



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

博士學位論文

# 확률론적 모델을 이용한 다변성지반의 지반진동속도 추정식 개발

Development of Prediction Equation of Ground Vibration Velocity for  
Irregularly Layered Ground using Probabilistic Model

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

金 承 賢

2017年 8月

# 확률론적 모델을 이용한 다변성지반의 지반진동속도 추정식 개발

指導教授 李 東 昱

金 承 現

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2017年 6月

金承賢의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長 -----

委 員 -----

委 員 -----

委 員 -----

委 員 -----

濟州大學校 大學院

2017年 6月

Development of Prediction Equation of Ground Vibration Velocity  
for Irregularly Layered Ground using Probabilistic Model

Seung Hyun Kim

(Supervised by Professor Dong Wook Lee)

A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for  
the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering

2017. 6

This dissertation has been examined and approved by

Doctoral Committee

Professor Byung Gul Lee

Professor Sang Jin Kim

Professor Seong Hyun Ko

Doctor In Keun Jung

Professor Dong Wook Lee

*June. 2017*

DEPARTMENT OF CIVIL & OCEAN ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

## <제목 차례>

LIST OF TABLES .....	v
LIST OF FIGURES .....	xiv
ABSTRACT .....	xxvi
제1장 서론 .....	1
1.1 연구의 배경 및 목적 .....	1
1.2 연구의 내용 및 방법 .....	4
1.3 제주지역의 지반 특성 .....	6
1.3.1 지형 및 지질 .....	6
1.3.2 불규칙한 층상구조 지반 .....	7
제2장 이론적 배경 .....	14
2.1 발파이론 .....	14
2.1.1 지반진동 .....	14
2.1.2 발파진동 .....	18
2.1.3 지반진동속도의 예측 .....	23
2.2 확률론적 시뮬레이션 분석모델 .....	27
2.2.1 다중회귀분석에 의한 모델 알고리즘 .....	28
2.2.2 시뮬레이션 분석법의 기본 논리 .....	32
2.2.3 몬테칼로 시뮬레이션 .....	33
제3장 시험발파 자료의 수집 및 분석 .....	41
3.1 시험발파 자료의 수집 .....	41
3.2 사이트. 1 .....	42
3.2.1 지질 및 지반 특성 .....	42
3.2.2 시험발파 분석 .....	44
3.3 사이트. 2 .....	66
3.3.1 지질 및 지반 특성 .....	66
3.3.2 시험발파 분석 .....	67

3.4 사이트. 3 .....	100
3.4.1 지질 및 지반 특성 .....	100
3.4.2 시험발파 분석 .....	102
3.5 시험발파 데이터 종합 .....	118
3.5.1 지반진동속도 예측 .....	118
3.5.2 지반진동속도 분석 .....	120
3.6 시험발파 지반진동속도 추정식 비교 .....	131
3.6.1 PPV_SRSD의 발파진동상수 K와 감쇠지수 n .....	131
3.6.2 PVS_SRSD의 발파진동상수 K와 감쇠지수 n .....	134
3.6.3 PPV_CRSD의 발파진동상수 K와 감쇠지수 n .....	136
3.6.4 PVS_CRSD의 발파진동상수 K와 감쇠지수 n .....	139
3.7 기반암 종류에 따른 지반진동속도 비교 .....	142
3.7.1 PPV_SRSD의 발파진동상수 K와 감쇠지수 n .....	142
3.7.2 PPV_CRSD의 발파진동상수 K와 감쇠지수 n .....	147
제4장 지반 전단파 속도 및 주파수 산정 .....	150
4.1 지반 전단파 속도 분석 방법 .....	150
4.1.1 탄성파 시험법 .....	150
4.1.2 내진설계 적용 방법 .....	156
4.2 제주지역 지반의 전단파속도 분석 .....	160
4.2.1 전단파 속도와 N값의 상관관계 .....	161
4.2.2 전단파 속도와 심도의 상관관계 .....	166
4.3 지반 전단파속도 및 주파수 산정 .....	173
4.3.1 지반의 전단파속도 및 주파수 산정 예시 .....	173
4.3.2 시험발파 지반의 전단파속도 및 주파수 산정 결과 .....	175
제5장 지반진동속도의 확률론적 모델 알고리즘 구성 .....	183
5.1 데이터베이스 구축 및 변수 선정 .....	183
5.1.1 데이터베이스 구축 .....	183
5.1.2 변수 선정 .....	184
5.1.3 변수들의 기술 통계 .....	184
5.2 다중회귀 모델 구축 .....	187

5.2.1 입력선택(All Possible Selection) 회귀분석	188
5.2.2 후진제거(Backward Elimination) 회귀분석	190
5.3 변수들의 비선형 회귀분석	193
5.3.1 전단파속도( $V_s$ )	194
5.3.2 주파수( $f$ )	195
5.3.3 천공장(Dilling length)	196
5.3.4 저항선(Burden)	197
5.3.5 공간격(Spacing)	198
5.3.6 Decoupling Index(D.I)	199
5.3.7 지발당 장약량(Weight)	200
5.3.8 거리(Distance)	201
5.3.9 자승근환산거리(SRSD)	202
5.4 데이터 마이닝 후 다중회귀분석	203
5.4.1 변수들의 기술 통계량	203
5.4.2 변수들의 상관관계	203
5.4.3 변수들의 산점도	204
5.5 데이터 마이닝 후 회귀 모델 구축	205
5.6 확률론적 시뮬레이션 모델의 구축	213
5.6.1 입력변수의 선정 및 모델 알고리즘	213
5.6.2 입력변수의 분포형태 결정	214
제6장 지반진동속도 추정식 모델 검증	218
6.1 모델 검증을 위한 시험발파	218
6.1.1 사이트. 4	218
6.1.2 시험발파 (Site. 4)	219
6.2 회귀 모델 검증	229
6.2.1 회귀 모델에 의한 지반진동속도 추정식	229
6.2.2 시험발파와 회귀 모델의 지반진동속도 추정식 비교	231
6.3 확률론적 모델 검증	235
6.3.1 몬테칼로 시뮬레이션 실행	235
6.3.2 몬테칼로 시뮬레이션에 의한 지반진동속도 추정식	242
6.3.3 시험발파와 확률론적 모델의 지반진동속도 추정식 비교	243

6.4 지반진동속도 추정 모델 적합 검증 .....	247
6.4.1 신뢰도 50%의 지반진동속도 추정 모델 비교 .....	247
6.4.2 신뢰도 95%의 지반진동속도 추정 모델 비교 .....	253
6.5 지반진동속도 추정 모델들의 민감도 분석 .....	259
6.5.1 시험발파 No. 1 .....	259
6.5.2 시험발파 No. 2 .....	262
6.5.3 시험발파 No. 3 .....	266
6.5.4 시험발파 No. 4 .....	269
6.5.5 시험발파 No. 5 .....	273
6.5.6 시험발파 No. 6 .....	276
6.5.7 시험발파 No. 7 .....	280
6.5.8 시험발파 No. 8 .....	283
6.5.9 시험발파 No. 9 .....	287
6.5.10 민감도 분석 결과 .....	291
제7장 결 론 .....	293
REFERENCES .....	296

## <LIST OF TABLES>

Table 1.1 XRF Results of Clinker .....	12
Table 2.1 Classification of Elastic Wave (Jang, 2014) .....	16
Table 2.2 Comparison of Ground Vibration and Earthquake (Ryu, 2014) .....	21
Table 2.3 Parameters which Influence Ground Motion (Ryu, 2014) .....	22
Table 2.4 Types of Probability Distributions (Lee, 2007) .....	36
Table 3.1 Obtained Blasting Data .....	42
Table 3.2 Experimental Conditions of Test Blast No.1, 2, 3 .....	45
Table 3.3 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity (PPV) and Peak Vector Sum (PVS) (Test Blast No.1) .....	47
Table 3.4 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.1) .....	50
Table 3.5 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.1) .....	51
Table 3.6 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity (PPV) and Peak Vector Sum (PVS) (Test Blast No.2) .....	53
Table 3.7 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.2) .....	57
Table 3.8 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.2) .....	57
Table 3.9 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity (PPV) and Peak Vector Sum (PVS) (Test Blast No.3) .....	60
Table 3.10 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.3) .....	63
Table 3.11 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.3) .....	64
Table 3.12 Experimental Condition of Test Blast No.4 .....	68
Table 3.13 Experimental Condition of Test Blast No.5 .....	70
Table 3.14 Experimental Condition of Test Blast No.6 .....	71
Table 3.15 Experimental Condition of Test Blast No.7 .....	73

Table 3.16 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity (PPV) and Peak Vector Sum (PVS) (Test Blast No.4) .....	75
Table 3.17 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.4) .....	78
Table 3.18 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.4) .....	79
Table 3.19 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity (PPV) and Peak Vector Sum (PVS) (Test Blast No.5) .....	81
Table 3.20 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.5) .....	85
Table 3.21 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.5) .....	85
Table 3.22 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity (PPV) and Peak Vector Sum (PVS) (Test Blast No.6) .....	88
Table 3.23 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.6) .....	91
Table 3.24 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.6) .....	92
Table 3.25 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity (PPV) and Peak Vector Sum (PVS) (Test Blast No.7) .....	94
Table 3.26 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.7) .....	98
Table 3.27 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.7) .....	98
Table 3.28 Experimental Condition of Test Blast No.8 .....	102
Table 3.29 Experimental Condition of Test Blast No.9 .....	104
Table 3.30 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity (PPV) and Peak Vector Sum (PVS) (Test Blast No.8) .....	105
Table 3.31 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.8) .....	109
Table 3.32 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.8) .....	109

Table 3.33 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity (PPV) and Peak Vector Sum (PVS) (Test Blast No.9) .....	112
Table 3.34 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.9) .....	115
Table 3.35 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.9) .....	116
Table 3.36 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity (PPV) and Peak Vector Sum (PVS) (Test Blast No. All) .....	119
Table 3.37 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No. All) .....	124
Table 3.38 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No. All) .....	124
Table 3.39 The Influence of Charge per Delay on the Predicted Ground Vibration Velocity for SRSD (Test Blast No. All) .....	126
Table 3.40 The Influence of Charge per Delay on the Predicted Ground Vibration Velocity for CRSD (Test Blast No. All) .....	126
Table 3.41 Separation Distance for Standard Blasting Method (Test Blast No. All) .....	129
Table 3.42 A Chart for Charge per Delay according to Distance (Test Blast No. All) .....	129
Table 3.43 Statistics of Basic of Frequency (Test Blast No. All) .....	130
Table 3.44 Comparison of Blasting Vibration Constant K and Attenuation Index n by PPV_SRSD .....	132
Table 3.45 Comparison of Blasting Vibration Constant K and Attenuation Index n by PVS_SRSD .....	135
Table 3.46 Comparison of Blasting Vibration Constant K and Attenuation Index n by PPV_CRSD .....	137
Table 3.47 Comparison of Blasting Vibration Constant K and Attenuation Index n by PVS_CRSD .....	140
Table 3.48 Comparison of Blasting Vibration Constant K and Attenuation Index n by Bedrock .....	144
Table 3.51 Comparison of Blasting Vibration Constant K and Attenuation	

Index n by Bedrock .....	148
Table 4.1 Borehole Investigation Method (Jeong et al., 2009) .....	151
Table 4.2 Characteristic of Ground Type (KGS, 2012) .....	157
Table 4.3 Earthquake Factor $C_a$ .....	158
Table 4.4 Earthquake Factor $C_v$ .....	158
Table 4.5 Regression Analysis Result of N value and Shear Wave Velocity .....	164
Table 4.6 Regression Analysis Result of N value and Shear Wave Velocity of Gravel and Clinker .....	165
Table 4.7 Regression Analysis Result of N value and Shear Wave Velocity of Weathered Rock and Clinker .....	166
Table 4.8 Shear Wave Velocity according to Ground .....	170
Table 4.9 Dynamic Shear Elastic Modulus according to Area .....	170
Table 4.10 Shear Wave Velocities according to Ground in Jeju .....	173
Table 4.11 Example for Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Borehole .....	174
Table 4.12 Example for Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of measuring instrument .....	175
Table 4.13 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Borehole (BT No. 1, 2, 3) .....	176
Table 4.14 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Measuring Instrument (BT No. 1, 2, 3) .....	176
Table 4.15 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Borehole (BT No. 4) .....	177
Table 4.16 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Measuring Instrument (BT No. 4) .....	178
Table 4.17 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Borehole (BT No. 5) .....	178
Table 4.18 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Measuring Instrument (BT No. 5) .....	178
Table 4.19 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of	

Borehole (BT No. 6) .....	179
Table 4.20 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Measuring Instrument (BT No. 6) .....	179
Table 4.21 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Borehole (BT No. 7) .....	180
Table 4.22 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Measuring Instrument (BT No. 7) .....	180
Table 4.23 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Borehole (BT No. 8) .....	181
Table 4.24 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Measuring Instrument (BT No. 8) .....	181
Table 4.25 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Borehole (BT No. 9) .....	182
Table 4.26 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Measuring Instrument (BT No. 9) .....	182
Table 5.1 Construction of data for regression analysis .....	183
Table 5.2 Prediction variables of ground vibration velocity .....	184
Table 5.3 Descriptive statistics of variables .....	185
Table 5.4 Pearson correlation of variables .....	186
Table 5.5 First Result of Multiple Regression by Input Selection .....	189
Table 5.6 Second Result of Multiple Regression by Input Selection .....	190
Table 5.7 First Result of Multiple Regression by Backward Elimination .....	191
Table 5.8 Second Result of Multiple Regression by Backward Elimination · .....	192
Table 5.9 Non-linear functions .....	193
Table 5.10 Model and Parameter Estimation of Shear Wave Velocity on PPV .....	194
Table 5.11 Model and Parameter Estimation of Frequency on PPV .....	195
Table 5.12 Model and Parameter Estimation of Drilling Length on PPV .....	196
Table 5.13 Model and Parameter Estimation of Burden on PPV .....	197
Table 5.14 Model and Parameter Estimation of Spacing on PPV .....	198
Table 5.15 Model and Parameter Estimation of Decoupling Index on PPV · .....	

.....	199
Table 5.16 Model and Parameter Estimation of Charge per Delay on PPV .....	200
Table 5.17 Model and Parameter Estimation of Distance on PPV .....	201
Table 5.18 Model and Parameter Estimation of SRSD on PPV .....	202
Table 5.19 Descriptive Statistics Quantity of Variables .....	203
Table 5.20 Pearson Correlation of Each Variables after Data Mining .....	204
Table 5.21 Multiple Regression Analysis Result of All Possible Selection after Data Mining .....	207
Table 5.22 Probability Distribution of Square Root Scale Distance (SRSD_1) .....	215
Table 5.23 Probability Distribution of Charge per Delay (Weidht_1) .....	215
Table 5.24 Probability Distribution of Dilling length (Dilling length_1) .....	216
Table 5.25 Probability Distribution of Shear Wave (Velocity_1) .....	216
Table 6.1 Experimental Conditions .....	221
Table 6.2 Order of Test Blasting .....	222
Table 6.3 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity (PPV) and Peak Vector Sum (PVS) (For verification) .....	223
Table 6.4 The Influence of Charge per Delay on the PPV (For verification) .....	227
Table 6.5 The Influence of Charge per Delay on the PVS (For verification) .....	227
Table 6.6 Variables of Regression Model .....	229
Table 6.7 Transformation Value after Data Mining .....	230
Table 6.8 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity (PPV) by Regression Model .....	231
Table 6.9 Prediction Equation of Guide Line, Test Blasting, and Ground Vibration by Regression Model .....	232
Table 6.10 The Influence of Charge per Delay (Regression Model) .....	234
Table 6.11 Analysis of Percentiles of PPV .....	237
Table 6.12 Analyzed Simulation Result by User-defined Distribution .....	238
Table 6.13 Simulation Result by Uniform Distribution .....	240

Table 6.14 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity (PPV) by Simulation Model .....	243
Table 6.15 Prediction Equation of Guide Line, Test Blasting, and Simulation .....	244
Table 6.16 The Influence of Charge per Delay (Simulation Model) .....	246
Table 6.17 Comparing Prediction Equations of Ground Vibration Velocity (Reliability 50%) .....	248
Table 6.18 Ground Vibration Velocity and Change Rate of Prediction Equations (Reliability 50%) .....	249
Table 6.19 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (Reliability 50%) .....	251
Table 6.20 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (Reliability 50%) .....	252
Table 6.21 A Chart for Charge per Delay by Prediction Equations according to Distance (Reliability 50%) .....	252
Table 6.22 Comparing Prediction Equations of Ground Vibration Velocity (Reliability 95%) .....	253
Table 6.23 Change Rate and Ground Vibration Velocity of Prediction Equation (Reliability 95%) .....	254
Table 6.24 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (Reliability 95%) .....	257
Table 6.25 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (Reliability 95%) .....	257
Table 6.26 A Chart for Charge per Delay by Prediction Equations according to Distance (Reliability 95%) .....	258
Table 6.27 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 1)	260
Table 6.28 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 1) .....	260
Table 6.29 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (TB. 1) .....	262
Table 6.30 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 1) .....	262

Table 6.31 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 2)	263
Table 6.32 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 2)	264
Table 6.33 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (TB. 2)	265
Table 6.34 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 2)	266
Table 6.35 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 3)	266
Table 6.36 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 3)	267
Table 6.37 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (TB. 3)	269
Table 6.38 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 3)	269
Table 6.39 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 4)	270
Table 6.40 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 4)	271
Table 6.41 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (TB. 4)	272
Table 6.42 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 4)	273
Table 6.43 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 5)	273
Table 6.44 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 5)	274
Table 6.45 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (TB. 5)	276
Table 6.46 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 5)	276
Table 6.47 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 6)	277
Table 6.48 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 6)	278
Table 6.49 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction	

Equations (TB. 6) .....	279
Table 6.50 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 6) .....	280
Table 6.51 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 7)	280
Table 6.52 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 7) .....	281
Table 6.53 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (TB. 7) .....	283
Table 6.54 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 7) .....	283
Table 6.55 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 8)	284
Table 6.56 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 8) .....	285
Table 6.57 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (TB. 8) .....	286
Table 6.58 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 8) .....	287
Table 6.59 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 9)	287
Table 6.60 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 9) .....	288
Table 6.61 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (TB. 9) .....	290
Table 6.62 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 9) .....	290

## <LIST OF FIGURES>

Fig. 1.1 Research Concept .....	5
Fig. 1.2 Irregularly Layered Ground in Jeju .....	8
Fig. 1.3 FE-SEM Observations .....	9
Fig. 1.4 Comparison of Clinker layers shape and color .....	11
Fig. 1.5 Comparison of Clinker Particle Size .....	11
Fig. 2.1 Transformation of Displacement, Velocity and Acceleration in Sine Vibration .....	15
Fig. 2.2 Wave Propagation and Particle Motion (Kang, 2014) .....	18
Fig. 2.3 Vertical Displacement Component of P wave, S wave and Rayleigh wave in a Short Duration Period .....	18
Fig. 2.4 Schematic of the Fracturing and Deformation Around an Explosion in Rock (Dupont, 1980) .....	19
Fig. 2.5 Measuring Direction of Ground Vibration .....	20
Fig. 2.6 Concept of Probabilistic Analysis (Lee, 2007) .....	27
Fig. 2.7 Basic Concept of Simulation Method (Lee, 2007) .....	32
Fig. 2.8 Validation Criteria (Lee, 2007) .....	35
Fig. 3.1 Location of Obtained Test Blast .....	41
Fig. 3.2 Geologic Map of Site. 1 .....	43
Fig. 3.3 Classification of the Basalt according to TAS Diagram (Site. 1)	43
Fig. 3.4 Clinkers N-value by the SPT (Site. 1) .....	44
Fig. 3.5 Geological Profile(A-A') and Composition of Test Blast No.1, 2, 3 .....	46
Fig. 3.6 Relationship between Distance and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.1) .....	47
Fig. 3.7 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.1) .....	48
Fig. 3.8 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.1) .....	48
Fig. 3.9 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity	

(Test Blast No.1) .....	48
Fig. 3.10 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.1) .....	51
Fig. 3.11 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.1) .....	52
Fig. 3.12 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.1) .....	52
Fig. 3.13 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.1) .....	52
Fig. 3.14 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.1) .....	52
Fig. 3.15 Frequency Distribution (Test Blast No.1) .....	52
Fig. 3.16 Relationship between Distances and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.2) .....	54
Fig. 3.17 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.2) .....	54
Fig. 3.18 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.2) .....	54
Fig. 3.19 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No.2) .....	55
Fig. 3.20 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.2) .....	58
Fig. 3.21 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.2) .....	58
Fig. 3.22 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.2) .....	58
Fig. 3.23 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.2) .....	58
Fig. 3.24 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.2) .....	59
Fig. 3.25 Frequency distribution (Test Blast No.2) .....	59
Fig. 3.26 Relationship between Distances and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.3) .....	60
Fig. 3.27 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and	

PVS (Test Blast No.3) .....	61
Fig. 3.28 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.3) .....	61
Fig. 3.29 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No.3) .....	61
Fig. 3.30 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.3) .....	64
Fig. 3.31 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.3) .....	65
Fig. 3.32 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.3) .....	65
Fig. 3.33 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.3) .....	65
Fig. 3.34 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.3) .....	65
Fig. 3.35 Frequency distribution (Test Blast No.3) .....	65
Fig. 3.36 Geologic Map of Site. 2 .....	67
Fig. 3.37 Classification of the Basalt according to TAS Diagram (Site. 2)	67
Fig. 3.38 Geological Profile(B-B') and Composition of Test Blast No.4	69
Fig. 3.39 Geological Profile(C-C') and Composition of Test Blast No.5	70
Fig. 3.40 Geological Profile(D-D') and Composition of Test Blast No.6	72
Fig. 3.41 Geological Profile(E-E') and Composition of Test Blast No.7	74
Fig. 3.42 Relationship between Distances and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.4) .....	75
Fig. 3.43 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.4) .....	76
Fig. 3.44 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.4) .....	76
Fig. 3.45 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No.4) .....	76
Fig. 3.46 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.4) .....	79
Fig. 3.47 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge	

per Delay (Test Blast No.4) .....	80
Fig. 3.48 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.4) .....	80
Fig. 3.49 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.4) .....	80
Fig. 3.50 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.4) .....	80
Fig. 3.51 Frequency Distribution (Test Blast No.4) .....	80
Fig. 3.52 Relationship between Distances and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.5) .....	82
Fig. 3.53 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.5) .....	82
Fig. 3.54 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.5) .....	82
Fig. 3.55 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No.5) .....	83
Fig. 3.56 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.5) .....	86
Fig. 3.57 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.5) .....	86
Fig. 3.58 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.5) .....	86
Fig. 3.59 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.5) .....	86
Fig. 3.60 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.5) .....	87
Fig. 3.61 Frequency distribution (Test Blast No.5) .....	87
Fig. 3.62 Relationship between Distances and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.6) .....	88
Fig. 3.63 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.6) .....	88
Fig. 3.64 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.6) .....	89
Fig. 3.65 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity	

(Test Blast No.6) .....	89
Fig. 3.66 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.6) .....	92
Fig. 3.67 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.6) .....	93
Fig. 3.68 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.6) .....	93
Fig. 3.69 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.6) .....	93
Fig. 3.70 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.6) .....	93
Fig. 3.71 Frequency distribution (Test Blast No.6) .....	93
Fig. 3.72 Relationship between Distances and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.7) .....	95
Fig. 3.73 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.7) .....	95
Fig. 3.74 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.7) .....	95
Fig. 3.75 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No.7) .....	96
Fig. 3.76 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.7) .....	99
Fig. 3.77 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.7) .....	99
Fig. 3.78 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.7) .....	99
Fig. 3.79 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.7) .....	99
Fig. 3.80 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.7) .....	100
Fig. 3.81 Frequency Distribution (Test Blast No.7) .....	100
Fig. 3.82 Geologic Map of Site. 3 .....	101
Fig. 3.83 Classification of the Basalt according to TAS Diagram (Site. 3) .. .....	101

Fig. 3.84 Geological Profile(F-F') and Composition of Test Blast No.8	103
Fig. 3.85 Geological Profile(G-G') and Composition of Test Blast No.9	104
Fig. 3.86 Relationship between Distances and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.8)	106
Fig. 3.87 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.8)	106
Fig. 3.88 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.8)	106
Fig. 3.89 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No.8)	107
Fig. 3.90 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.8)	110
Fig. 3.91 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.8)	110
Fig. 3.92 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.8)	110
Fig. 3.93 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.8)	110
Fig. 3.94 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.8)	111
Fig. 3.95 Frequency Distribution (Test Blast No.8)	111
Fig. 3.96 Relationship between Distances and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.9)	112
Fig. 3.97 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.9)	113
Fig. 3.98 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.9)	113
Fig. 3.99 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No.9)	113
Fig. 3.100 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.9)	116
Fig. 3.101 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.9)	117

Fig. 3.102 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.9) .....	117
Fig. 3.103 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.9) .....	117
Fig. 3.104 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.9) .....	117
Fig. 3.105 Frequency Distribution (Test Blast No.9) .....	117
Fig. 3.106 Relationship between Distance and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.All) .....	118
Fig. 3.107 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.All) .....	119
Fig. 3.108 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.All) .....	120
Fig. 3.109 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No. All) .....	120
Fig. 3.110 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No. All) .....	125
Fig. 3.111 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No. All) .....	125
Fig. 3.112 Relationship between Predicted Ground Vibration Velocity (Component) and Distance by Charge per Delay (Test Blast No. All) ..	127
Fig. 3.113 Relationship between Ratio of Increase(Component) and Distance by Charge per Delay (Test Blast No. All) .....	127
Fig. 3.114 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No. All) .....	128
Fig. 3.115 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No. All) .....	128
Fig. 3.116 Frequency distribution (Test Blast No. All) .....	130
Fig. 3.117 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (PPV_SRSD) .....	133
Fig. 3.118 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (PPV_SRSD) .....	133
Fig. 3.119 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to	

Distance (PVS_SRSD) .....	135
Fig. 3.120 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (PVS_SRSD) .....	136
Fig. 3.121 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (PPV_CRSD) .....	138
Fig. 3.122 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (PPV_CRSD) .....	138
Fig. 3.123 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (PVS_CRSD) .....	140
Fig. 3.124 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (PVS_CRSD) .....	141
Fig. 3.125 Comparison of Ground Vibration Velocity according to scaled Distance on Ground with diverse Bed Rock (PPV_SRSD) .....	145
Fig. 3.126 Comparison of allowable Charge per Delay according to scaled Distance on Ground with diverse bed rock (PPV_SRSD) .....	145
Fig. 3.127 Comparison of Ground Vibration Velocity according to scaled Distance on Ground with diverse bed rock (PPV_CRSD) .....	148
Fig. 3.128 Comparison of allowable Charge per Delay according to scaled Distance on Ground with diverse bed rock (PPV_CRSD) .....	149
Fig. 4.1 Diagram of Testing (Crice, 2002) .....	153
Fig. 4.2 Obtained Time Domain Signal according to Depth (Jeong et al., 2009) .....	154
Fig. 4.3 Obtained Travel Time Information (Jeong et al., 2009) .....	155
Fig. 4.4 Comparison of Velocity Deduction Method according to Distance (Jeong et al., 2009) .....	155
Fig. 4.5 Modified Decision Process of Travel Time (Jeong et al., 2009) ·	156
Fig. 4.6 Testing location map .....	160
Fig. 4.7 Relationship between N value of Clinker and Shear Wave Velocity .....	161
Fig. 4.8 Relationship between N value and Shear Wave Velocity of Sedimentary Layer .....	162
Fig. 4.9 Shear Wave Velocity of burried layer according to N value ···	163

Fig. 4.10 Relationship between N Value and Shear Wave Velocity of silty gravel .....	163
Fig. 4.11 Relationship between N Value and Shear Wave Velocity for Stratums in Jeju .....	164
Fig. 4.12 Comparison of Shear Wave Velocity of Gravel and Clinker according to N Value .....	165
Fig. 4.13 Comparison of Shear Wave Velocity of Weathered Rock and Clinker according to N Value .....	166
Fig. 4.14 Shear Wave Velocity according to Depth of Ground .....	168
Fig. 4.15 Elastic Test Result of Jeju .....	171
Fig. 4.16 Elastic Test Result of Other Interior Areas .....	172
Fig. 4.17 Example for Estimate of Shear Wave Velocity and Frequency of Ground .....	174
Fig. 5.1 Scatter Plot of Variables of Subject of Analysis .....	187
Fig. 5.2 Data Mining of $V_s$ .....	194
Fig. 5.3 Data Mining of $f$ .....	195
Fig. 5.4 Data Mining of Dilling length .....	196
Fig. 5.5 Data Mining of Burden .....	197
Fig. 5.6 Data Mining of Spacing .....	198
Fig. 5.7 Data Mining of Decoupling Index .....	199
Fig. 5.8 Data Mining of Charge per delay .....	200
Fig. 5.9 Data Mining of Distance .....	201
Fig. 5.10 Data Mining of SRSD .....	202
Fig. 5.11 Scatter Plot of Variables of Subject of Analysis .....	205
Fig. 6.1 Test Blasting Location for Model Verification .....	218
Fig. 6.2 Geologic Map of Site. 4 .....	220
Fig. 6.3 Classification of the Basalt according to TAS Diagram (Site. 4)220	
Fig. 6.4 Relationship between Distance and Velocities (PPV & PVS) (For verification) .....	224
Fig. 6.5 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (For verification) .....	224
Fig. 6.6 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and	

PVS (For verification) .....	224
Fig. 6.7 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (For verification) .....	225
Fig. 6.8 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (For verification) .....	228
Fig. 6.9 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (For verification) .....	228
Fig. 6.10 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (For verification) .....	228
Fig. 6.11 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (For verification) .....	228
Fig. 6.12 Analysis of Vibrations Frequency (For verification) .....	229
Fig. 6.13 Frequency Distribution (For verification) .....	229
Fig. 6.14 Prediction Equation of Ground Vibration Velocity by Regression Model .....	231
Fig. 6.15 Comparing Prediction Equations on Ground Vibration Velocities of Regression Model, Guide Line, and Test Blasting .....	232
Fig. 6.16 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay .....	234
Fig. 6.17 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay .....	234
Fig. 6.18 Example for Simulation Result of SRSD (5.593, Value of SRSD_1) .....	236
Fig. 6.19 Sensitivity Analysis by User-defined Distribution .....	238
Fig. 6.20 Simulation Result by User-defined Distribution .....	239
Fig. 6.21 Simulation Result by Uniform Distribution .....	241
Fig. 6.22 Sensitivity Analysis by Uniform Distribution .....	242
Fig. 6.23 Prediction Equation of Ground Vibration by Simulation Model	243
Fig. 6.24 Comparison of Prediction Equation of Guide Line, Test Blasting, and Simulation .....	245
Fig. 6.25 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Simulation Model) .....	247

Fig. 6.26 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Simulation Model) .....	247
Fig. 6.27 Ground Vibration Velocity according to SRSD (Reliability 50%) .....	248
Fig. 6.28 Comparing Charge per Delay of Prediction Models (Reliability 50%) .....	250
Fig. 6.29 Ground Vibration Velocity according to SRSD (Reliability 95%) .....	254
Fig. 6.30 Comparing Delay per Charge of Prediction Models (Reliability 95%) .....	256
Fig. 6.31 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 1) .....	261
Fig. 6.32 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 1) .....	261
Fig. 6.33 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 2) .....	264
Fig. 6.34 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 2) .....	265
Fig. 6.35 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 3) .....	267
Fig. 6.36 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 3) .....	268
Fig. 6.37 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 4) .....	271
Fig. 6.38 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 4) .....	272
Fig. 6.39 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 5) .....	274
Fig. 6.40 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 5) .....	275
Fig. 6.41 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 6) .....	278

Fig. 6.42 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 6)	279
Fig. 6.43 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 7)	281
Fig. 6.44 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 7)	282
Fig. 6.45 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 8)	285
Fig. 6.46 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 8)	286
Fig. 6.47 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 9)	289
Fig. 6.48 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 9)	290
Fig. 6.49 Sensitivity Analysis Result (Reliability 50%)	291
Fig. 6.50 Sensitivity Analysis Result (Reliability 95%)	292

## ABSTRACT

This study suggests three models for the prediction of ground vibration velocity in the irregularly layered ground of Jeju area: a regression model, a probabilistic model, and a case based model.

The ground vibration from blasting in Jeju area is attenuated less and spread farther than in inland due to irregular layers composed of basalt and clinker layers, which have large pores. In other words, the medium characteristics of Jeju for the ground vibration differ from those of inland. However, the identical prediction equation both for Jeju and inland is used for the ground vibration velocity at a planning stage. Thus, the ground vibration velocity of the prediction equation is different from that of actual blasting.

Therefore, it is necessary to develop an equation for the prediction of ground velocity considering the ground vibration characteristics of Jeju area. First, a regression model is constructed by using the data mining technique with the independent variables of ground shear wave velocity, drilling length, charge per delay, and scaled distance. Then, a probabilistic model corresponding to the regression model is established with the Monte Carlo simulation method.

In order to verify their applicabilities, the ground vibration velocities from the models are compared with those from test blasting. In addition, a sensitivity analysis on blasting conditions is performed for the individual test blasting. The applicable range of blasting conditions for the models is suggested from the sensitivity analysis.

# 제1장 서론

## 1.1 연구의 배경 및 목적

발파는 발파진동, 발파소음, 파쇄암의 비산 등과 같은 공해를 필연적으로 수반하는 작업이지만 이는 또한, 많은 연구자들의 연구대상이 되어 발파메커니즘 및 컴퓨터 모델링 기술, 화약류 성능에 대한 평가기술, 계측기술 분야 등에 기술적 성장을 가져오고 있다(Kim and Lee, 2016).

최근 제주지역에서는 국제자유도시 조성을 위한 정책적 지원에 힘입어 급격한 인구의 증가와 대형 자본이 유입되고 있어 종래에 없던 대규모 개발 사업이 그 어느 때보다 활발하지만, 제주지역의 지반에 대한 기술적 연구 및 검토가 매우 부족한 실정이다. 특히 대규모 건설공사에서 필연적으로 수반되는 토공사 시 경제성과 효율성을 동시에 만족시키기 위한 발파가 계획되고 실시되었지만, 제주지역의 다변성 지반특성 즉, 수직 차례에 걸친 화산분출에 의해 현무암층과 화산쇄설층인 클링커층 또는 스코리아층이 불규칙하게 반복되는 층서적으로 불량한 층상구조에서 발파진동특성에 대한 충분한 검토가 이루어지지 않은 채, 진동매질 특성인 지반조건이 전혀 다름에도 불구하고 내륙지역의 지반진동속도 추정식을 그대로 계획 단계에서 반영해 사용하는 문제로 인해 발파실무자들의 지반진동 해석 및 평가에 어려움을 겪고 있다.

발파와 관련하여 지반진동의 대표적인 특성인 진폭특성과 주파수특성(Persson et al., 1994)을 결정하는 요소에는 크게 두 가지가 있다(ISEE, 1998). 첫 번째는 폭발특성으로서 이는 지반진동을 일으키는 요인에 해당하는 소스(source)와 관련된 성질을 말한다. 두 번째는 암반특성으로서 이는 폭발이 일으킨 지반진동을 전달하는 매질, 즉 암반과 관련된 성질을 말한다. 폭발의 특성을 결정짓는 중요한 요소로는 폭약의 종류, 장약의 위치, 지발시간 및 순서 등이 있다. 암반의 특성을 결정짓

는 중요한 요소로는 암반의 종류 및 상태, 전파경로 상의 불연속면의 상태 및 조건 등이 있다. 이와 같이 지반진동의 특성은 폭원과 암반, 즉 소스와 매질이라는 두 가지 요소의 특성에 의해 결정되며, 어느 한 가지에 의해 결정되는 성질이 아니다 (Choi and Ryu, 2012).

지반진동의 전파 특성을 결정짓는 인자는 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있다. 입지조건은 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특징 및 역학적 성질 등을 예로 들 수 있다. 발파조건은 사용하는 폭약의 종류, 지발당 장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면의 수, 발파유형, 폭원과 측정간의 거리 등을 말한다.

폭원의 특성을 결정짓는 발파조건들은 인위적으로 제어가 가능한 범주로 기술자의 역량에 의해 발파패턴을 응용함으로써 조절이 가능하지만, 발파 시 암반의 특성을 결정짓는 요인들은 제어가 불가능한 범주로 실제 시험발파에 의한 발파 진동 특성을 파악하기 전에는 예단하기 어렵다.

제주지역의 다변성 지반에서 발파진동과 관련된 연구에서 Yang et al.,(2011)은 클링커층과 다공질 현무암의 불규칙적인 분포 특성으로 인해 발파 효율이 낮아 공사에 지장을 주고 있으며, 시험발파 결과 효과적인 발파를 위한 비장약량은  $0.40\text{kg}/\text{m}^3 \sim 0.45\text{kg}/\text{m}^3$  정도로 판단하였다. 그리고 발파로 인해 생긴 진동을 멀리 전파하고 감쇠가 줄어드는 특성을 파악하였다. Kim and Lee(2016)는 생성기원에 의해 현무암층과 클링커층이 불규칙하게 반복되는 층상구조인 다변성 지반에 대해 설명하고, 시험발파 결과를 국내 설계지침(MOCT, 2006)과 비교하여 평가하였다.

또한, 지반진동의 전파특성에 관한 연구로는 Ahn and Park(1999)은 대구 규장암 지역에서 지반 진동을 측정하여 입지상수  $K$ ,  $n$ 의 변화에 대해 분석한 결과 입지상수  $K$ ,  $n$ 의 차이는 풍화 및 절리가 발달하고 강도가 비교적 약한 상부암층에서 풍화 및 절리가 약하고 강도가 강한 하부 암반으로 발파 진동이 전파되면서 나타나는 감쇠현상으로 분석하였다. Ahn(2000)은 영남지역 일대의 주요암반을 대상으

로 지반진동, 소음, 비산먼지 등의 측정 자료를 바탕으로 굴진 깊이에 따른 암질의 변화가 지반진동상수 및 감쇠지수에 미치는 영향을 검토하였다. Park et al.(2009)는 경암층 지반에서 최소제곱회귀분석을 이용해 검토된 직선에 확률이론을 도입하고 신뢰도에 따른 진동추정식을 도출해 각 성분별 신뢰도를 달리 제안하였다. Oh et al.(2004) 조립질 화강암 지반 문화재 주변에서 수집된 데이터를 연암과 보통암을 구분하여 발파진동추정식을 산정하고 문화재 허용진동속도가 0.2cm/sec를 적용해 안전 측의 자승근 환산거리와 삼승근 환산거리 적용 방안을 제시 하였다. Yang and Choi(2006)은 건설교통부 암발파 설계 잠정지침(2003)은 du Pont 사의 발파진동 추정식으로 95%의 신뢰구간이 아닌 평균 추정식이며, Dowding, Devine 및 국내 자료로 발표한 식들을 분석하였다. 그 결과 잠정지침의 기준식은 잘못 적용되어 전반적으로 최대 진동속도를 낮게 평가하고 있고 이에 의한 발파설계는 높은 진동을 유발할 가능성이 높은 것으로 예측하였고, 국내의 발파사례로부터 구한 추정식으로 교체되어야한다고 주장하였다.

이와 같이 지금까지 이루어진 연구들은 발파로 인한 지반진동의 복합적인 원인에 비해 단편적인 연구로 진행되거나, 적용 범위를 연구가 이루어진 해당 지역만으로 국한하고 있어 연구결과를 발파 설계 인자로 활용하는데 한계가 있다. 따라서 적용 범위를 확장할 수 있고 발파진동의 다양한 영향요인이 고려된 지반진동속도 추정식이 필요하다.

이에 본 연구에서는 지반진동의 전파매질이 불규칙하고 이질적인 층상구조를 가지고 있는 제주지역의 발파로 인한 지반진동속도 추정식을 개발하기 위해 시험발파 사례들을 검토하여 사례기반 모델을 제시하고, 입지상수(K, n)에 대한 영향요인들을 분석하여 제어 가능한 변수와 제어 불가능한 변수를 선정한 후 회귀 모델과 몬테칼로 시뮬레이션 기반의 확률론적 모델을 이용해 다변성지반에서의 지반진동속도 추정식을 제시하고자 하였다.

## 1.2 연구의 내용 및 방법

### 1) 제주지역의 시험발파 사례들로부터 사례기반 모델 제시

제주지역에서 실시된 9회 61번의 시험발파로부터 획득한 데이터를 이용하여 Peak Particle Velocity(PPV), Peak Vector Sum(PVS), 발파진동의 세 가지 성분인 진행성분(Longitudinal)과 수직성분(Vertical) 그리고 접선성분(Transverse)의 진동속도를 환산거리(SD) 방식에 따라 분석하였다. 지발당 허용장약량에 대한 지반진동속도 영향을 검토하고 각 속도성분의 진동주파수 특성을 파악하고 시험발파지역의 지반조사보고서로부터 폭원과 계측기의 지층단면을 분석하여 진동매질특성을 파악한다.

수집된 총 462개의 데이터를 활용한 지반진동속도 추정식을 본 연구에서는 제주지역의 시험발파 사례를 종합한 사례기반 모델로 제시한다.

### 2) 확률론적 모델을 구축하기 위한 변수 선정

발파로 인한 지반진동의 발파조건과 입지조건 중 제어 불가능한 입지조건에 영향을 검토하기 위해 일반적으로 단일 매질인 암을 대상으로 지질학적 특징과 역학적 상관관계를 분석한다. 지질학적 특징으로는 생성기원과 성인분류 및 지형 분석이 대표적이고, 역학적 특성으로는 공학적으로 이용하기 위한 다양한 물리·역학적 특성을 포함하는데 실험에 의한 방법을 제외하면 RMR, Q-system, RQD와 같은 암반 분류 조건에 따른 암질평가 기법을 이용하는 방법이 대표적이다.

하지만, 본 연구에서는 단일 매질이 아닌 이질 매질(현무암과 클링커)을 같이 고려해야하므로 이질 매질을 지반진동과 연계하여 설명할 수 있는 객관적인 지표가 필요하다. 이에 지반진동속도 추정을 위한 확률론적 모델의 변수를 지반의 전단파속도 그리고 지반 고유주기를 통해 얻을 수 있는 지반 고유주파수로 선택하였다.

제주지역에서 시행된 다운홀시험(Downhole seismic test) 결과를 분석하여 지층별(연암, 보통암, 클링커, 풍화암 등) 전단파속도를 구해 지반의 전단파속도와 고유주파수를 산출한다.

### 3) 지반진동속도 추정식의 확률론적 모델 알고리즘 구성

제어 불가능한 변수 전단파속도, 지반주파수와 제어 가능한 변수 천공장, 최소저항선, 공간격, D.I, 지발당 장약량, 폭원으로부터 거리, SRSD를 독립변수로하고 PPV를 종속변수로 한 다중회귀분석을 수행하여 회귀 모델을 구축한다.

회귀 모델 부적합 시 각 독립변수와 종속변수의 비선형 적합 분석을 실시하여 결정된 함수로 데이터 마이닝(Data mining) 수행하고 회귀 모델을 재구축한다.

### 4) 시뮬레이션 모델 실행

회귀 모델에 의한 알고리즘을 이용해 몬테칼로 시뮬레이션을 수행하기 위해 독립변수를 확률밀도함수(Probabilistic Density Function)로 분포적합을 실시하고 Anderson-Darling 통계량으로 검증한 후 시뮬레이션을 단계적으로 실행하여 확률론적 모델에 의한 지반진동속도 추정식을 개발한다.

### 5) 모델 검증

개발된 회귀 모델과 확률론적 모델의 지반진동속도 추정식에 대한 적합도를 검증하기 위해 시험발파를 실시하였다. 시험발파에 의한 지반진동속도와 동일한 조건에서 회귀 모델과 확률론적 모델의 지반진동속도를 비교하여 적합도를 분석한다.

그리고 연구를 통해 만들어진 모델들(회귀 모델, 확률론적 모델, 사례기반 모델)을 9개의 개별 시험발파 지반진동속도 추정식에 대해 민감도 분석을 실시하여 모델들의 적용 범위를 제시한다.

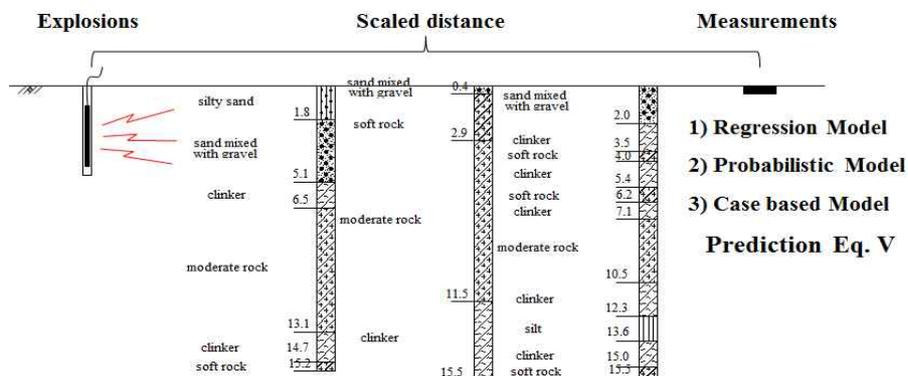


Fig. 1.1 Research Concept

### 1.3 제주지역의 지반 특성

본 절에서는 Kim and Lee(2016)의 연구 내용 중 제주지역의 지반 특성을 보완하여 재정리하고, 제주지역에서 발파로 인한 지반진동 영향을 검토하였다.

#### 1.3.1 지형 및 지질

제주도는 한반도 서남단에서 남쪽으로 약 90km 떨어져 있는 대륙붕 위의 화산섬으로 장축방향이 N70°E인 타원형이며, 동서 길이는 74km이고, 남북은 32km로 면적은 1,829km<sup>2</sup>이다. 중앙부에는 1,947m 높이의 한라산이 있고 화산 활동이 정지된 후 그 주변의 틈으로 분출 생성된 360여개의 기생화산(제주방언: 오름)이 한라산 주변에 분포해 있다. 한라산을 정점으로 동서사면은 5~9%의 완만한 경사이고, 남북사면은 9~12%의 약간 급한 사면으로 형성되어 전체적으로 순상화산에서 흔히 볼 수 있는 아스피테(Aspite)형이다(Kim, 2007).

해안의 총 길이는 약 420km이고 단조로우며 대부분 화산암이 노출되어 있다. 국지적으로 소규모 해빈(Pocket beach)과 해안사구(Coastal sand dune)가 있고 해안 주변에는 수성화산활동에 의한 응회구(Tuff cone) 및 응회환(Tuff ring)이 분포하며, 이들은 해수의 침식작용으로 독특한 해안 지형을 보인다.

제주도는 신생대 제3기말 ~ 제4기초까지 수십 회에 걸쳐 일어난 화산활동에 의해 초기에는 유동성이 작은 조면암의 분출로 종상화산이, 후기에는 유동성이 큰 현무암의 분출로 순상화산이나 용암대지가 만들어졌으며 형성시기가 비교적 젊고 개석(開析)의 정도가 얼마 되지 않아 화산원지형이 잘 보존되어 있다.

화산활동과정에서 고온의 용암이 화구에서 사면을 따라 흐르면서 식고 굳은 상태에 따라 파호이호이 용암(Pahoehoe Lava)과 아아 용암(Aa Lava)으로 나뉘어진다. 파호이호이 용암은 점성이 낮아 넓게 퍼지면서 반원형의 호를 만들거나 동심원상의 주름이 많은 형상을 하고 있으며, 아아용암은 점성이 높아 느리게 흐르면서

표면이 아주 거칠고 작은 기포가 밀집되어 있으며 요철이 많은 특징을 보인다.

제주지역의 암반은 화산활동에 의한 용암분출로 형성된 화산분출암과 화산폭발에 의해 형성된 화산쇄설암이 있으며, 용암과 용암사이에 퇴적암도 나타난다. 시추조사에 의하면 동부지역은 해수면 하부로 150m까지, 서부지역은 해수면 하부 50~70m까지 현무암이 차지하고 있고, 그 밑으로는 서귀포층과 미고결퇴적층(U층)이 더 깊은 곳에는 중생대 화강암과 용결응회암(Welded tuff)이 분포하고 있다.

화산분출암으로는 현무암, 조면현무암, 현무암질 조면안산암, 조면안산암, 그리고 조면암이 있다. 현무암류는 침상장석감람석현무암, 반상휘석현무암, 비현정질현무암, 장석현무암 등으로 나타나며 이들은 제주지역 전체면적의 90%이상을 점유하고 있다. 또한 지표의 토양은 고기층에서 풍화·침식·퇴적 작용에 의한 풍화토보다는 현무암에서 기원된 화산회토로 구성되어 있어 배수성이 좋다.

### 1.3.2 불규칙한 층상구조 지반

제주지역의 지반 특성은 내륙지반과는 다르게 화산활동으로 인한 화산쇄설물 등의 퇴적물들이 암층 사이에 분포하는 층상구조를 가지고 있다. 즉 화산이 분출되어 흐른 마그마에 의해 형성된 화산암층 위에 오랜 시간 동안 화산쇄설물 등 퇴적물이 쌓이고 그 뒤에 다시 화산이 분출되어 퇴적물 위에 화산암층이 형성된 경우로서 암반층과 암반층 사이에 퇴적층이 놓이게 되는 층상구조를 나타내고 있다(Koh, 1997).

이러한 퇴적층 즉, 화산쇄설층이 암반층과 암반층 사이에 불규칙하게 반복적으로 혼재돼 있어 다양한 형태의 층상구조를 이루고 있기 때문에 동일지역에서도 지층 변화에 대한 예측이 매우 어렵고, 지반 공학적 특성 또한 내륙부의 지반과는 달라 해석 시 주의가 요구된다.

제주지반에서 화산쇄설층을 이루고 있는 클링커(Clinker) 또는 스킨리아(Scoria)

의 층상구조는 수차례의 화산활동에 의한 결과이며, 제주지역의 층상구조에 의한 다변성 지반 특성을 파악하기 위해서는 클링커와 스킨리아의 특성 대한 이해가 필요하다. Fig. 1.2는 제주 서부지역에 위치한 석산의 절개지에서 육안으로 확인한 지반의 층상구조이며, 다층적 층상구조로 이루어진 제주지역의 다변성 지반 특성을 보여주고 있다. 종종 클링커층과 암반층의 경계면에 스킨리아층이 출현하기도 한다.



(a) Cutting Area A

(b) Cutting Area B

Fig. 1.2 Irregularly Layered Ground in Jeju

### 1.3.2.1 스킨리아(Scoria)

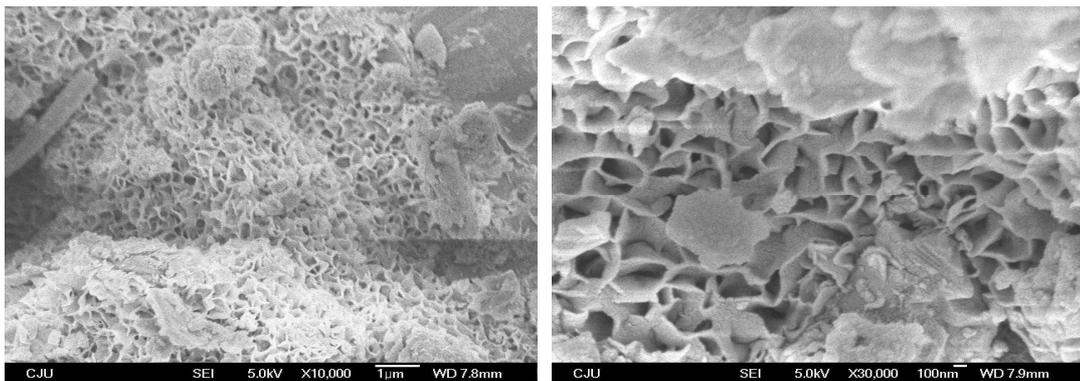
스킨리아(Scoria)는 화산이 폭발할 때 고체 상태로 분출되는 물질인 화산쇄설물의 일종으로 마그마가 대기 중으로 방출되어 그 속의 휘발성 성분이 빠져나가 많은 기공(氣孔)이 생긴 것으로 부석(浮石)보다 다소 무겁고, 염기성 또는 중성의 마그마에서 유래된다. 주성분은  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ 의 함량이 70% ~ 80%에 달하고 또한 쇄설물의 안식각이 커 30 ~ 40°의 지형을 이루는 것이 특징이며, 크기는 약 6cm 이하이다.

또한, 스킨리아(제주방언 : 송이)는 지역에 따라 조금씩 차이를 보이며, 색상에 따라 적갈색(Reddish-Brown), 황갈색(Yellow-Brown), 흑색(Black) 그리고 암회색(Dark-Grey)의 4가지로 크게 분류하며, 이들은 화학적 조성 and 공학적 특성에서 차

이를 보이고 있다. 내화도는 1120°C ~ 1210°C 이고, 흡수율은 17.7% ~ 32.5%로 높은 흡수율을 보이며, 마모율은 47.3% ~ 67.2%로 일반 자갈이나 모래에 비해 매우 높다. 단위중량은 0.65g/cm<sup>3</sup> ~ 0.75g/cm<sup>3</sup>의 범위이고, 스킨리아의 기공 내 수분 함유량에 기인하는 절대건조비중은 1.31 ~ 1.90의 범위를 보이며, 표면 건조 비중 1.85 ~ 2.45이다(Youn, 1995).

스킨리아의 표면을 장방출주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM)으로 비교적 배율을 높여 ×10,000, ×30,000로 촬영하고 관찰한 결과는 Fig. 1.3에서와 같이 표면이 매우 거칠며 날카롭고, 아주 조밀한 기공부터 비교적 넓은 기공까지 다량의 기공을 가지고 있다.

Nam et al.(2003)은 스킨리아에 대한 역학적 특성을 연구하여, 삼축압축시험을 통해 스킨리아의 내부마찰각은 26.8°~37.8° 사이이고, 탄성계수가 사질토에 비해 작고 파괴 시 변위가 많이 발생하는 것을 스킨리아의 역학적 특성으로 보았다. 그리고  $SiO_2$ 의 함량이 많을수록 내부마찰각이 커지고  $Al_2O_3$ 와  $Fe_2O_3$ 의 함량이 많을수록 내부마찰각이 작아지는 경향을 파악하였다.



(a) ×10,000 Magnification

(b) ×30,000 Magnification

Fig. 1.3 FE-SEM Observations

### 1.3.2.2 클링커(Clinker)

화산활동으로 분출된 용암이 서서히 식어 고결되면 암반을 형성하게 되는데, 차가운 공기 또는 지표면과 접하는 경계부에서는 용암이 급격하게 냉각되면서 파쇄된다. 이들 파쇄구간을 클링커(Clinker)라 한다. 따라서 클링커층은 대부분 암반층과 암반층 사이에서 출현한다. 일반적으로 암반층 하부에서는 다공질 표면에 공극이 큰 느슨한 지층으로 나타나 암반층에 비해 역학적 특성이 매우 불량한 상태이며, 암반이 오랜 시간 풍화되어 형성되는 풍화암과는 상이한 층이다. 파쇄가 심한 구간은 자갈 형태로 나타나고 부분적으로 암층과 연속체를 형성하면서 풍화암 정도의 역학적 특성을 나타내기도 하지만, 인접지점에서 형태의 차이를 보인다.

층의 높이가 수 미터에 이르기도 하지만, 고결되는 용암의 말단부 또는 상·하단 경계부에 불규칙하게 형성되므로 대부분 수평적 연속성이 미약하고, 층 경계부에 절리가 발달하여 절리의 간격이 넓고 완전히 분리되어 절리자체가 공동으로 발견되기도 한다.

클링커층의 색상은 산화 정도에 따라 암회색부터 담적색까지 다양하다. Fig. 1.4는 동일한 현장에서 노출된 클링커층이며, Fig. 1.4(a)와 (b)는 담적색의 클링커로 마그마에서 올라온 뜨거운 증기에 의해 산화된 것이며, 이런 증기가 미치지 않은 곳의 클링커는 Fig. 1.4(d)와 같이 암회색을 띠고 있다.

Fig. 1.5는 건조 후 클링커의 입경 크기를 비교한 것으로, 클링커 색상에 관계없이 10cm이상의 암석 크기부터 입경 분포가 다양함을 확인할 수 있다. 그리고 Table 1.1은 Fig. 1.5의 두 지역 클링커에 대한 화학적 조성을 확인하기 위해 XRF(X-ray Fluorescence Spectrometry) 분석을 실시한 결과이다. 두 지역의 화학조성비가 유사함을 확인할 수 있으며, 주성분은  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ 의 함량이 약 75%이고, 양이 많을수록 안정된 결합구조를 보이는 사면체구조(Lambe and Whitman, 1979)의  $SiO_2$  함량이 46.5% ~ 48.5%에 달하고 유기불순물의 함량이 적어, 비교적 안정된 결합구조를 갖고 있는 것으로 확인된다.



(a) Bright-Red



(b) Bright-Red



(c) Bright-Yellow



(d) Dark-Grey

Fig. 1.4 Comparison of Clinker layers shape and color



(a) Northern part of Jeju



(b) Western part of Jeju

Fig. 1.5 Comparison of Clinker Particle Size

Table 1.1 XRF Results of Clinker

Sample	$Al_2O_3$	$CaO$	$Fe_2O_3$	$K_2O$	$MgO$	$MnO$	$Na_2O$	$P_2O_5$	$SiO_2$	$TiO_2$	LOI	Total
a	15.9	7.72	12.3	1.32	6.23	0.17	2.68	0.64	48.4	2.45	2.04	99.8
b	15.5	7.65	12.8	1.56	8.24	0.17	2.45	0.58	46.5	2.65	0.49	98.5

그리고 Fig. 1.6은 시험발파가 이루어진 제주 서부지역 2개의 현장에서 표준관입 시험(Standard Penetration Test, SPT)에 의한 클링커층의 N 값이다. 2회/30cm ~ 50회/4cm 범위를 나타내고 있는데, 암괴로 구성된 구간은 시험이 실시되지 않았다. 측정된 N값은 암편들 간의 공극 차이에 따라 매우 높은 값을 나타내거나 매우 낮은 값으로 측정되기도 하므로 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)에 의한 N값으로부터 이론적·경험적인 방법으로 클링커층의 역학적 특성을 정량화하기 매우 어렵다.

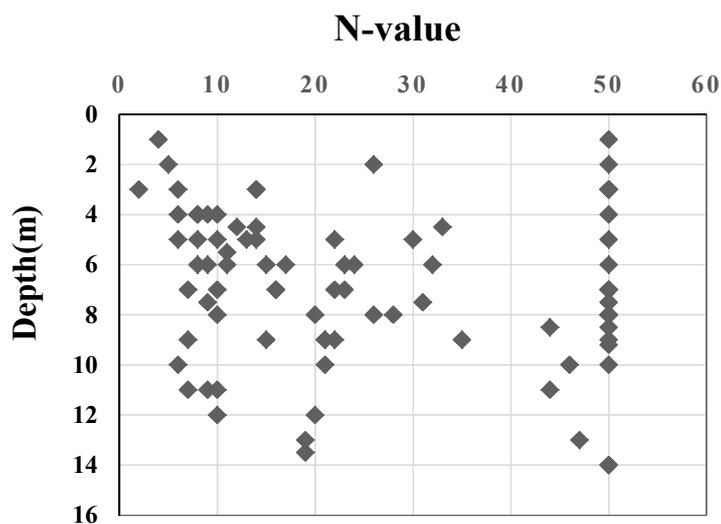


Fig. 1.6 Clinkers N-value by the SPT

이와 같은 클링커층과 현무암으로 이루어진 불규칙한 층상구조 지반에서의 발파로 인한 지반진동 파형은 내륙지역과는 다른 것으로 확인된다.

내륙지역의 지질구조를 이루고 있는 퇴적암, 변성암 등에서 시험발파에 의한 지반진동 주파수는 일반적으로 80Hz 내외로 보고되고 있다. 이에 비해 제주지역에서 실시된 시험발파에 의한 지반진동 주파수는 5 ~ 30Hz 내외의 저주파수 대역을 형성하고 있어 상대적으로 저주파수 특징을 갖는다(Yang et al., 2011; Kim and Lee, 2016). 이러한 지반진동의 저주파수 특징은 다공질 현무암과 클링커층 지반의 층상구조 영향으로 발파진동이 암반 → 클링커 → 암반 또는 암반 → 클링커 → 암반 → 클링커 → 암반을 거치면서 지반진동 파형의 주기가 길어져 주파수 대역이 저주파수 대역으로 나타나는 것으로 판단된다.

그리고, 암반층에 발파 착점이 공극이 크고 느슨한 클링커층과 인접한 위치에 형성되면 가스압 방출로 인한 발파 효과 저감이 우려되고, 천공작업 시 Jamming 현상으로 인해 클링커층을 관통하여 천공하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 또한, 암 파쇄가 목적인 발파에서 기반암의 심도가 얇으면 허용된 발파패턴에 의한 천공장을 확보할 수 없다. 이는 결과적으로 장약량을 제어하는 제약조건이 되어 낮은 수준의 발파를 반복해야하는 비효율적인 발파시공이 이루어질 수 있다.

## 제2장 이론적 배경

### 2.1 발파이론<sup>1)</sup>

#### 2.1.1 지반진동

##### 2.1.1.1 진동의 기초 이론

진동원으로부터 발생된 진동은 일반적으로 변위(Displacement), 속도(Velocity), 가속도(Acceleration)의 3가지 형태로 설명되며, 각각의 관계는 Fig. 2.1에서 살펴 볼 수 있다.

진동 변위(Displacement)는 정지 상태로 부터 움직인 폭으로 나타내며, 전체진폭(Peak to Peak)과 편진폭(0 to Peak)이 있다. 일반적으로 진폭은 편진폭을 의미한다. 기본단위는 'm'이지만, 실제의 진폭은 매우 작아 ' $\mu\text{m}$ '( $1/1,000\text{mm}$ )를 사용한다. 지반진동을 정현파 진동으로 가정하면 지표면에서의 변위는 Eq. 2.1과 같다. 그리고 진동 속도(Velocity)는 단위 시간당의 변위량으로 변위진폭을 미분하여 구할 수 있으며 Eq. 2.2와 같고 이로부터 진동 속도 최대치는  $A_0\omega$ 임을 알 수 있다.

단위 시간당 속도 변위량을 진동 가속도(Acceleration)라고 하며, 단위는  $\text{m/s}^2$ ( $\text{gal}=\text{cm/s}^2$ ,  $g=9.8\text{m/s}^2$ )이며, 중력가속도는  $980\text{gal}(1\text{G})$ 이다. 지진에 의해 피해가 발생한 경우는  $200\sim 300\text{gal}$ 정도가 되며, 공해진동에서는  $30\text{gal}$ (많은 사람이 진동을 느낌) 전후를 대상으로 하고 있다. 진동가속도  $a$ 는 Eq. 2.3과 같으며 진동가속도 최대치(Peak Value)는  $A_0\omega^2$ 이다. 피크-피크 값(Peak to Peak Value,  $2A_0$ )은 전체 진폭을 말하며, 일반적으로 진폭은 짧은 시간의 충격 등을 크기로 나타내기 매우 유용하다. 하지만 이 값은 단지 최대값만을 표시할 뿐이며 시간에 대한 변화량은 나타나지 않는다.

1) 본 절에서는 Kang; 2014, ME; 2010, Ryu; 2014 그리고 Jang; 2014의 연구 내용 중 일부를 인용하여 보완하고 재구성하였다.

$$X = A_0 \sin(\omega t) \quad \text{Eq. 2.1}$$

$$v = A_0 \omega \cos(\omega t) \quad \text{Eq. 2.2}$$

$$a = -\omega^2 A_0 \sin(\omega t) \quad \text{Eq. 2.3}$$

여기서,  $X$ : 변위진폭,  $A_0$ : 변위진폭의 최대치,  $\omega$ : 각진동수,  $t$ : 시간.

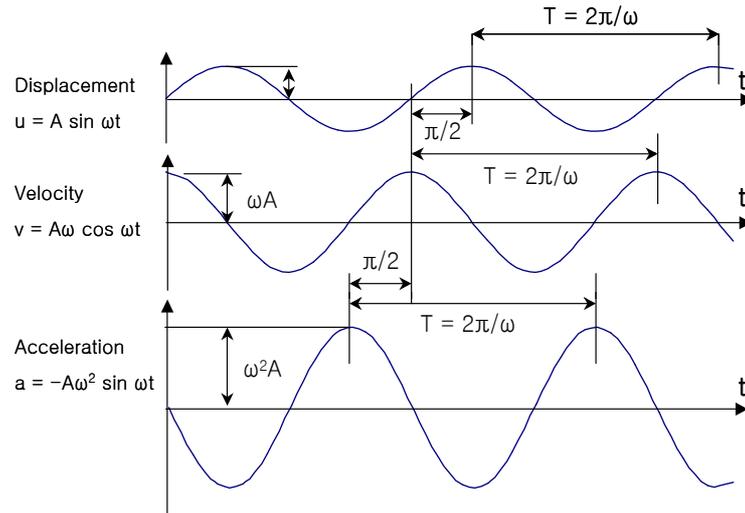


Fig. 2.1 Transformation of Displacement, Velocity and Acceleration in Sine Vibration

진동가속도레벨(Vibration Acceleration Level, VAL)은 측정대상 진동의 가속도 실효치를  $A_r(m/s^2)$ , 기준진동의 가속도 실효치를  $A_0(10^{-5}m/s^2)$ 라 하면, 진동가속도 레벨  $L_a(dB)$ 은 Eq. 2.4로 표시되며 인체에 느껴지는 약한 진동의 진동가속도레벨을 60dB, 진도 4정도의 진동가속도 레벨은 94dB이다. 진동레벨(Vibration level,  $V_L$ )이란 단순한 물리량인 진동가속도레벨을 진동평가 시 이 값에 인체진동 감각에 따른 주파수보정을 하여 평가한 것을 진동레벨이라 하며, Eq. 2.5와 같다.

$$L_a = 20 \log(A_r/A_0) \text{ (dB)} \quad \text{Eq. 2.4}$$

$$V_L = VAL + W_n \text{ (dB(V))} \quad \text{Eq. 2.5}$$

여기서,  $W_n$ : 인체감각에 따른 주파수 보정치.

### 2.1.1.2 지반진동의 전파 특성

Jang(2014)에 의하면, 지반진동은 지표면 및 지반내부에 위치한 각종 진동원의 가진 작용으로 인해 지반으로 전달된 진동에너지가 탄성파에너지의 형태로 지반이라는 전파매질을 통하여 전파되어 나가는 과정에서 지반을 구성하는 토립자들이 운동을 일으키는 물리적 현상이다. 진동원에 의한 탄성파의 형태는 암반 내부로 전달되는 체적파(입체파)와 물체 표면을 따라 이동하는 표면파로 구성 된다. Table 2.1은 탄성파의 종류이다.

Table 2.1 Classification of Elastic Wave (Jang, 2014)

Wave	Classification
Body wave	P-Wave (Primary wave, Compressional wave)
	S-Wave (Secondary wave, Shear wave)
Surface wave	R-Wave (Rayleigh wave, Maximum wave)
	L-Wave (Love wave, Largest wave)
	Hydrodynamic wave
	Couple wave

탄성파는 전파되는 양상에 따라, 첫 번째는 암반내부를 전파하는 체적파로 지표면을 포함한 지반내부 전체를 통해 원구형의 파동면을 형성하며 입체적으로 전파되는 탄성파로서 P파(Primary wave, Compressional wave), S파(Secondary wave, Shear wave)로 구성된다. 압축파는 파의 진행방향에 따라 압축과 인장변형을 유발하고, 전단파는 파의 진행방향과 직교하는 두 축방향으로 전단변형을 유발한다. 따라서 지표면을 기준으로 할 때 압축파는 종-수평 진동을, 전단파는 횡-수평 진동을 일으킨다. 따라서, 압축파, 전단파를 각각 종파(Longitudinal wave), 횡파(Lateral wave)라고도 부르며, 또한 전단파의 수평방향 성분을 SH파, 수직방향 성분은 SV파라고도 부른다. S파는 고체의 편차적 탄성작용에 의해 발생함으로 액체와 기체에서는 존재하지 않는다.

두 번째는 암반표면을 따라 전파하는 표면파로 R파(Rayleigh wave), L파(Love wave), H파(Hydrodynamic wave), C파(Couple wave)의 4가지로 분류된다. 탄성파가 매우 상이한 매질 즉, 지반과 공기, 지반과 물 등 매우 다른 탄성을 가진 층들을 지날 때에는 다른 형태의 탄성파인 표면파가 발생한다. 표면파는 지표면을 따라 전파되는 탄성파로서 러브파 등은 특수한 성층구조의 지표면에서 발생하지만 R파는 성층구조와 관계없이 항존 한다. R파는 에너지가 커서 수진구조물에 미치는 영향력이 큰 관계로 흔히, 표면파를 R파라고 한다. R파는 원통형의 파동면을 갖고, 깊이가 증가함에 따라 에너지가 급격하게 감소하는 특성을 갖는다. 한편, 표면파는 파의 진행방향에 따라 종-수평 변형(P파의 압축, 인장 변형)과 동시에 파의 진행방향과 수직으로 전단변형(S파의 수직 전단변형)을 일으키므로 지표면은 수평, 수직 운동을 동시에 일으킨다. 이러한 측면에서 R파를 P-SV파라고도 부른다. Fig. 2.2는 탄성파의 종류에 따른 입자운동 모양을 나타낸 것이다.

Ryu(2014)에 의하면, 진동원으로부터 일정한 거리가 떨어진 지점에서는 전달된 파동에 의해 수직 변위가 지표에서 발생한다. 이때 P파(종파)가 가장 빠른 전달속도를 가지므로 가장 먼저 도달하고 다음이 S파(횡파), 레일리파의 순서로 도달하게 되며, 이것을 그림으로 표현하면 Fig. 2.3과 같다.

지반진동에 관한 문제는 지반을 전파하는 파동문제에 귀착되며 자연 상태의 지반은 정적인 큰 힘에 대해서 소성체로써의 성질을 나타내지만, 변화하는 속도가 빠른 동적인 미소변위에 대해서는 탄성체의 성질을 나타낸다. R파에 의한 입자운동은 회귀성타원의 경로를 따르고, 전단방향의 변위가 없으므로 종파와 유사한 성질을 갖는다. P파, S파, R파의 운동모양은 폭발위치가 깊지 않거나 암반이 대단히 균질한 경우가 아니면 입체파는 보통 방출에너지의 절반 이하로 작게 나타나고 나머지는 암석의 표면이나 내부의 자유면을 따라 이동하는 표면파가 된다. 그러므로 지표 부근에서 실시한 발파작업에 의한 진동에는 입체파 보다 표면파에 더 많은 에너지가 작용한다. 반면 진동을 측정하는 지점이 발파 지점에서 가까우면 이러한 모든 파는 구분되지 않고 합성되어 함께 복합파 형태로 나타난다.

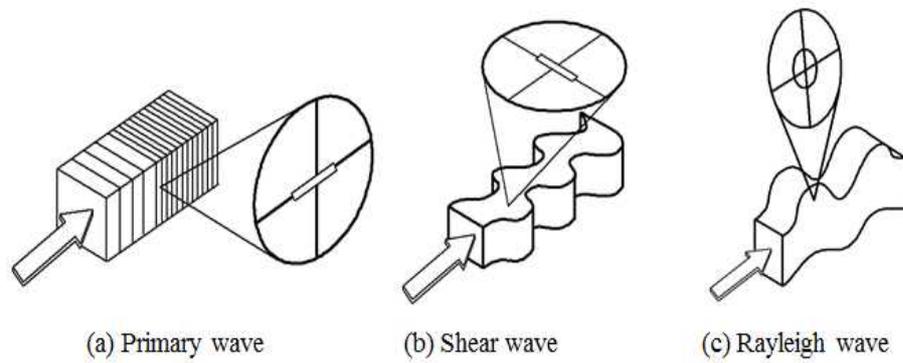


Fig. 2.2 Wave Propagation and Particle Motion (Kang, 2014)

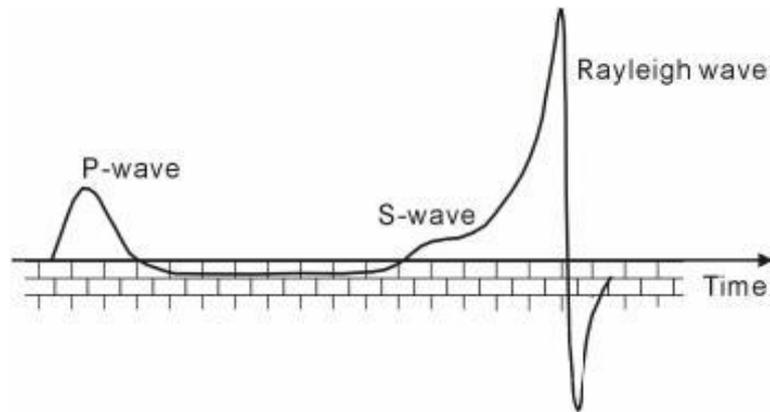


Fig. 2.3 Vertical Displacement Component of P wave, S wave and Rayleigh wave in a Short Duration Period

## 2.1.2 발파진동

### 2.1.2.1 발파진동의 발생

폭약이 장약공 내에서 폭굉하면 그 폭약은 기폭 후 수  $\mu\text{sec}$ 에서 최고치에 달하고 그 압력은 5~20만 기압에 달하는 강력한 충격압과 연소된 화약에 의한 가스압 및 3000°C 이상의 고온이 발생한다. 이 때 Fig. 2.4와 같이 충격압과 고온에 의해 발파공에서 수~수십 mm 이내에 인접한 암반은 녹아내리거나 잘게 파쇄되어 파쇄대를 형성한다. 연속되는 가스압과 충격파의 전달로 인해 파쇄대 외부의 암반에는 균열이 발생되어 전파되는 균열대를 형성하게 된다. 이렇게 폭원으로부터 전달된 3

차원적 충격압에 의한 충격파는 거리에 따라 현저히 감쇠되어 발파에 의한 에너지의 0.5~20%가 탄성파의 형태로 균열 대 외부로 전파되어 간다. 이렇게 전달된 탄성파는 전파되어 가면서 지반의 진동을 발생시키게 되는데, 이를 발파진동(Blasting Vibration)이라 한다(Kang, 2014).

지반으로 전달되는 탄성파는 암반내부로 전달되는 입체파(P파, S파)와 물체의 표면을 따라 이동하는 표면파(Rayleigh파 등)로 나뉜다. 이러한 탄성파가 전파하면서 지반진동을 일으켜 한 점에서 지면의 운동은 진폭과 주기를 갖는 진동으로 나타난다. 이와 같은 발파에 의한 지반진동은 입자 변위(Particle Displacement), 입자 속도(Particle Velocity), 입자 가속도(Particle Acceleration)로 제시된다.

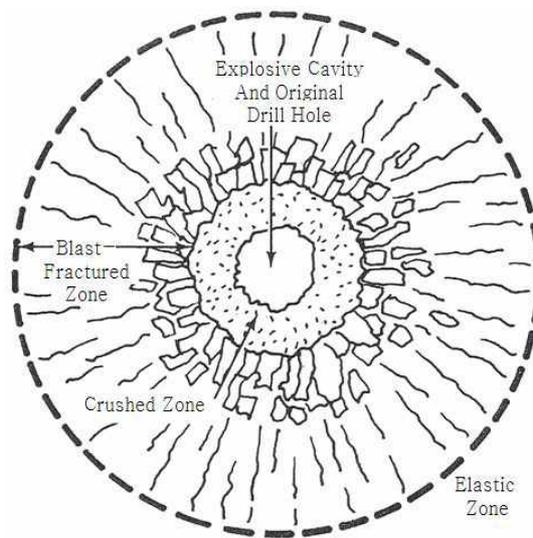


Fig. 2.4 Schematic of the Fracturing and Deformation Around an Explosion in Rock (Dupont, 1980)

#### 2.1.2.2 발파진동의 전파 및 측정

Ryu(2014)에 의하면, 발파에 의해 발생하는 P파, S파, R파 중 지표 진동에서 가장 영향이 크게 작용되는 것은 표면파인 R파이다. 실체파(입체파)들은 발파 시 가까운 거리에서 주로 나타나며, 이러한 실체파들은 매질 특성이 다른 암반이나 토사층의 표면과 같은 경계를 만날 때까지 외부로 향해 구상으로 전파되고 전파 시 다

양한 경계면을 만나면 반사·굴절이 일어나 표면파가 생성된다. 그리고 가까운 거리에서는 세 개의 파가 모두 함께 도달하여 파의 형태를 구별하기가 대단히 복잡하지만, 먼 거리에서는 느리게 전파되는 전단파와 표면파가 압축파로부터 분리되기 시작하여 구분이 된다.

지반진동의 측정은 그 방향에 따라 Fig. 2.5와 같이 폭발으로부터 측점을 향하는 평면상에서 파의 진행방향성분(Longitudinal component, L), 진행방향에 직교하는 수직방향성분(Vertical component, V) 그리고 이들 두 방향과 직각을 이루는 접선방향성분(Transverse component, T)의 세 성분으로 이루어진다.

지반진동은 진행방향성분에서는 종파(P파)가 우세하며, 접선성분은 횡파(S파)가 수직성분은 표면파(R파)가 우세하며, 이 세 가지 성분들은 크기 및 진동주파수가 각각 다르고 복합파이기 때문에 운동하는 형태가 대단히 불규칙하고 복잡하다. 따라서 세 가지 성분 중 각각 단일성분(L, V, T)에 대한 크기와 탁월성분의 최대치가 원하는 계측 위치에서 측정할 수 있어야 한다.

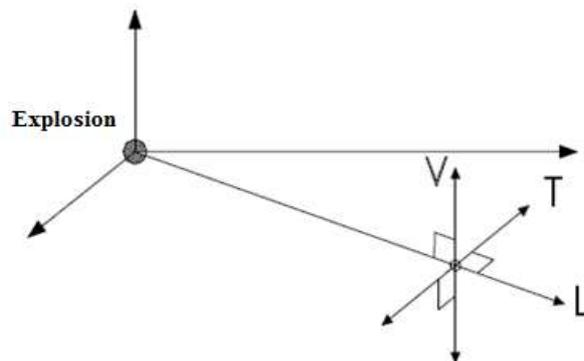


Fig. 2.5 Measuring Direction of Ground Vibration

이러한 탄성파의 파형은 매우 복잡하여 폭발으로부터 근거리에서는 육안으로 구분되지 않고 복합파의 형태로 나타나며, 비교적 원거리에서는 전파속도가 느린 표면파가 지배적인 것으로 알려져 있다. 한편 발파에 의한 지반진동을 단순 조화 진동(Simple Harmonic Motion)으로 보면 입자변위(D), 입자속도(V), 입자가속도(A)

의 사이에는 Eq. 2.6 및 2.7과 같은 관계가 성립한다. 그리고 발파로 인한 지반진동의 크기를 표시하거나 허용수준을 설정하려면 지반진동 크기를 비교할 수 있는 척도가 필요하며, 그 크기 정도를 입자 변위, 입자 속도, 입자 가속도의 3가지 형태로 표시 할 수 있다.

$$V = 2\pi f \cdot D \quad \text{Eq. 2.6}$$

$$A = 2\pi f \cdot V \quad \text{Eq. 2.7}$$

여기서, f는 최대 진폭에서의 진동주파수.

Table 2.2와 같이 지진동(Earthquake Vibration)은 지반진동에 비해 그 주파수가 작고 지속시간이 길며 진원이 깊은 지중이어서 종파, 횡파, 표면파가 분리되어 지표 중에 도달된다. 지반진동은 발파원이 측점에 가까워 이들 각각의 파가 측점에 동시에 도달하고, 또 고주파인 관계로 쉽게 감쇠가 일어나며 지진에 비하여 파형이 비교적 단순하다. 현재까지 연구된 결과들에 의하면 주파수가 수십에서 수백 Hz 범위인 지반진동에서 주로 주거구조물의 피해 정도는 진동변위속도에 비례하는 것으로 보고되고 있다. 이에 지반진동의 규제기준을 진동속도로 활용하고 있다.

Table 2.2 Comparison of Ground Vibration and Earthquake (Ryu, 2014)

Sort	Ground vibration	Earthquake
Focal depth	Ground or inside of close ground	Over under ground 10km
Vibration frequency	Several 10 to several 100Hz	1Hz of below
Vibration duration	Within 0.1s	Over10s, minute unit(a big earthquake)
Vibration waveform	Simple	Complex

폭약이 폭발할 때 발파에 필요한 최대의 효과를 얻기 위해서는 충분한 에너지가 전달되어야 한다. 폭약의 종류와 특성, 자유면의 수와 크기, 암반의 구조(절리, 층리, 박리, 균열 등), 천공경과 천공간격, 장약량과 장약공법, 전색의 정도, 발파공의

배치, 기폭시차 배열 등에 따라 발파효과가 좌우된다.

지반진동의 전파특성을 결정하는 조건은 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있다. 입지조건은 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특성 및 역학적 성질 등을 말하며, 발파조건은 사용하는 폭약, 장약량, 기폭방법, 폭원과의 거리 등을 말한다. 이 중에서 발파조건은 조절 가능한 변수로, 입지조건은 조절 불가능한 변수로 구분하며 지반진동의 영향을 최소화하기 위해서는 조절 가능한 변수들을 잘 파악하여 이를 적극 활용하여야 한다. Table 2.3은 지반진동 변수에 대한 영향을 나타내었다.

Table 2.3 Parameters which Influence Ground Motion (Ryu, 2014)

Parameter	Item	Influence on ground motion		
		Significant	Moderately signif.	Insignif.
Controllable parameters	A. Delay interval	○		
	B. Charge weight per delay	○		
	C. Explosives type	○		
	D. Burden and spacing		○	
	E. Hole diameter and drilling angle		○	
	F. Stemming			○
	G. Direction of initiation			○
	H. Charge weight per blasting			○
Uncontrollable parameters	A. Distance of blast site and structure	○		
	B. Geography		○	
	C. Soil type and layer depth		○	
	D. Rock condition		○	
	E. Atmospheric condition			○

### 2.1.3 지반진동속도의 예측

지반진동속도를 예측하는 대표적인 두 가지 방법은 환산거리 방식(Duvall, et al., 1963; Devine, 1966; Bicholls, et al., 1971; Bollinger, 1971; Ash, 1973; Archibald, 1976; Dupont, 1980; Konya and Walter, 1990)과 장약레벨 방식(Langefors, 1978)을 들 수 있다. 환산거리 방식은 거리와 장약량의 자승근 혹은 삼승근 관계인 환산거리(Scaled Distance) 개념에 의한 지반진동의 예측방법이며, Langefors의 장약레벨 방식은 각각의 장약레벨과 거리와의 관계인 장약레벨(Charge Levels) 개념에 의해 진동속도를 예측한다. 국내에서는 이들 방법 중 환산거리 개념에 의한 지반진동속도의 예측이 일반화되어 있다(Ryu, 2014).

ME(2010)에 의하면, 발파진동의 크기 즉, 속도성분을 표시하는 방법이 학자마다 조금씩 다르기 때문에 아직 이론적 전개가 완전하다고 보기는 어렵지만, 현재 국·내외로 가장 많이 적용하고 있는 경험식은 미광무국(USBM)에서 발표한 Eq. 2.8이다.

$$V = K \left( \frac{D}{W^b} \right)^{-n} \quad \text{Eq. 2.8}$$

- 여기서,  $V$  : 진동속도 (cm/s)  
 $D$  : 폭원으로부터의 거리 (m)  
 $W$  : 지발당 장약량 (kg)  
 $K$  : 발파진동 상수  
 $b$  : 장약지수  
 $n$  : 감쇠지수

위 Eq. 2.8에서 거리와 지발당 장약량의 비( $D/W^b$ )를 환산거리(Scaled Distance : SD)라 하고,  $b=1/2$ 이면 자승근 환산거리(Square Root Scaled Distance : SRSD),  $b=1/3$ 이면 삼승근 환산거리(Cube Root Scaled Distance : CRSD)라 한다.

발파작업에 있어서는 대상지역에서 미리 시험발파를 실시하여 입지상수인 발파상수  $K$ 와 감쇠지수  $n$ 의 값을 결정하는 것이 발파진동추정식의 핵심이다. 시험발파에서 얻어진 자료들을 회귀분석하기 위해 Eq. 2.8의 양변을 log화하면 Eq. 2.9와 같이 되고, Log-Log Scale 좌표 상에 X축에 SD를 Y축에 V값을 취함으로써 기울기  $-n$ 값과 절편  $K$ 를 가지는 직선을 나타낼 수 있으며, 이 회귀직선은 Eq. 2.10과 같은 단순선형회귀모형을 따르게 된다.

$$\log V = \log K - n \cdot \log\left(\frac{D}{W^b}\right) \quad \text{Eq. 2.9}$$

$$Y_i = \alpha + \beta x_i + e_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad \text{Eq. 2.10}$$

위 단순모형에서  $\log V = Y$ ,  $\log K = \alpha$ ,  $\log\left(\frac{D}{W^b}\right) = x$ ,  $n = \beta$  라 하면, 미지의 직선관계를 나타내는  $Y = \alpha + \beta x$ 를 모회귀직선(Population Regression Line)이라고 하며, 모회귀직선을 생성할 때 발생하는 오차( $e_i$ )들의 제곱합을 최소로 하게 하는 추정방법을 최소제곱법(Method of Least Squares)이라고 한다. 최소제곱법으로 구해진 모회귀직선의 계수인  $\alpha$ ,  $\beta$ 와  $K$ ,  $n$ 은 Eq. 2.11과 같은 관계를 가지게 된다.

$$K = 10^\alpha, n = \beta \quad \text{Eq. 2.11}$$

이와 같은 방법으로 산출된 발파진동추정식에서는 자료의 50%가 진동추정식의 윗부분에, 나머지 50%는 진동식의 아랫부분에 위치하게 된다. 즉, 신뢰도 50%를 가지는 진동추정식이 산출되어지는 것이다. 그러나 안전성과 신뢰도를 높이기 위해서는 자료의 95%를 대표할 수 있는 즉, 신뢰도 95%의 발파진동추정식을 산출하는 것이 필요하다. 이를 위해 위에서 구해진 회귀직선식의 기울기( $\beta$ )를 동일하게 한 상태에서 Y절편( $\alpha$ )를 이동시켜, 새로운 Y절편을 계산하여 구할 수 있다. 이 값을 산출하는 방법은 다음과 같다.

절편  $\alpha$ 의 표준오차(SE)는 Eq. 2.12과 같이 계산된다.

$$SE = \left( \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{x^{-2}}{\sum x^2 - (\sum x)^2}} \right) \cdot \sigma \quad \text{Eq. 2.12}$$

Eq. 2.12에서  $\sigma$ 는 오차하의 표준편자로 Eq. 2.13과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma^2 = \left( \sum x^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} - \frac{(\frac{(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n})^2}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \right) \times \frac{1}{n-2} \quad \text{Eq. 2.13}$$

이 때, 절편  $\alpha$ 는 t분포를 따르며, 95% 신뢰 값은 Eq. 2.14와 같다.

$$\alpha(95\%) = \alpha + t_\alpha(n-2) \times SE \quad \text{Eq. 2.14}$$

위 Eq. 2.14에서  $t_\alpha(n-2)$ 는 t분포 표에서 자유도가  $n-2$ 이고 신뢰구간이  $(100-\alpha)\%$ 인 경우의 값을 나타낸다. 이때 구하고자 하는 신뢰 값이 95%이므로  $\alpha$ 는 5% 값이 된다.

이와 같은 이론적 근거로 시험발파를 통해 얻은 계측자료를 회귀 분석함으로써, 지반진동속도 추정식(발파진동추정식)을 산출할 수 있으며, 이를 근거로 발파진동 허용수준에 따라 보안물건과 이격 거리별 지발당 장약량을 기준으로 발파설계를 수행하게 되며 역으로 이 식을 인용하여 발파로 인한 지반진동속도를 예측할 수도 있다.

한편, 우리나라 국토해양부(구 건설교통부)에서도 발파진동 추정식을 제안한 바, 이는 전술한 미광무국(USBM)에서 발표한 식을 근간으로 하고 있으며, 효율적인 설계 추진을 위해 예측진동을 중심으로 설계단계에서 제시된 발파진동 추정식이라

할 수 있다.

국토부는 2003년 2월 “암발파 설계 및 시험발파잠정지침(안)”을 통하여  $K=160$ ,  $n=-1.6$ 을 사용한 신뢰도 75%의 Eq. 2.15를 1차 발표하였다.

$$V = 160 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.60} \quad \text{Eq. 2.15}$$

이어, 2006년 12월에는 국내의 지반매질 특성 반영에 의한 신뢰도 향상을 위해 국토부 산하 각 지방청에서 발주한 국내 도로공사 현장의 실 계측 자료로부터 구한  $K=200$ ,  $n=-1.6$ 을 사용한 신뢰도 84%의 Eq. 2.16을 “도로공사 노천발파 설계·시공 지침”에 수록하여 발표하였다.

$$V = 200 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.60} \quad \text{Eq. 2.16}$$

이로써, 노천 암발파 현장에서 증가되고 있는 발파진동에 의한 분쟁을 줄이고 암발파 설계 및 시공 시 혼선을 방지하여 일관된 과업수행이 이루어지도록하기 위한 표준 발파패턴 계획 과정이 어느 정도 제시되었다고 볼 수 있으며, 해당 식이 상당히 많은 실측 데이터를 근거로 하고 있다는 점에서 안전 측면에서의 신뢰도 역시 비교적 높은 것으로 평가되고 있다.

다만, 이러한 발파진동추정식들은 사전 발파설계 단계에서 주변에 미칠 수 있는 피해를 예방하기 위한 차원에서 제안된 것으로, 사후 환경 분쟁이 발생된 상황에서 발파진동을 추정하기 위한 자료로 활용하기에는 주의가 필요하다.

## 2.2 확률론적 시뮬레이션 분석모델<sup>2)</sup>

Lee(2007)에 의하면, 시뮬레이션(Simulation)은 지난 20년 동안 기업, 공학 및 사회과학의 각 분야에서 서 매우 강력한 문제해결(Problem Solving) 혹은 의사결정(Decision Making)의 방법으로 사용되어 왔다(Law, 1991; Evans, 2002; Kim, 2004; Choo, 2005). 시뮬레이션이란 시스템을 이해하고 의사결정에 도움을 주기 위해 현재 혹은 미래에 일어날 수 있는 상황을 수리적이고 논리적인 모델로 컴퓨터로 재현하는 모의시험의 총칭(Kim, 2005)으로, 모든 가능한 값을 고려하고 그 가능성을 확률(Probability)개념으로 반영시킴으로서 복잡하고 불확실한 변수들을 효과적으로 단순화, 표준화 및 구체화 할 수 있는 모델을 개발하여 동태적 실험을 하는 기술적 의사결정(Technique Decision Making)이라 할 수 있다(Kim, 1992).

시뮬레이션기법이 기업체, 공공기관 등에서 광범위하게 사용되고 있는 이유는 대규모이고 복잡한 현실문제를 해결하는데 이 기법이 효과적이기 때문이다. 특성을 반영하여 확률·통계적 방법으로 분석을 실시하면 Fig. 2.6과 같이 결정론적 방법에서 얻을 수 있는 특정값(기댓값 또는 평균값)과 동시에 통계적 특성을 같이 얻을 수 있으므로 이를 이용하여 각 신뢰수준에 따른 변화 값도 분석할 수 있다.

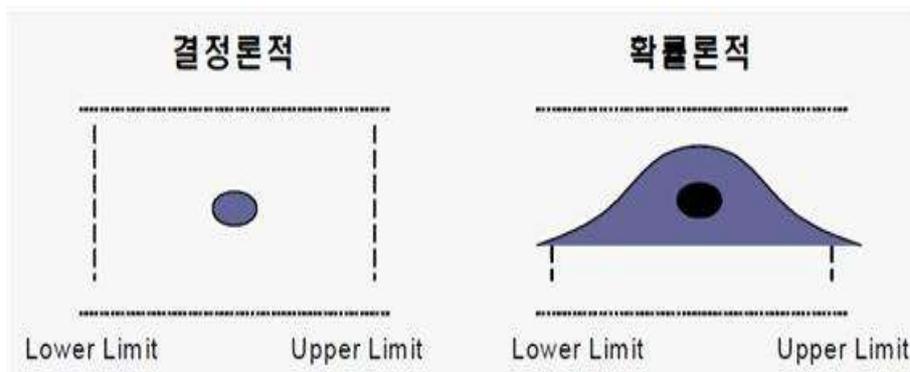


Fig. 2.6 Concept of Probabilistic Analysis (Lee, 2007)

2) 본 절에서는 Lee; 2007와 Jin; 2014의 연구 내용 중 일부를 원용하여 보완하고 재구성하였다.

### 2.2.1 다중회귀분석에 의한 모델 알고리즘

일반적인 연구에서는 단순히 두 변수 간에 유의미한 관계가 존재하는지 여부를 확인하는 것으로 충분하다. 그러나 두 변수간의 관계를 넘어서 하나 혹은 여러 개의 독립변수가 종속변수에 어떤 영향을 미치는지를 확인할 필요가 있다. 이러한 경우 가설과 검증을 통해 여러 변수들의 관계를 분석할 수 있는 회귀분석을 많이 활용한다(Jin, 2014). 이에 본 연구에서는 다중 회귀 분석(Multiple Regression Analysis, MRA)을 활용하여 지반진동속도에 영향을 미치는 요인들의 속성가중치를 산정하였다.

#### 2.2.1.1 회귀분석의 정의

회귀분석은 종속변수와 독립변수 사이의 관계식을 파악하고 미래의 값을 예측하기 위하여 적절한 회귀 모형을 설정하고 알려지지 않은 모수, 즉 회귀계수(Regression Coefficient)를 추정하는 방법이다. 서로 인과관계를 가지고 있는 변수들 중에서 다른 변수에 영향을 주는 변수를 독립변수(Independent Variable)라 하고 독립변수에 의해 영향을 받는 변수를 종속변수(Dependent Variable)라고 한다(Lee, 2001).

#### 2.2.1.2 다중회귀모델 기본형태

Yang(2007)에 의하면, 다중회귀분석을 통해 종속변수를 예측하는 회귀모델을 만들고 회귀모델의 적합성을 검증함과 동시에 각 독립변수가 회귀모델에 기여하는 상대적인 비율을 파악할 수 있다. 그리고 회귀방정식을 통하여 종속변수를 설명하는 모델을 검증한다. 다중회귀분석의 기본 방정식은 Eq. 2.17과 같다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon \quad \text{Eq. 2.17}$$

여기서,  $X_1, X_2, \dots, X_k$  는 독립 변수,  $Y$  는 종속 변수,  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$  는 회귀계

수로서 미지의 상수이며,  $\varepsilon$  는 오차항으로서 통계적 추론을 가능하게하기 위해서, 기대값 0, 분산  $\sigma^2$ 인 정규분포를 따른다고 가정한다(Walpole & Myers, 1985).

k개의 독립 변수들과 종속 변수 Y의 관계가 Eq. 2.17과 같다는 조건은 변수들간 상당히 강한 제약을 나타낸다. 복잡하고 다양한 실제 데이터를 모델화(수식화)하는데 있어서 선형 모델이 부적합한 경우도 있다. 또한, 이공 분야에서 수리적으로 증명된 이론들은 Eq. 2.17과 같이 단순하지 않다.

위의 모델은 회귀 계수에 관해서도 선형적이며 변수들(Y,  $X_1, X_2, \dots, X_k$ )도 선형 관계를 가진다. 이 모델은 종속 변수 Y를 수직 축에, 각 독립 변수를 수평축에 표현한 산점도(Scatter plot)들이 모두 직선 형태를 가질 때 활용 가능한 것이다.

### 2.2.1.3 다중회귀분석

#### 가. 비표준화계수(Unstandardized coefficient)

다중회귀모델에서 각 회귀계수를 해석할 때 중요한 다른 독립변수가 통제되었다는 것을 전제하고 해석해야 한다. 다중회귀모델에서 얻어지는 독립변수들의 회귀계수(비표준화계수: Unstandardized coefficient, B)는 나머지 독립변수들을 특정한 값으로 고정시켰을 때 어떤 독립변수가 종속변수에 미치는 순수한 영향, 즉 종속변수가 얼마나 변화하는지를 나타낸다. 이를 가리켜 다중회귀모델의 '통계적 통제(Statistical Control)'기능이라고 한다. 이를 통해 하나의 독립변수의 고유영향을 도출하고자 할 때, 그 외의 변수를 통제하여 원하는 독립변수가 가지는 고유영향력과 종속변수에 미치는 변화의 정도를 쉽게 판단할 수 있다(Kim, 2006).

#### 나. 표준화계수(Standardized coefficient)

회귀모델은 독립변수의 단위를 그대로 간직하고 있는 비표준화계수를 사용하여 만들어진다. 하지만 비표준화계수는 각 독립변수의 측정단위에 영향을 받기 때문에

단위가 서로 다른 독립변수들 간의 상대적 공헌도를 비교할 때는 사용이 적절하지 않다(Kim, 2007). 이러한 경우에는 단위와 분포를 통일시키고 서로의 영향력 크기를 비교할 수 있는 표준화계수 (Standardized coefficient)를 사용하여야 한다.

표준화계수를 사용하면 상수항이 항상 0의 값이 되어 간단한 형태가 되거나, 독립변수가 2개 이상인 경우 독립변수의 종속변수에 대한 상대적인 영향력의 크기는 표준화계수에 비례한다. 또한, 각 변수의 표준편차값만 제시되면 원래의 비표준화계수로 환원시킬 수 있다(Kim and Kang, 2008).

#### 다. 결정계수(Coefficient of Determination)

Kim(2006)에 의하면, 통계학에서는 추정회귀식이 의미 있는지 판단하기 위하여 결정계수(Coefficient of Determination)를 사용한다. 결정계수는 (R square)라고 부르며 독립변수가 종속변수를 설명하는 척도라고 볼 수 있다. 결정계수를 산정하는 수식은 Eq. 2.18과 같다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{SST - SSE}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad \text{Eq. 2.18}$$

여기서,  $R^2$  = 결정계수

$SSE$  = 회귀식에 기초한 오차제곱합

$SSR$  = 회귀식으로 설명된 회귀제곱합

$SST$  = 종속변수의 평균에 기초한 오차제곱합

결정계수는 일반적으로  $0 \leq R^2 \leq 1$ 의 범위 값을 갖게 된다. 즉  $R^2$ 값이 1에 가까울수록 독립변수의 설명력이 크고 추정회귀식의 적합도가 높으며, 반대로  $R^2$ 값이 0에 가까워질수록 설명력이 미약하고 적합도가 떨어지게 된다.

다중회귀모델에서는 수정결정계수(Adjusted  $R^2$ )가 유용하게 사용된다. 표본의 자료에서 얻어진 결정계수의 값은 모집단을 대상으로 한 결정계수의 값보다 커지는

경향이 있는데 이를 보정해주는 차원에서 수정결정계수를 사용한다. 이는 표본의 수와 독립변수의 수를 반영한 수치로 볼 수 있다. 수정결정계수를 산정하는 수식은 Eq. 2.19와 같다.

$$R_{adj}^2 = R^2 - \frac{k(1-R^2)}{(n-k-1)} \quad \text{Eq. 2.19}$$

여기서,  $R_{adj}^2$  = 수정결정계수

$R^2$  = 결정계수

$n$  = 표본의 수

$k$  = 회귀식에 포함된 독립변수의 수

#### 라. 다중공선성

다중회귀모형에 포함된 독립변수들이 서로 지나치게 밀접한 관계를 가짐으로 인해 분석결과를 왜곡시키는 경우가 발생하는데 이런 경우를 다중공선성의 문제라고 한다. 회귀분석에서 다중공선성 문제를 판단하는 방법 중 한 가지는 분산팽창계수 (Variance Inflation Factor: VIF)를 확인하는 것이다. 이 값은 각 회귀계수의 변량 증가분을 의미하기 때문에 다중공선성에 대한 지수가 된다. VIF값이 1에 접근할 때 다중공선성이 없는 것으로 판단되고 10이상이 되면 다중공선성이 있는 것으로 간주해야 한다(Yang, 2007).

본 연구에서는 다중 공선성의 척도로서 분산 팽창 계수(VIF: variance inflation factor)를 채택하였다. j번째 회귀 계수  $\beta_j$ 에 대한 분산 팽창 계수는 Eq. 2.20과 같다.

$$VIF_j = \frac{1}{1-R_j^2} (j = 1, 2, \dots, k) \quad \text{Eq. 2.20}$$

마. 유의도(Significance Level) 검증

독립변수간의 상관관계가 존재할 때 결정계수로는 통계적 유의성을 검증할 기준을 갖지 못하기 때문에 회귀식의 유의도를 검증하여야 한다. 검증 방법으로는, 일정한 확률하에서 모집단의 회귀계수가 가질 수 있는 값의 범위를 알려주는 신뢰구간을 통한 검증, 또는 모집단위 회귀계수가 '0'인지에 대해 판단할 수 있도록 해주는 가설검증이 있다. 일반적으로 사회과학에서 받아들이는 통계적 유의수준이 5 ~ 10%이기 때문에 신뢰구간을 통한 검증의 경우 신뢰구간을 90 ~ 95%로 설정하여 회귀계수의 통계적 의미를 판단한다(Kim, 2006).

2.2.2 시뮬레이션 분석법의 기본 논리

확률론적 시뮬레이션 분석법의 기본개념은 각 입력변수별로 확률분포를 입력값으로 입력하면 결과값도 확률분포형태로 산출되는 것으로 기본논리는 Eq. 2.21과 같으며, 시뮬레이션 분석법의 기본논리를 개념도로 표현하면 Fig. 2.7과 같다.

$$Y = f(PDF_i) \tag{Eq. 2.21}$$

여기서,  $PDF$  = 독립변수, 입력값, 확률분포

$Y$  = 종속변수, 결과값, 기대값, 확률분포

$i = 1, 2, 3, \dots, n$ ,  $n$ 개의 변수

\*  $PDF$ (확률밀도함수, Probabilistic Density Function)

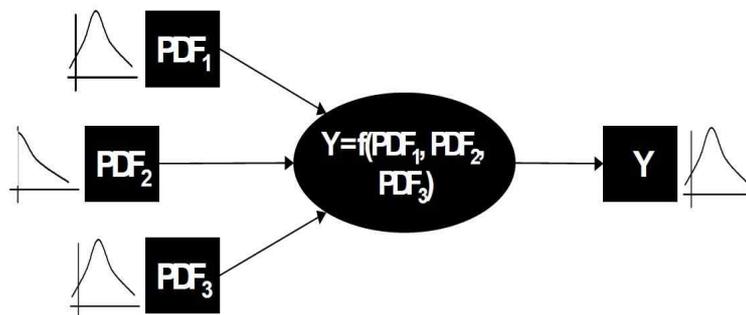


Fig. 2.7 Basic Concept of Simulation Method (Lee, 2007)

### 2.2.3 몬테칼로 시뮬레이션

몬테칼로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)은 현실세계를 대표하는 확률 분포(Probabilistic Distribution)로부터 임의적으로 표본을 추출하는 과정을 통해 특정 상황 하에서 발생할 수 있는 결과값의 분포(Distribution)를 추정하는 방법으로 확률·통계적 방법을 시뮬레이션 모델로 이용하는 기법이다. 즉, 불확실한 상황 하에서의 의사결정을 목적으로 가능한 해의 범위를 주거나 최적의 해를 찾기 위해 무작위적이거나 확률적 특성을 가진다는 가정 하에 확률변수의 값을 분포로 나타내는 방식이다(Baek, 1997).

몬테칼로 시뮬레이션은 2차 세계대전당시 원자폭탄개발 및 국방사업에 처음 사용된 것으로 알려져 있고 현재는 생산현장, 제품개발, 공사비 예측, 사업성 분석 등 다양한 응용분야에서 널리 사용되고 있다(Kang, 2004).

몬테칼로 시뮬레이션은 전통적인 분석방법의 연장선상에서 결정론적 분석법의 한계를 극복할 수 있는 보다 진화된 확률론적(Stochastic) 분석방법이며(Mun, 2005), 시뮬레이션으로 모델을 최적화하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소요되는데 이런 문제점을 해결하기 위해 가장 널리 사용되는 최적의 분석방법이다(Kim, 2003). 앞으로 본 연구에서 시뮬레이션이라 함은 몬테칼로 시뮬레이션을 의미한다.

본 연구에서는 몬테칼로 시뮬레이션 분석기법을 활용한 소프트웨어로 Crystal Ball 11.1 Program을 사용하였다.

#### 2.2.3.1 시뮬레이션 모델 구축절차

##### 1) 시스템의 순서와 알고리즘 확립

시뮬레이션 분석모델을 사용하여 분석하고자 하는 의사결정 문제를 정의하고 시스템을 정확하게 이해하여 전체 분석구도의 알고리즘을 확립한다. 이때, 문제가 내포하고 있는 한계와 제약조건들도 모두 포함해야 한다.

## 2) 입력변수의 확률분포형태 결정

입력변수의 확률분포형태결정은 몬테칼로 시뮬레이션 중 가장 중요한 과정의 하나로 모형설정 단계는 정의된 문제를 기반으로 문제해결을 위한 모형을 설립하는 것이다. 일반적으로 모형설정은 수학식들의 정의를 통해 표현되는 경우가 많다.

### 2.2.3.2 확률변수발생을 위한 난수생성

위에서 결정한 특정 확률분포로부터 확률변수를 발생시키기 위해서는 일양분포  $U(0,1)$ 로부터 난수를 발생시킨 후 이를 이용하여 확률변수를 발생시킨다. 난수(Random Numbers)란 일양확률분포를 지닌 상호 독립적인 수들의 집합에서 임의적으로 추출된 수를 말하며, 균일성(Uniformity, 등출현성)과 독립성(Independence, 무규칙성)이 있어야 한다(Kim, 2004).

### 2.2.3.3 실제상황을 모의하기 위한 확률변수 생성

확률분포로부터 시뮬레이션 모델상에 실제상황과 유사한 상황을 표현하기 위해 표본의 값(확률변수)을 발생시켜야 한다. 이 확률변수는 앞에서 살펴본 난수와 입력자료의 확률분포를 이용하여 발생시키는데 이를 확률변수 발생기(Process Generator)라 하고 Crystal Ball에는 그런 발생을 자동 수행하는 기능이 있다.

### 2.2.3.4 시뮬레이션 실행

#### 가. 신뢰수준 결정

먼저 Fig. 2.8의 유효성 검증 개념에 따라 신뢰수준을 결정한다. 신뢰구간은 통계량의 유효성과 정확성을 결정하는데 중요하다(Mun, 2005). 통계량의 유효성 검증의 개념은 모집단의 정규분포를 기준으로 평균에서  $\pm 2$  표준편차 거리( $\pm 2\sigma$ )내에 시뮬레이션 결과 도출된 결과값이 95.4%이상 포함된다는 설명으로, 유효성 검증기준을 개념적으로 도식화하면 Fig. 2.8의 좌측과 같고, 이를 정규 확률밀도함수로

표현하면 Fig. 2.8의 우측과 같다

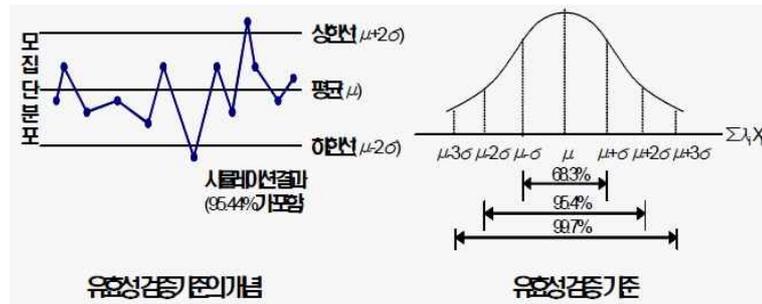


Fig. 2.8 Validation Criteria (Lee, 2007)

#### 나. 실행횟수 결정

이미 결정한 신뢰수준에 도달하기 위한 시뮬레이션 실행횟수를 결정한다. 실행 횟수는 분석의 정밀도와 직결된다. 실행횟수가 증가할수록 분석대상의 확률분포 형태는 점차 매끄러운 곡선모양을 보이게 되므로 그래프의 모양이 일정하게 수렴 (Convergence)한다면 충분한 횟수로 판단한다.

정확하게 정해진 실행횟수는 없으나 시뮬레이션 모델의 상세정도, 분포의 모양, 요구되는 정확도 등에 영향을 받으며, 실행횟수가 많을수록 정확도는 높아지나 시간과 비용이 수반되므로 신뢰수준을 고려하여 5,000회~10,000회 정도를 일반적으로 실행한다.

#### 2.2.3.5 입력변수의 확률분포형태 결정

몬테칼로 시뮬레이션은 확률분포(Probabilistic Distribution)를 근거로 입력변수 (Assumption)별로 변동 가능한 확률적 범위, 즉 확률변수(Random Variable)를 입력하면 결과값(Forecast)도 확률분포로 산출해내는 방법을 말하므로 확률분포형태의 결정이 매우 중요하다.

### 2.2.3.6 확률 분포의 종류

확률분포는 확률변수가 취하는 값이 셀 수 있을 정도로 한정되어 있는 이산형(Discrete) 확률분포와 확률변수가 취하는 값이 무한인 연속형(Continuous) 확률분포가 있으며, Table 2.4에 정리하였다.

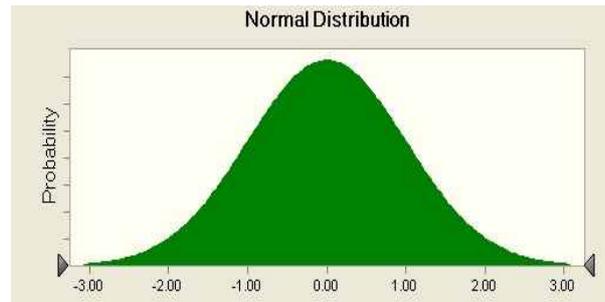
Table 2.4 Types of Probability Distributions (Lee, 2007)

Division	Discrete probability distribution	Continuous Probabilistic Distribution
Concept	· 정수와 같이 비연속적인 값에 대한 분포, 두 확률 변수 값 사이에 중간 값 이 존재하지 않으며 수직 막대 그래프모양으로 나타남	· 두 확률 변수 값 사이에 중간 값이 무한히 존재하며, 수학적으로 도출된 분포로 연속 그래프모양으로 나타남
Types and Terms	· 이항분포 · 확률분포(Probabilistic Distribution) · 확률(분포)함수(PDF) (Probabilistic Distribution Function) · 누적분포함수(CDF) (Cumulative Distribution Function)	· 정규분포 · 확률밀도(Probabilistic Density) · 확률밀도함수(PDF) (Probabilistic Density Function) · 누적밀도함수(CDF) (Cumulative Density Function)
Kinds	· 이산형 균등분포, 이항분포, 포아송 분포, 초기하분포, 기하분포, 음이항 분포, 사용자정의 분포 등	· 연속형 균등분포, 정규분포, 로그 정규분포, 삼각분포, 베타분포, 감마분포, 와이블분포, 지수분포, 극한값분포, 로지스틱분포, 스튜던트 t분포, 파레토분포 등

#### 가. 정규분포(Normal Distribution)

- 개념 : 정규분포는 IQ, 신장 등 자연현상을 설명해 주는 분포이기 때문에 확률이론과 관련된 가장 중요한 분포로 분포곡선이 종 모양의 대칭 형태를 취하며, 일반정규분포와 표준정규분포로 나누어진다.
- 조건 : 정규분포의 세 가지 조건은 다음과 같다.
  - 불확실한 변수의 특정값의 발생확률이 가장 크다(분포의 평균).
  - 불확실한 변수의 값이 평균보다 클 확률과 작을 확률이 같다(평균을 중심으로 한 대칭분포).
  - 평균 근방의 값이 발생할 확률이 평균에서 멀리 떨어져 있는 값의 발생확률보다 크다.

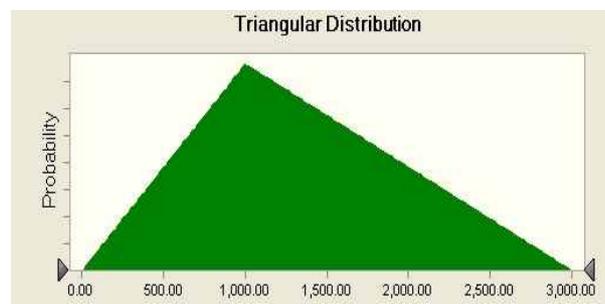
- 모수 : 변수의 입력값
  - 평균( $\mu$ ), 표준편차( $\sigma$ )



<Normal Distribution>

나. 삼각형 분포(Triangular Distribution)

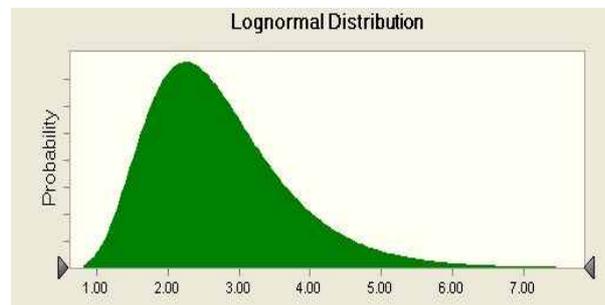
- 개념 : 최대값, 최빈값, 최소값을 아는 경우를 설명하는 분포로 경영 시뮬레이션에서 자주 활용하고 아주 유용하게 사용하는 분포로 좌우 대칭인 분포와 비대칭인 삼각형 분포로 나뉘어진다.
- 조건 : 삼각형 분포의 세 가지 조건은 다음과 같다.
  - 최대값이 고정되어 있다.
  - 최소값이 고정되어 있다.
  - 최빈값이 최대값과 최고값 사이에 있어 분포가 삼각형 모양을 이루게 된다.
- 모수 : 변수의 입력값
  - 최대값(Max), 최소값(Min), 최빈값(Likely)



<Triangular Distribution>

다. 로그정규분포(Log-normal Distribution)

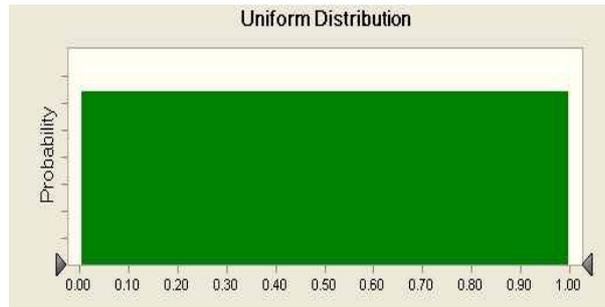
- 개념 : 값들이 양의 치우침을 가진 경우 광범위하게 사용되는 분포로 주식 또는 부동산의 가치평가와 관련된 재무분석시 자주 사용되는 분포이다. 주식이나 부동산은 0 이하의 값은 가질 수 없지만 무한히 커질 수 있기 때문이다.
- 조건 : 로그정규분포의 세 가지 조건은 다음과 같다.
  - 불확실한 값들이 무한히 커질 수 있지만 0 미만으로 떨어질 수 없다.
  - 불확실한 값들은 양의 방향으로 치우쳐 있고 대부분 값은 하한값 근처에 있다.
  - 불확실한 값들의 자연로그 값들이 정규분포를 따른다.
- 모수 : 변수의 입력값
  - 평균( $\mu$ ), 표준편차( $\sigma$ )



<Log-normal distribution>

라. 균등분포(일양분포, Uniform Distribution)

- 개념 : 최대값과 최소값 범위내의 모든 값의 발생확률이 동일한 분포이다.
- 조건 : 균등분포의 세 가지 조건은 다음과 같다.
  - 최소값이 고정되어 있다.
  - 최대값이 고정되어 있다.
  - 최대값과 최소값 범위내의 모든 값은 발생확률이 같다.
- 모수 : 변수의 입력값
  - 최대값(Max), 최소값(Min)



<Uniform Distribution>

### 2.2.3.7 확률분포형태 결정방법

확률분포형태 결정은 매우 중요하고 시뮬레이션의 기본이 되는 과정으로 경험적 또는 과거 실적 데이터의 분석을 통해 각각의 분석 변수(항목) 별로 가장 적합한 분포형태를 결정하여야 한다.

확률분포형태의 결정방법으로 실적자료가 충분한 경우 실적자료를 분석하여 실적 자료에 가장 근접한 최적의 확률분포형태를 도출(최적분포)하여 사용하며, 최적분포형태를 도출하기 위해 최적형태에 대한 적합도 검정(Goodness of Fit Tests)을 실시하는데, 그 검정방법으로는  $\chi^2$ 검정, K-S검정 및 A-D검정 등이 있다.

자료가 불충분한 경우 분포형태를 가정해야 하는데, 크게 타 자료의 연구결과를 활용하거나 또는 경험적 분포를 가정하며, 현재 대부분의 선행연구들이 채택하는 방식이다. 이는 충분한 실적 데이터가 수집되지 않았기 때문에 바람직한 방법이라 할 수 없다.

그러므로 가장 이상적인 결정방법은 충분한 실적자료에 근거하여 최적의 확률분포형태를 찾아 입력함으로서 보다 정확한 결과값을 도출하는 것이며, 이를 통해 최상의 의사결정을 유도하는 것이다. 이 확률분포 선택 과정은 시뮬레이션 전체 과정 중 가장 중요한 단계 중 하나로 확률분포형태에 대한 검토 없이 시뮬레이션이 진행될 경우 분석 결과값에 심각한 오류가 발생할 수 있다.

### 2.2.3.8 분포형태의 적합도 검정

확률분포형태가 결정되면, 각 형태에 따른 기본조건을 가정하고 모수값(예측값)을 결정하게 되는데, 앞서 결정한 확률분포형태가 모집단의 특성을 잘 나타내고 있는지 적합도 검정(Goodness of Fit Tests)을 실시하여야 한다(Mun, 2005; Kim, 2002).

적합도 검정방법으로는,

- 1)  $\chi^2$  검정(Chi-square Test)
- 2) K-S 검정(Kolmogorov-Smirnov Test)
- 3) A-D 검정(Anderson-Darling Test) 등이 있다.

자료의 수가 30보다 크고 이산적인 분포의 경우  $\chi^2$  검정이, 표본수가 작고 연속 분포의 경우 K-S 검정이 적합(Mun, 2005; Kim, 2002)하다고 알려져 있으나, 일반적으로 가장 많이 사용하는 방법은 A-D 검정법이다. 적합도 검정은 실적자료와 분포형태의 일치(적합)여부를 검정하는 방법으로 A-D 통계량이 1.50보다 작으면 분포가 잘 적합 되었다고 본다(Mun, 2005). 그러나 Crystal Ball에는 확률분포 형태의 적합성 검정을 수행하는 기능이 있어 그 결과를 쉽게 알 수 있다.

## 제3장 시험발파 자료의 수집 및 분석

### 3.1 시험발파 자료의 수집

최근 제주지역에서는 종래 없던 대규모 개발 사업이 이루어지고 있다. 이러한 대규모 건설공사에서 필연적으로 수반되는 토공사 시 경제성과 효율성을 동시에 만족시키기 위해 발파가 계획되고 실시되었다.

본 연구에서는 시공 시 활용되는 현장의 발파패턴을 결정하기 위해 계획 단계에서 수행된 시험발파자료들을 Fig. 3.1의 위치에서 Table 3.1과 같이 수집하였다.

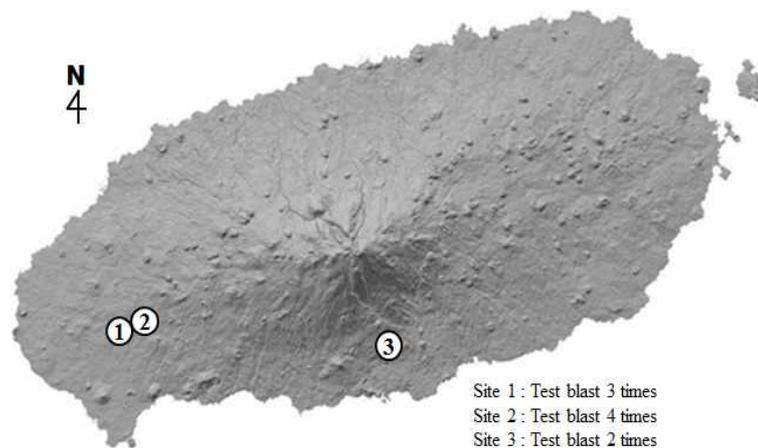


Fig. 3.1 Location of Obtained Test Blast

Table 3.1 Obtained Blasting Data

Site	Test Blast Times	Test Blast No.	Event	Data
1	3	1	8	58
		2	8	64
		3	8	55
2	4	4	6	47
		5	4	30
		6	5	44
		7	6	54
3	2	8	8	70
		9	8	40
Total	9		61	462

## 3.2 사이트. 1

### 3.2.1 지질 및 지반 특성

시험발파가 3회 이루어진 사이트. 1 지역은 제주특별자치도 서귀포시 안덕면 일원이며, 기반암의 특성을 파악하기 위해 한국지질자원연구원 지질정보시스템에서 제공하는 지질도를 확인한 결과 Fig. 3.2와 같이 후기 화산활동시기 화산암인 왕이매조면현무암(Qwtb)으로 조사되었다.

왕이매조면현무암(Qwtb)은 회색 내지 암회색이며, 이 암석은 일반적으로 치밀 견고하고 부분적으로 기공이 함유되어 있는데, 대부분은 길게 신장되어 있고 반정으로는 2~3 mm 크기의 감람석이 10 cm<sup>2</sup>의 단위면적에 5~10개 정도 분포하는 특징이 있다. 화학적 조성은  $SiO_2$ 가 47.5~49.90wt%,  $Na_2O$ 는 2.76~3.75wt%,  $K_2O$ 는 1.07~2.01wt%의 범위이고  $Na_2O+K_2O$ 는 4.07~5.76wt%의 범위에 해당한다(Park et al., 2000a).  $SiO_2$ 와  $Na_2O+K_2O$ 의 조성비를 이용한 화산암류 분류법인 TAS도 (Total Alkali-Silica diagram; Le Maitre, 1984)에 도시한 결과는 Fig. 3.3와 같이 현무암내지 조면현무암으로 분류되었다.

암반의 단위중량은 2.74~2.78g/cm<sup>3</sup>, 흡수율은 1.91~1.96%이고 일축압축강도 67.6~139.8MPa까지 다양하다. 그리고 암반과 암반사이에 협재되어 있는 클링커층의 표준관입시험에 의한 N치 값은 Fig. 3.4에서와 같이 2회/30cm~50회/5cm 범위로 다양하게 나타내고 있다.

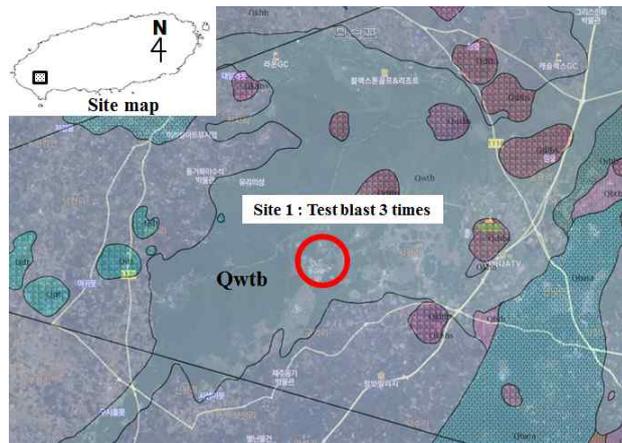


Fig. 3.2 Geologic Map of Site. 1

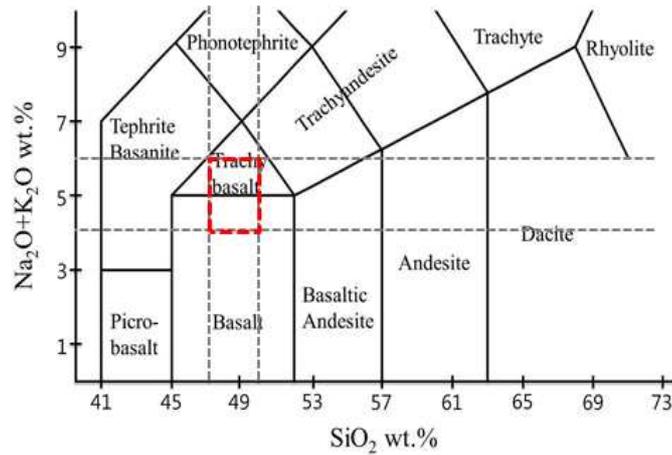


Fig. 3.3 Classification of the Basalt according to TAS Diagram (Site. 1)

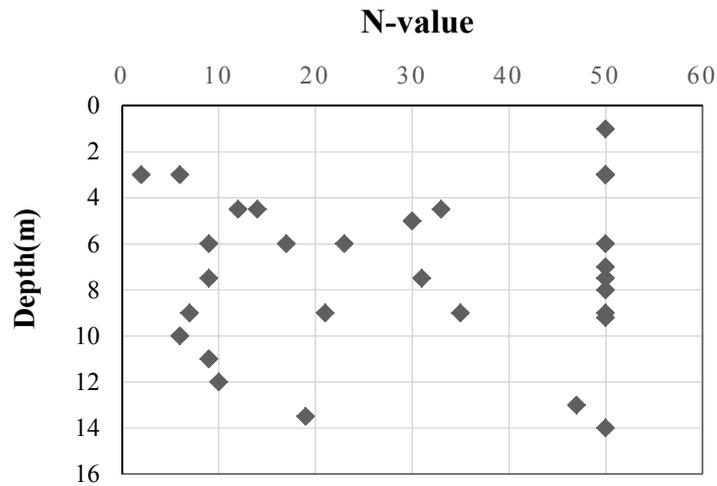


Fig. 3.4 Clinkers N-value by the SPT (Site. 1)

### 3.2.2 시험발파 분석

#### 3.2.2.1 시험방법

시험발파 위치는 제주 서부지역에 위치한 S개발사업 현장이며, 인근 보안물건의 영향범위를 고려한 3회의 시험발파가 각 8번 실시되어 총 24번의 시험발파가 진행되었다.

시험발파는 표준발파공법 II(정밀진동제어발파), III(소규모진동제어발파), IV(중규모진동제어발파), V(일반발파)를 적용하였으며 시험발파 조건은 Table 3.2와 같다. 그리고 시험발파 수행 순서는 TB. 1 : 정밀진동제어발파(10공→6공) → 소규모진동제어발파(10공→6공) → 중규모진동제어발파(10공→6공) → 일반발파(6공→10공), TB. 2, 3 : 일반발파(10공→6공) → 중규모진동제어발파(10공→6공) → 규모진동제어발파(10공→6공) → 정밀진동제어발파(10공→6공)의 순으로 진행되었으며, 일반발파는 발파 시 클링커층을 피하기 위해 응용패턴-1을 적용하여 천공장 4.5m로 경사천공(70°)이 실시되었다.

Table 3.2 Experimental Conditions of Test Blast No.1, 2, 3

Description	Unit	TYPE II	TYPE III	TYPE IV	TYPE V
Drilling length	m	2.0	2.7	3.4	4.5
Burden	m	0.7	1.0	1.6	1.8
Spacing	m	0.8	1.2	1.9	2.1
Drilled hole diameter	mm	50	50	76	76
Charge per hole	kg	0.25	0.96	3.0	5.0
Charge per delay	kg	0.25	0.96	3.0	5.0
Explosive diameter	mm	25	32	50	50
Explosive	-	Emulsion			
Holes	-	6, 10	6, 10	6, 10	6, 10

시험발파는 Fig. 3.5와 같이 구성되었으며, 발파진동 계측을 위하여 11기의 계측기가 설치되었고 시험발파 폭원으로부터 각 계측기까지의 이격거리는 TB. 1의 경우 최소 50m에서 최대 580m이고 TB. 2의 경우 최소 50m에서 최대 800m이며, TB. 3의 경우 최소 40m에서 최대 1,000m이다.

제어불가능한 발파진동의 영향요인인 지반조건을 확인하기 위해 시험발파 현장의 지반조사보고서로부터 지층단면도(Section A-A')를 시험발파 지역의 대표 지층단면으로 설정하여 지반특성을 검토하였다. 시추주상도 BH-3에서는 표층에 실트섞인 자갈층이 2.6m를 이루고 이후 보통암 2.4m(TCR: 83%, RQD: 80%), 연암 1.0m(TCR: 55%, RQD: 20%)가 형성되어 있고 클링커층 1.4m, 연암 1.0m(TCR: 90%, RQD: 30%) 이후 다시 클링커층이 3.0m 형성되고 이후 연암(TCR: 83%, RQD: 60%)으로 형성되어 있다. 시추주상도 B-21은 실트질모래 2.4m, 자갈층 1.1m 이후 연암이 3.0m 형성된 이후 클링커층 1.0m, 연암 0.5m 형성된 이후 다시 클링커층이 5.0m이상 깊게 형성되어 있다. 그리고 시추주상도 BH-1은 실트섞인 자갈층이 0.8m로 얇게 형성되어 있고 연암 4.1m(TCR: 83%, RQD: 75%) 이후 클링커층 1.6m, 연암 1.4m(TCR: 85%, RQD: 60%) 후 보통암(TCR: 90%, RQD: 85%)이 형성되어 있다. 결과적으로 모든 시추공에서 클링커층이 확인되었으며 심도 13m이내에서 1회 또는 2회가 출현하고 층의 두께가 1.0m~5.0m이상으로 형성되어 있어 층서적으로 매우 불규칙한 분포 특성을 보이고 있다.

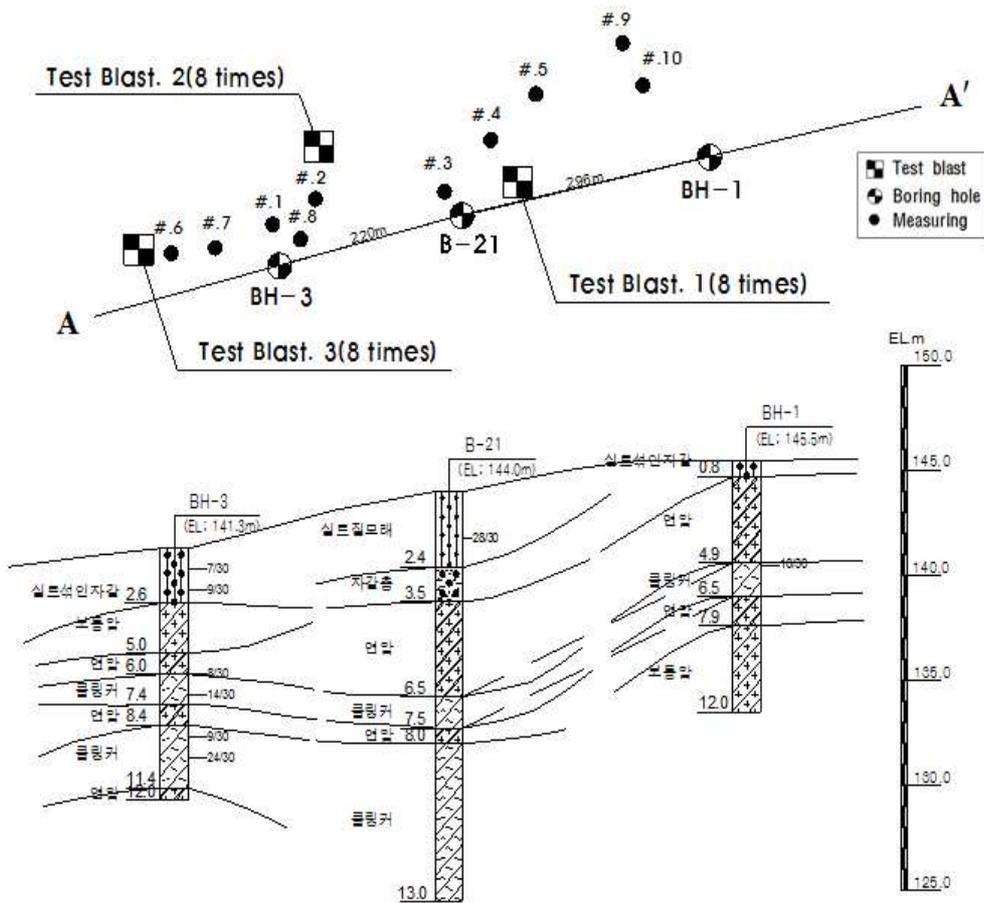


Fig. 3.5 Geological Profile(A-A') and Composition of Test Blast No.1, 2, 3

### 3.2.2.2 시험발파 분석

#### 가. 시험발파 No.1

8번의 시험발파를 통해 58개의 지반진동 데이터가 계측되었다.

#### 1) 지반진동속도 예측

PPV와 PVS에 대한 거리와의 관계를 Fig. 3.6에서 보여주고 있으며, Table 3.3은 Fig. 3.7과 3.8에서와 같이 시험발파 데이터를 대수눈금 그래프에서 회귀분석한 신뢰도 50%, 95%에서 PPV와 PVS의 지반진동속도 예측식이다.

그리고 Fig. 3.9은 시험발파를 통해 계측된 진동데이터에서 각 성분별 진동속도 데이터를 회귀분석한 신뢰도 95%의 결과이며,  $V_T$ 는 접선방향 성분의 진동속도,  $V_V$ 는 수직방향 성분의 진동속도,  $V_L$ 은 진행방향 성분의 진동속도이다.

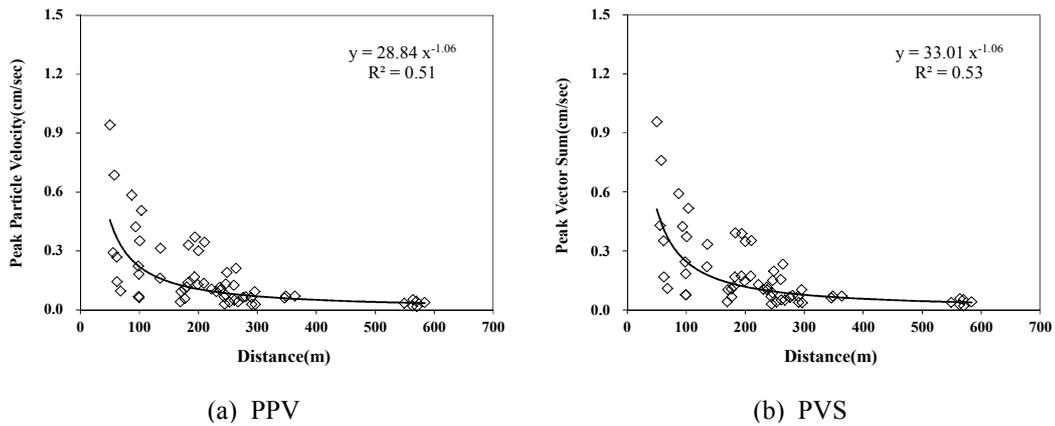
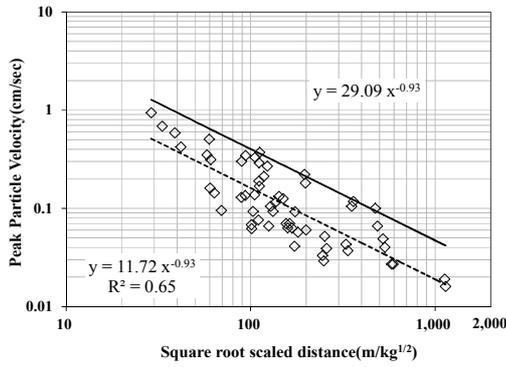


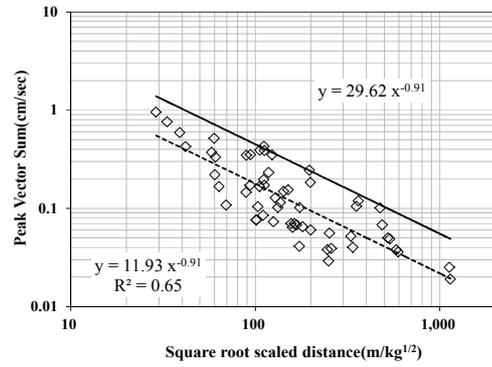
Fig. 3.6 Relationship between Distance and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.1)

Table 3.3 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity(PPV) and Peak Vector Sum(PVS) (Test Blast No.1)

Peak Particle Velocity(PPV, cm/s)				
SD Method	Reliability	Predictive Equation	R	S.E
Square root	50%	$V = 11.70(SD)^{-0.93}$	0.81	0.24
	95%	$V = 29.09(SD)^{-0.93}$		
Cube root	50%	$V = 32.42(SD)^{-1.11}$	0.84	0.22
	95%	$V = 75.70(SD)^{-1.11}$		
Peak Vector Sum(PVS, cm/s)				
Square root	50%	$V = 11.93(SD)^{-0.91}$	0.80	0.24
	95%	$V = 29.62(SD)^{-0.91}$		
Cube root	50%	$V = 33.39(SD)^{-1.10}$	0.84	0.22
	95%	$V = 77.05(SD)^{-1.10}$		

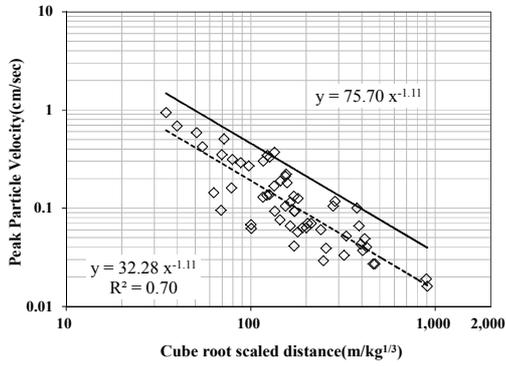


(a) PPV

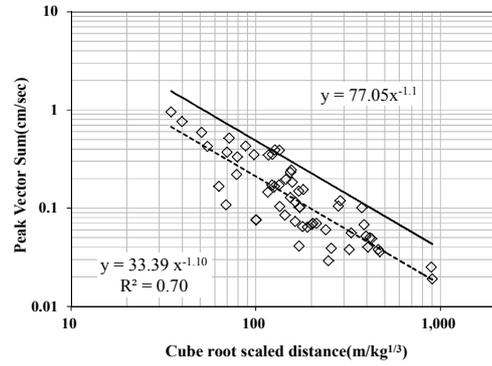


(b) PVS

Fig. 3.7 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.1)

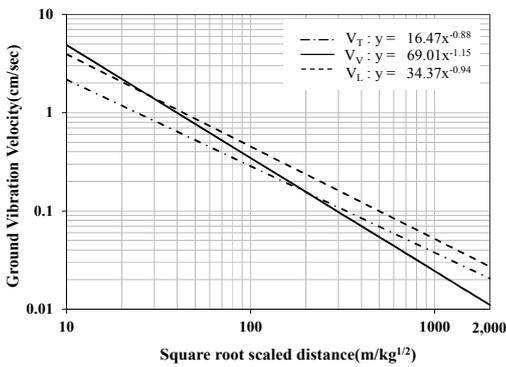


(a) PPV

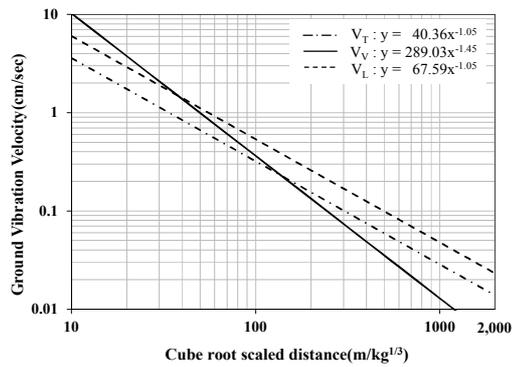


(b) PVS

Fig. 3.8 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.1)



(a) SRSD



(b) CRSD

Fig. 3.9 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No.1)

## 2) 지반 진동 분석

지반진동 예측에 사용된 지발당 장약량은 국토해양부(2006)의 “도로공사 노천발파 설계·시공 지침”에 제시된 표준발파공법의 공법별 경계 기준 장약량인 0.5, 1.6, 5.0, 15.0kg을 적용하였고, Table 3.3에서 예측된 최대입자속도(PPV)와 최대 벡터합(PVS)의 95% 지반진동속도 추정식을 이용하여 지발당 장약량을 기준으로 환산거리(Scale Distance) 방식에 따른 지반진동속도의 차이를 Table 3.4와 3.5에서 비교하고 Fig. 3.10과 3.11에 나타내었다.

지발당 장약량 0.5kg일 때, PPV와 PVS 추정식은 거리 200m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 큰 것으로 예측되고 SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 108.0% PVS는 103.7%로 PPV 보다 조금 작고 거리 200m에서는 PPV가 7.1% PVS는 1.1%로 감쇠기울기의 차이를 보이는 것으로 예측되었다.

지발당 장약량 5.0kg일 때, PPV 추정식은 거리 80m까지 PVS 추정식은 거리 60m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 크고 이후 반전되어 SRSD 방식의 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고, SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 67.1% PVS는 66.2%이며 반전된 후 SRSD 방식의 지반진동속도는 거리 200m에서 CRSD 보다 PPV가 14.0% 크고 PVS는 17.5% 더 큰 것으로 예측되었다.

전반적으로 지발당 장약량이 커질수록 근거리에서 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도 차이가 줄어들며 반전되는 거리 또한 줄어드는 것으로 확인되었다.

Fig. 3.12에서 환산거리(SD)에 따른 PPV와 PVS 추정식을 국내 가이드라인(국토해양부, 2006)과 비교하였다. 우선 PPV와 PVS 추정식은 SD 방식으로 예측되는 지반진동속도의 변화가 거의 유사하고 약 200m선에서 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도가 반전된다. 그리고 SRSD로 제안된 G.L 추정식과 시험발파에 의한 SRSD 방식의 추정식을 비교해 보면 약 15m의 매우 근거리에서는 G.L의 지반

진동속도가 높지만 기울기가 커 진동속도의 감소가 큰 반면 시험발파에 의한 지반 진동속도 추정식은 상대적으로 원거리까지 진동이 발생하는 것으로 예측되었다.

Fig. 3.13에서는 지반의 허용 진동속도를 재래주택 수준인 0.3cm/s로 가정하여 PPV와 PVS 지반진동속도 추정식을 이용해 거리에 따른 지발당 허용 장약량을 예측하였다. SD방식에 따라서는 두 가지가 비슷한 경향을 보이며 근거리에서 지반진동속도가 크게 예측되는 CRSD 방식은 SRSD 방식에 비해 지발당 허용 장약량이 작고 반전점 이 후에 커진다. 그리고 G.L 추정식과 유사한 기울기를 보이는 SRSD 방식의 추정식들도 지반진동속도가 더 높게 예측되었기 때문에 지발당 허용 장약량이 작고 원거리까지 유지된다.

지반진동에 의한 각 성분별(T, V, L) 입자속도와 주파수를 Fig. 3.14에 나타내었고 Fig. 3.15와 같이 도수분포표를 작성하였다. 각 성분별 주파수 평균은 10.5~14.2Hz이고 최빈값은 11.0~13.0Hz로 분석되었으며 도수분포표에서도 9~15Hz에서 빈도가 매우 높다.

Table 3.4 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.1)

Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	4.72	9.81	108.0	8.10	15.09	86.2	13.76	23.01	67.1	22.94	34.54	50.6
10	2.48	4.55	83.6	4.25	6.99	64.4	7.22	10.66	47.5	12.04	16.00	32.9
20	1.30	2.11	62.1	2.23	3.24	45.1	3.79	4.94	30.2	6.32	7.41	17.3
40	0.68	0.98	43.1	1.17	1.50	28.1	1.99	2.29	15.0	3.32	3.44	3.6
60	0.47	0.62	33.0	0.80	0.96	19.1	1.36	1.46	6.9	2.28	2.19	-3.7
80	0.36	0.45	26.3	0.61	0.70	13.1	1.04	1.06	1.5	1.74	1.59	-8.6
100	0.29	0.35	21.3	0.50	0.54	8.6	0.85	0.83	-2.5	1.41	1.24	-12.2
120	0.25	0.29	17.4	0.42	0.44	5.1	0.72	0.68	-5.7	1.19	1.01	-15.0
140	0.21	0.24	14.2	0.37	0.37	2.2	0.62	0.57	-8.3	1.03	0.86	-17.3
160	0.19	0.21	11.5	0.32	0.32	-0.2	0.55	0.49	-10.4	0.91	0.74	-19.3
180	0.17	0.18	9.1	0.29	0.28	-2.3	0.49	0.43	-12.3	0.82	0.65	-21.0
200	0.15	0.16	7.1	0.26	0.25	-4.1	0.45	0.38	-14.0	0.74	0.58	-22.5

Table 3.5 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.1)

Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	4.99	10.17	103.7	8.48	15.59	83.8	14.24	23.67	66.2	23.48	35.41	50.8
10	2.66	4.75	78.6	4.51	7.27	61.1	7.58	11.04	45.7	12.49	16.52	32.2
20	1.41	2.21	56.5	2.40	3.39	41.2	4.03	5.15	27.7	6.65	7.71	15.9
40	0.75	1.03	37.2	1.28	1.58	23.8	2.15	2.40	12.0	3.54	3.60	1.6
60	0.52	0.66	27.0	0.88	1.01	14.6	1.48	1.54	3.7	2.45	2.30	-5.9
80	0.40	0.48	20.3	0.68	0.74	8.5	1.14	1.12	-1.9	1.88	1.68	-10.9
100	0.33	0.38	15.3	0.56	0.58	4.0	0.93	0.88	-5.9	1.54	1.31	-14.6
120	0.28	0.31	11.4	0.47	0.47	0.5	0.79	0.72	-9.1	1.30	1.07	-17.5
140	0.24	0.26	8.2	0.41	0.40	-2.4	0.69	0.61	-11.8	1.13	0.91	-19.9
160	0.21	0.22	5.4	0.36	0.34	-4.9	0.61	0.52	-14.0	1.00	0.78	-21.9
180	0.19	0.20	3.1	0.33	0.30	-7.0	0.55	0.46	-15.9	0.90	0.69	-23.6
200	0.17	0.18	1.1	0.30	0.27	-8.8	0.50	0.41	-17.5	0.82	0.61	-25.2

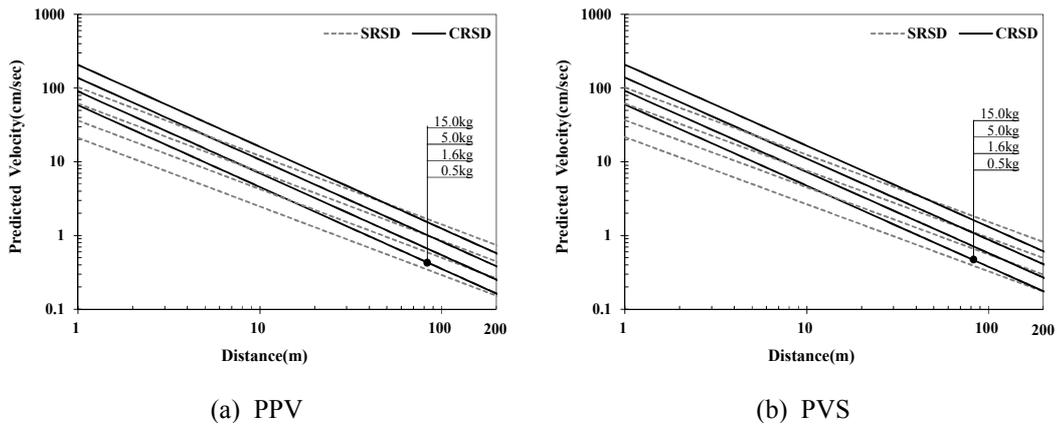
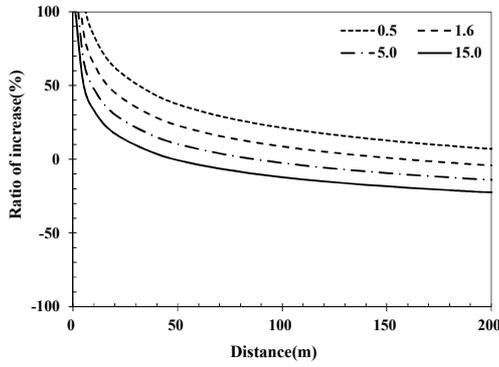
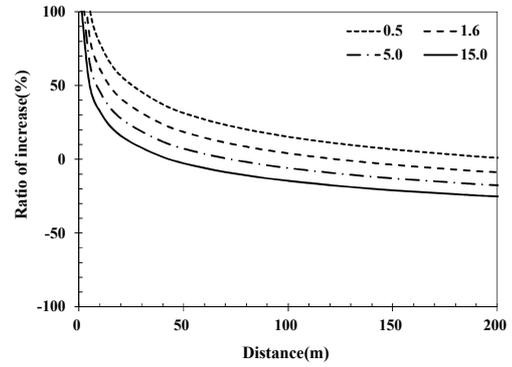


Fig. 3.10 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.1)



(a) PPV



(b) PVS

Fig. 3.11 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.1)

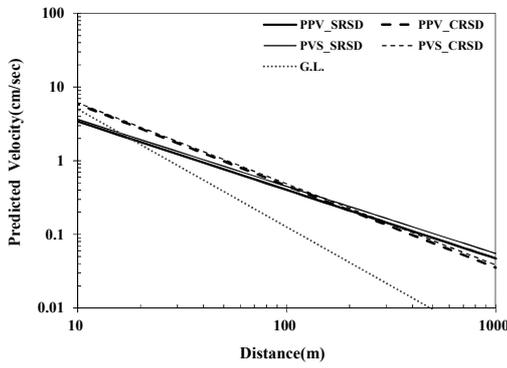


Fig. 3.12 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.1)

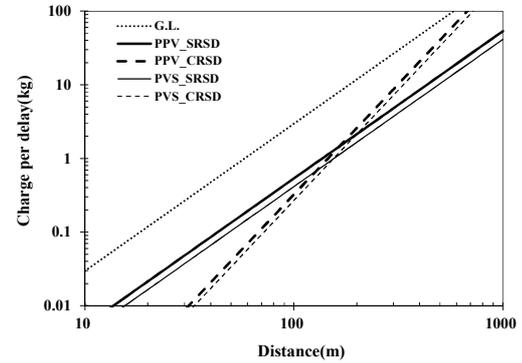


Fig. 3.13 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.1)

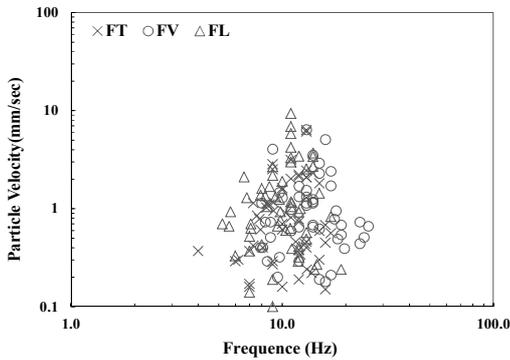


Fig. 3.14 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.1)

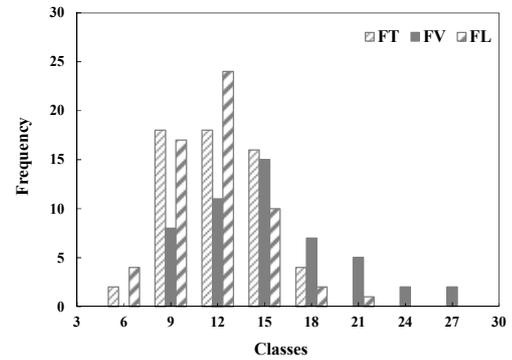


Fig. 3.15 Frequency Distribution (Test Blast No.1)

나. 시험발파 No.2

8번의 시험발파를 통해 64개의 지반진동 데이터가 계측되었다.

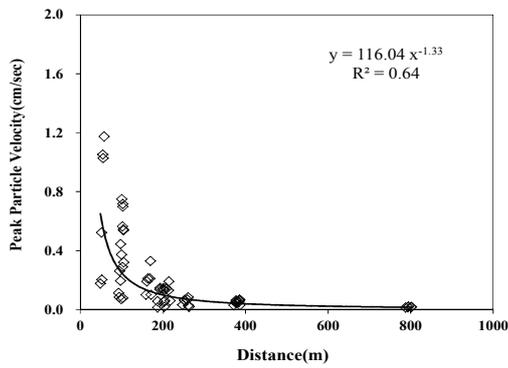
1) 지반진동속도 예측

PPV와 PVS에 대한 거리와의 관계를 Fig. 3.16에서 보여주고 있으며, Table 3.6은 Fig. 3.17과 3.18에서와 같이 시험발파 데이터를 대수눈금 그래프에서 회귀분석한 신뢰도 50%, 95%에서 PPV와 PVS의 지반진동속도 예측식이다.

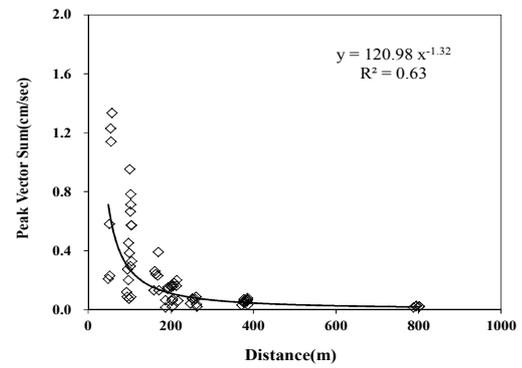
그리고 Fig. 3.19는 시험발파를 통해 계측된 진동데이터에서 각 성분별 진동속도 데이터를 회귀분석한 신뢰도 95%의 결과이며,  $V_T$ 는 접선방향 성분의 진동속도,  $V_V$ 는 수직방향 성분의 진동속도,  $V_L$ 은 진행방향 성분의 진동속도이다.

Table 3.6 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity(PPV) and Peak Vector Sum(PVS) (Test Blast No.2)

Peak Particle Velocity(PPV, cm/s)				
SD method	Reliability	Predictive Equation	R	S.E
Square root	50%	$V = 230.30(SD)^{-1.55}$	0.96	0.15
	95%	$V = 401.10(SD)^{-1.55}$		
Cube root	50%	$V = 476.82(SD)^{-1.67}$	0.96	0.14
	95%	$V = 813.39(SD)^{-1.67}$		
Peak Vector Sum(PVS, cm/s)				
Square root	50%	$V = 255.00(SD)^{-1.55}$	0.96	0.15
	95%	$V = 444.44(SD)^{-1.55}$		
Cube root	50%	$V = 516.79(SD)^{-1.66}$	0.96	0.15
	95%	$V = 897.05(SD)^{-1.66}$		

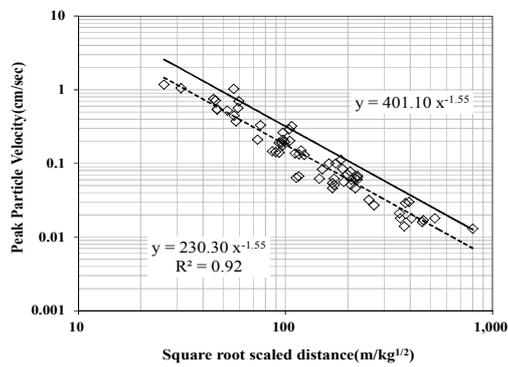


(a) PPV

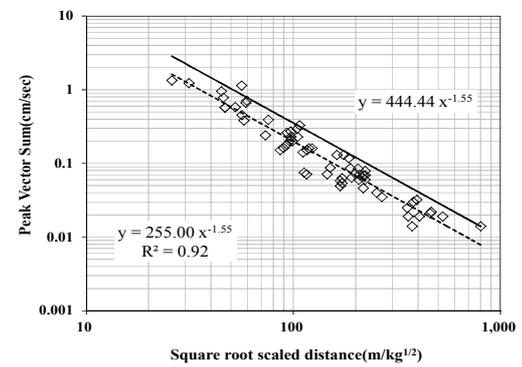


(b) PVS

Fig. 3.16 Relationship between Distances and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.2)

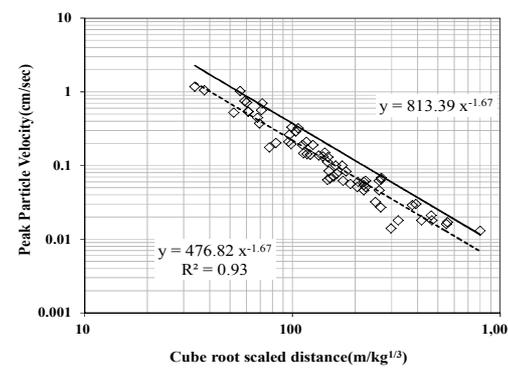


(a) PPV

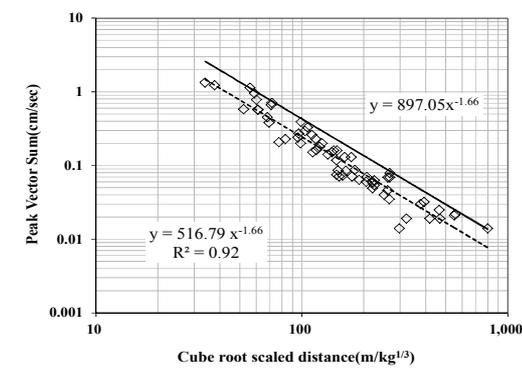


(a) PVS

Fig. 3.17 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.2)



(b) PPV



(b) PVS

Fig. 3.18 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.2)

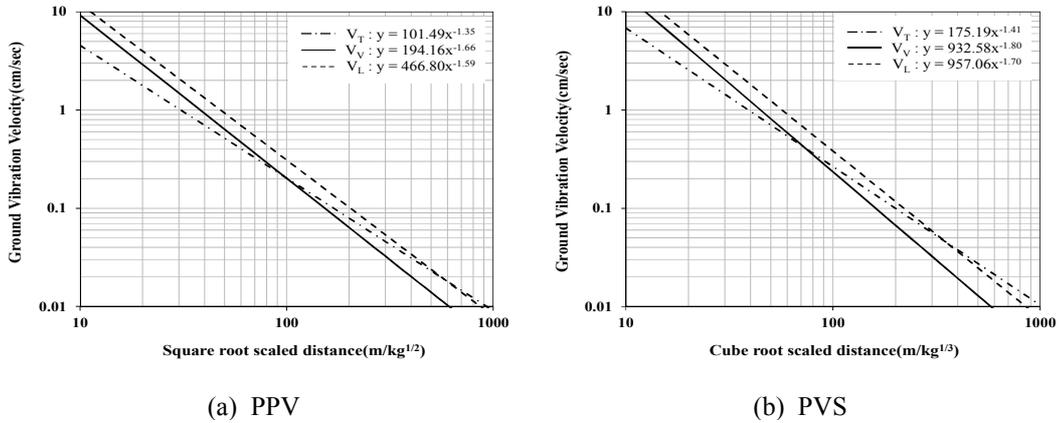


Fig. 3.19 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No.2)

## 2) 지반 진동 분석

Table 3.6에서 예측된 최대입자속도(PPV)와 최대벡터합(PVS)의 95% 지반진동속도 추정식을 이용하여 지발당 장약량을 기준으로 환산거리(Scale Distance) 방식에 따른 지반진동속도의 차이를 Table 3.7과 3.8에서 비교하고 Fig. 3.20과 3.21에 나타내었다.

지발당 장약량 0.5kg일 때, PPV와 PVS 추정식은 거리 200m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 큰 것으로 예측되고 SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 94.5% PVS는 97.2%로 PPV 보다 조금 크고 거리 200m에서는 PPV가 24.9% PVS는 31.4%로 감쇠기울기의 차이를 보이는 것으로 예측되었다.

지발당 장약량 5.0kg일 때, PPV 추정식은 거리 10m까지, PVS 추정식은 거리 20m까지, CRSD 방식의 지반진동속도가 크고 이후 반전되어 SRSD 방식의 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고, SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 17.6% PVS는 18.4%이며 반전된 후 SRSD 방식의 지반진동속도는 거리 200m에서 CRSD 보다 PPV가 24.4% 크고 PVS는 21.1% 더 큰 것으로 예측되었다.

전반적으로 지발당 장약량이 커질수록 근거리에서 지반진동속도가 커지는 것으로

예측되고 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도 차이가 줄어들며 반전되는 거리 또한 줄어드는 것으로 확인되었다.

Fig. 3.22에서 환산거리(SD)에 따른 PPV와 PVS 추정식을 국내 가이드라인(국토해양부, 2006)과 비교하였다. 우선 PPV와 PVS 추정식은 SD 방식으로 예측되는 지반진동속도의 변화가 거의 유사하고 약 140m선에서 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도가 반전된다. 그리고 SRSD로 제안된 G.L 추정식과 시험발파에 의한 SRSD 방식의 추정식을 비교해 보면 약 15m의 매우 근거리에서는 G.L의 지반진동속도가 높지만 기울기가 커 진동속도의 감소가 큰 반면 시험발파에 의한 지반진동속도 추정식은 상대적으로 원거리까지 진동이 발생하는 것으로 예측되었다.

Fig. 3.23에서는 지반의 허용 진동속도를 재래주택 수준인 0.3cm/s로 가정하여 PPV와 PVS 지반진동속도 추정식을 이용해 거리에 따른 지발당 허용 장약량을 예측하였다. SD방식에 따라서는 두 가지가 비슷한 경향을 보이며 근거리에서 지반진동속도가 크게 예측되는 CRSD 방식은 SRSD 방식에 비해 지발당 허용 장약량이 작고 반전점 이 후에 커진다. 그리고 G.L 추정식과 유사한 기울기를 보이는 SRSD 방식의 추정식들도 지반진동속도가 더 높게 예측되었기 때문에 지발당 허용 장약량이 작고 원거리까지 유지된다.

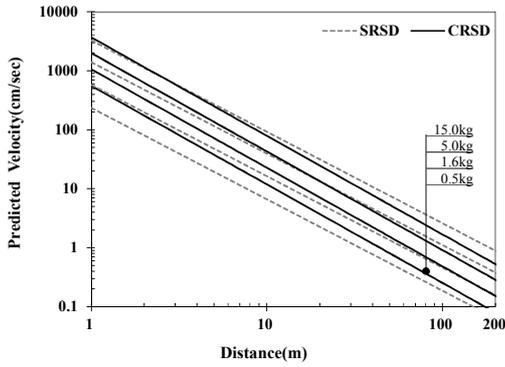
지반진동에 의한 각 성분별(T, V, L) 입자속도와 주파수를 Fig. 3.24에 나타내었고 Fig. 3.25와 같이 도수분포표를 작성하였다. 각 성분별 주파수 평균은 10.3~12.6Hz이고 최빈값은 8.0~10.0Hz로 분석되었으며 도수분포표에서도 9~12Hz에서 빈도가 매우 높다.

Table 3.7 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.2)

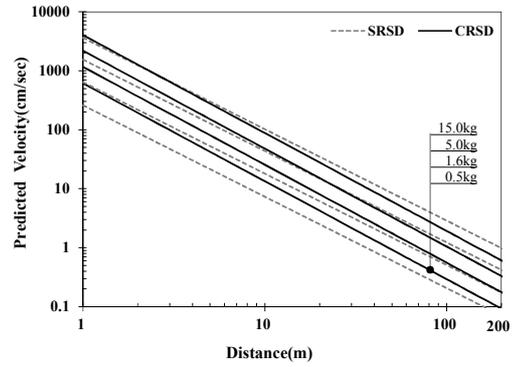
Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	19.34	37.62	94.5	47.65	71.89	50.9	115.23	135.55	17.6	269.97	249.87	-7.4
10	6.61	11.82	79.0	16.27	22.59	38.8	39.35	42.60	8.3	92.20	78.52	-14.8
20	2.26	3.72	64.7	5.56	7.10	27.7	13.44	13.39	-0.4	31.49	24.68	-21.6
40	0.77	1.17	51.5	1.90	2.23	17.6	4.59	4.21	-8.3	10.75	7.75	-27.9
60	0.41	0.59	44.3	1.01	1.13	12.0	2.45	2.14	-12.7	5.74	3.94	-31.3
80	0.26	0.37	39.4	0.65	0.70	8.2	1.57	1.32	-15.7	3.67	2.44	-33.6
100	0.19	0.25	35.8	0.46	0.48	5.3	1.11	0.91	-17.9	2.60	1.68	-35.4
120	0.14	0.19	32.8	0.35	0.36	3.0	0.84	0.67	-19.7	1.96	1.24	-36.8
140	0.11	0.14	30.4	0.27	0.28	1.1	0.66	0.52	-21.1	1.54	0.96	-38.0
160	0.09	0.12	28.3	0.22	0.22	-0.5	0.54	0.42	-22.4	1.25	0.77	-38.9
180	0.07	0.09	26.5	0.18	0.18	-1.9	0.45	0.34	-23.5	1.04	0.63	-39.8
200	0.06	0.08	24.9	0.16	0.15	-3.1	0.38	0.29	-24.4	0.89	0.53	-40.6

Table 3.8 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.2)

Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	21.43	42.26	97.2	52.80	80.44	52.4	127.68	151.11	18.4	299.14	277.52	-7.2
10	7.32	13.37	82.7	18.03	25.45	41.2	43.60	47.82	9.7	102.16	87.82	-14.0
20	2.50	4.23	69.3	6.16	8.05	30.8	14.89	15.13	1.6	34.89	27.79	-20.3
40	0.85	1.34	56.9	2.10	2.55	21.2	5.09	4.79	-5.8	11.91	8.79	-26.2
60	0.46	0.68	50.0	1.12	1.30	15.9	2.71	2.44	-10.0	6.36	4.49	-29.4
80	0.29	0.42	45.3	0.72	0.81	12.3	1.74	1.52	-12.8	4.07	2.78	-31.6
100	0.21	0.29	41.8	0.51	0.56	9.6	1.23	1.05	-14.9	2.88	1.92	-33.3
120	0.16	0.22	39.0	0.38	0.41	7.4	0.93	0.77	-16.6	2.17	1.42	-34.6
140	0.12	0.17	36.7	0.30	0.32	5.6	0.73	0.60	-18.0	1.71	1.10	-35.7
160	0.10	0.13	34.7	0.25	0.26	4.1	0.59	0.48	-19.2	1.39	0.88	-36.6
180	0.08	0.11	32.9	0.20	0.21	2.7	0.49	0.39	-20.2	1.16	0.72	-37.5
200	0.07	0.09	31.4	0.17	0.18	1.5	0.42	0.33	-21.1	0.98	0.61	-38.2

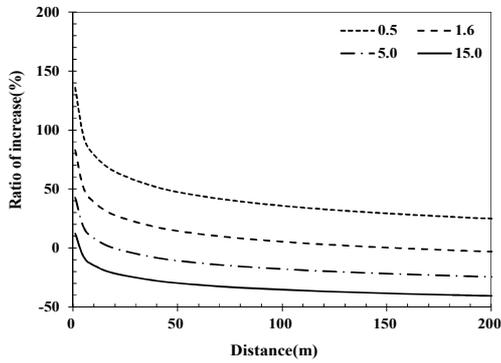


(a) PPV

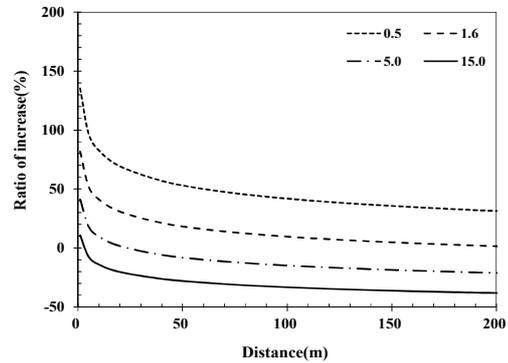


(b) PVS

Fig. 3.20 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.2)



(a) PPV



(b) PVS

Fig. 3.21 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.2)

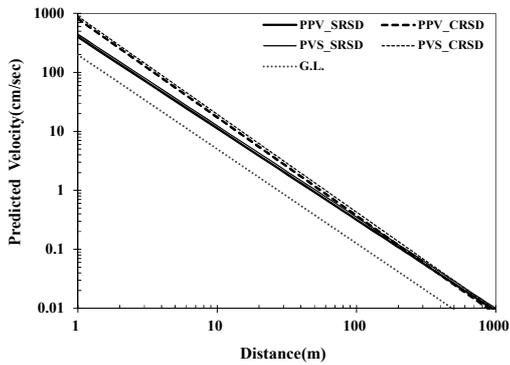


Fig. 3.22 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.2)

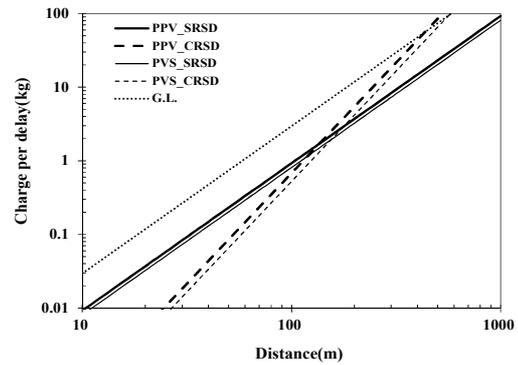


Fig. 3.23 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.2)

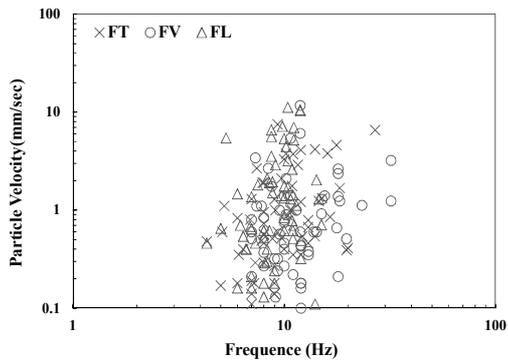


Fig. 3.24 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.2)

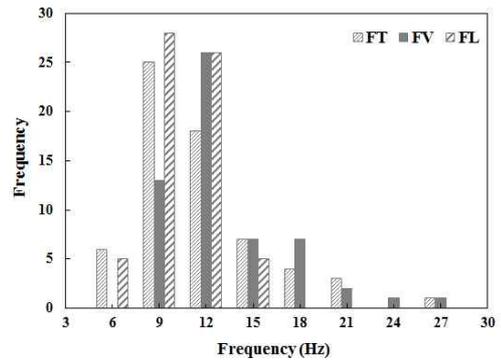


Fig. 3.25 Frequency distribution (Test Blast No.2)

### 다. 시험발파 No.3

8번의 시험발파를 통해 55개의 지반진동 데이터가 계측되었다.

#### 1) 지반진동속도 예측

PPV와 PVS에 대한 거리와의 관계를 Fig. 3.26에서 보여주고 있으며, Table 3.9는 Fig. 3.27과 3.28에서와 같이 시험발파 데이터를 대수눈금 그래프에서 회귀분석한 신뢰도 50%, 95%에서 PPV와 PVS의 지반진동속도 예측식이다.

그리고 Fig. 3.29는 시험발파를 통해 계측된 진동데이터에서 각 성분별 진동속도 데이터를 회귀분석한 신뢰도 95%의 결과이며,  $V_T$ 는 접선방향 성분의 진동속도,  $V_V$ 는 수직방향 성분의 진동속도,  $V_L$ 은 진행방향 성분의 진동속도이다.

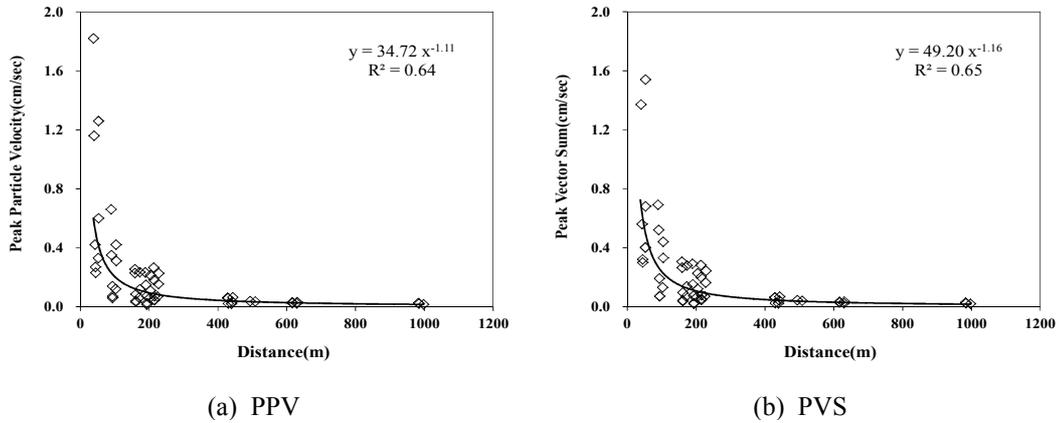
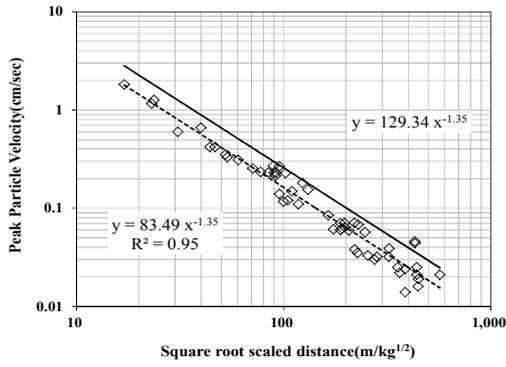


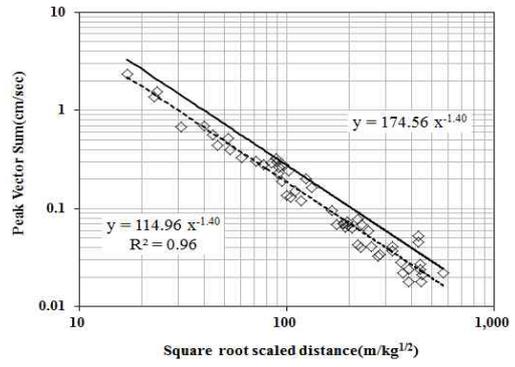
Fig. 3.26 Relationship between Distances and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.3)

Table 3.9 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity(PPV) and Peak Vector Sum(PVS) (Test Blast No.3)

Peak Particle Velocity(PPV, cm/s)				
SD method	Reliability	Predictive Equation	R	S.E
Square root	50%	$V = 83.49(SD)^{-1.35}$	0.98	0.12
	95%	$V = 129.34(SD)^{-1.35}$		
Cube root	50%	$V = 121.23(SD)^{-1.40}$	0.96	0.14
	95%	$V = 209.92(SD)^{-1.40}$		
Peak Vector Sum(PVS, cm/s)				
Square root	50%	$V = 114.96(SD)^{-1.40}$	0.98	0.11
	95%	$V = 174.56(SD)^{-1.40}$		
Cube root	50%	$V = 172.12(SD)^{-1.45}$	0.97	0.14
	95%	$V = 289.47(SD)^{-1.45}$		

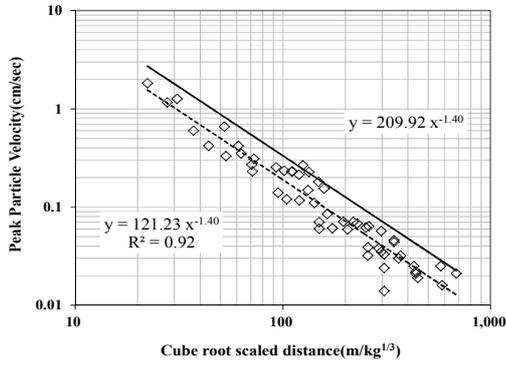


(a) PPV

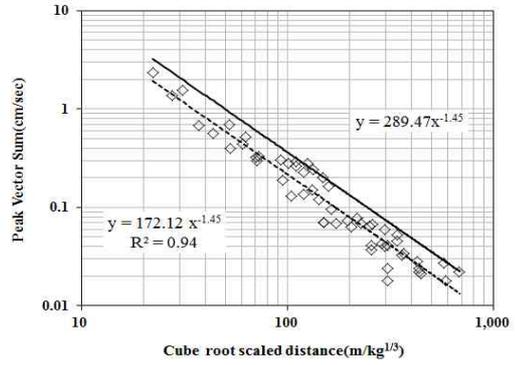


(b) PVS

Fig. 3.27 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.3)

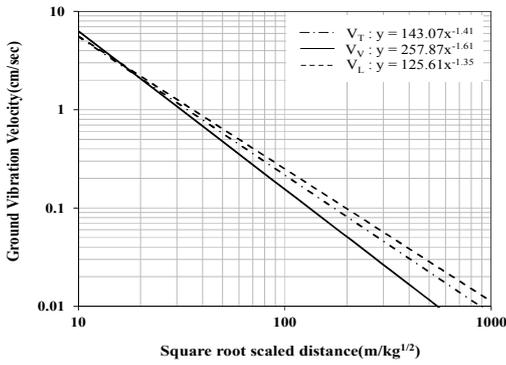


(a) PPV

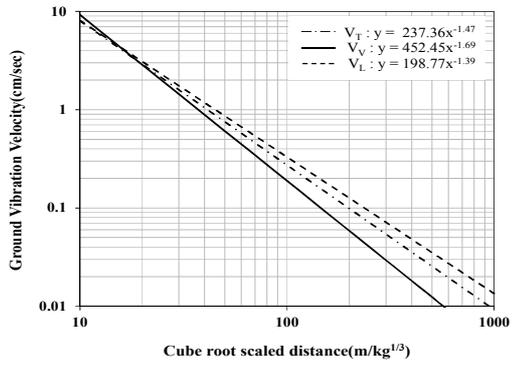


(b) PVS

Fig. 3.28 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.3)



(a) SRSD



(b) CRSD

Fig. 3.29 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No.3)

## 2) 지반 진동 분석

Table 3.9에서 예측된 최대입자속도(PPV)와 최대벡터합(PVS)의 95% 지반진동속도 추정식을 이용하여 지발당 장약량을 기준으로 환산거리(Scale Distance) 방식에 따른 지반진동속도의 차이를 Table 3.10과 3.11에서 비교하고 Fig. 3.30과 3.31에 나타내었다.

지발당 장약량 0.5kg일 때, PPV와 PVS 추정식은 거리 200m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 큰 것으로 예측되고 SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 73.0% PVS는 77.8%로 PPV 보다 조금 작고 거리 200m에서는 PPV가 43.9% PVS는 47.9%로 감쇠기울기의 차이를 보이는 것으로 예측되었다.

지발당 장약량 5.0kg일 때, PPV 추정식은 거리 20m까지 PVS 추정식은 거리 40m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 크고 이후 반전되어 SRSD 방식의 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고, SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 7.1% PVS는 8.0%이며 반전된 후 SRSD 방식의 지반진동속도는 거리 200m에서 CRSD 보다 PPV가 10.9% 크고 PVS는 10.2% 더 큰 것으로 예측되었다.

전반적으로 지발당 장약량이 커질수록 근거리에서 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도 차이가 줄어들며 반전되는 거리 또한 줄어드는 것으로 확인되었다.

Fig. 3.32에서 환산거리(SD)에 따른 PPV와 PVS 추정식을 국내 가이드라인(국토해양부, 2006)과 비교하였다. 우선 PPV와 PVS 추정식은 SD 방식으로 예측되는 지반진동속도의 변화가 거의 유사하고 약 200m선에서 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도가 반전된다. 그리고 SRSD로 제안된 G.L 추정식과 시험발파에 의한 SRSD 방식의 추정식을 비교해 보면 약 15m의 매우 근거리에서는 G.L의 지반진동속도가 높지만 기울기가 커 진동속도의 감소가 큰 반면 시험발파에 의한 지반진동속도 추정식은 상대적으로 원거리까지 진동이 발생하는 것으로 예측되었다.

Fig. 3.33에서는 지반의 허용 진동속도를 재래주택 수준인 0.3cm/s로 가정하여 PPV와 PVS 지반진동속도 추정식을 이용해 거리에 따른 지발당 허용 장약량을 예측하였다. SD방식에 따라서는 두 가지가 비슷한 경향을 보이며 근거리에서 지반진동속도가 크게 예측되는 CRSD 방식은 SRSD 방식에 비해 지발당 허용 장약량이 작고 반전점 이 후에 커진다. 그리고 G.L 추정식과 유사한 기울기를 보이는 SRSD 방식의 추정식들도 지반진동속도가 더 높게 예측되었기 때문에 지발당 허용 장약량이 작고 원거리까지 유지된다.

지반진동에 의한 각 성분별(T, V, L) 입자속도와 주파수를 Fig. 3.34에 나타내었고 Fig. 3.35와 같이 도수분포표를 작성하였다. 각 성분별 주파수 평균은 10.2~14.4Hz이고 최빈값은 5.0~17.7Hz로 분석되었으며 도수분포표에서도 9~18Hz에서 빈도가 매우 높다.

Table 3.10 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.3)

Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	81.01	151.90	87.5	177.63	261.40	47.2	383.29	444.87	16.1	804.61	742.84	-7.7
10	9.22	15.96	73.0	20.23	27.46	35.8	43.64	46.74	7.1	91.62	78.04	-14.8
20	3.62	6.05	67.1	7.93	10.41	31.2	17.12	17.71	3.4	35.94	29.57	-17.7
40	1.42	2.29	61.4	3.11	3.94	26.7	6.72	6.71	-0.1	14.10	11.21	-20.5
60	0.56	0.87	55.9	1.22	1.49	22.4	2.63	2.54	-3.5	5.53	4.25	-23.2
80	0.32	0.49	52.8	0.71	0.85	19.9	1.52	1.44	-5.4	3.20	2.41	-24.8
100	0.22	0.33	50.6	0.48	0.57	18.2	1.03	0.96	-6.8	2.17	1.61	-25.8
120	0.16	0.24	49.0	0.35	0.41	16.9	0.76	0.71	-7.8	1.61	1.18	-26.7
140	0.13	0.19	47.6	0.28	0.32	15.8	0.60	0.55	-8.6	1.26	0.91	-27.3
160	0.10	0.15	46.5	0.23	0.26	14.9	0.49	0.44	-9.3	1.02	0.74	-27.9
180	0.09	0.12	45.5	0.19	0.21	14.2	0.41	0.37	-9.9	0.85	0.61	-28.4
200	0.07	0.11	44.6	0.16	0.18	13.5	0.35	0.31	-10.5	0.73	0.52	-28.8

Table 3.11 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.3)

Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	11.29	20.07	77.8	25.48	35.22	38.2	56.58	61.08	8.0	122.08	103.88	-14.9
10	4.28	7.35	71.7	9.66	12.89	33.5	21.44	22.36	4.3	46.26	38.02	-17.8
20	1.62	2.69	65.9	3.66	4.72	28.9	8.12	8.18	0.7	17.53	13.92	-20.6
40	0.61	0.98	60.2	1.39	1.73	24.5	3.08	3.00	-2.7	6.64	5.09	-23.3
60	0.35	0.55	57.0	0.79	0.96	22.0	1.75	1.66	-4.7	3.77	2.83	-24.8
80	0.23	0.36	54.8	0.53	0.63	20.3	1.17	1.10	-6.0	2.52	1.86	-25.9
100	0.17	0.26	53.1	0.38	0.46	19.0	0.85	0.79	-7.1	1.84	1.35	-26.7
120	0.13	0.20	51.7	0.30	0.35	17.9	0.66	0.61	-7.9	1.43	1.04	-27.4
140	0.11	0.16	50.5	0.24	0.28	17.0	0.53	0.49	-8.6	1.15	0.83	-28.0
160	0.09	0.13	49.5	0.20	0.23	16.2	0.44	0.40	-9.2	0.95	0.68	-28.4
180	0.07	0.11	48.6	0.17	0.20	15.5	0.37	0.34	-9.7	0.81	0.58	-28.9
200	0.06	0.10	47.9	0.15	0.17	14.9	0.32	0.29	-10.2	0.70	0.49	-29.2

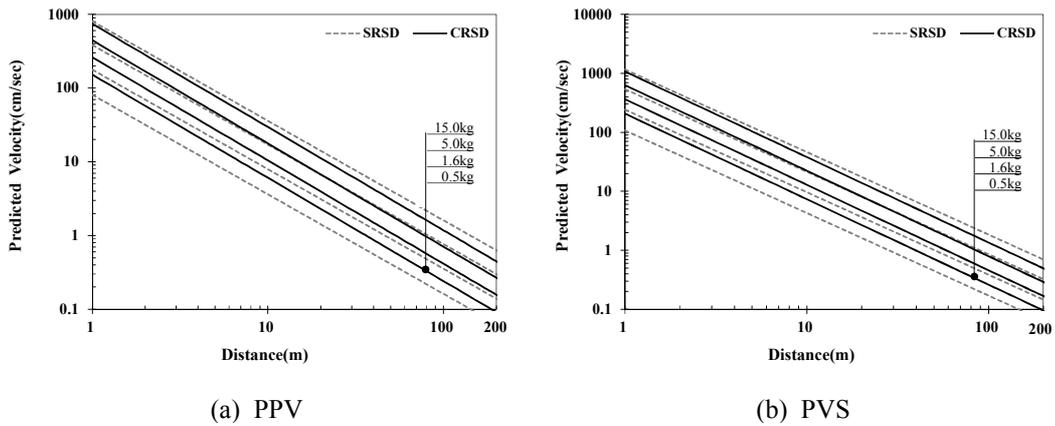
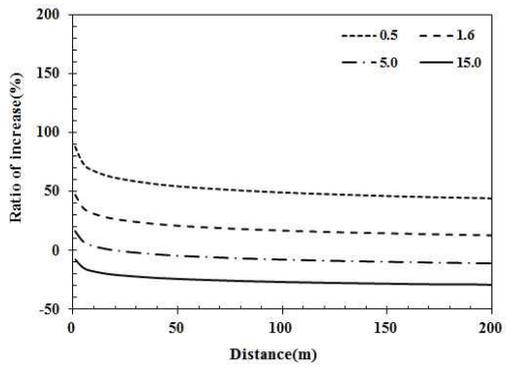
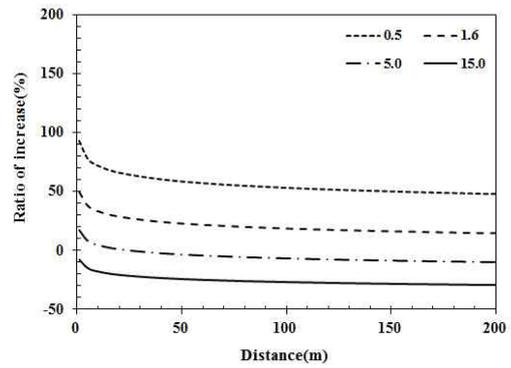


Fig. 3.30 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.3)



(a) PPV



(b) PVS

Fig. 3.31 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.3)

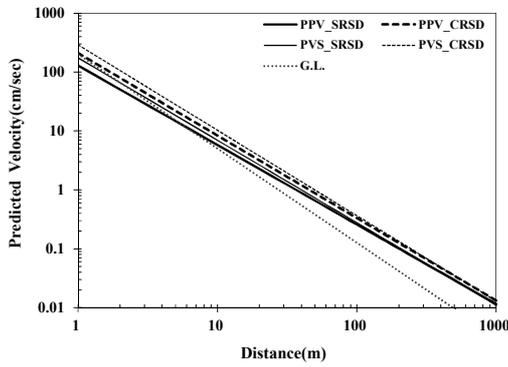


Fig. 3.32 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.3)

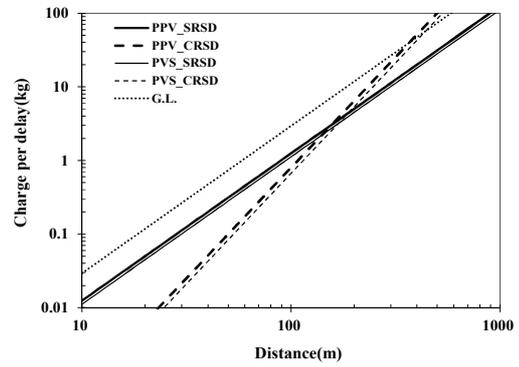


Fig. 3.33 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.3)

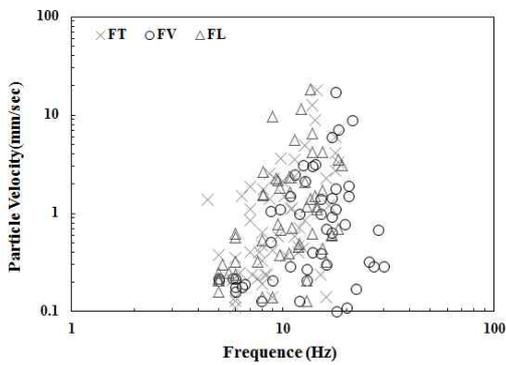


Fig. 3.34 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.3)

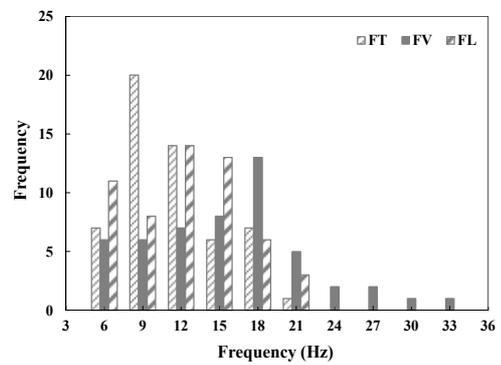


Fig. 3.35 Frequency distribution (Test Blast No.3)

### 3.3 사이트. 2

#### 3.3.1 지질 및 지반 특성

기간을 두고 시험발파가 총 4회 이루어진 사이트. 2 지역은 제주특별자치도 서귀포시 안덕면 일원이며, 기반암의 특징을 파악하기 위해 한국지질자원연구원 지질정보시스템에서 제공하는 지질도를 확인한 결과 Fig. 3.36과 같이 후기 화산활동시기 화산암인 왕이매조면현무암(Qwtb)으로 조사되었다.

왕이매조면현무암(Qwtb)은 회색 내지 암회색이며, 이 암석은 일반적으로 치밀 견고하고 부분적으로 기공이 함유되어 있는데, 대부분은 길게 신장되어 있고 반정으로는 2~3 mm 크기의 감람석이 10 cm<sup>2</sup>의 단위면적에 5~10개 정도 분포하는 특징이 있다. 화학적 조성은  $SiO_2$ 가 47.5wt%~49.90wt%,  $Na_2O$ 는 2.76wt%~3.75wt%,  $K_2O$ 는 1.07wt%~2.01wt%의 범위이고  $Na_2O+K_2O$ 는 4.07wt%~5.76wt%의 범위에 해당한다(Park et al., 2000a).

$SiO_2$ 와  $Na_2O+K_2O$ 의 조성비를 이용한 화산암류 분류법인 TAS도(Total Alkali-Silica diagram; Le Maitre, 1984)에 도시한 결과는 Fig. 3.37과 같이 현무암내지 조면현무암으로 분류되었다.

암반의 단위중량은 2.37~2.61g/cm<sup>3</sup>, 비중은 2.47~2.612, 흡수율은 0.32~1.27%이고 일축압축강도 51.3~136.3MPa까지 다양하다. 그리고 암반과 암반사이에 협재되어 있는 클링커층의 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)에 의한 N치 값은 10회/30cm~50회/5cm 범위를 나타내고 있으며 암괴로 구성된 구간은 시험이 실시되지 않았다. 측정된 N값은 암편들 간의 공극 차이에 따라 매우 높은 값을 나타내거나 매우 낮은 값으로 측정되기도 하므로 SPT에 의한 N값으로부터 이론적·경험적인 방법으로 클링커층의 역학적 특성을 정량화하기 매우 어렵다.

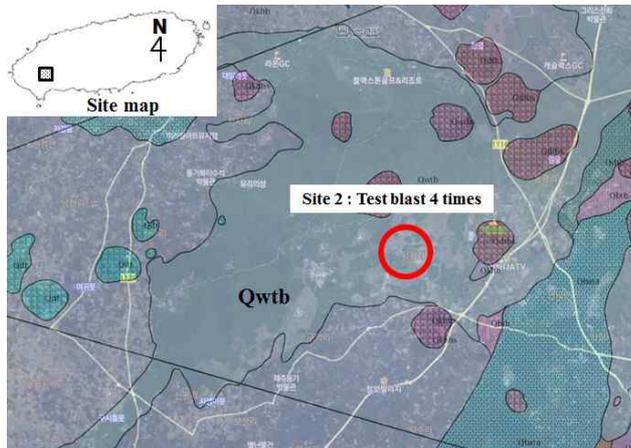


Fig. 3.36 Geologic Map of Site. 2

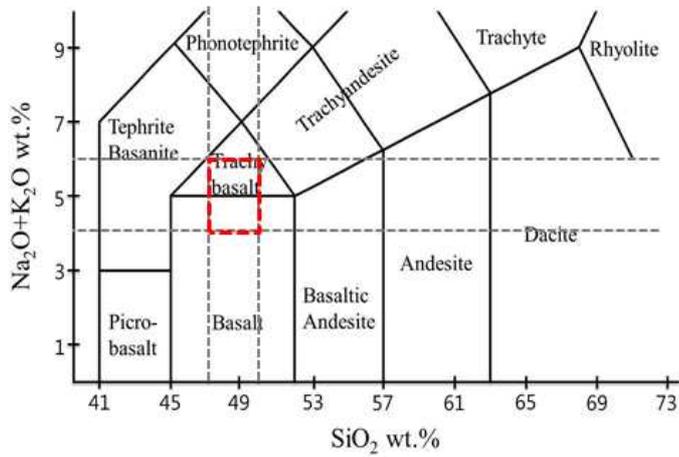


Fig. 3.37 Classification of the Basalt according to TAS Diagram (Site. 2)

### 3.3.2 시험발파 분석

#### 3.3.2.1 실험방법

시험발파 위치는 제주 서부지역에 위치한 현장으로서 인근 보안물건의 영향범위를 고려한 4회의 시험발파가 각각 6번, 4번, 5번, 그리고 6번 실시되어 총 21번의 시험발파가 진행되었다.

가. 시험발파 No.4

시험발파는 소규모진동제어발파, 중규모진동제어발파와 일반발파를 적용하였으며 시험발파 조건은 Table 3.12와 같다. 그리고 시험발파 수행 순서는 소규모진동제어발파(6공→10공) → 중규모진동제어발파(6공→10공) → 일반발파(6공→10공)의 순으로 진행되었으며, 일반발파는 발파 시 클링커층을 피하기 위해 대안 발파패턴을 적용하여 지발당 장약량은 일반발파로 유지한 상태에서 천공제원 및 장약제원은 중규모 발파패턴으로 적용하여 실시되었다.

Table 3.12 Experimental Condition of Test Blast No.4

Description	Unit	TYPE III	TYPE IV	TYPE V
Drilling length	m	2.7	3.4	3.4
Burden	m	1.0	1.6	1.6
Spacing	m	1.2	1.9	1.9
Drilled hole diameter	mm	50	50	76
Charge per hole	kg	1.00	3.0	3.0
Charge per delay	kg	1.00	3.0	6.0
Explosive diameter	mm	25	32	50
Explosive	-	Emulsion		
Holes	-	6, 10	6, 10	6, 10

시험발파는 Fig. 3.38과 같이 구성되었으며, 발파진동 계측을 위하여 각각 9기의 계측기가 설치되었고 시험발파 폭원으로부터 각 계측기까지의 이격거리는 최소 31.7m에서 최대 525m이다.

제어불가능한 발파진동의 영향요인인 지반조건을 확인하기 위해 시험발파 현장의 지반조사보고서로부터 지층단면도(Section B-B')를 시험발파 지역의 대표 지층단면으로 설정하여 지반특성을 검토하였다.

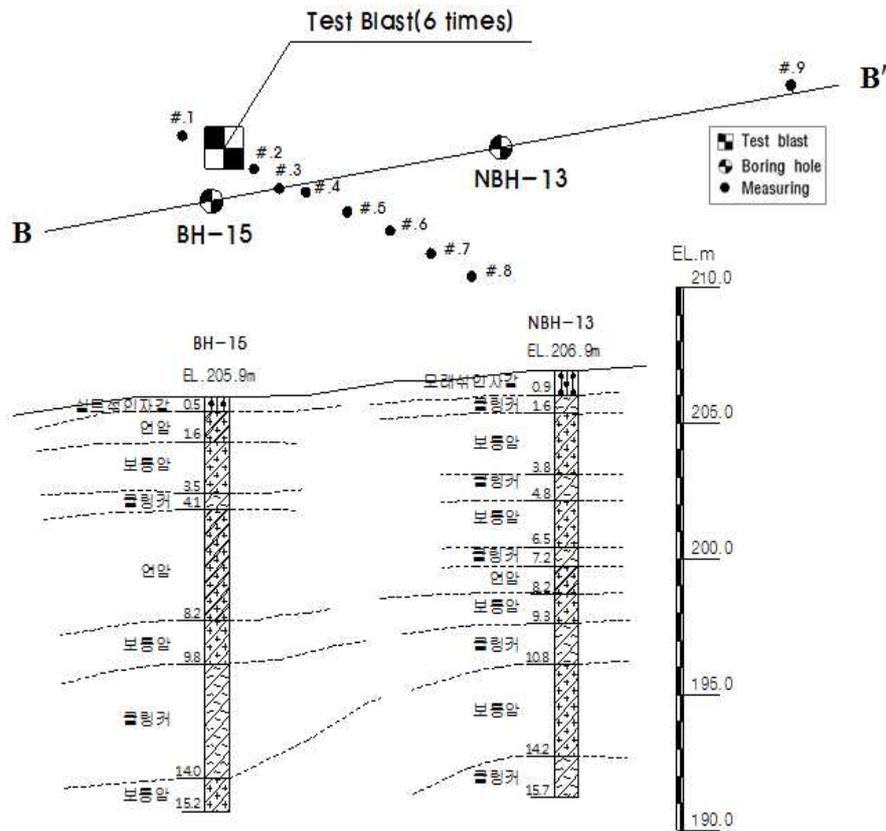


Fig. 3.38 Geological Profile(B-B') and Composition of Test Blast No.4

#### 나. 시험발파 No.5

시험발파는 Low bench, 소규모진동제어발파, 중규모진동제어발파와 일반발파를 적용하였으며 시험발파 조건은 Table 3.13과 같다. 그리고 시험발파 수행 순서는 LOW bench (7공) → 소규모진동제어발파(10공) → 중규모진동제어발파(8공) → 중규모진동제어발파(8공)의 순으로 진행되었다.

시험발파는 Fig. 3.39와 같이 구성되었으며, 발파진동 계측을 위하여 각각 9기의 계측기가 설치되었고 시험발파 폭원으로부터 각 계측기까지의 이격거리는 최소 40m에서 최대 240m이다. 제어불가능한 발파진동의 영향요인인 지반조건을 확인하기 위해 시험발파 현장의 지반조사보고서로부터 지층단면도(C-C')를 시험발파 지역의 대표 지층단면으로 설정하여 지반특성을 검토하였다.

Table 3.13 Experimental Condition of Test Blast No.5

Description	Unit	TYPE I	TYPE III	TYPE IV	
Drilling length	m	1.5	2.7	3.4	
Burden	m	0.7	1.0	1.6	
Spacing	m	0.7	1.2	1.9	
Drilled hole diameter	mm	50	50	76	
Charge per hole	kg	0.25	1.00	4.00	3.00
Charge per delay	kg	0.25	1.00	4.00	3.00
Explosive diameter	mm	25	32	50	
Explosive	-	Emulsion			
Holes	-	7	10	8	8

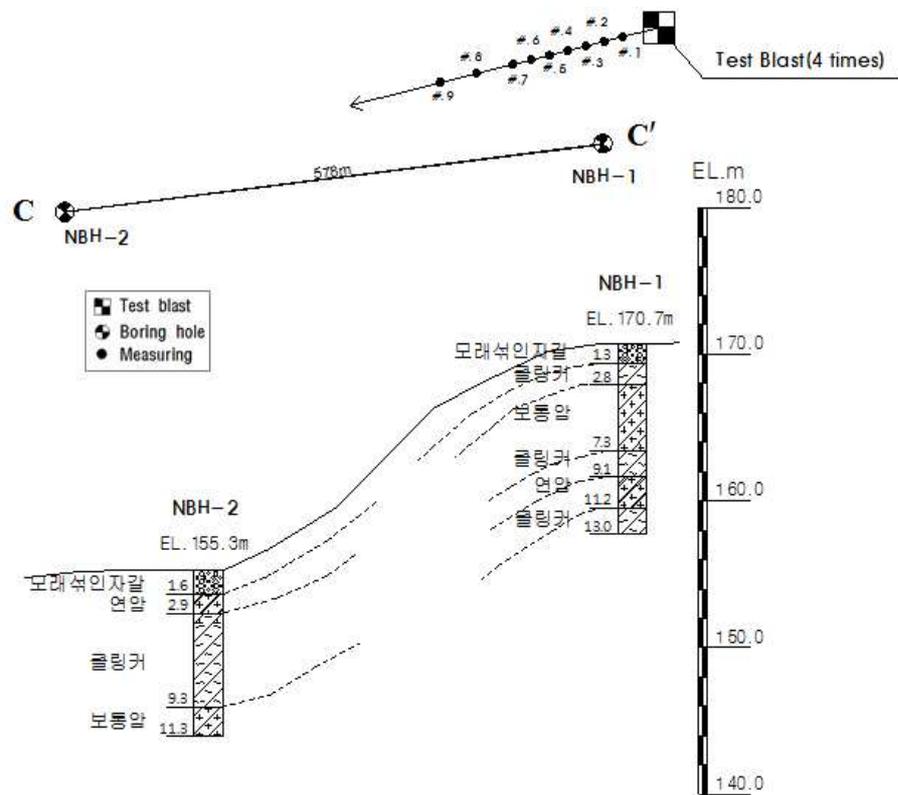


Fig. 3.39 Geological Profile(C-C') and Composition of Test Blast No.5

다. 시험발파 No.6

시험발파 조건은 Table 3.14와 같다. 그리고 시험발파 수행 순서는 Low bench (7공) → 소규모진동제어발파(8공) → 중규모진동제어발파(8공) → 중규모진동제어 발파(8공) → 중규모진동제어발파(8공)의 순으로 진행되었다.

Table 3.14 Experimental Condition of Test Blast No.6

Description	Unit	TYPE I	TYPE III	TYPE IV		
Drilling length	m	1.5	2.7	3.4		
Burden	m	0.7	1.0	1.6		
Spacing	m	0.7	1.2	1.9		
Drilled hole diameter	mm	50	50	76		
Charge per hole	kg	0.25	1.00	4.50	4.00	3.00
Charge per delay	kg	0.25	1.00	4.50	4.00	3.00
Explosive diameter	mm	25	32	50		
Explosive	-	Emulsion				
Holes	-	7	8	8	8	8

시험발파는 Fig. 3.40과 같이 구성되었으며, 발파진동 계측을 위하여 각각 9기의 계측기가 설치되었고 시험발파 폭발으로부터 각 계측기까지의 이격거리는 최소 40m에서 최대 240m이다.

제어불가능한 발파진동의 영향요인인 지반조건을 확인하기 위해 시험발파 현장의 지반조사보고서로부터 지층단면도(D-D')를 시험발파 지역의 대표 지층단면으로 설정하여 지반특성을 검토하였다.

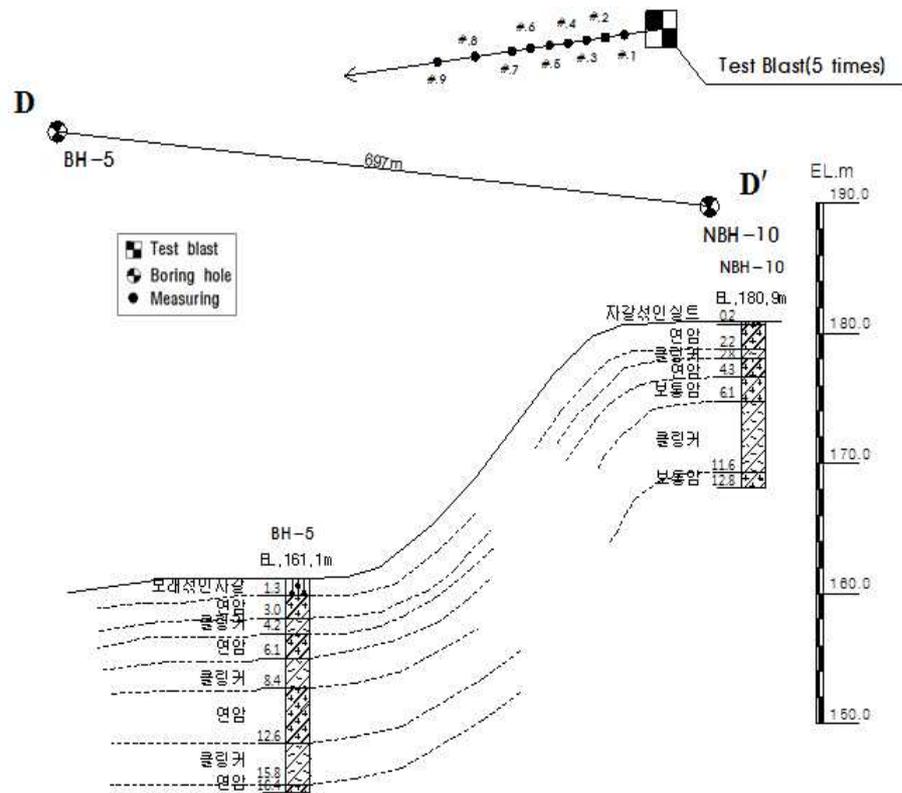


Fig. 3.40 Geological Profile(D-D') and Composition of Test Blast No.6

라. 시험발파 NO.7

시험발파 조건은 Table 3.15와 같다. 그리고 시험발파 수행 순서는 LOW bech (7공) → 중규모진동제어발파(8공) → 중규모진동제어발파(8공) → 소규모진동제어 발파(8공) → 중규모진동제어발파(8공) → 중규모진동제어발파(8공)의 순으로 진행 되었다.

Table 3.15 Experimental Condition of Test Blast No.7

Description	Unit	TYPE I	TYPE III	TYPE IV			
Drilling length	m	1.5	2.7	3.4			
Burden	m	0.7	1.0	1.6			
Spacing	m	0.7	1.2	1.9			
Drilled hole diameter	mm	50	50	76			
Charge per hole	kg	0.25	1.00	4.00	8.00	8.00	8.00
Charge per delay	kg	0.25	1.00	4.00	8.00	8.00	8.00
Explosive diameter	mm	25	32	50			
Explosive	-	Emulsion					
Holes	-	8	8	8		8	8

시험발파는 Fig. 3.41과 같이 구성되었으며, 발파진동 계측을 위하여 각각 9기의 계측기가 설치되었고 시험발파 폭발으로부터 각 계측기까지의 이격거리는 최소 40m에서 최대 240m이다.

제어불가능한 발파진동의 영향요인인 지반조건을 확인하기 위해 시험발파 현장의 지반조사보고서로부터 지층단면도(E-E')를 시험발파 지역의 대표 지층단면으로 설정하여 지반특성을 검토하였다.

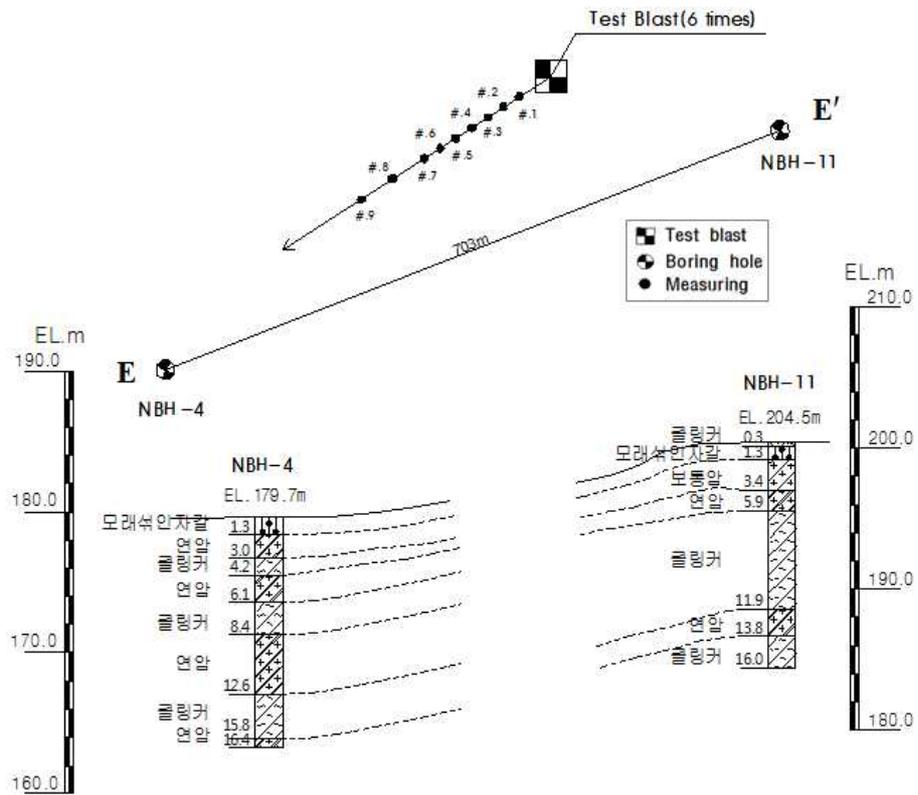


Fig. 3.41 Geological Profile(E-E') and Composition of Test Blast No.7

### 3.3.2.2 시험발파 분석

#### 가. 시험발파 No.4

6번의 시험발파를 통해 47개의 지반진동 데이터가 계측되었다.

#### 1) 지반진동속도 예측

PPV와 PVS에 대한 거리와의 관계를 Fig. 3.42에서 보여주고 있으며, Table 3.16은 Fig. 3.43과 3.44에서와 같이 시험발파 데이터를 대수눈금 그래프에서 회귀분석한 신뢰도 50%, 95%에서 PPV와 PVS의 지반진동속도 예측식이다.

그리고 Fig. 3.45는 시험발파를 통해 계측된 진동데이터에서 각 성분별 진동속도

데이터를 회귀분석한 신뢰도 95%의 결과이며,  $V_T$ 는 접선방향 성분의 진동속도,  $V_V$ 는 수직방향 성분의 진동속도,  $V_L$ 은 진행방향 성분의 진동속도이다.

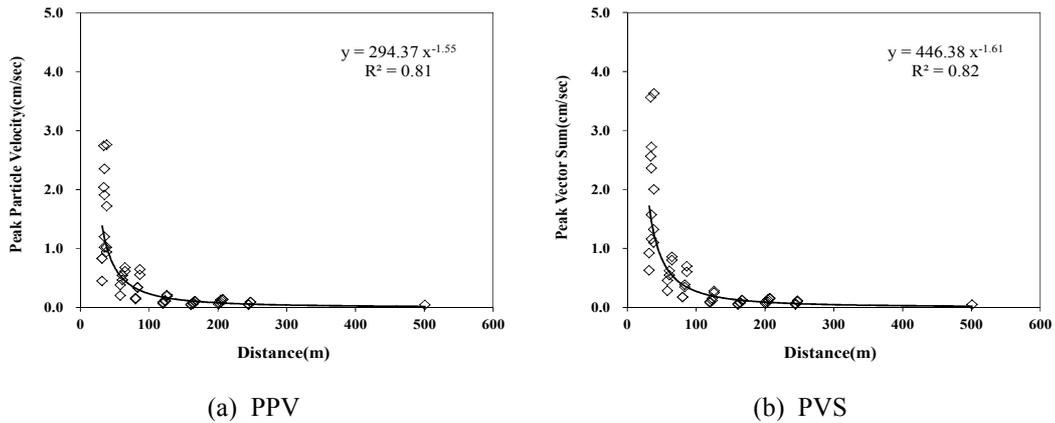
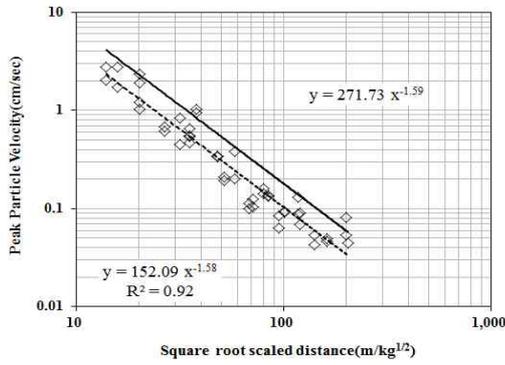


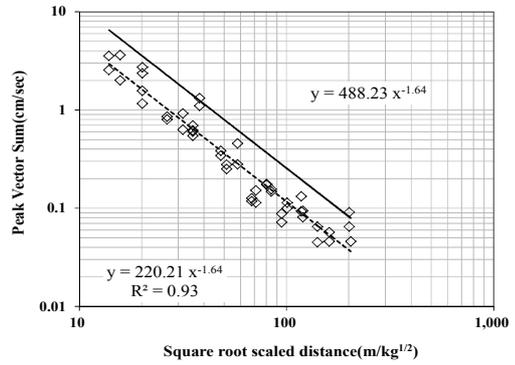
Fig. 3.42 Relationship between Distances and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.4)

Table 3.16 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity(PPV) and Peak Vector Sum(PVS) (Test Blast No.4)

Peak Particle Velocity(PPV, cm/s)				
SD method	Reliability	Predictive Equation	R	S.E
Square root	50%	$V = 152.09(SD)^{-1.59}$	0.96	0.15
	95%	$V = 271.73(SD)^{-1.59}$		
Cube root	50%	$V = 273.52(SD)^{-1.66}$	0.97	0.14
	95%	$V = 469.45(SD)^{-1.66}$		
Peak Vector Sum(PVS, cm/s)				
Square root	50%	$V = 220.21(SD)^{-1.64}$	0.93	0.21
	95%	$V = 488.23(SD)^{-1.64}$		
Cube root	50%	$V = 406.92(SD)^{-1.72}$	0.93	0.21
	95%	$V = 913.92(SD)^{-1.72}$		

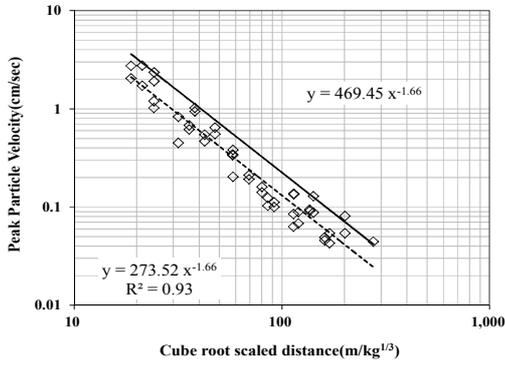


(a) PPV

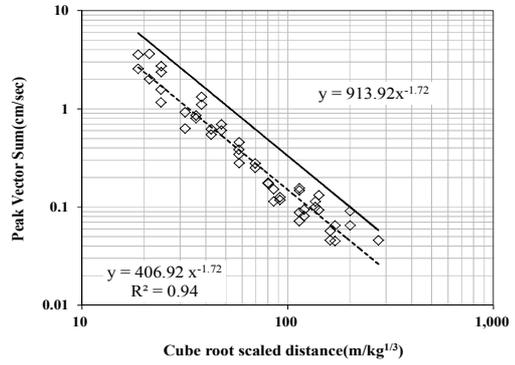


(b) PVS

Fig. 3.43 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.4)

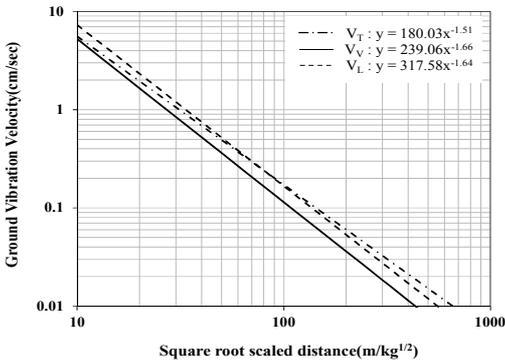


(a) PPV

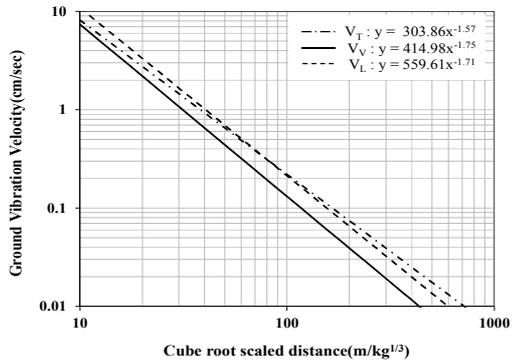


(b) PVS

Fig. 3.44 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.4)



(a) PPV



(b) PVS

Fig. 3.45 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No.4)

## 2) 지반 진동 분석

Table 3.16에서 예측된 최대입자속도(PPV)와 최대벡터합(PVS)의 95% 지반진동 속도 추정식을 이용하여 지발당 장약량을 기준으로 환산거리(Scale Distance) 방식에 따른 지반진동속도의 차이를 Table 3.17과 3.18에서 비교하고 Fig. 3.46과 3.47에 나타내었다.

지발당 장약량 0.5kg일 때, PPV와 PVS 추정식은 거리 200m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 큰 것으로 예측되고 SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 82.5% PVS는 95.3%로 PPV 보다 조금 작고 거리 200m에서는 PPV가 41% PVS는 45.4%로 감쇠기울기의 차이를 보이는 것으로 예측되었다.

지발당 장약량 5.0kg일 때, PPV 추정식은 거리 10m까지 PVS 추정식은 거리 20m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 크고 이후 반전되어 SRSD 방식의 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고, SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 4.6% PVS는 10.6%이며 반전된 후 SRSD 방식의 지반진동속도는 거리 200m에서 CRSD 보다 PPV가 19.2% 크고 PVS는 17.6% 더 큰 것으로 예측되었다.

전반적으로 지발당 장약량이 커질수록 근거리에서 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도 차이가 줄어들며 반전되는 거리 또한 줄어드는 것으로 확인되었다.

Fig. 3.48에서 환산거리(SD)에 따른 PPV와 PVS 추정식을 국내 가이드라인(국토해양부, 2006)과 비교하였다. 우선 PPV와 PVS 추정식은 SD 방식으로 예측되는 지반진동속도의 변화가 거의 유사하고 약 200m선에서 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도가 반전된다. 그리고 SRSD로 제안된 G.L 추정식과 시험발파에 의한 SRSD 방식의 추정식을 비교해 보면 약 15m의 매우 근거리에서는 G.L의 지반진동속도가 높지만 기울기가 커 진동속도의 감소가 큰 반면 시험발파에 의한 지반진동속도 추정식은 상대적으로 원거리까지 진동이 발생하는 것으로 예측되었다.

Fig. 3.49에서는 지반의 허용 진동속도를 재래주택 수준인 0.3cm/s로 가정하여 PPV와 PVS 지반진동속도 추정식을 이용해 거리에 따른 지발당 허용 장약량을 예측하였다. SD방식에 따라서는 두 가지가 비슷한 경향을 보이며 근거리에서 지반진동속도가 크게 예측되는 CRSD 방식은 SRSD 방식에 비해 지발당 허용 장약량이 작고 반전점 이 후에 커진다. 그리고 G.L 추정식과 유사한 기울기를 보이는 SRSD 방식의 추정식들도 지반진동속도가 더 높게 예측되었기 때문에 지발당 허용 장약량이 작고 원거리까지 유지된다.

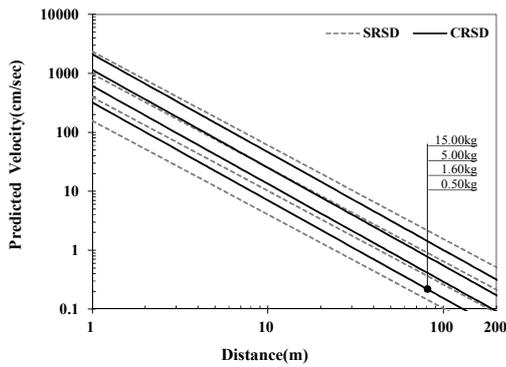
지반진동에 의한 각 성분별(T, V, L) 입자속도와 주파수를 Fig. 50에 나타내었고 Fig. 3.51과 같이 도수분포표를 작성하였다. 각 성분별 주파수 평균은 12.9~18.7Hz이고 최빈값은 9.0~34.1Hz로 분석되었으며 도수분포표에서도 9~21Hz에서 빈도가 매우 높다.

Table 3.17 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.4)

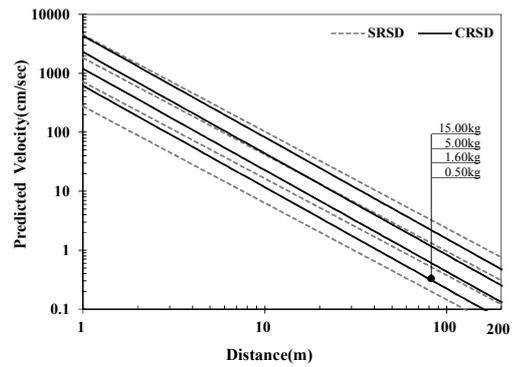
Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	12.12	22.12	82.5	30.55	42.10	37.8	75.59	79.08	4.6	181.04	145.23	-19.8
10	4.03	7.00	73.9	10.15	13.32	31.3	25.11	25.02	-0.3	60.14	45.96	-23.6
20	1.34	2.21	65.6	3.37	4.22	25.0	8.34	7.92	-5.1	19.98	14.54	-27.2
40	0.44	0.70	57.8	1.12	1.33	19.1	2.77	2.51	-9.6	6.64	4.60	-30.6
60	0.23	0.36	53.4	0.59	0.68	15.8	1.45	1.28	-12.1	3.48	2.35	-32.6
80	0.15	0.22	50.3	0.37	0.42	13.5	0.92	0.79	-13.8	2.20	1.46	-33.9
100	0.10	0.15	48.0	0.26	0.29	11.7	0.65	0.55	-15.2	1.55	1.01	-35.0
120	0.08	0.11	46.1	0.20	0.22	10.3	0.48	0.40	-16.2	1.16	0.74	-35.8
140	0.06	0.09	44.5	0.15	0.17	9.1	0.38	0.31	-17.1	0.91	0.58	-36.5
160	0.05	0.07	43.2	0.12	0.13	8.1	0.31	0.25	-17.9	0.73	0.46	-37.1
180	0.04	0.06	42.0	0.10	0.11	7.2	0.25	0.21	-18.6	0.61	0.38	-37.6
200	0.03	0.05	41.0	0.09	0.09	6.4	0.21	0.17	-19.2	0.51	0.32	-38.0

Table 3.18 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.4)

Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	19.75	38.56	95.3	51.25	75.11	46.6	130.46	144.35	10.6	321.15	271.00	-15.6
10	6.34	11.70	84.7	16.44	22.80	38.7	41.86	43.82	4.7	103.04	82.26	-20.2
20	2.03	3.55	74.8	5.28	6.92	31.2	13.43	13.30	-1.0	33.06	24.97	-24.5
40	0.65	1.08	65.3	1.69	2.10	24.1	4.31	4.04	-6.3	10.61	7.58	-28.5
60	0.34	0.54	60.1	0.87	1.05	20.1	2.22	2.01	-9.3	5.46	3.77	-30.8
80	0.21	0.33	56.4	0.54	0.64	17.4	1.38	1.23	-11.4	3.40	2.30	-32.4
100	0.15	0.22	53.7	0.38	0.43	15.3	0.96	0.83	-12.9	2.36	1.57	-33.6
120	0.11	0.16	51.4	0.28	0.32	13.7	0.71	0.61	-14.2	1.75	1.15	-34.6
140	0.08	0.13	49.6	0.22	0.24	12.3	0.55	0.47	-15.2	1.36	0.88	-35.4
160	0.07	0.10	48.0	0.17	0.19	11.1	0.44	0.37	-16.1	1.09	0.70	-36.0
180	0.06	0.08	46.6	0.14	0.16	10.0	0.37	0.30	-16.9	0.90	0.57	-36.6
200	0.05	0.07	45.4	0.12	0.13	9.1	0.31	0.25	-17.6	0.76	0.48	-37.2

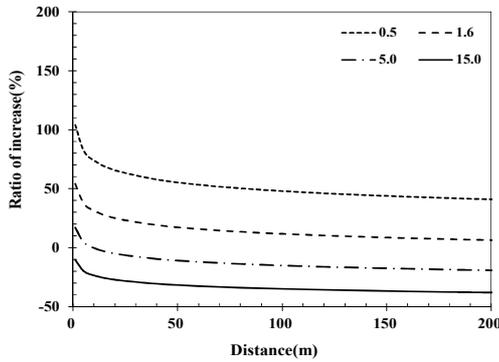


(a) PPV

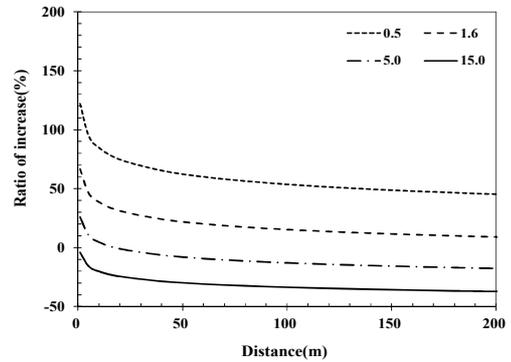


(b) PVS

Fig. 3.46 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.4)



(a) PPV



(b) PVS

Fig. 3.47 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.4)

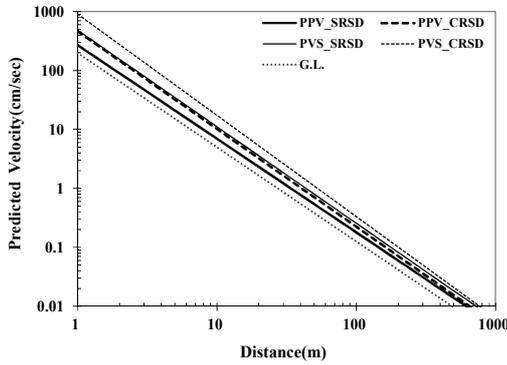


Fig. 3.48 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.4)

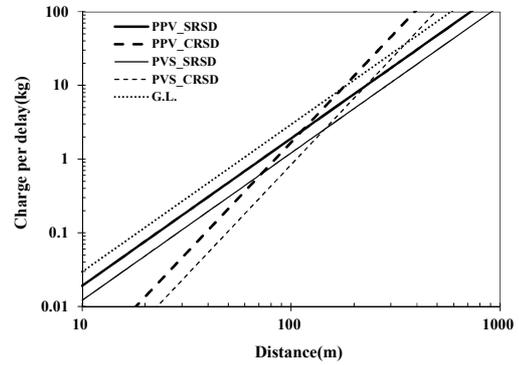


Fig. 3.49 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.4)

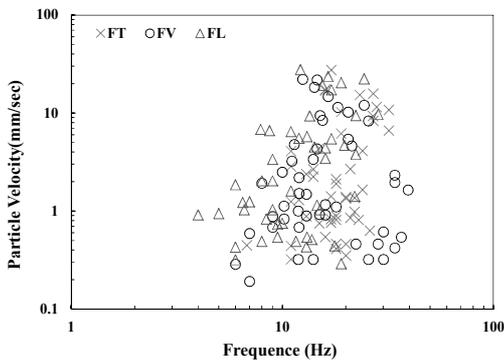


Fig. 3.50 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.4)

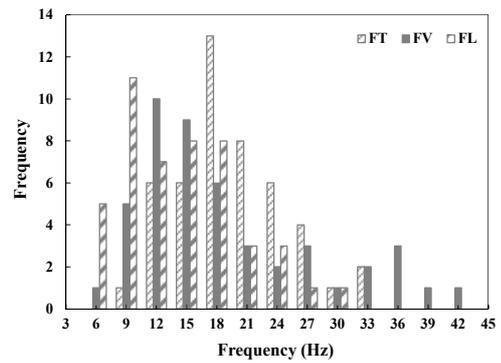


Fig. 3.51 Frequency Distribution (Test Blast No.4)

나. 시험발파 No.5

4번의 시험발파를 통해 30개의 지반진동 데이터가 계측되었다.

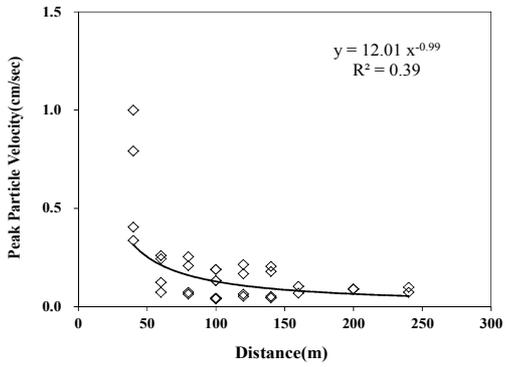
1) 지반진동속도 예측

PPV와 PVS에 대한 거리와의 관계를 Fig. 3.52에서 보여주고 있으며, Table 3.19은 Fig. 3.53과 3.54에서와 같이 시험발파 데이터를 대수눈금 그래프에서 회귀분석한 신뢰도 50%, 95%에서 PPV와 PVS의 지반진동속도 예측식이다.

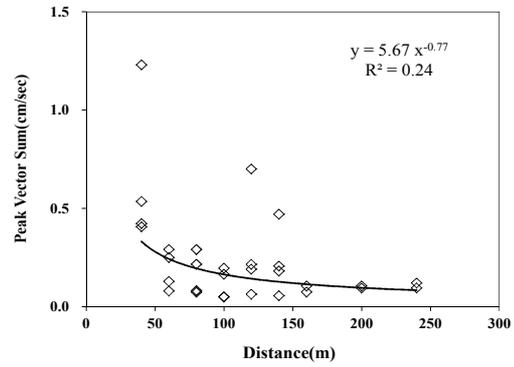
그리고 Fig. 3.55는 시험발파를 통해 계측된 진동데이터에서 각 성분별 진동속도 데이터를 회귀분석한 신뢰도 95%의 결과이며,  $V_T$ 는 접선방향 성분의 진동속도,  $V_V$ 는 수직방향 성분의 진동속도,  $V_L$ 은 진행방향 성분의 진동속도이다.

Table 3.19 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity(PPV) and Peak Vector Sum(PVS) (Test Blast No.5)

Peak Particle Velocity(PPV, cm/s)				
SD method	Reliability	Predictive Equation	R	S.E
Square root	50%	$V = 17.51(SD)^{-1.13}$	0.88	0.18
	95%	$V = 34.02(SD)^{-1.13}$		
Cube root	50%	$V = 43.58(SD)^{-1.31}$	0.88	0.18
	95%	$V = 84.65(SD)^{-1.31}$		
Peak Vector Sum(PVS, cm/s)				
Square root	50%	$V = 2.39(SD)^{-0.61}$	0.48	0.32
	95%	$V = 8.04(SD)^{-0.61}$		
Cube root	50%	$V = 5.33(SD)^{-0.78}$	0.53	0.31
	95%	$V = 17.25(SD)^{-0.78}$		

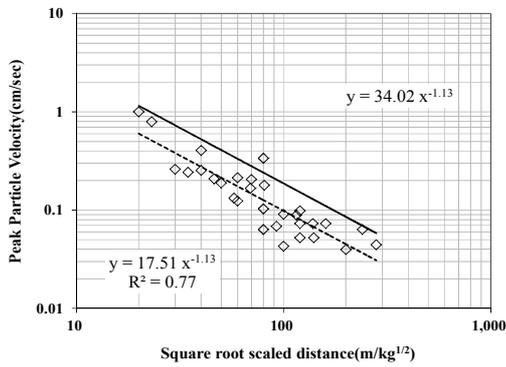


(a) PPV

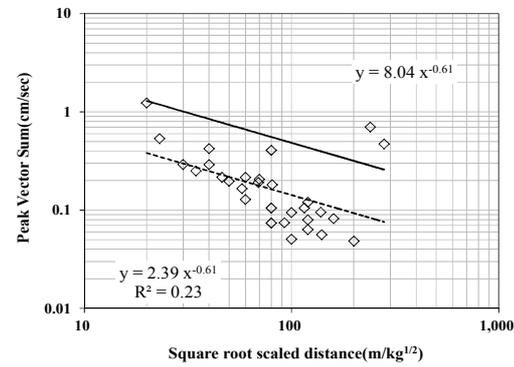


(b) PVS

Fig. 3.52 Relationship between Distances and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.5)

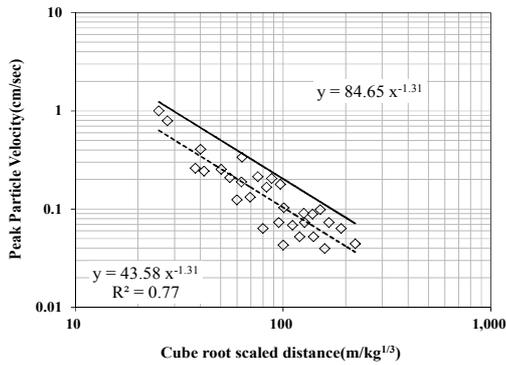


(a) PPV

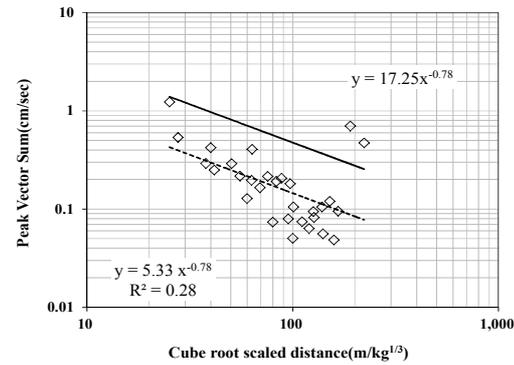


(b) PVS

Fig. 3.53 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.5)



(a) PPV



(b) PVS

Fig. 3.54 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.5)

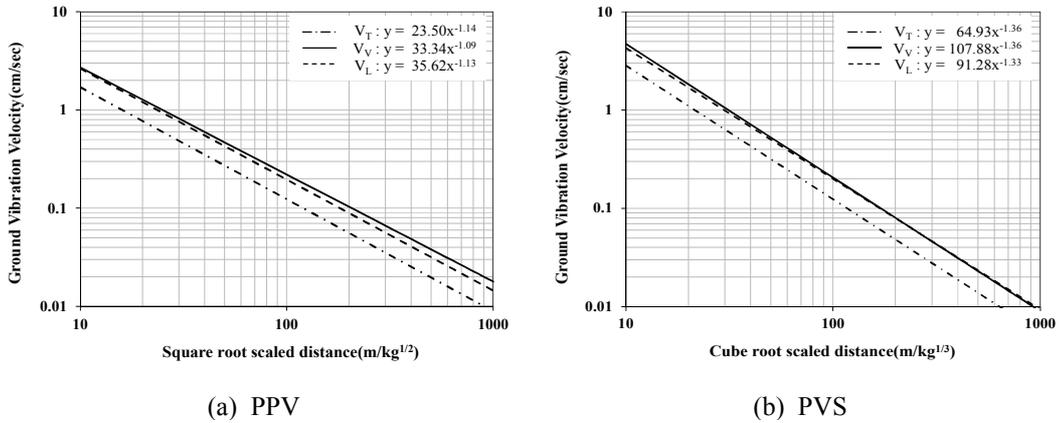


Fig. 3.55 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No.5)

## 2) 지반 진동 분석

Table 3.19에서 예측된 최대입자속도(PPV)와 최대벡터합(PVS)의 95% 지반진동 속도 추정식을 이용하여 지발당 장약량을 기준으로 환산거리(Scale Distance) 방식에 따른 지반진동속도의 차이를 Table 3.20과 3.21에서 비교하고 Fig. 3.56과 3.57에 나타내었다.

지발당 장약량 0.5kg일 때, PPV 추정식은 거리 200m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 큰 것으로 예측되는 반면 와 PVS 추정식은 120m에서 반전되는 것을 확인할 수 있었다. SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 103.6% PVS는 68.5%로 PPV 보다 조금 크고 거리 200m에서는 PPV가 4.8% PVS는 10.0%로 감쇠기울기의 차이를 보이는 것으로 예측되었다.

지발당 장약량 5.0kg일 때, PPV와 PVS 추정식은 거리 60m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 크고 이후 반전되어 SRSD 방식의 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고, SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 51.5% PVS는 51.9%이며 반전된 후 SRSD 방식의 지반진동속도는 거리 200m에서 CRSD 보다 PPV가 22.0% 크고 PVS는 18.9% 더 큰 것으로 예측되었다.

전반적으로 지발당 장약량이 커질수록 근거리에서 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도 차이가 줄어들며 반전되는 거리 또한 줄어드는 것으로 확인되었다.

Fig. 3.58에서 환산거리(SD)에 따른 PPV와 PVS 추정식을 국내 가이드라인(국토해양부, 2006)과 비교하였다. 우선 PPV와 PVS 추정식은 SD 방식으로 예측되는 지반진동속도의 변화가 거의 유사하고 약 140m선에서 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도가 반전된다. 그리고 SRSD로 제안된 G.L 추정식과 시험발파에 의한 SRSD 방식의 추정식을 비교해 보면 약 15m의 매우 근거리에서는 G.L의 지반진동속도가 높지만 기울기가 커 진동속도의 감소가 큰 반면 시험발파에 의한 지반진동속도 추정식은 상대적으로 원거리까지 진동이 발생하는 것으로 예측되었다.

Fig. 3.59에서는 지반의 허용 진동속도를 재래주택 수준인 0.3cm/s로 가정하여 PPV와 PVS 지반진동속도 추정식을 이용해 거리에 따른 지발당 허용 장약량을 예측하였다. SD방식에 따라서는 두 가지가 비슷한 경향을 보이며 근거리에서 지반진동속도가 크게 예측되는 CRSD 방식은 SRSD 방식에 비해 지발당 허용 장약량이 작고 반전점 이 후에 커진다. 그리고 G.L 추정식과 유사한 기울기를 보이는 SRSD 방식의 추정식들도 지반진동속도가 더 높게 예측되었기 때문에 지발당 허용 장약량이 작고 원거리까지 유지된다.

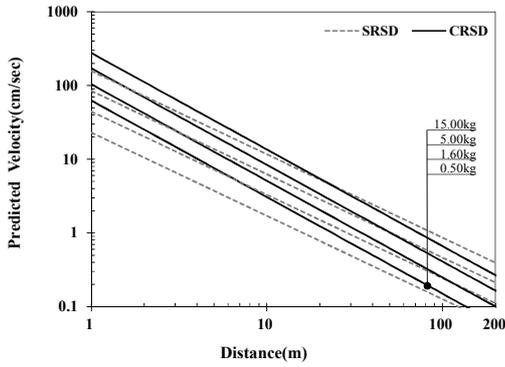
지반진동에 의한 각 성분별(T, V, L) 입자속도와 주파수를 Fig. 3.60에 나타내었고 Fig. 3.61과 같이 도수분포표를 작성하였다. 각 성분별 주파수 평균은 11.5~13.1Hz이고 최빈값은 11.0~14.0Hz로 분석되었으며 도수분포표에서도 10~12Hz에서 빈도가 매우 높다.

Table 3.20 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.5)

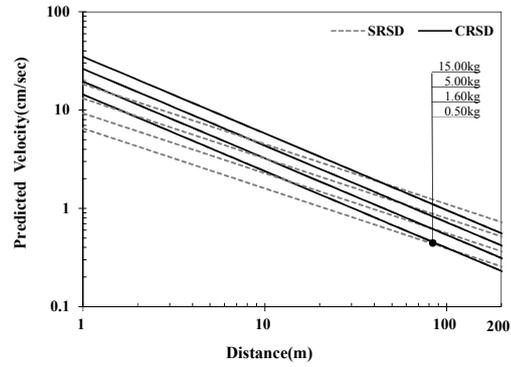
Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	3.73	7.60	103.6	7.20	12.62	75.4	13.70	20.76	51.5	25.49	33.54	31.6
10	1.70	3.06	79.7	3.29	5.09	54.8	6.26	8.37	33.7	11.65	13.53	16.1
20	0.78	1.24	58.6	1.50	2.05	36.6	2.86	3.38	18.0	5.32	5.46	2.5
40	0.36	0.50	40.0	0.69	0.83	20.6	1.31	1.36	4.2	2.43	2.20	-9.5
60	0.23	0.29	30.2	0.43	0.49	12.1	0.83	0.80	-3.1	1.54	1.29	-15.9
80	0.16	0.20	23.6	0.31	0.33	6.5	0.60	0.55	-8.0	1.11	0.89	-20.1
100	0.13	0.15	18.7	0.24	0.25	2.3	0.46	0.41	-11.6	0.86	0.66	-23.3
120	0.10	0.12	14.9	0.20	0.20	-1.0	0.38	0.32	-14.5	0.70	0.52	-25.7
140	0.09	0.10	11.8	0.17	0.16	-3.7	0.32	0.26	-16.8	0.59	0.43	-27.8
160	0.07	0.08	9.1	0.14	0.13	-6.0	0.27	0.22	-18.8	0.51	0.36	-29.5
180	0.07	0.07	6.8	0.13	0.12	-8.0	0.24	0.19	-20.5	0.44	0.31	-31.0
200	0.06	0.06	4.8	0.11	0.10	-9.7	0.21	0.17	-22.0	0.39	0.27	-32.3

Table 3.21 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.5)

Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR									
5	2.44	4.11	68.5	3.47	5.55	59.9	4.92	7.47	51.9	6.88	9.94	44.5
10	1.60	2.39	49.7	2.28	3.23	42.1	3.22	4.35	35.0	4.51	5.79	28.5
20	1.05	1.39	33.1	1.49	1.88	26.3	2.11	2.53	20.0	2.95	3.37	14.2
40	0.69	0.81	18.3	0.98	1.10	12.3	1.38	1.48	6.6	1.93	1.96	1.5
60	0.54	0.59	10.4	0.76	0.80	4.8	1.08	1.08	-0.5	1.51	1.43	-5.3
80	0.45	0.47	5.1	0.64	0.64	-0.2	0.91	0.86	-5.2	1.27	1.14	-9.8
100	0.39	0.40	1.2	0.56	0.54	-3.9	0.79	0.72	-8.7	1.11	0.96	-13.1
120	0.35	0.34	-1.9	0.50	0.47	-6.9	0.71	0.63	-11.5	0.99	0.83	-15.8
140	0.32	0.31	-4.4	0.46	0.41	-9.3	0.64	0.56	-13.8	0.90	0.74	-18.0
160	0.29	0.27	-6.5	0.42	0.37	-11.3	0.59	0.50	-15.7	0.83	0.67	-19.8
180	0.27	0.25	-8.4	0.39	0.34	-13.1	0.55	0.46	-17.4	0.77	0.61	-21.4
200	0.26	0.23	-10.0	0.37	0.31	-14.6	0.52	0.42	-18.9	0.72	0.56	-22.8

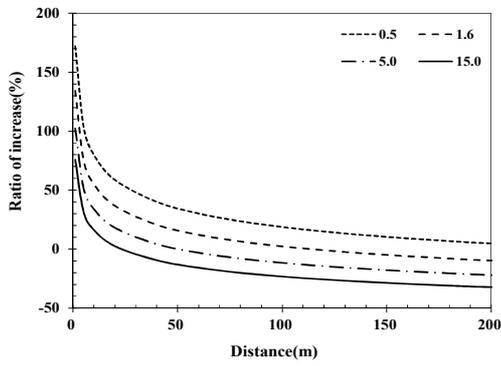


(a) PPV

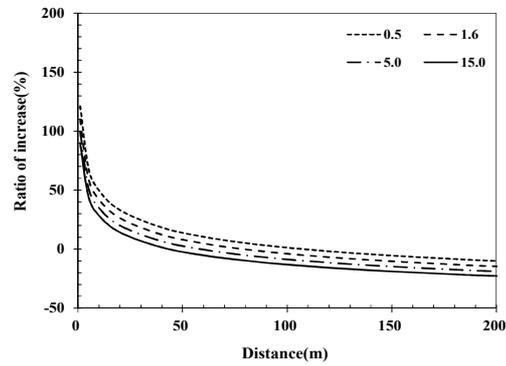


(b) PVS

Fig. 3.56 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.5)



(a) PPV



(b) PVS

Fig. 3.57 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.5)

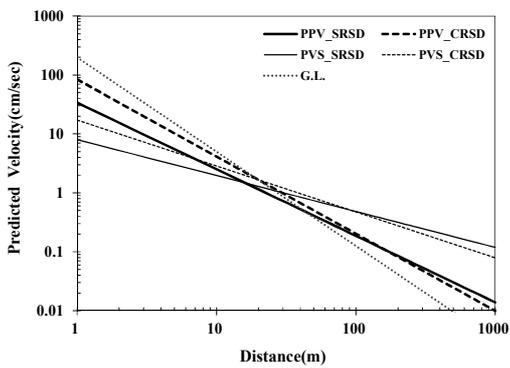


Fig. 3.58 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.5)

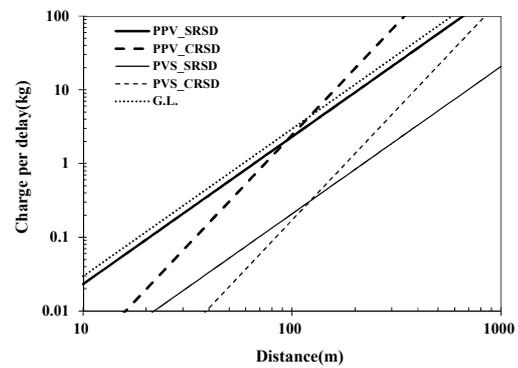


Fig. 3.59 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.5)

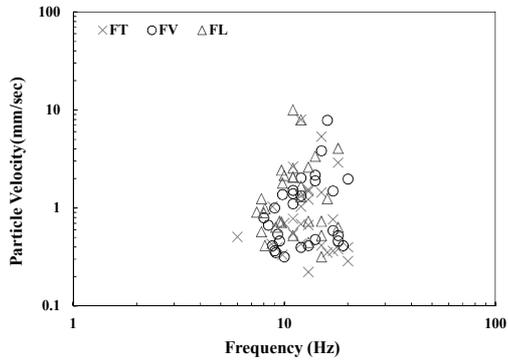


Fig. 3.60 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.5)

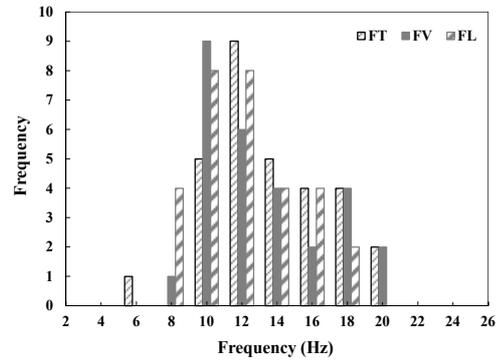


Fig. 3.61 Frequency distribution (Test Blast No.5)

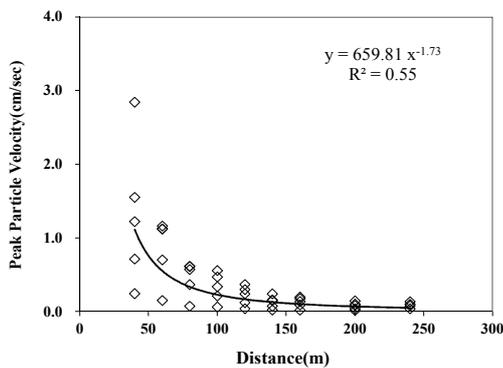
### 다. 시험발파 No.6

5번의 시험발파를 통해 30개의 지반진동 데이터가 계측되었다.

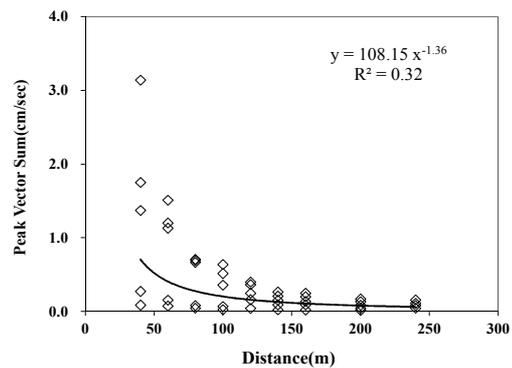
#### 1) 지반진동속도 예측

PPV와 PVS에 대한 거리와의 관계를 Fig. 3.62에서 보여주고 있으며, Table 3.22은 Fig. 3.63과 3.64에서와 같이 시험발파 데이터를 대수눈금 그래프에서 회귀분석한 신뢰도 50%, 95%에서 PPV와 PVS의 지반진동속도 예측식이다.

그리고 Fig. 3.65는 시험발파를 통해 계측된 진동데이터에서 각 성분별 진동속도 데이터를 회귀분석한 신뢰도 95%의 결과이며,  $V_T$ 는 접선방향 성분의 진동속도,  $V_V$ 는 수직방향 성분의 진동속도,  $V_L$ 은 진행방향 성분의 진동속도이다.



(a) PPV

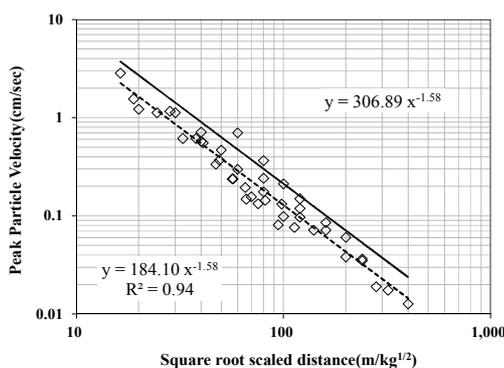


(b) PVS

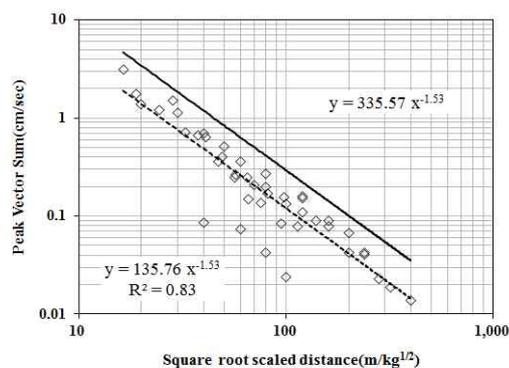
Fig. 3.62 Relationship between Distances and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.6)

Table 3.22 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity(PPV) and Peak Vector Sum(PVS) (Test Blast No.6)

Peak Particle Velocity(PPV, cm/s)				
SD method	Reliability	Predictive Equation	R	S.E
Square root	50%	$V = 17.51(SD)^{-1.13}$	0.88	0.18
	95%	$V = 34.02(SD)^{-1.13}$		
Cube root	50%	$V = 43.58(SD)^{-1.31}$	0.88	0.18
	95%	$V = 84.65(SD)^{-1.31}$		
Peak Vector Sum(PVS, cm/s)				
Square root	50%	$V = 2.39(SD)^{-0.61}$	0.48	0.32
	95%	$V = 8.04(SD)^{-0.61}$		
Cube root	50%	$V = 5.33(SD)^{-0.78}$	0.53	0.31
	95%	$V = 17.25(SD)^{-0.78}$		



(a) PPV



(b) PVS

Fig. 3.63 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.6)

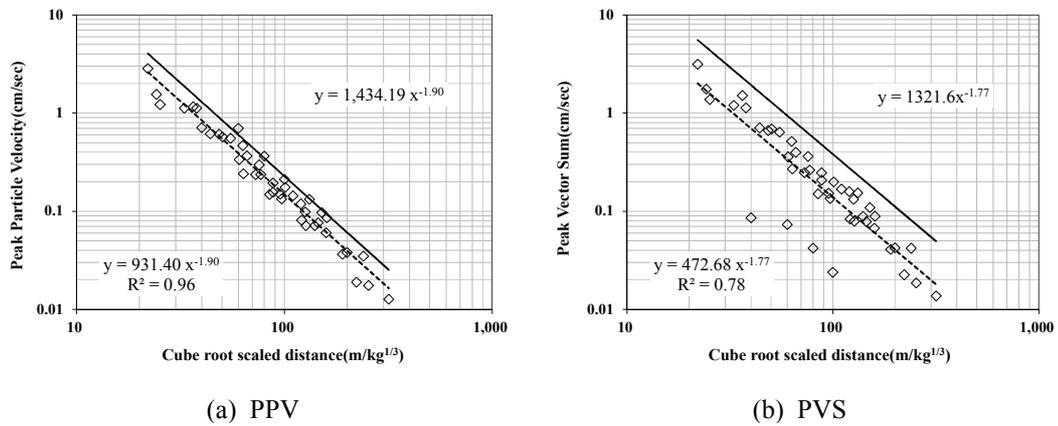


Fig. 3.64 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.6)

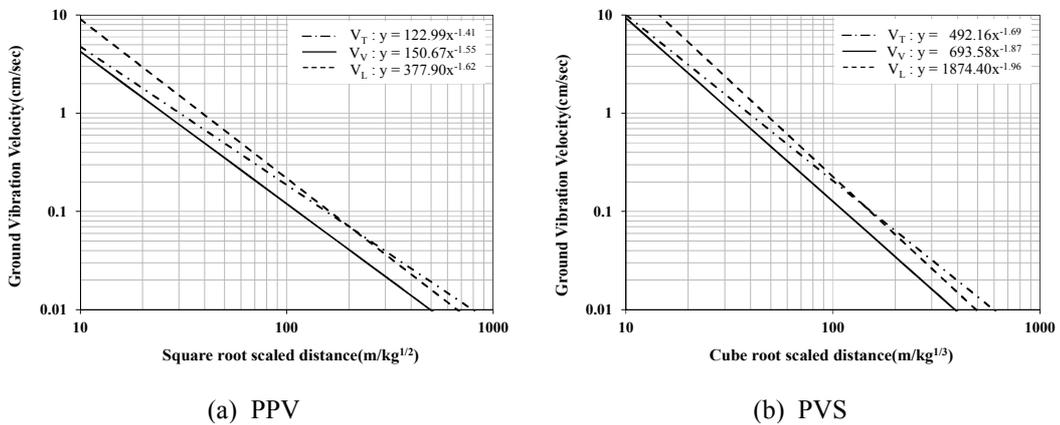


Fig. 3.65 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No.6)

## 2) 지반 진동 분석

Table 3.22에서 예측된 최대입자속도(PPV)와 최대벡터합(PVS)의 95% 지반진동 속도 추정식을 이용하여 지발당 장약량을 기준으로 환산거리(Scale Distance) 방식에 따른 지반진동속도의 차이를 Table 3.23과 3.24에서 비교하고 Fig. 3.66과 3.67에 나타내었다.

지발당 장약량 0.5kg일 때, PPV 추정식은 거리 200m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 큰 것으로 예측되는 반면 와 PVS 추정식은 120m에서 반전되는 것을 확

인 할 수 있었다. SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 103.6% PVS는 68.5%로 PPV 보다 조금 크고 거리 200m에서는 PPV가 4.8% PVS는 10.0%로 감쇠기울기의 차이를 보이는 것으로 예측되었다.

지발당 장약량 5.0kg일 때, PPV와 PVS 추정식은 거리 60m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 크고 이후 반전되어 SRSD 방식의 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고, SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 51.5% PVS는 51.9%이며 반전된 후 SRSD 방식의 지반진동속도는 거리 200m에서 CRSD 보다 PPV가 22.0% 크고 PVS는 18.9% 더 큰 것으로 예측되었다.

전반적으로 지발당 장약량이 커질수록 근거리에서 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도 차이가 줄어들며 반전되는 거리 또한 줄어드는 것으로 확인되었다.

Fig. 3.68에서 환산거리(SD)에 따른 PPV와 PVS 추정식을 국내 가이드라인(국토해양부, 2006)과 비교하였다. 우선 PPV와 PVS 추정식은 SD 방식으로 예측되는 지반진동속도의 변화가 거의 유사하고 약 140m선에서 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도가 반전된다. 그리고 SRSD로 제안된 G.L 추정식과 시험발파에 의한 SRSD 방식의 추정식을 비교해 보면 약 15m의 매우 근거리에서는 G.L의 지반진동속도가 높지만 기울기가 커 진동속도의 감소가 큰 반면 시험발파에 의한 지반진동속도 추정식은 상대적으로 원거리까지 진동이 발생하는 것으로 예측되었다.

Fig. 3.69에서는 지반의 허용 진동속도를 재래주택 수준인 0.3cm/s로 가정하여 PPV와 PVS 지반진동속도 추정식을 이용해 거리에 따른 지발당 허용 장약량을 예측하였다. SD방식에 따라서는 두 가지가 비슷한 경향을 보이며 근거리에서 지반진동속도가 크게 예측되는 CRSD 방식은 SRSD 방식에 비해 지발당 허용 장약량이 작고 반전점 이 후에 커진다. 그리고 G.L 추정식과 유사한 기울기를 보이는 SRSD 방식의 추정식들도 지반진동속도가 더 높게 예측되었기 때문에 지발당 허용 장약량이 작고 원거리까지 유지된다.

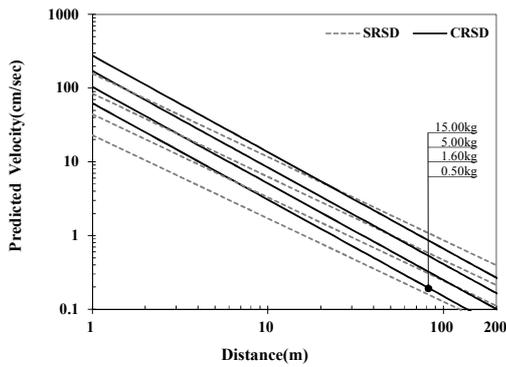
지반진동에 의한 각 성분별(T, V, L) 입자속도와 주파수를 Fig. 3.70에 나타내었고 Fig. 3.71과 같이 도수분포표를 작성하였다. 각 성분별 주파수 평균은 11.5~13.1Hz이고 최빈값은 11.0~14.0Hz로 분석되었으며 도수분포표에서도 10~12Hz에서 빈도가 매우 높다.

Table 3.23 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.6)

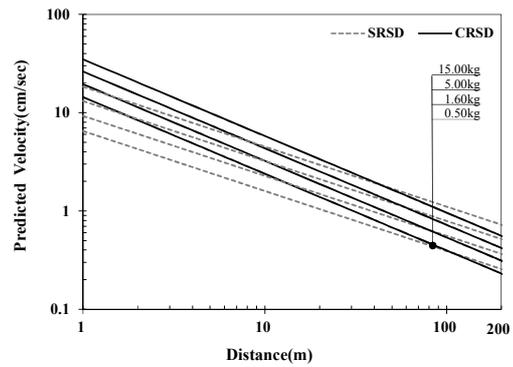
Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	3.73	7.60	103.6	7.20	12.62	75.4	13.70	20.76	51.5	25.49	33.54	31.6
10	1.70	3.06	79.7	3.29	5.09	54.8	6.26	8.37	33.7	11.65	13.53	16.1
20	0.78	1.24	58.6	1.50	2.05	36.6	2.86	3.38	18.0	5.32	5.46	2.5
40	0.36	0.50	40.0	0.69	0.83	20.6	1.31	1.36	4.2	2.43	2.20	-9.5
60	0.23	0.29	30.2	0.43	0.49	12.1	0.83	0.80	-3.1	1.54	1.29	-15.9
80	0.16	0.20	23.6	0.31	0.33	6.5	0.60	0.55	-8.0	1.11	0.89	-20.1
100	0.13	0.15	18.7	0.24	0.25	2.3	0.46	0.41	-11.6	0.86	0.66	-23.3
120	0.10	0.12	14.9	0.20	0.20	-1.0	0.38	0.32	-14.5	0.70	0.52	-25.7
140	0.09	0.10	11.8	0.17	0.16	-3.7	0.32	0.26	-16.8	0.59	0.43	-27.8
160	0.07	0.08	9.1	0.14	0.13	-6.0	0.27	0.22	-18.8	0.51	0.36	-29.5
180	0.07	0.07	6.8	0.13	0.12	-8.0	0.24	0.19	-20.5	0.44	0.31	-31.0
200	0.06	0.06	4.8	0.11	0.10	-9.7	0.21	0.17	-22.0	0.39	0.27	-32.3

Table 3.24 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.6)

Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR									
5	2.44	4.11	68.5	3.47	5.55	59.9	4.92	7.47	51.9	6.88	9.94	44.5
10	1.60	2.39	49.7	2.28	3.23	42.1	3.22	4.35	35.0	4.51	5.79	28.5
20	1.05	1.39	33.1	1.49	1.88	26.3	2.11	2.53	20.0	2.95	3.37	14.2
40	0.69	0.81	18.3	0.98	1.10	12.3	1.38	1.48	6.6	1.93	1.96	1.5
60	0.54	0.59	10.4	0.76	0.80	4.8	1.08	1.08	-0.5	1.51	1.43	-5.3
80	0.45	0.47	5.1	0.64	0.64	-0.2	0.91	0.86	-5.2	1.27	1.14	-9.8
100	0.39	0.40	1.2	0.56	0.54	-3.9	0.79	0.72	-8.7	1.11	0.96	-13.1
120	0.35	0.34	-1.9	0.50	0.47	-6.9	0.71	0.63	-11.5	0.99	0.83	-15.8
140	0.32	0.31	-4.4	0.46	0.41	-9.3	0.64	0.56	-13.8	0.90	0.74	-18.0
160	0.29	0.27	-6.5	0.42	0.37	-11.3	0.59	0.50	-15.7	0.83	0.67	-19.8
180	0.27	0.25	-8.4	0.39	0.34	-13.1	0.55	0.46	-17.4	0.77	0.61	-21.4
200	0.26	0.23	-10.0	0.37	0.31	-14.6	0.52	0.42	-18.9	0.72	0.56	-22.8

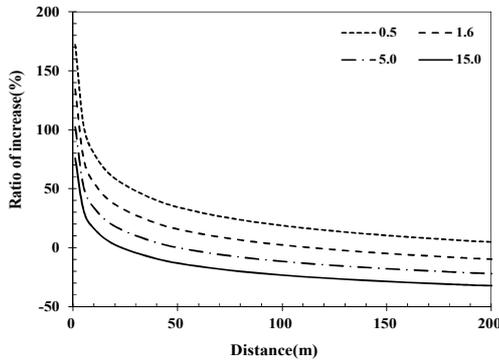


(a) PPV

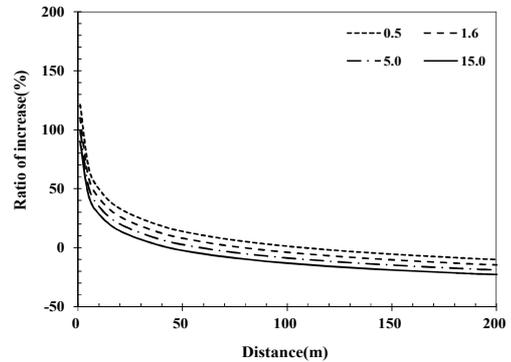


(b) PVS

Fig. 3.66 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.6)



(a) PPV



(b) PVS

Fig. 3.67 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.6)

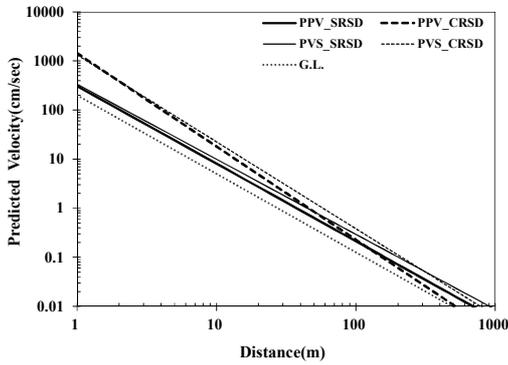


Fig. 3.68 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.6)

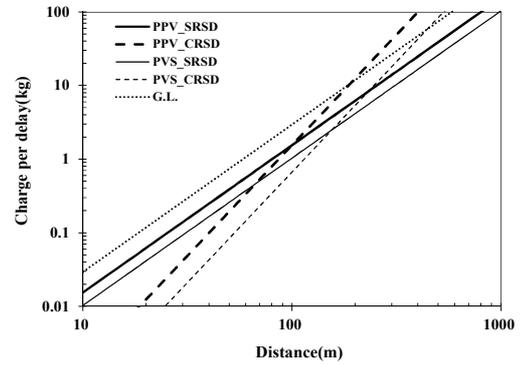


Fig. 3.69 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.6)

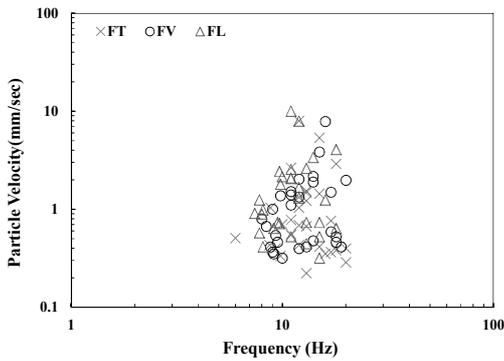


Fig. 3.70 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.6)

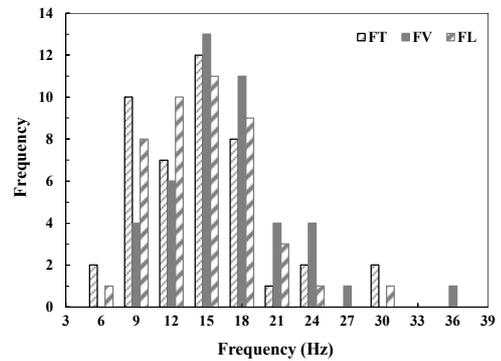


Fig. 3.71 Frequency distribution (Test Blast No.6)

라. 시험발파 No.7

6번의 시험발파를 통해 54개의 지반진동 데이터가 계측되었다.

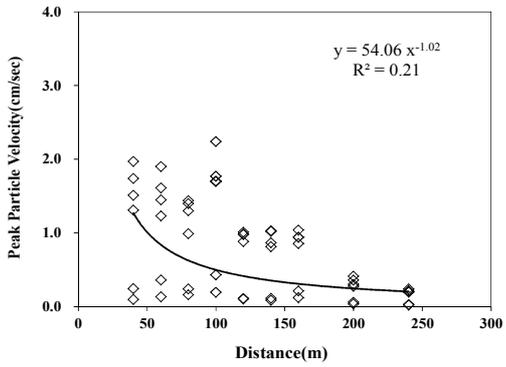
1) 지반진동속도 예측

PPV와 PVS에 대한 거리와의 관계를 Fig. 3.72에서 보여주고 있으며, Table 3.25은 Fig. 3.73과 3.74에서와 같이 시험발파 데이터를 대수눈금 그래프에서 회귀분석한 신뢰도 50%, 95%에서 PPV와 PVS의 지반진동속도 예측식이다.

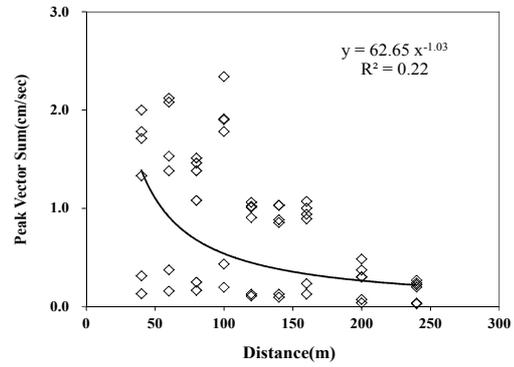
그리고 Fig. 3.75은 시험발파를 통해 계측된 진동데이터에서 각 성분별 진동속도 데이터를 회귀분석한 신뢰도 95%의 결과이며,  $V_T$ 는 접선방향 성분의 진동속도,  $V_V$ 는 수직방향 성분의 진동속도,  $V_L$ 은 진행방향 성분의 진동속도이다.

Table 3.25 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity(PPV) and Peak Vector Sum(PVS) (Test Blast No.7)

Peak Particle Velocity(PPV, cm/s)				
SD method	Reliability	Predictive Equation	R	S.E
Square root	50%	$V = 91.24(SD)^{-1.27}$	0.89	0.24
	95%	$V = 226.79(SD)^{-1.27}$		
Cube root	50%	$V = 268.91(SD)^{-1.47}$	0.85	0.29
	95%	$V = 792.89(SD)^{-1.47}$		
Peak Vector Sum(PVS, cm/s)				
Square root	50%	$V = 94.19(SD)^{-1.26}$	0.90	0.23
	95%	$V = 221.00(SD)^{-1.26}$		
Cube root	50%	$V = 281.07(SD)^{-1.46}$	0.86	0.27
	95%	$V = 780.42(SD)^{-1.46}$		

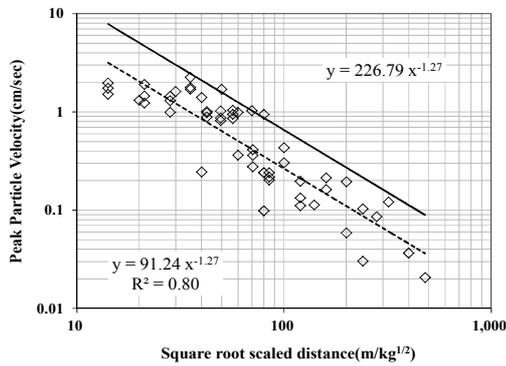


(a) PPV

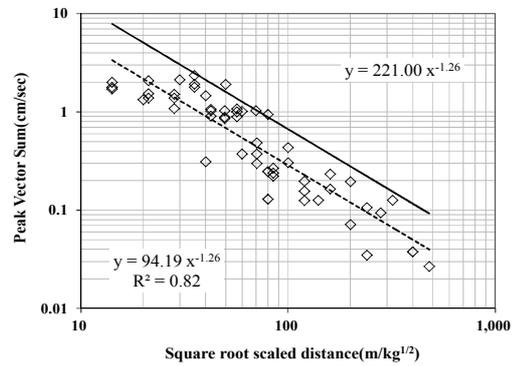


(b) PVS

Fig. 3.72 Relationship between Distances and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.7)

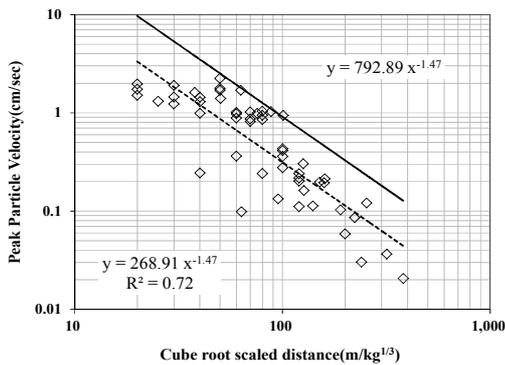


(a) PPV

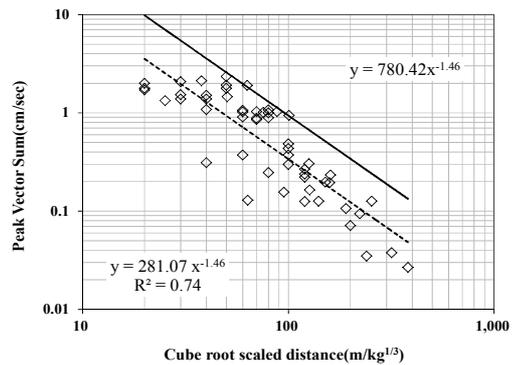


(b) PVS

Fig. 3.73 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.7)



(a) PPV



(b) PVS

Fig. 3.74 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.7)

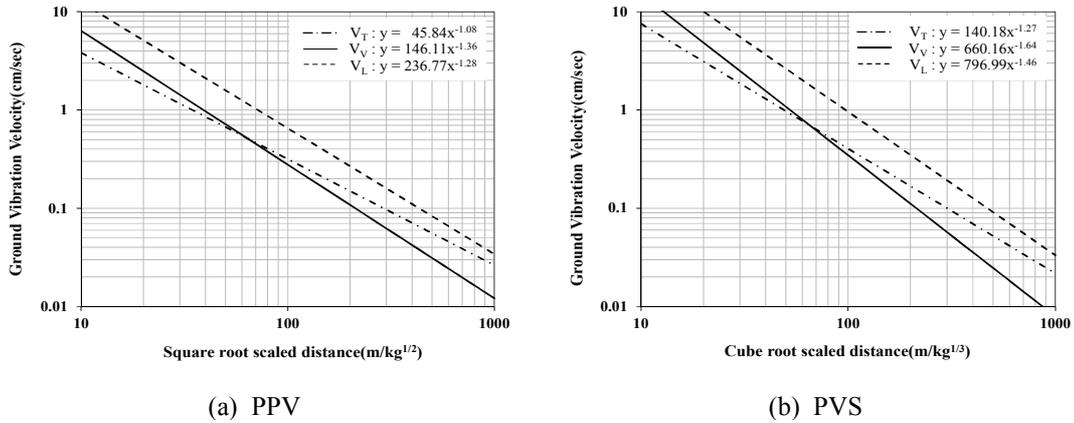


Fig. 3.75 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No.7)

## 2) 지반 진동 분석

Table 3.25에서 예측된 최대입자속도(PPV)와 최대벡터합(PVS)의 95% 지반진동 속도 추정식을 이용하여 지발당 장약량을 기준으로 환산거리(Scale Distance) 방식에 따른 지반진동속도의 차이를 Table 3.26과 3.27에서 비교하고 Fig. 3.76과 3.77에 나타내었다.

지발당 장약량 0.5kg일 때, PPV와 PVS 추정식은 거리 200m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 큰 것으로 예측되고 SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 180.2% PVS는 182.7%로 PPV 보다 조금 작고 거리 200m에서는 PPV가 34% PVS는 35.2%로 감쇠기울기의 차이를 보이는 것으로 예측되었다.

지발당 장약량 5.0kg일 때, PPV와 PVS 추정식은 거리 180m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 크고 이후 반전되어 SRSD 방식의 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고, SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 100.7% PVS는 103.2%이며 반전된 후 SRSD 방식의 지반진동속도는 거리 200m에서 CRSD 보다 PPV가 4.1% 크고 PVS는 2.8% 더 큰 것으로 예측되었다.

전반적으로 지발당 장약량이 커질수록 근거리에서 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도 차이가 줄어들며 반전되는 거리 또한 줄어드는 것으로 확인되었다.

Fig. 3.78에서 환산거리(SD)에 따른 PPV와 PVS 추정식을 국내 가이드라인(국토해양부, 2006)과 비교하였다. 우선 PPV와 PVS 추정식은 SD 방식으로 예측되는 지반진동속도의 변화가 거의 유사하고 약 200m선에서 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도가 반전된다. 그리고 SRSD로 제안된 G.L 추정식과 시험발파에 의한 SRSD 방식의 추정식을 비교해 보면 약 15m의 매우 근거리에서는 G.L의 지반진동속도가 높지만 기울기가 커 진동속도의 감소가 큰 반면 시험발파에 의한 지반진동속도 추정식은 상대적으로 원거리까지 진동이 발생하는 것으로 예측되었다.

Fig. 3.79에서는 지반의 허용 진동속도를 재래주택 수준인 0.3cm/s로 가정하여 PPV와 PVS 지반진동속도 추정식을 이용해 거리에 따른 지발당 허용 장약량을 예측하였다. SD방식에 따라서는 두 가지가 비슷한 경향을 보이며 근거리에서 지반진동속도가 크게 예측되는 CRSD 방식은 SRSD 방식에 비해 지발당 허용 장약량이 작고 반전점 이 후에 커진다. 그리고 G.L 추정식과 유사한 기울기를 보이는 SRSD 방식의 추정식들도 지반진동속도가 더 높게 예측되었기 때문에 지발당 허용 장약량이 작고 원거리까지 유지된다.

지반진동에 의한 각 성분별(T, V, L) 입자속도와 주파수를 Fig. 3.80에 나타내었고 Fig. 3.81과 같이 도수분포표를 작성하였다. 각 성분별 주파수 평균은 11.1~13.2Hz이고 최빈값은 11.0~16.0Hz로 분석되었으며 도수분포표에서도 9~18Hz에서 빈도가 매우 높다.

Table 3.26 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.7)

Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	18.91	52.99	180.2	39.59	93.70	136.7	81.62	163.77	100.7	163.96	280.55	71.1
10	7.84	19.13	143.9	16.41	33.82	106.1	33.84	59.12	74.7	67.99	101.27	49.0
20	3.25	6.91	112.3	6.81	12.21	79.4	14.03	21.34	52.1	28.19	36.56	29.7
40	1.35	2.49	84.9	2.82	4.41	56.2	5.82	7.70	32.4	11.69	13.20	12.9
60	0.81	1.37	70.5	1.69	2.43	44.0	3.48	4.24	22.1	6.99	7.27	4.1
80	0.56	0.90	60.9	1.17	1.59	35.9	2.41	2.78	15.2	4.85	4.76	-1.7
100	0.42	0.65	53.9	0.88	1.15	30.0	1.82	2.00	10.2	3.65	3.43	-6.0
120	0.33	0.50	48.4	0.70	0.88	25.4	1.44	1.53	6.3	2.90	2.62	-9.4
140	0.27	0.40	43.9	0.57	0.70	21.6	1.19	1.22	3.0	2.38	2.09	-12.1
160	0.23	0.32	40.1	0.49	0.57	18.4	1.00	1.00	0.3	2.01	1.72	-14.4
180	0.20	0.27	36.8	0.42	0.48	15.6	0.86	0.84	-2.0	1.73	1.45	-16.4
200	0.17	0.23	34.0	0.37	0.41	13.2	0.75	0.72	-4.1	1.51	1.24	-18.2

Table 3.27 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.7)

Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	18.79	53.13	182.7	39.11	93.58	139.3	80.17	162.93	103.2	160.18	278.10	73.6
10	7.85	19.31	146.1	16.33	34.01	108.3	33.48	59.22	76.9	66.88	101.09	51.1
20	3.28	7.02	114.2	6.82	12.36	81.3	13.98	21.53	54.0	27.93	36.74	31.6
40	1.37	2.55	86.5	2.85	4.49	57.9	5.84	7.83	34.1	11.66	13.36	14.5
60	0.82	1.41	72.0	1.71	2.49	45.6	3.50	4.33	23.6	7.00	7.39	5.6
80	0.57	0.93	62.4	1.19	1.63	37.4	2.44	2.84	16.7	4.87	4.85	-0.3
100	0.43	0.67	55.3	0.90	1.18	31.4	1.84	2.05	11.6	3.68	3.51	-4.6
120	0.34	0.51	49.7	0.71	0.90	26.7	1.46	1.57	7.6	2.92	2.69	-8.1
140	0.28	0.41	45.2	0.59	0.72	22.9	1.20	1.26	4.4	2.41	2.14	-10.8
160	0.24	0.34	41.3	0.50	0.59	19.6	1.02	1.03	1.6	2.03	1.76	-13.2
180	0.21	0.28	38.1	0.43	0.50	16.9	0.88	0.87	-0.8	1.75	1.49	-15.2
200	0.18	0.24	35.2	0.37	0.43	14.4	0.77	0.75	-2.8	1.53	1.27	-17.0

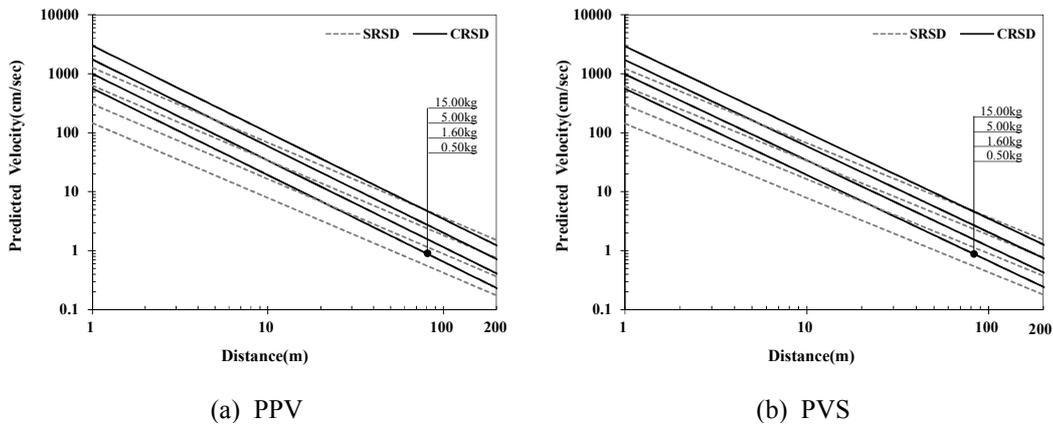


Fig. 3.76 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.7)

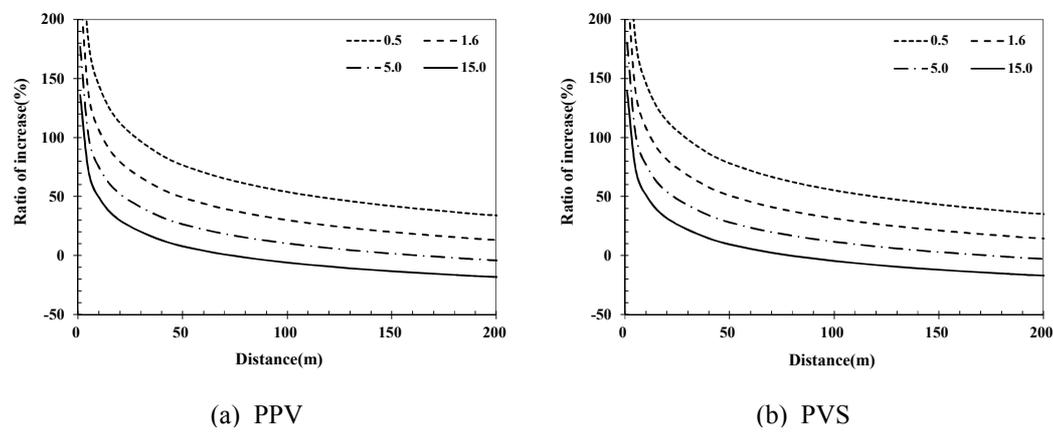


Fig. 3.77 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.7)

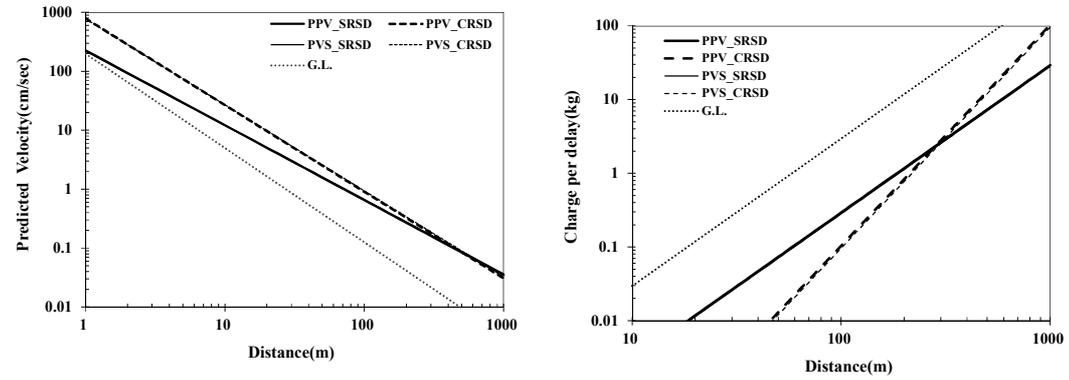


Fig. 3.78 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.7)

Fig. 3.79 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.7)

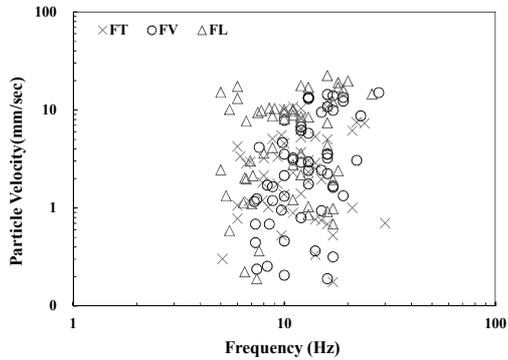


Fig. 3.80 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.7)

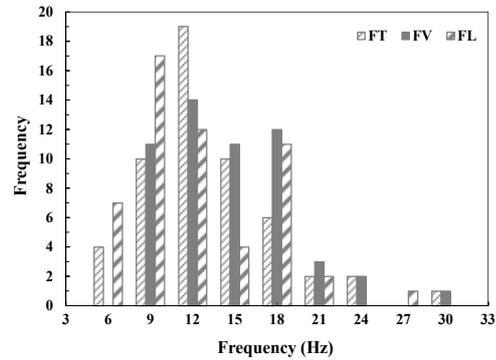


Fig. 3.81 Frequency Distribution (Test Blast No.7)

### 3.4 사이트. 3

#### 3.4.1 지질 및 지반 특성

시험발파가 2회 이루어진 사이트. 3 지역은 제주특별자치도 서귀포시 동홍동, 토평동 일원이며, 기반암의 특징을 파악하기 위해 한국지질자원연구원 지질정보시스템에서 제공하는 지질도를 확인한 결과 Fig. 3.82와 같이 후기 화산활동시기 화산암인 시오름조면현무암(Qstb)으로 조사되었다.

시오름조면현무암(Qstb)은 회색 내지 암회색이며, 이 암석은 1~10mm 크기의 기공을 20% 정도 함유하고 있다. 기공의 함량은 노두에 따라 변이가 크며, 기공이 없이 치밀하게 산출되기도 한다. 반정으로는 장석이 우세하고 5~10mm 크기이며 함량은 10 cm<sup>2</sup>의 단위면적에 약 20개의 함량을 보이고, 휘석은 5mm 크기로 약 3~5개의 함량을 보이는 특징이 있다. 화학적 조성은  $SiO_2$ 가 48.6wt%~50.47wt%,  $Na_2O$ 는 3.24wt%~3.89wt%,  $K_2O$ 는 0.97wt%~1.98wt%의 범위이고  $Na_2O+K_2O$ 는 4.21wt%~5.72wt%의 범위에 해당한다(Park et al., 2000b).  $SiO_2$ 와  $Na_2O+K_2O$ 의 조성비를 이용한 화산암류 분류법인 TAS도(Total Alkali-Silica diagram: Le Maitre, 1984)에 도시한 결과는 Fig. 3.83과 같이 현무암내지 조면현무암으로 분류되었다.

암반의 단위중량은 2.37~2.61g/cm<sup>3</sup>, 비중은 2.47~2.612, 흡수율은 0.32~1.27%이고 일축압축강도 51.3~136.3MPa까지 다양하다. 그리고 암반과 암반사이에 협재되어 있는 클링커층의 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)에 의한 N치 값은 10회/30cm~50회/5cm 범위를 나타내고 있으며 암괴로 구성된 구간은 시험이 실시되지 않았다. 측정된 N값은 암편들 간의 공극 차이에 따라 매우 높은 값을 나타내거나 매우 낮은 값으로 측정되기도 하므로 SPT에 의한 N값으로부터 이론적·경험적인 방법으로 클링커층의 역학적 특성을 정량화하기 매우 어렵다.

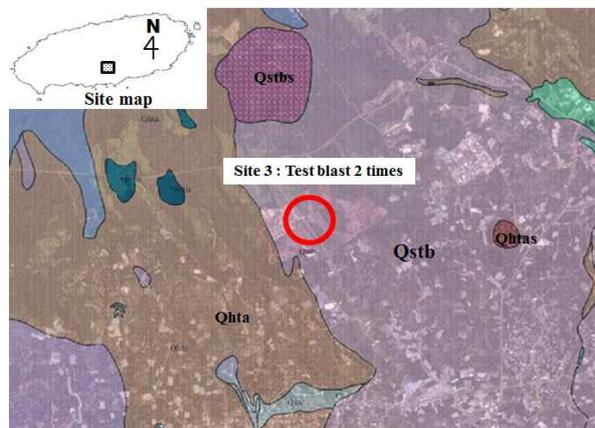


Fig. 3.82 Geologic Map of Site. 3

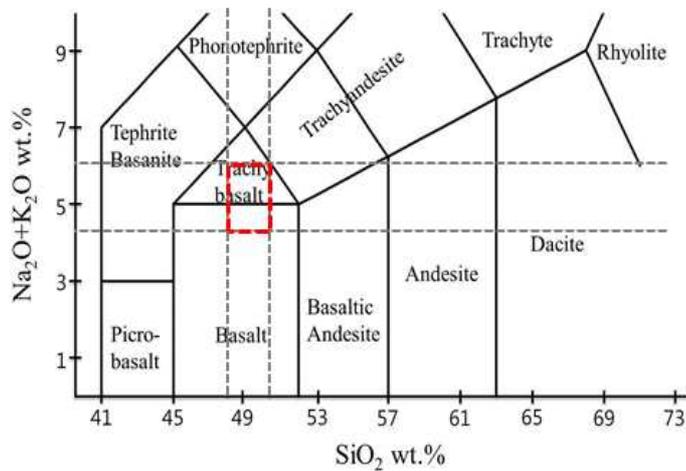


Fig. 3.83 Classification of the Basalt according to TAS Diagram (Site. 3)

### 3.4.2 시험발파 분석

#### 3.4.2.1 실험방법

시험발파 위치는 제주 서부지역에 위치한 현장으로서 인근 보안물건의 영향범위를 고려한 2회의 시험발파가 각각 8번 실시되어 총 16번의 시험발파가 실시되었다.

#### 가. 시험발파 No. 8

서귀포시 동흥동에서 실시한 시험발파는 정밀진동제어발파, 소규모진동제어발파, 중규모진동제어발파를 적용하였으며 시험발파 조건은 Table 3.28과 같다. 그리고 시험발파 수행 순서는 정밀진동제어발파(4공→6공) → 소규모진동제어발파(10공→10공) → 중규모진동제어발파(10공→10공→10공→10공)의 순으로 진행되었다.

Table 3.28 Experimental Condition of Test Blast No.8

Description	Unit	TYPE II	TYPE III	TYPE IV			
Drilling length	m	2.0	2.7	3.4			
Burden	m	0.7	1.0	1.5			
Spacing	m	0.7	1.0	1.6			
Drilled hole diameter	mm	51	51	76			
Charge per hole	kg	0.375	1.0	3.0			
Charge per delay	kg	0.375	1.0	3.0	6.0	6.0	3.0
Explosive diameter	mm	32	32	50			
Explosive	-	Emulsion					
Holes	-	4, 6	10, 10	10	10	10	10

Fig. 3.84와 같이 구성된 시험발파는, 발파진동 계측을 위하여 11기의 계측기가 설치되었고 시험발파 폭발으로부터 각 계측기까지의 이격거리는 최소 53m에서 최대 638m이다.

제어불가능한 발파진동의 영향요인인 지반조건을 확인하기 위해 시험발파 현장의 지반조사보고서로부터 지층단면도(Section F-F')를 시험발파 지역의 대표 지층단면으로 설정하여 지반특성을 검토하였다.

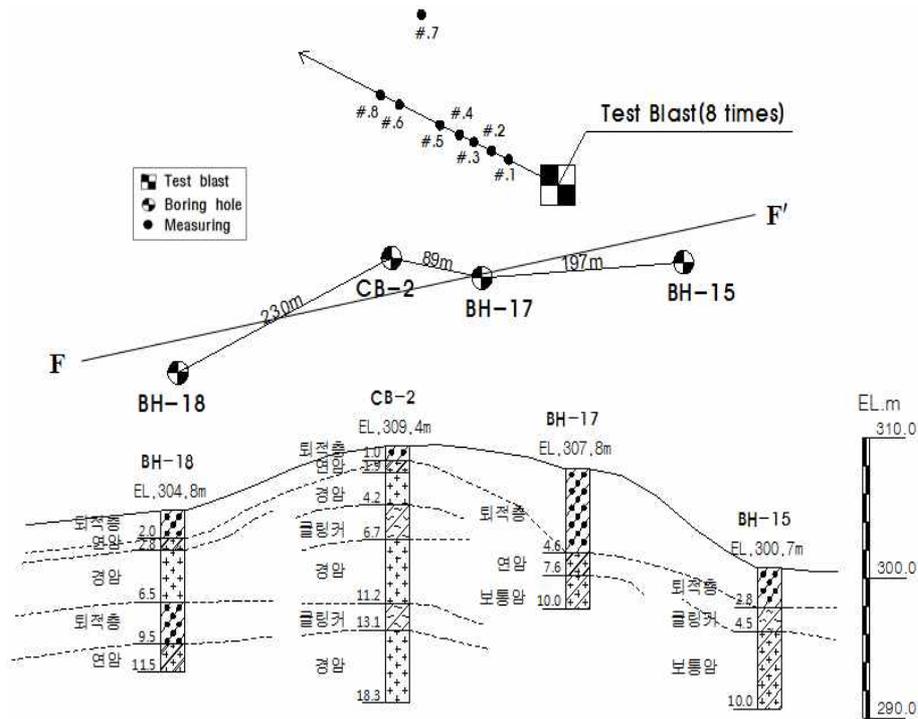


Fig. 3.84 Geological Profile(F-F') and Composition of Test Blast No.8

#### 나. 시험발파 No.9

서귀포시 토평동에서 실시한 시험발파는 정밀진동제어발파, 소규모진동제어발파, 중규모진동제어발파를 적용하였으며 시험발파 조건은 Table 3.29와 같다. 그리고 시험발파 수행 순서는 정밀진동제어발파(8공→8공) → 소규모진동제어발파(10공→10공) → 중규모진동발파(10공→10공→10공→10공)의 순으로 진행되었다.

Fig. 3.85와 같이 구성된 시험발파는 발파진동 계측을 위하여 11기의 계측기가 설치되었고 시험발파 폭원으로부터 각 계측기까지의 이격거리는 최소 130m에서 최대 997m이다. 제어불가능한 발파진동의 영향요인인 지반조건을 확인하기 위해

시험발파 현장의 지반조사보고서로부터 지층단면도(Section G-G')를 시험발파 지역의 대표 지층단면으로 설정하여 지반특성을 검토하였다.

Table 3.29 Experimental Condition of Test Blast No.9

Description	Unit	TYPE II	TYPE III	TYPE IV			
Drilling length	m	2.2	2.5	2.7			
Burden	m	0.6	1.0	1.5			
Spacing	m	0.7	1.0	1.6			
Drilled hole diameter	mm	51	51	76			
Charge per hole	kg	0.375	1.0	2.5			
Charge per delay	kg	0.375	1.0	2.5	2.5	5.0	5.0
Explosive diameter	mm	32	32	50			
Explosive	-	Emulsion					
Holes	-	8, 8	10, 10	10	10	10	10

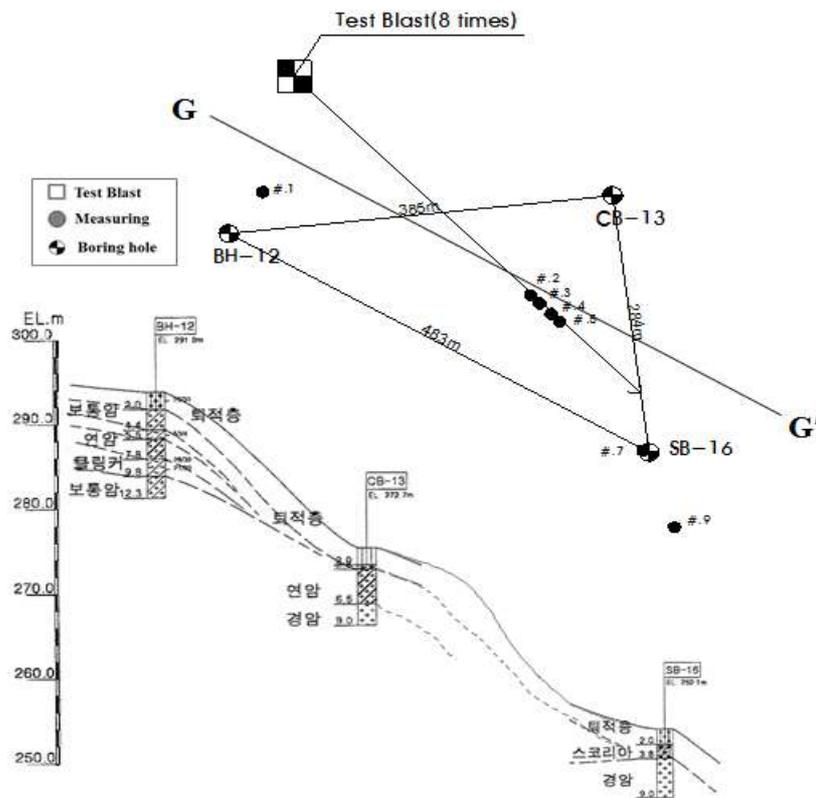


Fig. 3.85 Geological Profile(G-G') and Composition of Test Blast No.9

### 3.4.2.2 시험발파 분석

#### 가. 시험발파 No.8

8번의 시험발파를 통해 70개의 지반진동 데이터가 계측되었다.

#### 1) 지반진동속도 예측

PPV와 PVS에 대한 거리와의 관계를 Fig. 3.86에서 보여주고 있으며, Table 3.30은 Fig. 3.87과 3.88에서와 같이 시험발파 데이터를 대수눈금 그래프에서 회귀분석한 신뢰도 50%, 95%에서 PPV와 PVS의 지반진동속도 예측식이다.

그리고 Fig. 3.89는 시험발파를 통해 계측된 진동데이터에서 각 성분별 진동속도 데이터를 회귀분석한 신뢰도 95%의 결과이며,  $V_T$ 는 접선방향 성분의 진동속도,  $V_V$ 는 수직방향 성분의 진동속도,  $V_L$ 은 진행방향 성분의 진동속도이다.

Table 3.30 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity(PPV) and Peak Vector Sum(PVS) (Test Blast No.8)

Peak Particle Velocity(PPV, cm/s)				
SD method	Reliability	Predictive Equation	R	S.E
Square root	50%	$V = 27.74(SD)^{-1.27}$	0.85	0.25
	95%	$V = 72.17(SD)^{-1.27}$		
Cube root	50%	$V = 89.10(SD)^{-1.50}$	0.88	0.23
	95%	$V = 209.56(SD)^{-1.50}$		
Peak Vector Sum(PVS, cm/s)				
Square root	50%	$V = 34.74(SD)^{-1.31}$	0.90	0.20
	95%	$V = 74.41(SD)^{-1.31}$		
Cube root	50%	$V = 117.59(SD)^{-1.54}$	0.94	0.16
	95%	$V = 216.50(SD)^{-1.54}$		

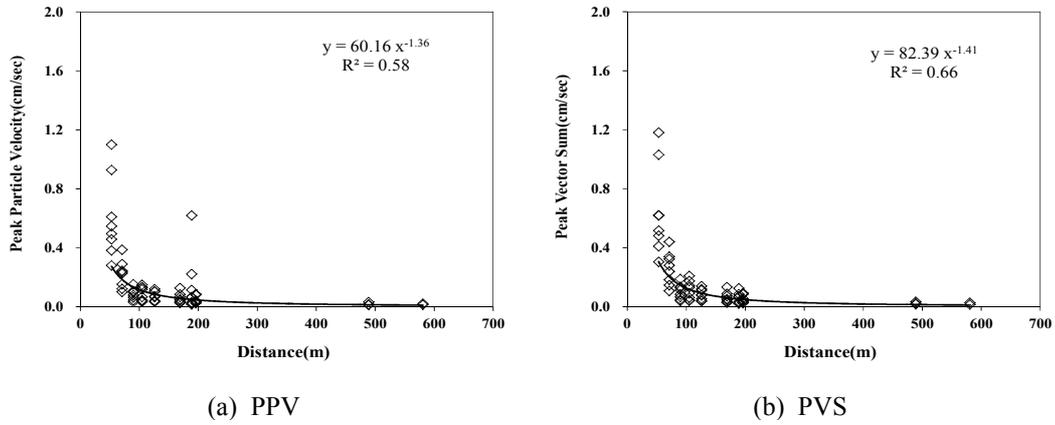


Fig. 3.86 Relationship between Distances and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.8)

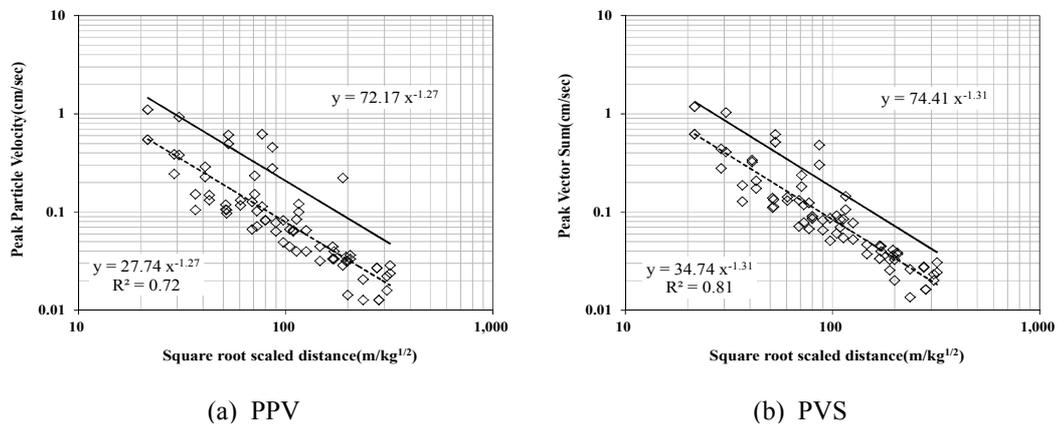


Fig. 3.87 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.8)

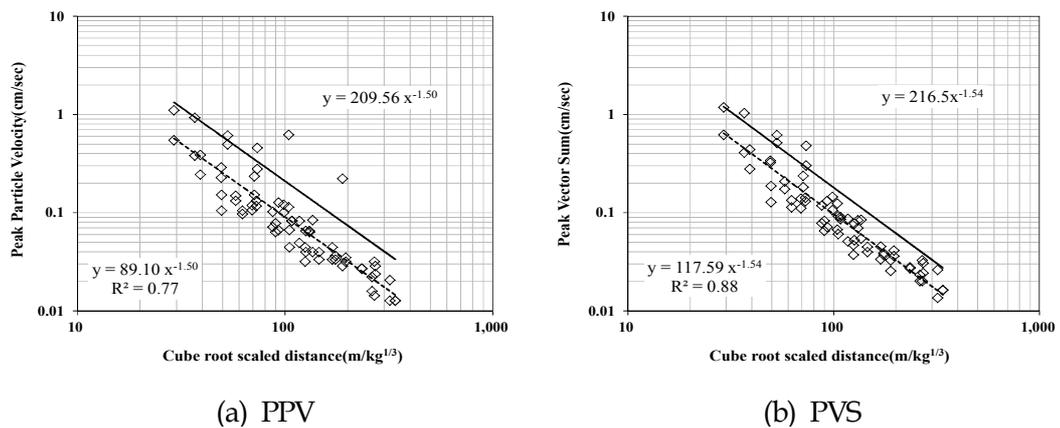


Fig. 3.88 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.8)

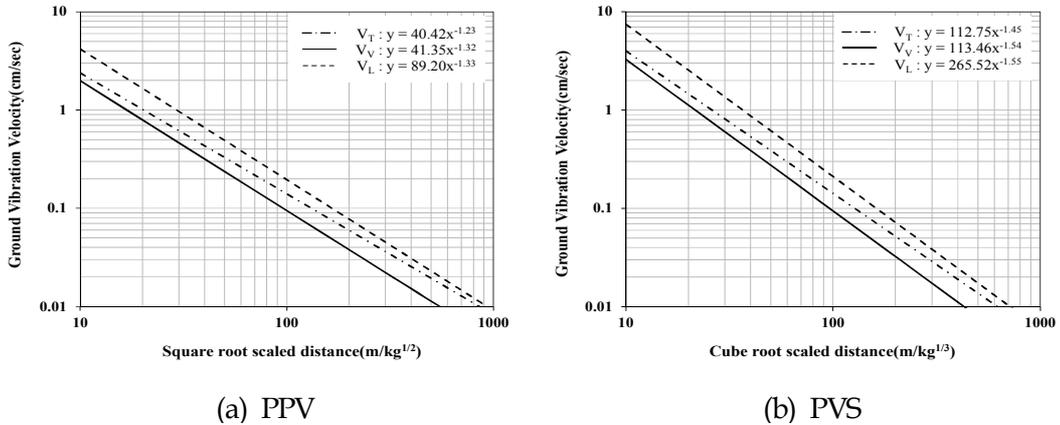


Fig. 3.89 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No.8)

## 2) 지반 진동 분석

Table 3.30에서 예측된 최대입자속도(PPV)와 최대벡터합(PVS)의 95% 지반진동 속도 추정식을 이용하여 지발당 장약량을 기준으로 환산거리(Scale Distance) 방식에 따른 지반진동속도의 차이를 Table 3.31과 3.32에서 비교하고 Fig. 3.90와 3.91에 나타내었다.

지발당 장약량 0.5kg일 때, PPV와 PVS 추정식은 거리 200m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 큰 것으로 예측되고 SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 120.2% PVS는 121.7%로 PPV 보다 조금 크고 거리 200m에서는 PPV가 -5.7% PVS는 -5.1%로 감쇠기울기의 차이를 보이는 것으로 예측되었다.

지발당 장약량 5.0kg일 때, PPV 추정식은 거리 60m까지, PVS 추정식은 거리 40m까지, CRSD 방식의 지반진동속도가 크고 이후 반전되어 SRSD 방식의 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고, SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 61.4% PVS는 60.0%이며 반전된 후 SRSD 방식의 지반진동속도는 거리 200m에서 CRSD 보다 PPV가 30.9% 크고 PVS는 31.5% 더 큰 것으로 예측되었다.

전반적으로 지발당 장약량이 커질수록 근거리에서 지반진동속도가 커지는 것으로

예측되고 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도 차이가 줄어들며 반전되는 거리 또한 줄어드는 것으로 확인되었다.

Fig. 3.92에서 환산거리(SD)에 따른 PPV와 PVS 추정식을 국내 가이드라인(국토해양부, 2006)과 비교하였다. 우선 PPV와 PVS 추정식은 SD 방식으로 예측되는 지반진동속도의 변화가 거의 유사하고 약 140m선에서 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도가 반전된다. 그리고 SRSD로 제안된 G.L 추정식과 시험발파에 의한 SRSD 방식의 추정식을 비교해 보면 약 15m의 매우 근거리에서는 G.L의 지반진동속도가 높지만 기울기가 커 진동속도의 감소가 큰 반면 시험발파에 의한 지반진동속도 추정식은 상대적으로 원거리까지 진동이 발생하는 것으로 예측되었다.

Fig. 3.93에서는 지반의 허용 진동속도를 재래주택 수준인 0.3cm/s로 가정하여 PPV와 PVS 지반진동속도 추정식을 이용해 거리에 따른 지발당 허용 장약량을 예측하였다. SD방식에 따라서는 두 가지가 비슷한 경향을 보이며 근거리에서 지반진동속도가 크게 예측되는 CRSD 방식은 SRSD 방식에 비해 지발당 허용 장약량이 작고 반전점 이 후에 커진다. 그리고 G.L 추정식과 유사한 기울기를 보이는 SRSD 방식의 추정식들도 지반진동속도가 더 높게 예측되었기 때문에 지발당 허용 장약량이 작고 원거리까지 유지된다.

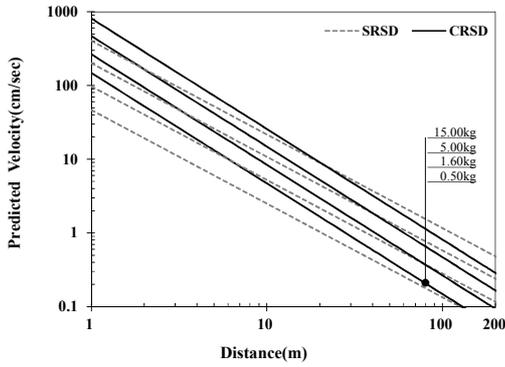
지반진동에 의한 각 성분별(T, V, L) 입자속도와 주파수를 Fig. 3.94에 나타내었고, Fig. 3.95와 같이 도수분포표를 작성하였다. 각 성분별 주파수 평균은 14.0~19.2Hz이고 최빈값은 13.0~27.0Hz로 분석되었으며 도수분포표에서도 9~27Hz에서 빈도가 매우 높다.

Table 3.31 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.8)

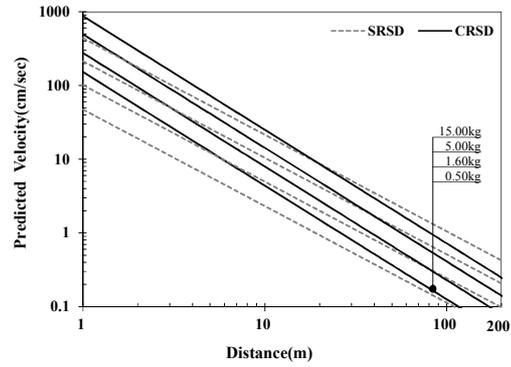
Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	6.02	13.25	120.2	12.60	23.71	88.2	25.97	41.91	61.4	52.18	72.59	39.1
10	2.50	4.69	87.7	5.22	8.38	60.5	10.77	14.82	37.6	21.64	25.67	18.6
20	1.03	1.66	60.1	2.17	2.96	36.8	4.47	5.24	17.3	8.97	9.07	1.1
40	0.43	0.59	36.5	0.90	1.05	16.7	1.85	1.85	0.0	3.72	3.21	-13.8
60	0.26	0.32	24.3	0.54	0.57	6.3	1.11	1.01	-8.9	2.22	1.75	-21.4
80	0.18	0.21	16.4	0.37	0.37	-0.5	0.77	0.65	-14.7	1.54	1.13	-26.5
100	0.13	0.15	10.6	0.28	0.27	-5.5	0.58	0.47	-19.0	1.16	0.81	-30.2
120	0.11	0.11	6.0	0.22	0.20	-9.4	0.46	0.36	-22.3	0.92	0.62	-33.0
140	0.09	0.09	2.3	0.18	0.16	-12.5	0.38	0.28	-25.0	0.76	0.49	-35.4
160	0.07	0.07	-0.8	0.15	0.13	-15.2	0.32	0.23	-27.3	0.64	0.40	-37.3
180	0.06	0.06	-3.4	0.13	0.11	-17.5	0.27	0.19	-29.2	0.55	0.34	-39.0
200	0.06	0.05	-5.7	0.12	0.09	-19.4	0.24	0.17	-30.9	0.48	0.29	-40.4

Table 3.32 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.8)

Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	5.74	12.72	121.7	12.29	23.11	88.0	25.93	41.48	60.0	53.25	72.91	36.9
10	2.31	4.37	89.0	4.96	7.95	60.3	10.46	14.26	36.4	21.48	25.07	16.7
20	0.93	1.50	61.2	2.00	2.73	36.7	4.22	4.91	16.3	8.66	8.62	-0.5
40	0.38	0.52	37.4	0.81	0.94	16.5	1.70	1.69	-0.8	3.49	2.96	-15.1
60	0.22	0.28	25.2	0.47	0.50	6.2	1.00	0.90	-9.7	2.05	1.59	-22.7
80	0.15	0.18	17.2	0.33	0.32	-0.6	0.69	0.58	-15.5	1.41	1.02	-27.6
100	0.11	0.13	11.3	0.24	0.23	-5.6	0.51	0.41	-19.7	1.05	0.72	-31.3
120	0.09	0.10	6.7	0.19	0.17	-9.5	0.40	0.31	-23.0	0.83	0.55	-34.1
140	0.07	0.08	3.0	0.16	0.14	-12.6	0.33	0.25	-25.7	0.68	0.43	-36.4
160	0.06	0.06	-0.1	0.13	0.11	-15.3	0.28	0.20	-27.9	0.57	0.35	-38.3
180	0.05	0.05	-2.8	0.11	0.09	-17.5	0.24	0.17	-29.8	0.49	0.29	-39.9
200	0.05	0.04	-5.1	0.10	0.08	-19.5	0.21	0.14	-31.5	0.42	0.25	-41.4

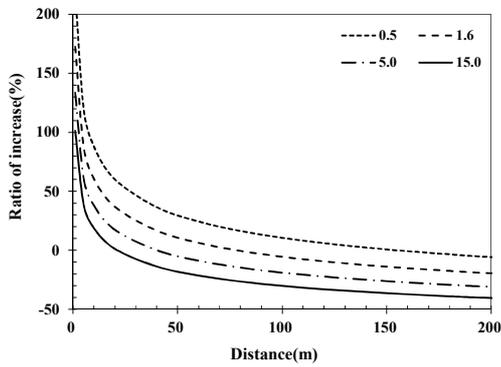


(a) PPV

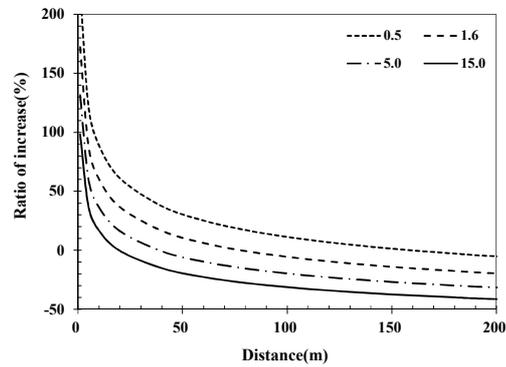


(b) PVS

Fig. 3.90 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.8)



(a) PPV



(b) PVS

Fig. 3.91 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.8)

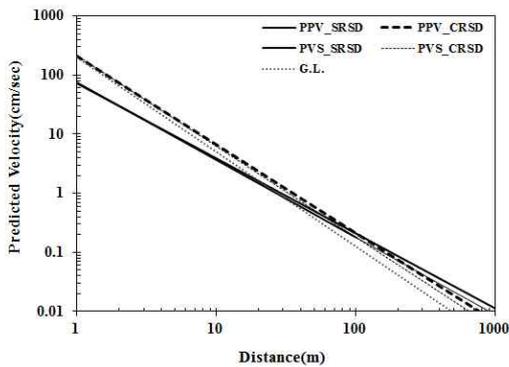


Fig. 3.92 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.8)

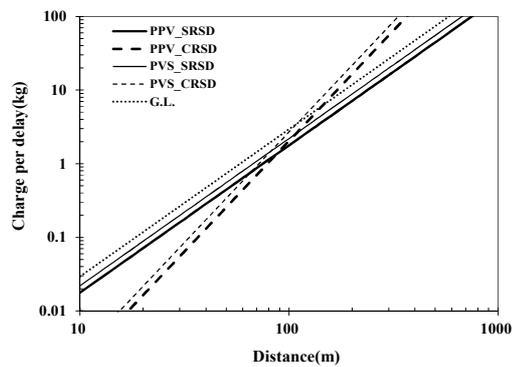


Fig. 3.93 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.8)

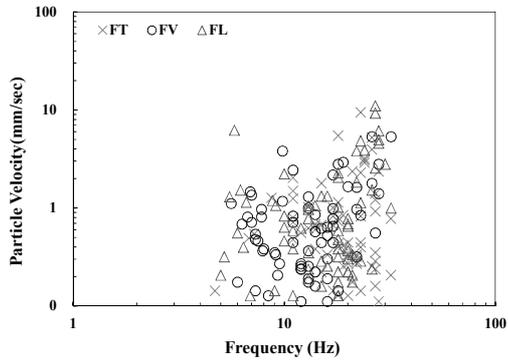


Fig. 3.94 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.8)

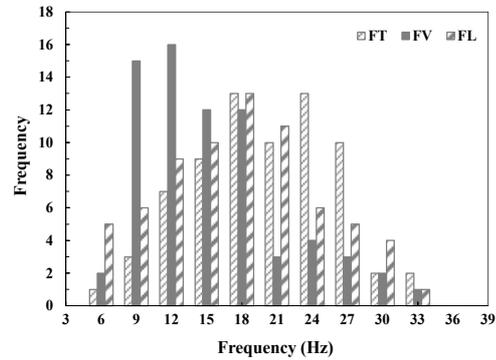


Fig. 3.95 Frequency Distribution (Test Blast No.8)

### 나. 시험발파 No.9

8번의 시험발파를 통해 40개의 지반진동 데이터가 계측되었다.

#### 1) 지반진동속도 예측

PPV와 PVS에 대한 거리와의 관계를 Fig. 3.96에서 보여주고 있으며, Table 3.33은 Fig. 3.97과 3.98에서와 같이 시험발파 데이터를 대수눈금 그래프에서 회귀분석한 신뢰도 50%, 95%에서 PPV와 PVS의 지반진동속도 예측식이다.

그리고 Fig. 3.99는 시험발파를 통해 계측된 진동데이터에서 각 성분별 진동속도 데이터를 회귀분석한 신뢰도 95%의 결과이며,  $V_T$ 는 접선방향 성분의 진동속도,  $V_V$ 는 수직방향 성분의 진동속도,  $V_L$ 은 진행방향 성분의 진동속도이다.

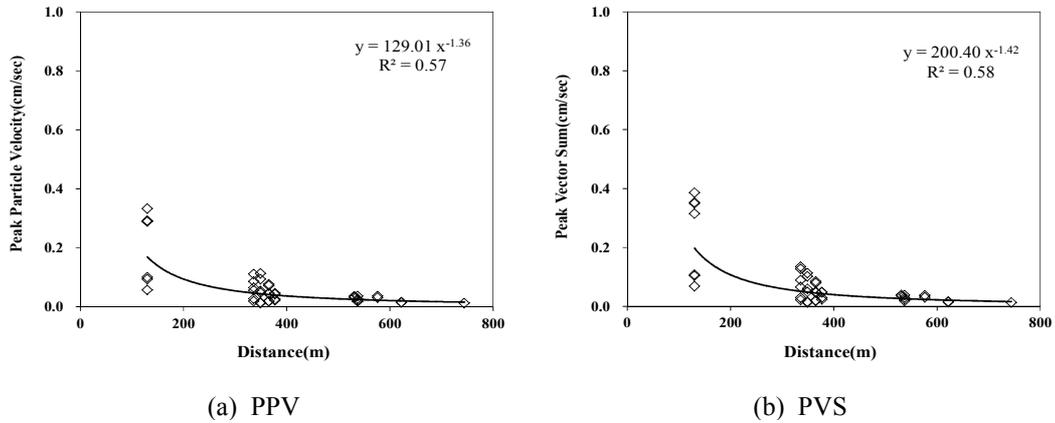
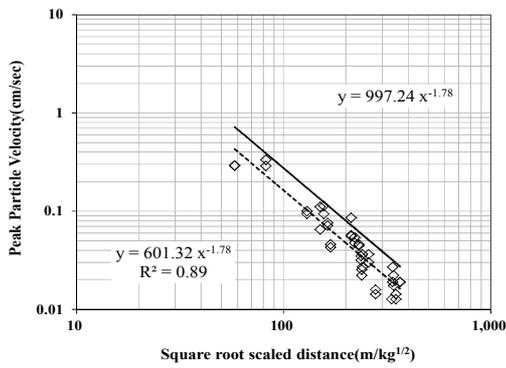


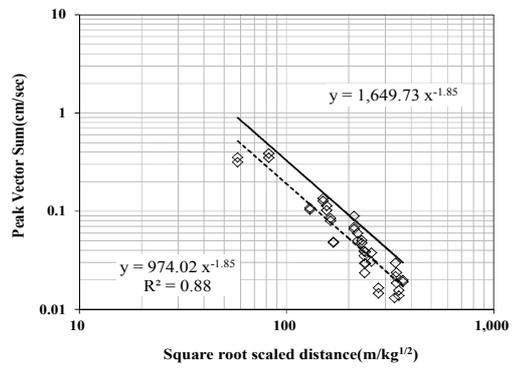
Fig. 3.96 Relationship between Distances and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.9)

Table 3.33 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity(PPV) and Peak Vector Sum(PVS) (Test Blast No.9)

Peak Particle Velocity(PPV, cm/s)				
SD method	Reliability	Predictive Equation	R	S.E
Square root	50%	$V = 601.32(SD)^{-1.78}$	0.94	0.13
	95%	$V = 997.24(SD)^{-1.78}$		
Cube root	50%	$V = 1174.29(SD)^{-1.85}$	0.93	0.14
	95%	$V = 2002.34(SD)^{-1.85}$		
Peak Vector Sum(PVS, cm/s)				
Square root	50%	$V = 974.02(SD)^{-1.85}$	0.94	0.14
	95%	$V = 1649.73(SD)^{-1.85}$		
Cube root	50%	$V = 1968.34(SD)^{-1.93}$	0.93	0.15
	95%	$V = 3422.22(SD)^{-1.93}$		

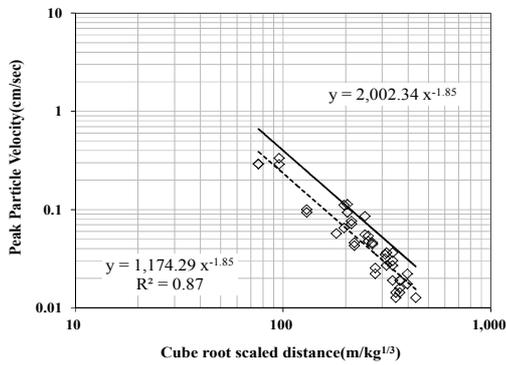


(a) PPV

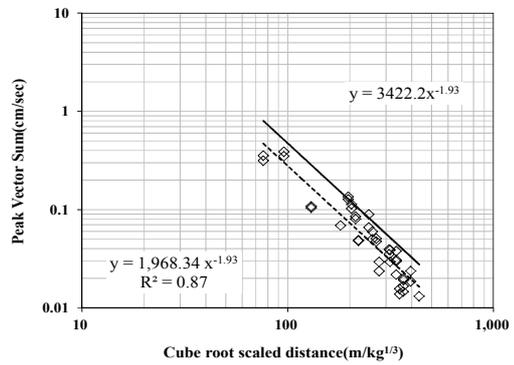


(b) PVS

Fig. 3.97 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.9)

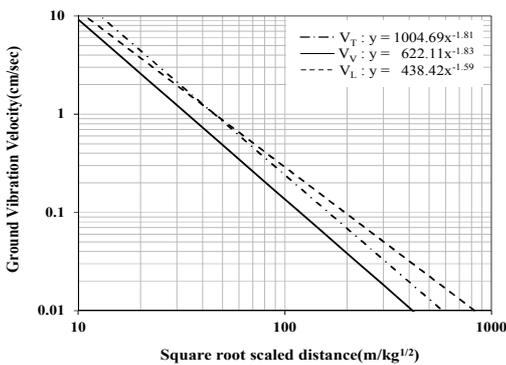


(a) PPV

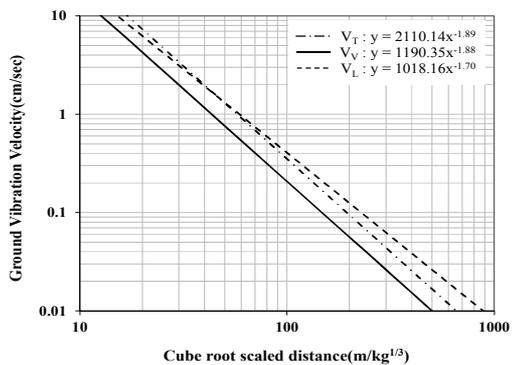


(b) PVS

Fig. 3.98 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.9)



(a) PPV



(b) PVS

Fig. 3.99 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No.9)

## 2) 지반 진동 분석

Table 3.33에서 예측된 최대입자속도(PPV)와 최대벡터합(PVS)의 95% 지반진동 속도 추정식을 이용하여 지발당 장약량을 기준으로 환산거리(Scale Distance) 방식에 따른 지반진동속도의 차이를 Table 3.34와 3.35에서 비교하고 Fig. 3.100와 3.101에 나타내었다.

지발당 장약량 0.5kg일 때, PPV와 PVS 추정식은 거리 200m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 큰 것으로 예측되고 SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 116.8% PVS는 121.7%로 PPV 보다 조금 크고 거리 200m에서는 PPV가 67.5% PVS는 65.0%로 감쇠기울기의 차이를 보이는 것으로 예측되었다.

지발당 장약량 5.0kg일 때, PPV와 PVS 추정식은 거리 40m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 크고 이후 반전되어 SRSD 방식의 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고, SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 15.5% PVS는 15.9%이며 반전된 후 SRSD 방식의 지반진동속도는 거리 200m에서 CRSD 보다 PPV가 10.7% 크고 PVS는 13.7% 더 큰 것으로 예측되었다. 전반적으로 지발당 장약량이 커질수록 근거리에서 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도 차이가 줄어들며 반전되는 거리 또한 줄어드는 것으로 확인되었다.

Fig. 102에서 환산거리(SD)에 따른 PPV와 PVS 추정식을 국내 가이드라인(국토해양부, 2006)과 비교하였다. 우선 PPV와 PVS 추정식은 SD 방식으로 예측되는 지반진동속도의 변화가 거의 유사하고 약 140m선에서 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도가 반전된다. 그리고 SRSD로 제안된 G.L 추정식과 시험발파에 의한 SRSD 방식의 추정식을 비교해 보면 약 15m의 매우 근거리에서는 G.L의 지반진동속도가 높지만 기울기가 커 진동속도의 감소가 큰 반면 시험발파에 의한 지반진동속도 추정식은 상대적으로 원거리까지 진동이 발생하는 것으로 예측되었다.

Fig. 103에서는 지반의 허용 진동속도를 재래주택 수준인 0.3cm/s로 가정하여

PPV와 PVS 지반진동속도 추정식을 이용해 거리에 따른 지발당 허용 장약량을 예측하였다. SD방식에 따라서는 두 가지가 비슷한 경향을 보이며 근거리에서 지반진동속도가 크게 예측되는 CRSD 방식은 SRSD 방식에 비해 지발당 허용 장약량이 작고 반전점 이 후에 커진다. 그리고 G.L 추정식과 유사한 기울기를 보이는 SRSD 방식의 추정식들도 지반진동속도가 더 높게 예측되었기 때문에 지발당 허용 장약량이 작고 원거리까지 유지된다.

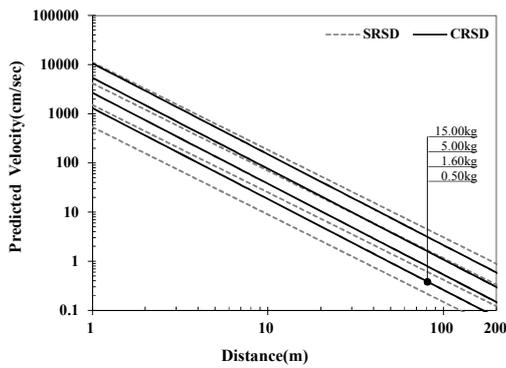
지반진동에 의한 각 성분별(T, V, L) 입자속도와 주파수를 Fig. 104에 나타내었고 Fig. 105와 같이 도수분포표를 작성하였다. 각 성분별 주파수 평균은 12.6~15.0Hz이고 최빈값은 11.0~21.0Hz로 분석되었으며 도수분포표에서도 9~21Hz에서 빈도가 매우 높다.

Table 3.34 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No.9)

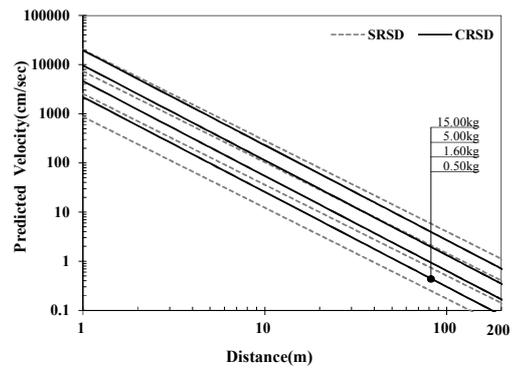
Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	30.67	66.50	116.8	86.36	136.24	57.8	238.08	275.09	15.5	632.93	541.63	-14.4
10	8.93	18.45	106.5	25.15	37.79	50.3	69.32	76.31	10.1	184.30	150.24	-18.5
20	2.60	5.12	96.8	7.32	10.48	43.2	20.19	21.17	4.9	53.66	41.68	-22.3
40	0.76	1.42	87.4	2.13	2.91	36.4	5.88	5.87	-0.1	15.63	11.56	-26.0
60	0.37	0.67	82.2	1.04	1.37	32.6	2.86	2.77	-2.9	7.59	5.46	-28.1
80	0.22	0.39	78.6	0.62	0.81	29.9	1.71	1.63	-4.8	4.55	3.21	-29.5
100	0.15	0.26	75.8	0.42	0.53	27.9	1.15	1.08	-6.3	3.06	2.12	-30.6
120	0.11	0.19	73.6	0.30	0.38	26.3	0.83	0.77	-7.5	2.21	1.51	-31.5
140	0.08	0.14	71.7	0.23	0.29	24.9	0.63	0.58	-8.5	1.68	1.14	-32.2
160	0.06	0.11	70.1	0.18	0.22	23.8	0.50	0.45	-9.3	1.32	0.89	-32.9
180	0.05	0.09	68.7	0.15	0.18	22.8	0.40	0.36	-10.1	1.07	0.72	-33.4
200	0.04	0.07	67.5	0.12	0.15	21.9	0.34	0.30	-10.7	0.89	0.59	-33.9

Table 3.35 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No.9)

Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	44.25	98.09	121.7	129.76	207.31	59.8	372.28	431.49	15.9	1028.50	874.81	-14.9
10	12.27	25.74	109.7	35.99	54.40	51.1	103.27	113.23	9.7	285.30	229.58	-19.5
20	3.40	6.76	98.4	9.98	14.28	43.0	28.65	29.72	3.7	79.14	60.25	-23.9
40	0.94	1.77	87.7	2.77	3.75	35.3	7.95	7.80	-1.9	21.95	15.81	-28.0
60	0.45	0.81	81.7	1.31	1.71	31.0	3.75	3.57	-5.0	10.37	7.23	-30.3
80	0.26	0.47	77.6	0.77	0.98	28.0	2.20	2.05	-7.2	6.09	4.15	-31.9
100	0.17	0.30	74.5	0.51	0.64	25.7	1.46	1.33	-8.8	4.03	2.70	-33.1
120	0.12	0.21	71.9	0.36	0.45	23.9	1.04	0.94	-10.1	2.88	1.90	-34.0
140	0.09	0.16	69.8	0.27	0.33	22.4	0.78	0.69	-11.2	2.16	1.41	-34.8
160	0.07	0.12	68.0	0.21	0.26	21.1	0.61	0.54	-12.2	1.69	1.09	-35.5
180	0.06	0.10	66.4	0.17	0.21	19.9	0.49	0.43	-13.0	1.36	0.87	-36.1
200	0.05	0.08	65.0	0.14	0.17	18.9	0.40	0.35	-13.7	1.12	0.71	-36.7

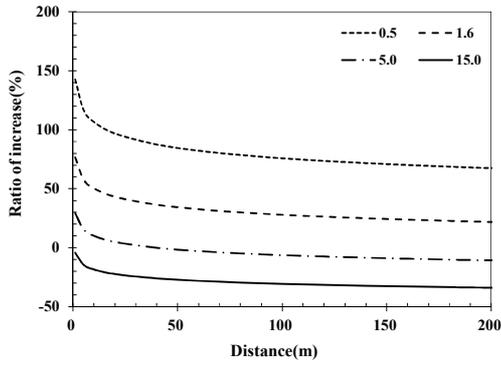


(a) PPV

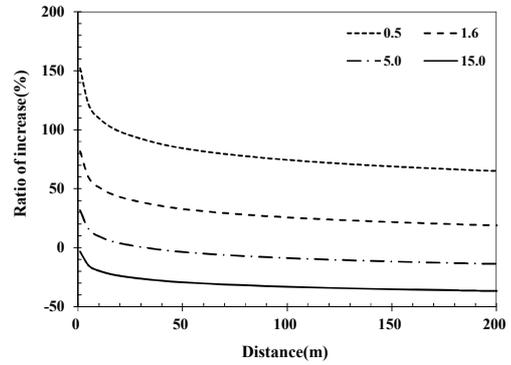


(b) PVS

Fig. 3.100 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.9)



(a) PPV



(b) PVS

Fig. 3.101 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No.9)

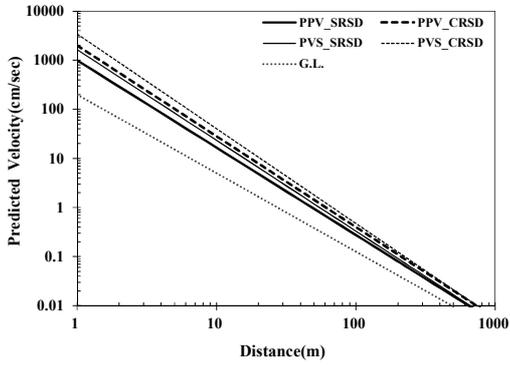


Fig. 3.102 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No.9)

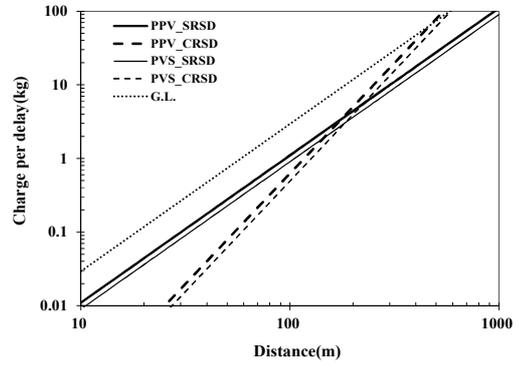


Fig. 3.103 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No.9)

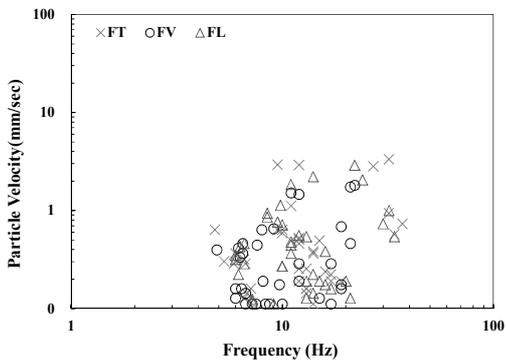


Fig. 3.104 Analysis of Vibrations Frequency (Test Blast No.9)

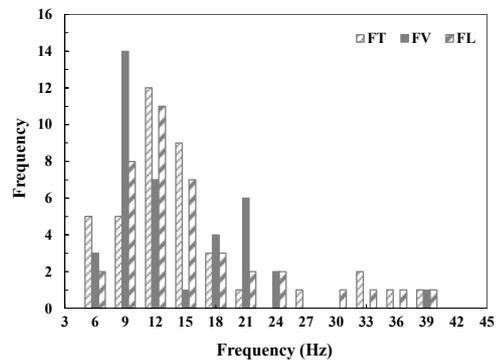


Fig. 3.105 Frequency Distribution (Test Blast No.9)

### 3.5 시험발파 데이터 종합

3개 사이트에서 9회, 61번의 시험발파를 통해 462개의 지반진동 데이터를 활용하였다. 이 장에서 데이터를 종합하여 분석한 결과를 제주지역의 사례기반 모델로 활용하였다.

#### 3.5.1 지반진동속도 예측

PPV와 PVS에 대한 거리와의 관계를 Fig. 3.106에서 보여주고 있으며, Table 3.36은 Fig. 3.107과 3.108에서와 같이 시험발파 데이터를 대수눈금 그래프에서 회귀분석한 신뢰도 50%, 95%에서 PPV와 PVS의 지반진동속도 예측식이다.

그리고 Fig. 3.109는 시험발파를 통해 계측된 진동데이터에서 각 성분별 진동속도 데이터를 회귀분석한 신뢰도 95%의 결과이며,  $V_T$ 는 접선방향 성분의 진동속도,  $V_V$ 는 수직방향 성분의 진동속도,  $V_L$ 은 진행방향 성분의 진동속도이다.

예측결과, SD 10에서 SRSD와 CRSD 모두  $V_L > V_V > V_T$  순으로 진동속도가 높고, SD 50부터는 SRSD와 CRSD 모두  $V_L > V_T > V_V$  순으로 나타났다.

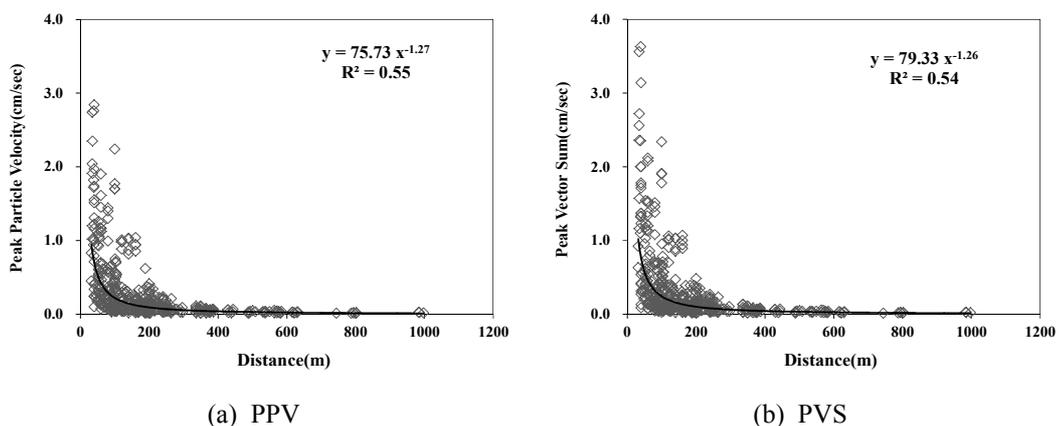
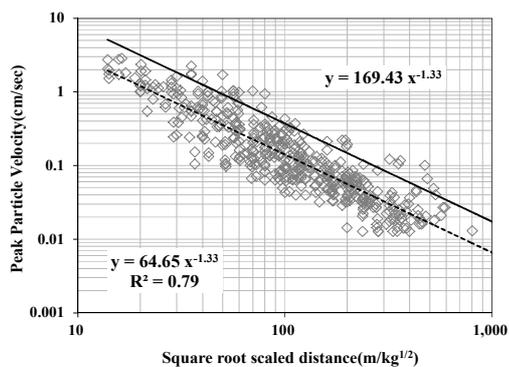


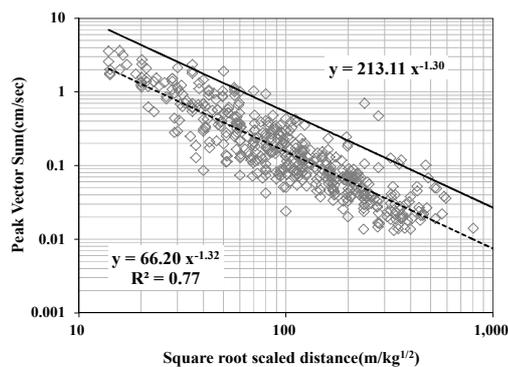
Fig. 3.106 Relationship between Distance and Velocities (PPV & PVS) (Test Blast No.All)

Table 3.36 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity(PPV) and Peak Vector Sum(PVS) (Test Blast No. All)

Peak Particle Velocity(PPV, cm/s)				
SD method	Reliability	Predictive Equation	R	S.E
Square root	50%	$V = 64.65(SD)^{-1.33}$	0.89	0.25
	95%	$V = 169.43(SD)^{-1.33}$		
Cube root	50%	$V = 137.74(SD)^{-1.46}$	0.89	0.26
	95%	$V = 364.81(SD)^{-1.46}$		
Peak Vector Sum(PVS, cm/s)				
Square root	50%	$V = 77.45(SD)^{-1.30}$	0.88	0.27
	95%	$V = 213.11(SD)^{-1.30}$		
Cube root	50%	$V = 153.36(SD)^{-1.42}$	0.88	0.27
	95%	$V = 424.69(SD)^{-1.42}$		



(a) PPV



(b) PVS

Fig. 3.107 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.All)

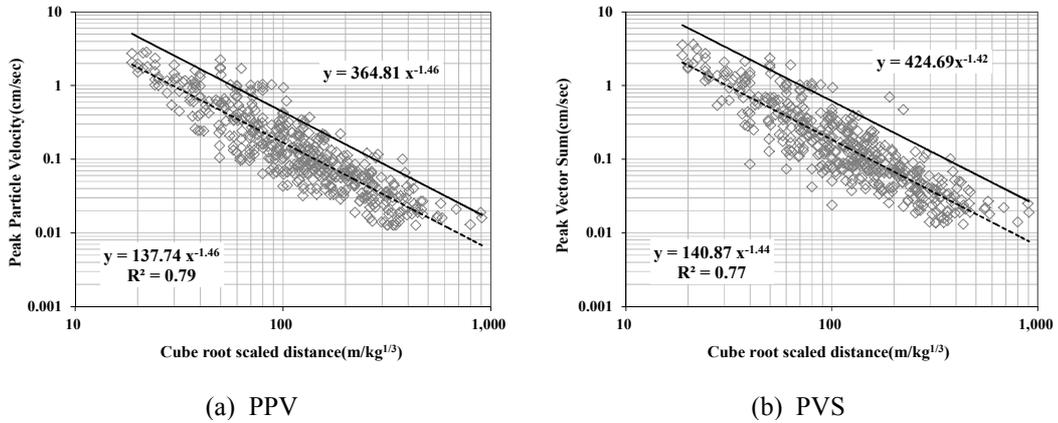


Fig. 3.108 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (Test Blast No.All)

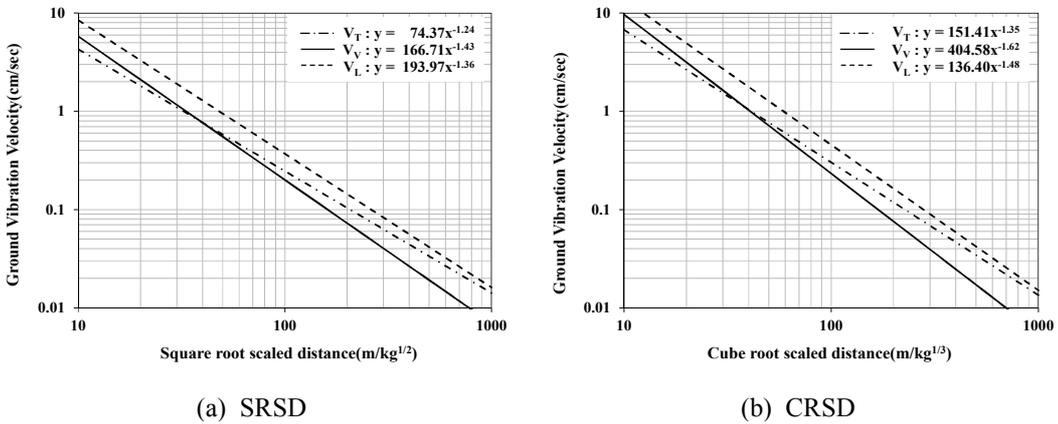


Fig. 3.109 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (Test Blast No. All)

### 3.5.2 지반진동속도 분석

지반진동 예측에 사용된 지발당 장약량은 국토해양부(2006)의 “도로공사 노천발파 설계·시공 지침”에 제시된 표준발파공법의 공법별 경계 기준 장약량인 0.5, 1.6, 5.0, 15.0kg을 적용하였고, Table 3.36에서 예측된 최대입자속도(PPV)와 최대벡터합(PVS)의 95% 지반진동속도 추정식을 이용하여 지발당 장약량을 기준으로 환산거리(Scale Distance) 방식에 따른 지반진동속도의 차이를 Table 3.37과 3.38에서 비교하고 Fig. 3.110와 3.111에 나타내었다.

지발당 장약량 0.5kg일 때, PPV와 PVS 추정식은 거리 200m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 큰 것으로 예측되고 SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 97.7% PVS는 85.7%로 PPV 보다 조금 작고 거리 200m에서는 PPV가 22.4% PVS는 19.3%로 감쇠기울기의 차이를 보이는 것으로 예측되었다.

지발당 장약량 5.0kg일 때, PPV 추정식은 거리 40m까지 PVS 추정식은 거리 20m까지 CRSD 방식의 지반진동속도가 크고 이후 반전되어 SRSD 방식의 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고, SRSD와 차이는 거리 5m에서 PPV가 31.1% PVS는 23.6%이며 반전된 후 SRSD 방식의 지반진동속도는 거리 200m에서 CRSD 보다 PPV가 18.8% 크고 PVS는 20.6% 더 큰 것으로 예측되었다.

전반적으로 지발당 장약량이 커질수록 근거리에서 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도 차이가 줄어들며 반전되는 거리 또한 줄어드는 것으로 확인되었다.

또한, 지발당 장약량(0.5, 5.0kg)에 따른 SRSD 방식과 CRSD 방식의 성분별 지반진동속도는 Table 3.39와 3.40 및 Fig. 3.112과 3.113과 같이 예측되었다.

지반진동에서 접선성분의 경우 S파(횡파)가 수직성분에는 Rayleigh파(표면파)가 진행성분의 경우 P파(종파)가 우세하다. 보통 폭발위치가 깊지 않거나 암반이 대단히 균질한 경우가 아니면 입체파는 방출에너지의 절반 이하로 작게 나타나고 나머지 암석의 표면이나 내부의 자유면을 따라 이동하는 표면파가 된다(Ryu, 2014). 그러므로 지표 부근에서 실시한 발파작업에 의한 지반진동에는 상대적으로 입체파보다 표면파에 더 많은 에너지가 작용한다.

예측결과를 살펴보면, SRSD와 CRSD 방식 모두에서는 장약량의 변화 및 거리와 상관없이 P파로 이루어진 진행성분(L)이 가장 우세하고 발파원과 거리가 가까우면 Rayleigh파로 이루어진 수직성분(V)이 우세하며 원거리로 가면 S파로 이루어진 접선성분(T)이 우세하게 역전된다.

이러한 현상은 장약량이 증가할수록 폭약의 방출에너지가 커져 속도는 느리지만 발파원과 거리가 가까운 경우 지반의 표면을 따라 이동하는 Rayleigh파에 의한 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. 그리고 S파로 이루어진 접선성분(T)의 경우 발파원과 거리가 가까우면 진동수준이 낮게 예측되는데 이는 고체만을 통과하는 S파의 특성상 현장 지반의 구조적 특징(불연속면 분포 및 클링커층)을 유추할 수 있다.

Fig. 3.114에서 환산거리(SD)에 따른 PPV와 PVS 추정식을 국내 가이드라인(국토해양부, 2006)과 비교하였다. 우선 PPV와 PVS 추정식은 SD 방식으로 예측되는 지반진동속도의 변화가 거의 유사하고 원거리인 약 200m선에서 CRSD 방식과 SRSD 방식의 지반진동속도가 역전된다. 그리고 두 방식 모두 G.L의 지반진동속도보다 지반진동속도를 높게 예측하고 있으며, 폭원으로부터 원거리로 갈수록 그 차이가 커진다. 이는 발파로 인해 발생된 에너지가 집중되지 못하고 폭원으로부터 멀리 전파된 것으로 판단된다.

Fig. 3.115에서는 지반의 허용 진동속도를 재래주택 수준인 0.3cm/s로 가정하여 PPV와 PVS 지반진동속도 추정식을 이용해 거리에 따른 지발당 허용 장약량을 예측하였다. SD방식에 따라서는 PPV와 PVS 지반진동속도가 비슷한 경향을 보이며 비교적 근거리에서 지반진동속도가 크게 예측되는 CRSD 방식은 SRSD 방식에 비해 지발당 허용 장약량이 작고 역전점 이후에 커진다. 그리고 G.L 추정식과 유사한 기울기를 보이는 SRSD 방식의 추정식들도 지반진동속도가 더 높게 예측되었기 때문에 지발당 허용 장약량이 작고 원거리까지 유지된다.

Table 3.41은 각 방식에 대한 표준발파공법 및 진동규제기준(허용 진동속도 0.3cm/s)에 대한 이격거리를 나타내고 있다. 표준발파패턴 II인 정밀진동제어발파의 지발당 장약량은 0.5kg 미만이며, 이에 대응하는 이격거리로 G.L은 41.2m 미만이고 PPV\_SRSD는 82.9m 미만으로 약 2배정도 크고 PPV\_CRSD는 103.0m 미만으로 약 2.5배정도 크다. 그리고 표준발파패턴 IV인 중규모진동제어발파의 지발당 장약량은 5.0kg 미만이며, 이에 대응하는 G.L은 130.1m 미만이고 PPV\_SRSD는 262.2m 미만으로 약 2배정도 크고 PPV\_CRSD는 221.8m 미만으로 약 1.7배

정도 크게 예측되어 표준발파패턴 II에서 보다 줄어들었다.

이는 Fig. 3.115에서 G.L과 거의 유사한 기울기를 보이는 SRSD 방식의 경우 지발당 장약량으로 제어하게 되면 원거리로 이동해도 G.L과는 약 2배 수준의 거리차가 유지된다. 하지만 CRSD 방식의 경우 G.L보다 기울기가 크기 때문에 근거리에서는 다소 차이를 보이지만 원거리로 갈수록 거리 차이가 좁혀진다. Table 3.42는 Table 3.43을 거리 10m 단위로 나누어 제시한 거리에 따른 지발당 장약량 조건표이다.

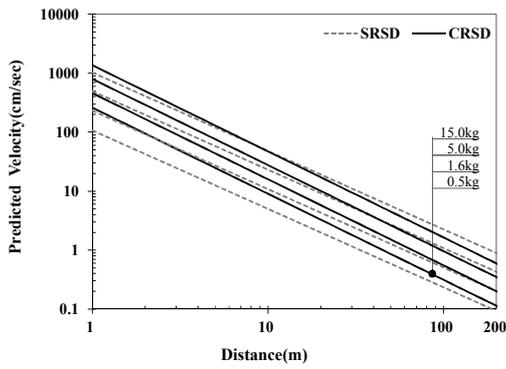
지반진동에 의한 각 성분별(T, V, L) 주파수를 분석하여 Fig. 3.116과 같이 도수분포표로 작성하였다. 주파수 대역은 1Hz~51Hz사이로 나타났으며, 도수분포표에 의하면 9~15Hz 사이에서 매우 높은 빈도를 보여주고 있다. Table 3.43은 각 성분별 주파수의 기초통계량이며 각 성분별 주파수의 특성은 평균이 진행성분(FL) 13.5Hz, 수직성분(FV) 13.9Hz, 접선성분(FL)이 12.4Hz이고 최빈값은 FL이 12.0Hz이고 FV는 13.0Hz 그리고 FT는 11.0Hz로 분석되었다.

Table 3.37 The Influence of Charge per Delay on the PPV (Test Blast No. All)

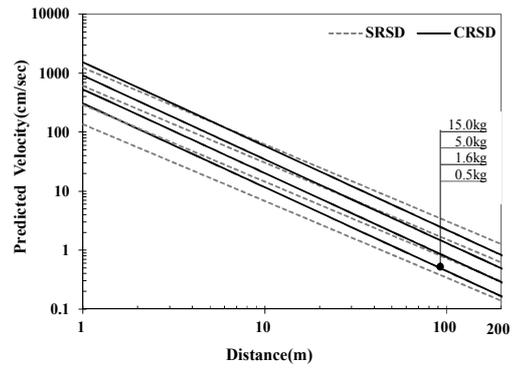
Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	12.57	24.84	97.7	27.23	43.74	60.6	58.10	76.16	31.1	120.63	130.00	7.8
10	5.00	9.03	80.6	10.83	15.90	46.8	23.11	27.68	19.8	47.98	47.25	-1.5
20	1.99	3.28	65.1	4.31	5.78	34.1	9.19	10.06	9.5	19.09	17.18	-10.0
40	0.79	1.19	50.8	1.71	2.10	22.6	3.66	3.66	0.0	7.59	6.24	-17.8
60	0.46	0.66	43.1	1.00	1.16	16.3	2.13	2.02	-5.1	4.43	3.45	-22.0
80	0.31	0.43	37.8	0.68	0.76	12.0	1.45	1.33	-8.6	3.02	2.27	-24.8
100	0.23	0.31	33.9	0.51	0.55	8.8	1.08	0.96	-11.2	2.24	1.64	-27.0
120	0.18	0.24	30.8	0.40	0.42	6.3	0.85	0.74	-13.3	1.76	1.26	-28.7
140	0.15	0.19	28.2	0.32	0.34	4.2	0.69	0.59	-15.0	1.43	1.00	-30.1
160	0.13	0.16	26.0	0.27	0.28	2.4	0.58	0.48	-16.5	1.20	0.82	-31.3
180	0.11	0.13	24.0	0.23	0.23	0.8	0.49	0.41	-17.7	1.03	0.69	-32.4
200	0.09	0.11	22.4	0.20	0.20	-0.6	0.43	0.35	-18.8	0.89	0.60	-33.3

Table 3.38 The Influence of Charge per Delay on the PVS (Test Blast No. All)

Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	16.76	31.12	85.7	35.70	53.97	51.2	74.86	92.55	23.6	152.90	155.68	1.8
10	6.81	11.63	70.9	14.50	20.17	39.1	30.40	34.59	13.8	62.10	58.18	-6.3
20	2.76	4.35	57.2	5.89	7.54	28.0	12.35	12.93	4.7	25.22	21.74	-13.8
40	1.12	1.62	44.7	2.39	2.82	17.8	5.01	4.83	-3.7	10.24	8.13	-20.7
60	0.66	0.91	37.8	1.41	1.58	12.2	2.96	2.72	-8.2	6.05	4.57	-24.4
80	0.46	0.61	33.1	0.97	1.05	8.4	2.04	1.81	-11.4	4.16	3.04	-27.0
100	0.34	0.44	29.6	0.73	0.77	5.5	1.52	1.31	-13.7	3.11	2.21	-28.9
120	0.27	0.34	26.8	0.57	0.59	3.3	1.20	1.02	-15.6	2.46	1.71	-30.5
140	0.22	0.27	24.5	0.47	0.48	1.4	0.98	0.82	-17.1	2.01	1.37	-31.7
160	0.19	0.23	22.5	0.39	0.39	-0.2	0.83	0.67	-18.4	1.69	1.13	-32.8
180	0.16	0.19	20.8	0.34	0.33	-1.6	0.71	0.57	-19.6	1.45	0.96	-33.8
200	0.14	0.17	19.3	0.30	0.29	-2.9	0.62	0.49	-20.6	1.26	0.83	-34.6

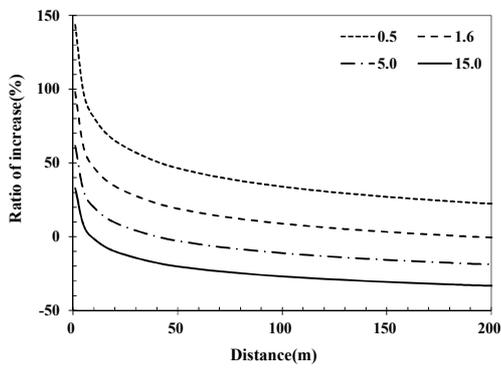


(a) PPV

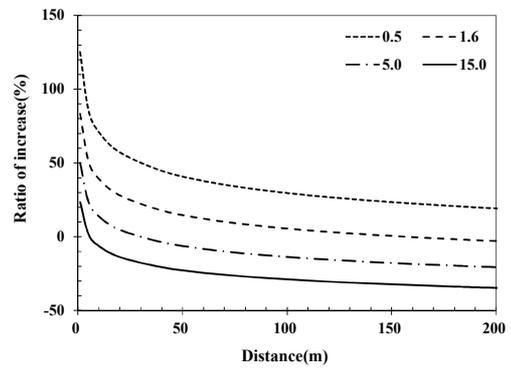


(b) PVS

Fig. 3.110 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Test Blast No. All)



(a) PPV



(b) PVS

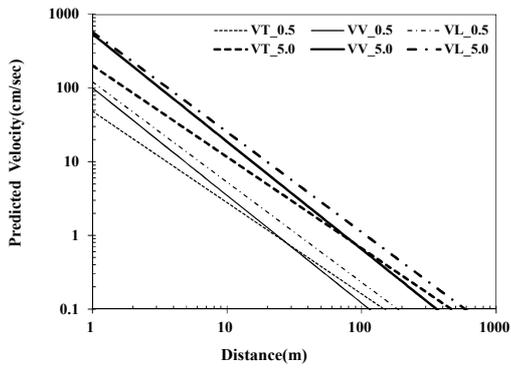
Fig. 3.111 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Test Blast No. All)

Table 3.39 The Influence of Charge per Delay on the Predicted Ground Vibration Velocity for SRSD (Test Blast No. All)

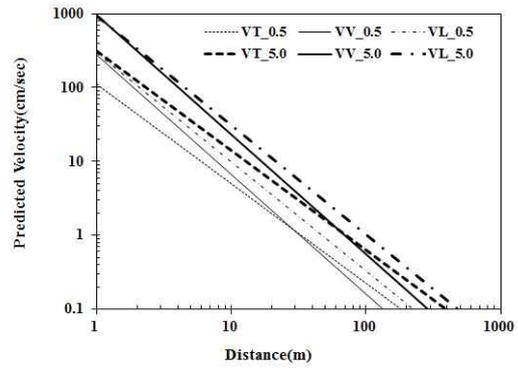
Charge per delay(kg)	0.5						5.0					
	$V_T$	$V_V$	$V_L$	$(V_V - V_T) / V_T$	$(V_L - V_V) / V_V$	$(V_L - V_T) / V_T$	$V_T$	$V_V$	$V_L$	$(V_V - V_T) / V_T$	$(V_L - V_V) / V_V$	$(V_L - V_T) / V_T$
5	6.58	9.59	13.57	45.8	41.49	106.2	27.42	51.49	64.93	87.8	26.10	136.8
10	2.78	3.49	5.28	25.2	51.64	89.8	11.61	18.72	25.30	61.2	35.15	117.9
20	1.18	1.27	2.06	7.5	62.53	74.6	4.91	6.80	9.85	38.4	44.85	100.5
40	0.50	0.46	0.80	-7.7	74.19	60.7	2.08	2.47	3.84	18.8	55.25	84.5
60	0.30	0.25	0.46	-15.6	81.40	53.1	1.26	1.37	2.21	8.7	61.67	75.7
80	0.21	0.17	0.31	-20.8	86.70	47.9	0.88	0.90	1.50	2.0	66.39	69.8
100	0.16	0.12	0.23	-24.6	90.91	44.0	0.67	0.65	1.10	-2.9	70.15	65.3
120	0.13	0.09	0.18	-27.6	94.42	40.9	0.53	0.50	0.86	-6.7	73.28	61.7
140	0.11	0.07	0.15	-30.0	97.44	38.3	0.44	0.40	0.70	-9.8	75.97	58.8
160	0.09	0.06	0.12	-32.0	100.10	36.1	0.37	0.33	0.58	-12.4	78.34	56.2
180	0.08	0.05	0.10	-33.7	102.47	34.2	0.32	0.28	0.50	-14.6	80.45	54.0
200	0.07	0.04	0.09	-35.3	104.61	32.5	0.28	0.24	0.43	-16.6	82.36	52.1

Table 3.40 The Influence of Charge per Delay on the Predicted Ground Vibration Velocity for CRSD (Test Blast No. All)

Charge per delay(kg)	0.5						5.0					
	$V_T$	$V_V$	$V_L$	$(V_V - V_T) / V_T$	$(V_L - V_V) / V_V$	$(V_L - V_T) / V_T$	$V_T$	$V_V$	$V_L$	$(V_V - V_T) / V_T$	$(V_L - V_V) / V_V$	$(V_L - V_T) / V_T$
5	12.62	20.52	27.30	62.6	33.05	116.3	35.57	71.14	85.01	100.0	19.49	139.0
10	4.95	6.67	9.79	34.8	46.61	97.7	13.95	23.14	30.47	65.9	31.67	118.4
20	1.94	2.17	3.51	11.8	61.55	80.6	5.47	7.53	10.92	37.6	45.09	99.6
40	0.76	0.71	1.26	-7.3	78.01	65.1	2.15	2.45	3.92	14.1	59.87	82.4
60	0.44	0.37	0.69	-16.9	88.41	56.6	1.24	1.27	2.15	2.2	69.21	73.0
80	0.30	0.23	0.45	-23.1	96.15	50.8	0.84	0.80	1.40	-5.4	76.16	66.7
100	0.22	0.16	0.32	-27.6	102.37	46.5	0.62	0.56	1.01	-10.9	81.75	61.9
120	0.17	0.12	0.25	-31.1	107.61	43.1	0.49	0.41	0.77	-15.2	86.45	58.1
140	0.14	0.09	0.20	-33.9	112.13	40.3	0.40	0.32	0.61	-18.7	90.52	55.0
160	0.12	0.07	0.16	-36.2	116.14	37.8	0.33	0.26	0.50	-21.5	94.12	52.3
180	0.10	0.06	0.14	-38.2	119.73	35.7	0.28	0.21	0.42	-24.0	97.34	50.0
200	0.09	0.05	0.12	-40.0	123.00	33.9	0.24	0.18	0.36	-26.1	100.28	48.0

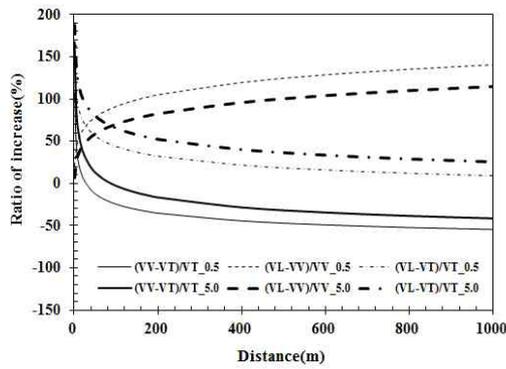


(a) SRSD

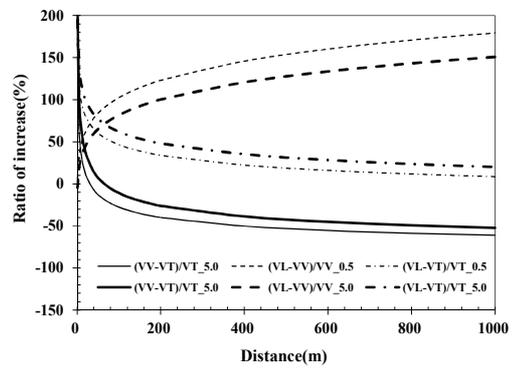


(b) CRSD

Fig. 3.112 Relationship between Predicted Ground Vibration Velocity(Component) and Distance by Charge per Delay (Test Blast No. All)



(a) SRSD



(b) CRSD

Fig. 3.113 Relationship between Ratio of Increase(Component) and Distance by Charge per Delay (Test Blast No. All)

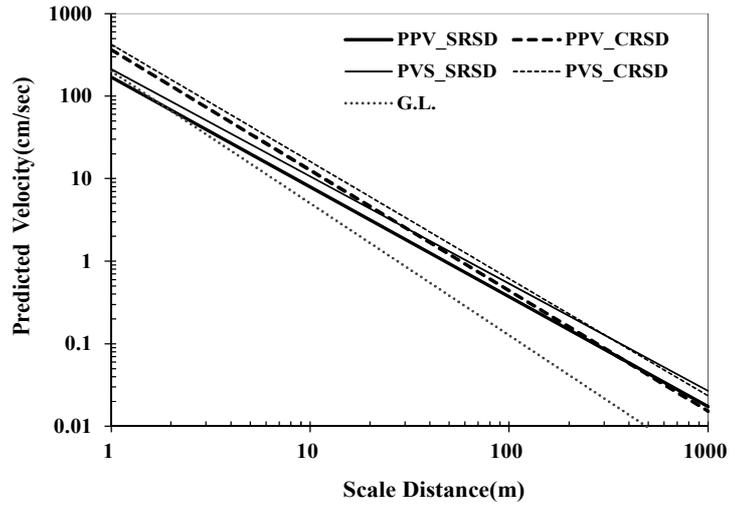


Fig. 3.114 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (Test Blast No. All)

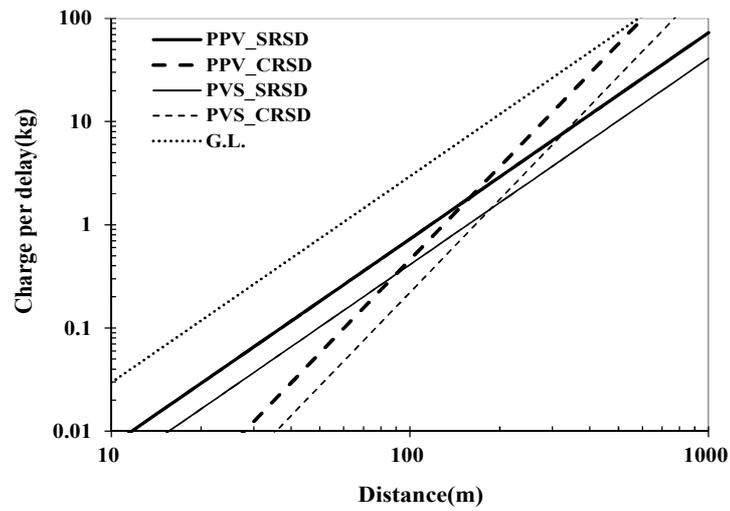


Fig. 3.115 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (Test Blast No. All)

Table 3.41 Separation Distance for Standard Blasting Method (Test Blast No. All)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)				
		G.L.	PPV		PVS	
		SRSD	SRSD	CRSD	SRSD	CRSD
I	0.125	20.6	41.4	64.9	55.2	82.8
II	0.5	41.2	82.9	103.0	110.4	131.4
III	1.6	73.6	148.3	151.7	197.5	193.7
IV	5.0	130.1	262.2	221.8	349.1	283.1
V	15.0	225.4	454.1	319.9	604.6	408.3
VI	15 Above					

Table 3.42 A Chart for Charge per Delay according to Distance (Test Blast No. All)

Maximum instantaneous charge-MIC(kg/delay)					
Distance(m)	G.L.	PPV		PVS	
	PPV_SRSD	PPV_SRSD	PPV_CRSD	PVS_SRSD	PVS_CRSD
10	0.030	0.007	0.000	0.004	0.000
20	0.118	0.029	0.004	0.016	0.002
30	0.266	0.065	0.012	0.037	0.006
40	0.472	0.116	0.029	0.066	0.014
50	0.738	0.182	0.057	0.103	0.028
60	1.063	0.262	0.099	0.148	0.048
70	1.446	0.357	0.157	0.201	0.076
80	1.889	0.466	0.235	0.263	0.113
90	2.391	0.589	0.334	0.332	0.161
100	2.952	0.728	0.458	0.410	0.220
110	3.572	0.880	0.610	0.496	0.293
120	4.251	1.048	0.792	0.591	0.381
130	4.989	1.230	1.007	0.693	0.484
140	5.786	1.426	1.257	0.804	0.605
150	6.642	1.637	1.546	0.923	0.744
160	7.557	1.863	1.877	1.050	0.902
170	8.531	2.103	2.251	1.186	1.082
180	9.564	2.357	2.672	1.329	1.285
190	10.657	2.626	3.143	1.481	1.511
200	11.808	2.910	3.666	1.641	1.763
210	13.018	3.209	4.243	1.809	2.040
220	14.288	3.521	4.879	1.986	2.346
230	15.616	3.849	5.575	2.170	2.681
240	17.003	4.191	6.334	2.363	3.046
250	18.450	4.547	7.160	2.564	3.443
260	19.955	4.918	8.054	2.774	3.872
270	21.520	5.304	9.019	2.991	4.337
280	23.144	5.704	10.059	3.217	4.837
290	24.826	6.119	11.175	3.451	5.373
300	26.568	6.548	12.372	3.693	5.949

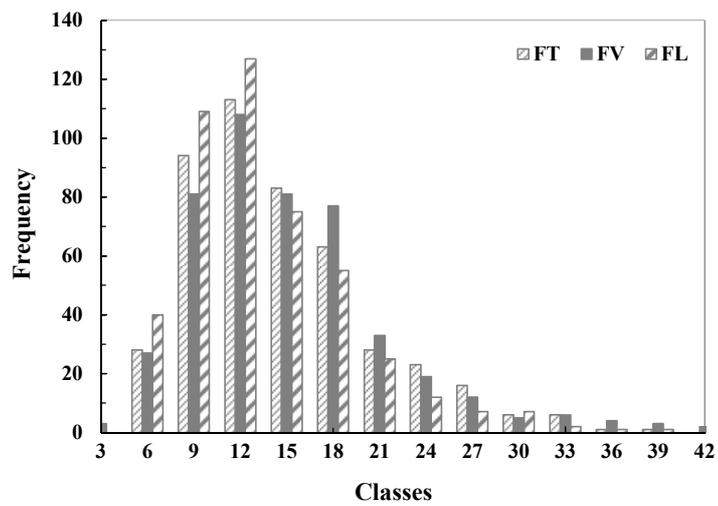


Fig. 3.116 Frequency distribution (Test Blast No. All)

Table 3.43 Statistics of Basic of Frequency (Test Blast No. All)

Division	FT	FV	FL
Mean	13.5	13.9	12.4
Median	12.0	13.0	11.0
Mode	12.0	13.0	11.0
Max.	37.0	47.0	51.0
Min.	4.0	1.0	4.0
Data	462	462	462

### 3.6 시험발파 지반진동속도 추정식 비교

시험발파 TB. 1 ~ 9와 시험발파 데이터를 모두 합한 TB.All에 대해 Peak Particle Velocity(PPV)에 대한 지반진동속도 추정식을 SRSD 방식과 CRSD 방식으로 구분하고, Peak Vector Sum(PVS)에 대한 지반진동속도 추정식도 SRSD 방식과 CRSD 방식으로 구분하였다.

따라서, 총 10개의 지반진동속도 추정식을 PPV\_SRSD, PVS\_SRSD, PPV\_CRSD, PVS\_CRSD로 각각 구분하고 신뢰도 50%, 95%에 대한 발파진동상수 K와 감쇠지수 n으로 정리하여 환산거리(SD)에 따른 지반진동속도와 허용진동속도 0.3 cm/s에서 거리에 따른 지발당 장약량을 비교하였다.

#### 3.6.1 PPV\_SRSD의 발파진동상수 K와 감쇠지수 n

PPV\_SRSD 방식의 지반진동속도 추정식을 발파진동상수 K와 감쇠지수 n으로 정리하면 Table 3.44와 같고, Fig. 3.117에서 신뢰도 95%의 환산거리(SD)에 따른 지반진동속도를 비교하였다.

TB. 1, 2, 3은 동일한 Site. 1에서 진동 계측기가 고정된 상태로 폭원의 발파 위치를 변경하여 표준발파패턴 II, III, IV, V로부터 획득한 진동데이터를 분석한 결과들이나 발파진동상수 K와 감쇠지수 n의 동질성을 찾아보기 어렵다. 그리고 TB. 7과 TB. 8은 다른 사이트에서 진행된 시험발파에 의한 결과이나 감쇠지수 n이 동일한 값을 보이고 있으며 발파진동상수 K는 다르다. 감쇠지수 n의 절대값이 같을 때 발파진동상수 K값이 커질수록 동일한 설계에서는 진동이 멀리 전파된다는 기존 연구(Yang et al., 2011)와 같은 결과를 보이고 있다. 그리고 전체 데이터로 지반진동속도를 추정한 TB. All은 동일한 설계에서 비교적 높은 수준의 지반진동속도를 예측하고 있다.

Fig. 3.118에서는 허용진동속도 0.3 cm/s에서 신뢰도 95%의 거리에 따른 지발

당 장약량을 비교하였다. 환산거리(SD)가 G.L과 동일한 SRSD 방식으로 검토되어 대수나선지에서 추정식의 기울기가 모두 동일하고 Fig. 3.117에서 지반진동속도가 매우 높게 추정된 TB. 7은 동일한 거리에서 지발당 장약량이 가장 작은 것으로 나타났다. 그리고 폭원과 근거리에서 지반진동속도가 중간정도로 추정된 TB. 1은 원거리로 갈수록 상대적으로 진동속도가 커져 동일거리에서 지발당 장약량이 작게 추정되었다. 이처럼 거리에 따른 지발당 허용 장약량은 근거리와 원거리를 나누어 추정되지 않는다.

Table 3.44 Comparison of Blasting Vibration Constant K and Attenuation Index n by PPV\_SRSD

Test Blast	Reliability	K	n	R
TB. 1	50%	11.70	-0.93	0.81
	95%	29.09		
TB. 2	50%	130.30	-1.55	0.96
	95%	401.10		
TB. 3	50%	83.49	-1.35	0.96
	95%	129.34		
TB. 4	50%	152.09	-1.59	0.96
	95%	271.73		
TB. 5	50%	17.51	-1.13	0.88
	95%	34.02		
TB. 6	50%	184.10	-1.58	0.97
	95%	306.89		
TB. 7	50%	91.24	-1.27	0.89
	95%	226.79		
TB. 8	50%	27.74	-1.27	0.85
	95%	72.17		
TB. 9	50%	601.32	-1.78	0.94
	95%	997.24		
TB. All	50%	64.65	-1.33	0.89
	95%	169.43		

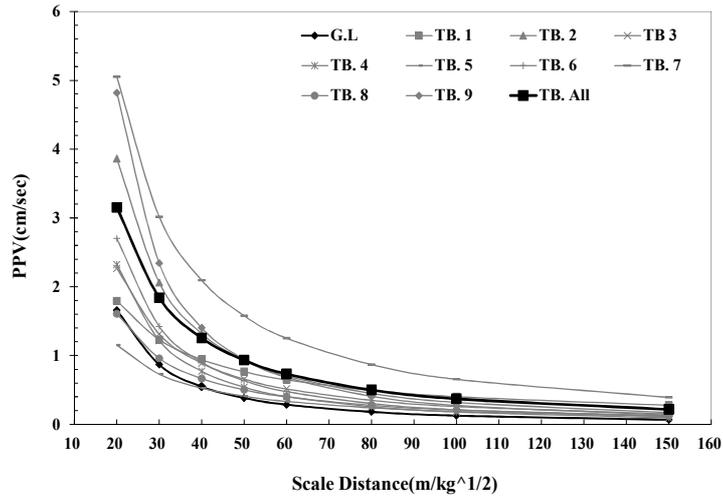


Fig. 3.117 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (PPV\_SRSD)

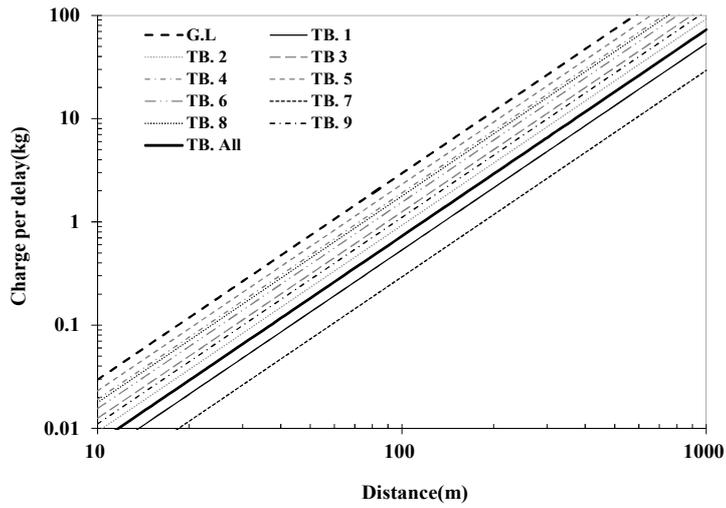


Fig. 3.118 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (PPV\_SRSD)

### 3.6.2 PVS\_SRSD의 발파진동상수 K와 감쇠지수 n

PVS\_SRSD 방식의 지반진동속도 추정식을 발파진동상수 K와 감쇠지수 n으로 정리하면 Table 3.45와 같고, Fig. 3.119에서 신뢰도 95%의 환산거리(SD)에 따른 지반진동속도를 비교하였다.

TB. 1, 2, 3은 동일한 Site. 1에서 진동 계측기가 고정된 상태로 폭원의 발파 위치를 변경하여 표준발파패턴 II, III, IV, V로부터 획득한 진동데이터를 분석한 결과들이나 PVS\_SRSD에서도 발파진동상수 K와 감쇠지수 n의 동질성을 찾아보기 어렵다. 지반진동속도 특징을 살펴보면, TB. 9의 지반진동속도가 가장 높게 추정되었으며, 발파진동상수 K와 감쇠지수 n의 절대값도 또한 가장 크다. 그리고 근거리와 원거리에서 지반진동속도 추정치의 차이가 PPV\_SRSD 보다 크다. 그리고 전체 데이터로 추정한 TB. All은 동일한 설계에서 높은 수준의 지반진동속도를 예측하고 있다.

그리고 Fig. 3.120에서는 허용진동속도 0.3 cm/s에서 신뢰도 95%의 거리에 따른 지발당 장약량을 비교하였다. 환산거리(SD)가 G.L과 동일한 SRSD 방식으로 검토되어 대수나선지에서 추정식의 기울기가 모두 동일하고 Fig. 3.119에서 지반진동속도가 변화가 가장 작은 TB. 5가 동일한 거리에서 지발당 장약량이 가장 작은 것으로 나타났고 그 다음이 TB. 7이다. 그리고 폭원과 근거리에서 지반진동속도의 변화가 비교적 큰 나머지 추정식들은 지발당 장약량 추정에서 변화폭이 매우 작은 결과를 보여주고 있다.

Table 3.45 Comparison of Blasting Vibration Constant K and Attenuation Index n by PVS\_SRSD

Test Blast	Reliability	K	n	R
TB. 1	50%	11.93	-0.91	0.80
	95%	29.62		
TB. 2	50%	255.00	-1.55	0.96
	95%	444.44		
TB. 3	50%	114.96	-1.40	0.98
	95%	174.56		
TB. 4	50%	220.21	-1.64	0.93
	95%	488.23		
TB. 5	50%	2.39	-0.61	0.48
	95%	8.04		
TB. 6	50%	135.76	-1.53	0.91
	95%	335.57		
TB. 7	50%	94.19	-1.26	0.90
	95%	221.00		
TB. 8	50%	34.74	-1.31	0.89
	95%	74.41		
TB. 9	50%	974.02	-1.85	0.94
	95%	1649.73		
TB. All	50%	77.45	-1.30	0.88
	95%	213.11		

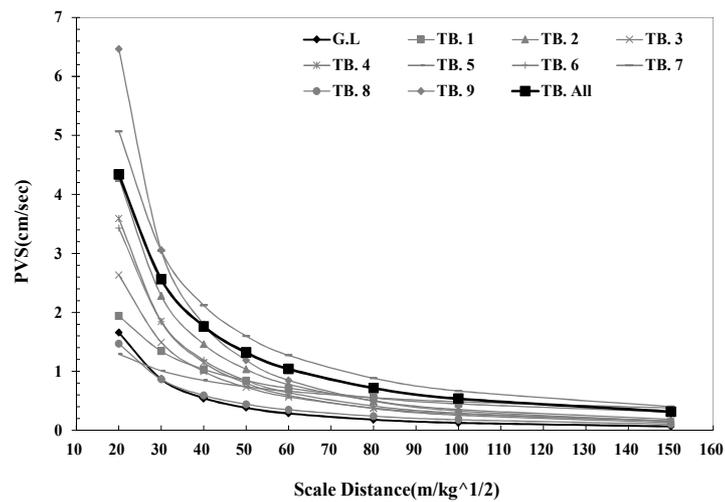


Fig. 3.119 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (PVS\_SRSD)

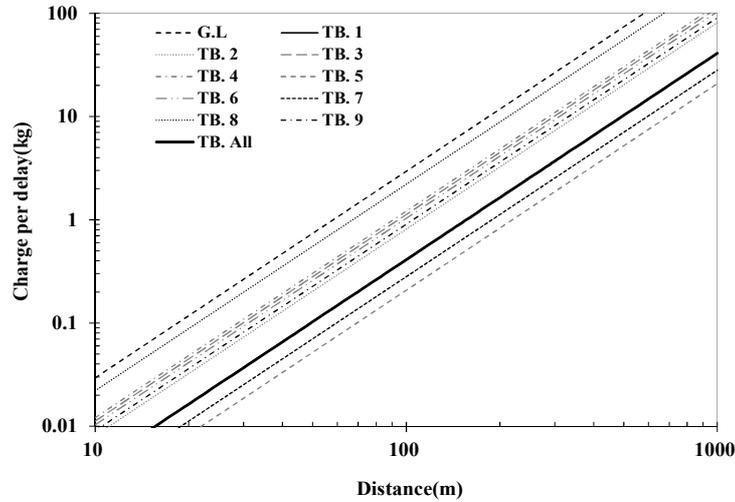


Fig. 3.120 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (PVS SRSD)

### 3.6.3 PPV\_CRSD의 발파진동상수 K와 감쇠지수 n

PPV\_CRSD 방식의 지반진동속도 추정식을 발파진동상수 K와 감쇠지수 n으로 정리하면 Table 3.46과 같고, Fig. 3.121에서 신뢰도 95%의 환산거리(SD)에 따른 지반진동속도를 비교하였다.

TB. 7의 지반진동속도가 가장 높게 추정되었으며, 발파진동상수 K와 감쇠지수 n의 절대값이 큰 TB. 9, 6, 2가 근거리에서 상대적으로 높은 진동속도를 보이고 있다. 그리고 전체 데이터로 추정한 TB. All은 동일한 설계에서 비교적 높은 수준의 지반진동속도를 예측하고 있다.

Fig. 3.122에서는 허용진동속도 0.3 cm/s에서 신뢰도 95%의 거리에 따른 지발당 장약량을 비교하였다. 환산거리(SD)가 G.L과 다른 방식인 삼승근의 CRSD 방식으로 검토되어 대수나선지에서 추정식의 기울기가 달라 직접 비교하기에는 무리가 있으나, 시험발파 전 설계에서와 부득이 시험발파가 진행되지 못하는 경우 적용되는 가장 일반적인 지반진동속도 추정식임으로 감안하여 같이 비교하였다.

Fig. 3.121에서 지반진동속도가 매우 높게 추정된 TB. 7은 동일한 거리에서 지발당 장약량이 가장 작은 것으로 나타났다. 그리고 폭원과 근거리에서 지반진동속도가 중간정도로 추정된 TB. 1은 원거리로 갈수록 상대적으로 진동속도가 커져 동일 거리에서 지발당 장약량이 작게 추정되었다. 이처럼 거리에 따른 지발당 허용 장약량은 근거리와 원거리를 나누어 추정되지 않는다. 그리고 G.L과 교점을 이룬 추정식들은 CRSD 방식을 이용한 지발당 장약량 적용 시 G.L과 교점 이후에 적용할 수 있는 장약량에 대한 충분한 주변영향을 검토해야 한다.

Table 3.46 Comparison of Blasting Vibration Constant K and Attenuation Index n by PPV\_CRSD

Test Blast	Reliability	K	n	R
TB. 1	50%	32.42	-1.11	0.84
	95%	75.70		
TB. 2	50%	476.82	-1.67	0.96
	95%	813.39		
TB. 3	50%	121.23	-1.40	0.96
	95%	209.92		
TB. 4	50%	273.52	-1.66	0.97
	95%	469.45		
TB. 5	50%	43.58	-1.31	0.88
	95%	84.65		
TB. 6	50%	931.40	-1.90	0.98
	95%	1434.19		
TB. 7	50%	268.91	-1.47	0.85
	95%	792.89		
TB. 8	50%	89.10	-1.50	0.88
	95%	209.56		
TB. 9	50%	1174.29	-1.85	0.93
	95%	2002.34		
TB. All	50%	137.74	-1.46	0.89
	95%	364.81		

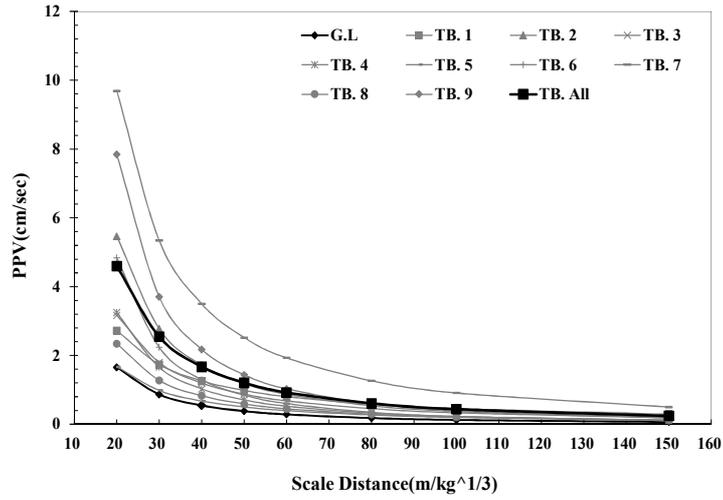


Fig. 3.121 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (PPV\_CRSD)

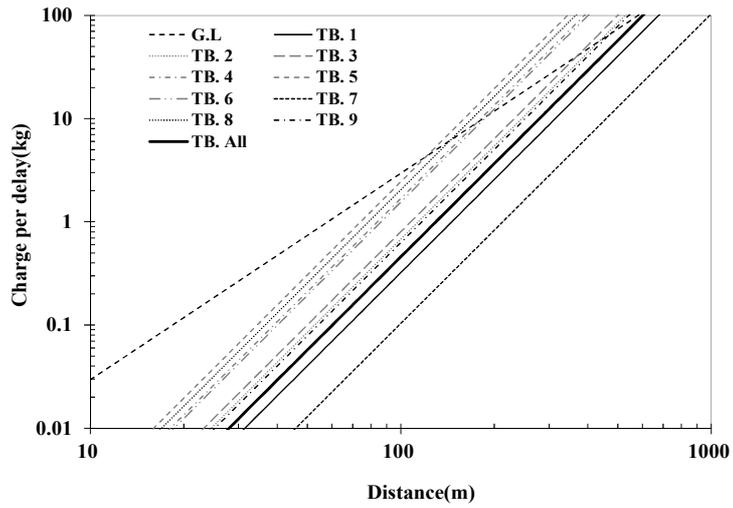


Fig. 3.122 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (PPV\_CRSD)

#### 3.6.4 PVS\_CRSD의 발파진동상수 K와 감쇠지수 n

PVS\_CRSD 방식의 지반진동속도 추정식을 발파진동상수 K와 감쇠지수 n으로 정리하면 Table 3.47과 같고, Fig. 3.123에서 신뢰도 95%의 환산거리(SD)에 따른 지반진동속도를 비교하였다.

TB. 7의 지반진동속도가 가장 크게 추정되었으며, 발파진동상수 K와 감쇠지수 n의 절대값이 큰 TB. 9, 6, 2 순으로 근거리에서 상대적으로 높은 진동속도를 보이고 있다. 그리고 전체데이터로 추정한 TB. All은 동일한 설계에서 비교적 높은 수준의 지반진동속도를 예측하고 있다.

Fig. 3.124에서는 허용진동속도 0.3 cm/s에서 신뢰도 95%의 거리에 따른 지발당 장약량을 비교하였다. Fig. 3.123에서 지반진동속도가 매우 높게 추정된 TB. 7은 동일한 거리에서 지발당 장약량이 가장 작은 것으로 나타났고 지반진동속도의 변화가 가장 작은 TB. 5가 동일한 거리에서 지발당 장약량이 두 번째로 작다. 이처럼 거리에 따른 지발당 허용 장약량은 근거리와 원거리를 나누어 추정되지 않는다. 그리고 G.L과 교점을 이룬 추정식들은 CRSD 방식을 이용한 지발당 장약량 적용 시 G.L과 교점 이후에 적용할 수 있는 장약량에 대한 충분한 주변영향을 검토해야 한다.

Table 3.47 Comparison of Blasting Vibration Constant K and Attenuation Index n by PVS\_CRSD

Test Blast	Reliability	K	n	R
TB. 1	50%	33.39	-1.10	0.84
	95%	77.05		
TB. 2	50%	516.79	-1.66	0.96
	95%	897.05		
TB. 3	50%	172.12	-1.45	0.97
	95%	289.47		
TB. 4	50%	406.92	-1.72	0.93
	95%	913.92		
TB. 5	50%	5.33	-0.78	0.53
	95%	17.25		
TB. 6	50%	472.68	-1.77	0.88
	95%	1321.57		
TB. 7	50%	281.07	-1.46	0.86
	95%	780.42		
TB. 8	50%	117.59	-1.54	0.94
	95%	216.50		
TB. 9	50%	1968.34	-1.93	0.93
	95%	3422.22		
TB. All	50%	153.36	-1.42	0.88
	95%	424.69		

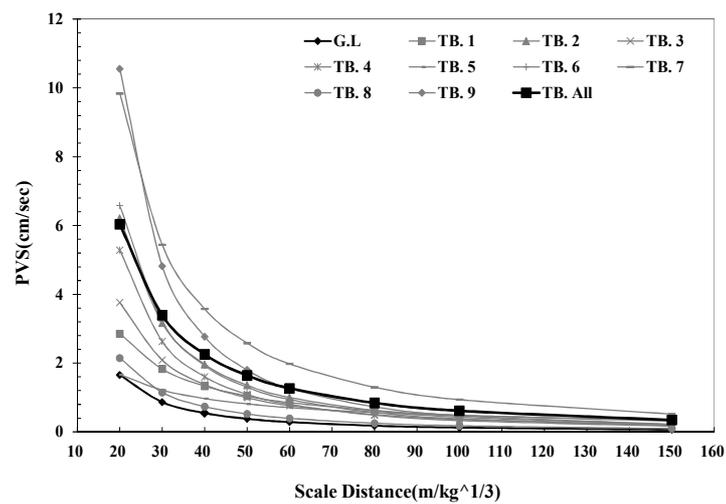


Fig. 3.123 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (PVS\_CRSD)

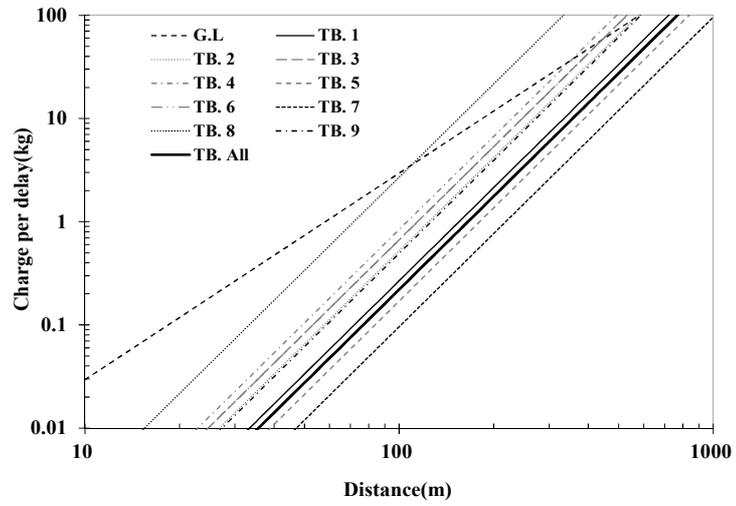


Fig. 3.124 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (PVS CRSD)

### 3.7 기반암 종류에 따른 지반진동속도 비교

지반을 전파매체로 하는 진동의 경우에는 지반 및 지형 등의 다양하고 복잡한 조건에 따라 전파되는 진동의 크기가 달라지므로, 관련 변수를 평가하고 그 적용상의 오류를 개선하는 등의 보완을 통하여 지속적으로 진동 추정치의 신뢰성을 높이는 것이 필요하다. 다시 말해서 각각의 현장에 있어서 현장계측에 의하지 않고는 발파에 의한 진동속도의 정확한 추정은 불가능하며, 다양한 조건하에서 많은 진동 추정식들이 기존 연구를 통하여 보고되었다 할지라도 그러한 식들은 주어진 조건하에서만 의미를 갖는다고 할 수 있다(Son, et. al., 2015).

본 연구를 통해 분석된 제주지역의 현무암과 클링커층(Basalt & Clinker)이 층상구조로 혼재되어 있는 지반에서의 발파로 인한 지반진동속도 추정식(No. All)의 발파진동상수 K와 감쇠지수 n을 내륙지역의 화강암(Granite), 편마암(Gneiss), 석회암(Lime stone), 퇴적암(Shale), 사암(Sand stone) 지반에서 추정된 발파진동 입지상수 K, n을 비교하였다.

내륙지역의 다양한 지반에서의 입지상수 K, n은 최근 비교적 많은 시험발파데이터를 분석하여 비교한 Son, et. al.(2015)의 연구결과에서 터널발파를 제외한 벤치 발파 결과들을 활용하였다.

#### 3.7.1 PPV\_SRSD의 발파진동상수 K와 감쇠지수 n

지반의 기반암 특성에 의한 PPV\_SRSD 방식의 지반진동속도 추정식을 발파진동상수 K와 감쇠지수 n으로 정리하면 Table 3.48과 같고, Fig. 3.125에서 신뢰도 95%의 환산거리(SD)에 따른 지반진동속도를 비교하였다.

신뢰도 95%에서 발파진동상수 K는 G.L이 160.0이고, 제주지역의 현무암과 클링커층(Basalt & Clinker)이 169.4로 다른 암에 비해 가장 작다. 그리고 감쇠지수 n의 절대값은 사암(Sand stone)이 1.28로 가장 작고 현무암과 클링커층(Basalt &

Clinker)이 1.33으로 그 다음이며, 모든 암이 G.L의 1.60 보다 작은 값을 보이고 있다. 또한 사암과 편마암은 결정계수 R2이 0.43, 0.50으로 지반진동속도 추정식의 입지상수 K, n에 대한 설명력이 조금 부족하지만, 각각 여러 현장의 시험발파 데이터를 취합하여 만든 다양한 지반특성을 내포하고 있는 점과 사암의 경우 시험발파가 빈번한 지반이 아니라는 점에서 비교 가치가 있다.

지반진동속도 특징을 살펴보면, 사암이 지반진동속도가 근거리와 원거리에서 가장 높게 추정되었고, 화강암, 편마암, 현무암과 클링커층은 유사한 수준으로 지반진동속도가 예측되었으며 그 다음 석회암, 퇴적암 순이다. 그리고 설계 시 반영되고 있는 G.L은 모든 암보다 지반진동속도가 작게 예측되고 있어 실제 보다 과대 설계될 수 있다.

그리고 Fig. 3.126에서는 허용진동속도 0.3 cm/s에서 신뢰도 95%의 거리에 따른 지발당 장약량을 비교하였다. 환산거리(SD)가 G.L과 동일한 SRSD 방식으로 검토되어 대수나선지에서 추정식의 기울기가 모두 동일하다. 지반진동속도가 가장 작게 예측된 G.L과 비교해, 모든 암이 G.L 보다 밑에 있어 동일한 거리에서 지발당 허용 장약량이 작다. 지반진동속도가 가장 크게 예측된 사암이 지발당 허용 장약량이 가장 작고, Fig. 3.125에서 지반진동속도가 유사한 것으로 예측된 세 가지 암은 현무암과 클링커층, 화강암, 편마암 순으로 지발당 허용 장약량이 작아 전체적인 지반진동속도가 역순인 것으로 유추되며, 그 다음은 석회암, 퇴적암 순이다.

Table 3.49는 G.L을 포함한 암종별 표준발파공법 및 진동규제기준(허용 진동속도 0.3cm/s)에 대한 이격거리를 나타내고 있다. 표준발파패턴 II인 정밀진동제어발파의 지발당 장약량은 0.5kg 미만이며, 이에 대응하는 이격거리로 G.L은 41.2m 미만이며, 사암이 135.7m 미만 그 다음이 현무암과 클링커층으로 82.9m미만으로 G.L 대비 약 2배정도 크다.

그리고 표준발파패턴 IV인 중규모진동제어발파의 지발당 장약량은 5.0kg 미만이며, 이에 대응하는 이격거리로 G.L은 130.1m 미만이며, 사암이 429.3m 미만 그

다음은 현무암과 클링커층으로 262.2m미만으로 G.L 대비 약 2배정도 크며 그 정도가 유지된다. Table 3.50은 Table 3.49를 거리 10m 단위로 나누어 제시한 암종별 거리에 따른 지발당 장약량 조건표이다.

이는 Fig. 3.126에서 G.L과 거의 유사한 기울기를 보이는 SRSD 방식의 경우 지발당 장약량으로 제어하게 되면 원거리로 이동해도 G.L과는 약 2배 수준의 거리차가 유지된다. 하지만 CRSD 방식의 경우 G.L보다 기울기가 크기 때문에 근거리에서는 다소 차이를 보이지만 원거리로 갈수록 거리 차이가 좁혀진다.

Table 3.48 Comparison of Blasting Vibration Constant K and Attenuation Index n by Bedrock

Test Blast	data	Reliability	K	n	R2
G.L		95%	200.0	-1.60	-
Granite	437	50%	79.0	-1.47	0.66
		95%	293.0		
Gneiss	283	50%	45.3	-1.39	0.50
		95%	196.0		
Lime stone	185	50%	90.0	-1.50	0.62
		95%	294.0		
Shale	73	50%	59.0	-1.43	0.89
		95%	159.0		
Sand stone	74	50%	33.0	-1.28	0.43
		95%	251.0		
Basalt & Clinker	462	50%	64.7	-1.33	0.79
		95%	169.4		

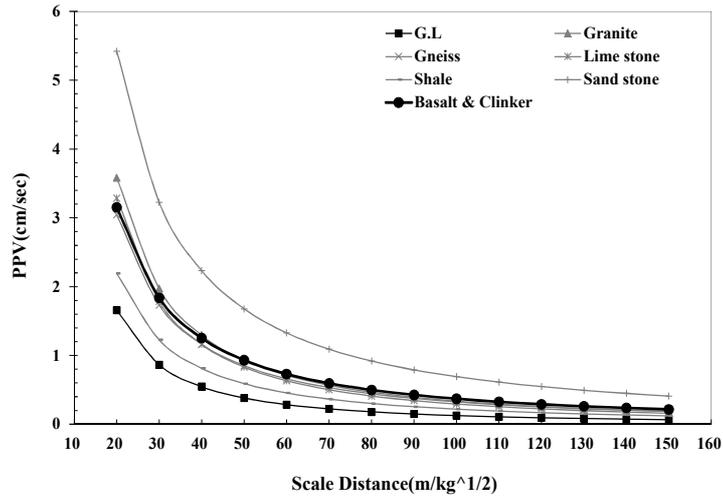


Fig. 3.125 Comparison of Ground Vibration Velocity according to scaled Distance on Ground with diverse bed rock (PPV SRSD)

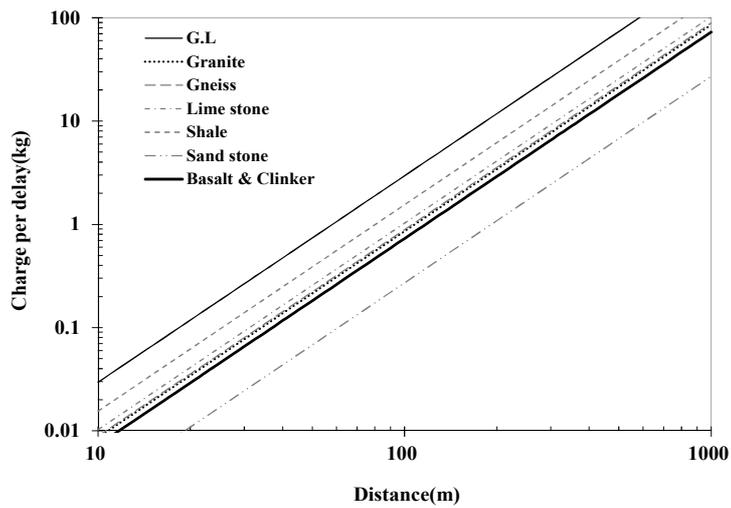


Fig. 3.126 Comparison of allowable Charge per Delay according to scaled Distance on Ground with diverse bed rock (PPV\_SRSD)

Table 3.49 Separation Distance according to Type of Rocks on Standard Blasting Method (Allowable Vibration Velocity 0.3cm/s)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Scale Distance(m/kg <sup>1/2</sup> )						
		G.L	Granite	Gneiss	Lime stone	Shale	Sand stone	Basalt & Clinker
I	0.125	20.6	38.2	37.5	34.9	28.4	67.9	41.5
II	0.5	41.2	76.4	74.9	69.8	56.8	135.7	82.9
III	1.6	73.6	136.7	134.1	124.8	101.7	242.8	148.3
IV	5.0	130.1	241.7	237.0	220.6	179.7	429.3	262.2
V	15.0	225.4	418.7	410.5	382.1	311.3	743.5	454.1
VI	15 Above							

Table 3.50 A Chart for Charge per Delay by Type of Rocks according to Distance (Allowable Vibration Velocity 0.3cm/s)

Maximum instantaneous charge-MIC(kg/delay)							
Distance(m)	G.L	Granite	Gneiss	Lime stone	Shale	Sand stone	Basalt & Clinker
10	0.030	0.009	0.009	0.010	0.015	0.003	0.007
20	0.118	0.034	0.036	0.041	0.062	0.011	0.029
30	0.266	0.077	0.080	0.092	0.139	0.024	0.065
40	0.472	0.137	0.142	0.164	0.248	0.043	0.116
50	0.738	0.214	0.223	0.257	0.387	0.068	0.182
60	1.063	0.308	0.320	0.370	0.557	0.098	0.262
70	1.446	0.419	0.436	0.503	0.759	0.133	0.356
80	1.889	0.548	0.570	0.657	0.991	0.174	0.466
90	2.391	0.693	0.721	0.832	1.254	0.220	0.589
100	2.952	0.856	0.890	1.027	1.548	0.271	0.728
110	3.572	1.035	1.077	1.243	1.873	0.328	0.880
120	4.251	1.232	1.282	1.479	2.229	0.391	1.048
130	4.989	1.446	1.504	1.736	2.616	0.459	1.230
140	5.786	1.677	1.745	2.014	3.034	0.532	1.426
150	6.642	1.925	2.003	2.311	3.483	0.611	1.637
160	7.557	2.191	2.279	2.630	3.963	0.695	1.862
170	8.531	2.473	2.572	2.969	4.474	0.784	2.103
180	9.564	2.772	2.884	3.328	5.016	0.879	2.357
190	10.657	3.089	3.213	3.709	5.589	0.980	2.626
200	11.808	3.423	3.560	4.109	6.193	1.085	2.910
210	13.018	3.774	3.925	4.530	6.828	1.197	3.208
220	14.288	4.142	4.308	4.972	7.493	1.313	3.521
230	15.616	4.527	4.709	5.434	8.190	1.435	3.849
240	17.003	4.929	5.127	5.917	8.918	1.563	4.191
250	18.450	5.348	5.563	6.421	9.676	1.696	4.547
260	19.955	5.784	6.017	6.945	10.466	1.834	4.918
270	21.520	6.238	6.489	7.489	11.286	1.978	5.304
280	23.144	6.709	6.979	8.054	12.138	2.127	5.704
290	24.826	7.196	7.486	8.640	13.020	2.282	6.119
300	26.568	7.701	8.011	9.246	13.934	2.442	6.548
1000	295.198	85.569	89.012	102.730	154.819	27.134	72.753

### 3.7.2 PPV\_CRSD의 발파진동상수 K와 감쇠지수 n

지반의 기반암 특성에 의한 PPV\_CRSD 방식의 지반진동속도 추정식을 발파진동상수 K와 감쇠지수 n으로 정리하면 Table 3.51과 같고, Fig. 3.127에서 신뢰도 95%의 환산거리(SD)에 따른 지반진동속도를 비교하였다.

신뢰도 95%에서 발파진동상수 K는 퇴적암이 240으로 가장 작고 그 다음 제주지역의 현무암과 클링커층(Basalt & Clinker)이 365로 다른 암에 비해 작다. 그리고 감쇠지수 n의 절대값은 현무암과 클링커층(Basalt & Clinker)이 1.46으로 가장 작고 편마암이 1.66으로 가장 큰 값을 보이고 있다. 또한 편마암과 사암은 결정계수 R2이 0.49, 0.51으로 지반진동속도 추정식의 입지상수 K, n에 대한 설명력이 조금 부족하지만, 각각 여러 현장의 시험발파데이터를 취합하여 만든 다양한 지반특성을 내포하고 있는 점과 사암의 경우 시험발파가 빈번한 지반이 아니라는 점에서 비교 가치가 있다.

지반진동속도 특징은 사암이 지반진동속도가 근거리와 원거리에서 가장 높게 추정되었고, 화강암, 편마암, 현무암과 클링커층은 유사한 수준으로 지반진동속도가 예측되었으며 그 다음 석회암, 퇴적암 순이다. 그리고 설계 시 반영되고 있는 SRSD 방식의 G.L은 비교를 생략한다.

그리고, Fig. 3.128에서는 허용진동속도 0.3 cm/s에서 신뢰도 95%의 거리에 따른 지발당 장약량을 비교하였다. 환산거리(SD)가 G.L과 다른 CRSD 방식으로 검토되어 기울기가 다르다. 지반진동속도가 가장 크게 예측된 사암이 지발당 허용 장약량이 가장 작고, Fig. 3.127에서 지반진동속도가 유사한 것으로 예측된 세 가지 암은 현무암과 클링커층, 화강암, 편마암 순으로 지발당 허용 장약량이 작아 전체적인 지반진동속도가 역순인 것으로 유추되며, 특히 현무암과 클링커층과 화강암은 거의 흡사한 지반진동속도가 예측된 것으로 보인다. 그 다음의 지발당 허용 장약량은 석회암, 퇴적암 순으로 작다.

Table 3.51 Comparison of Blasting Vibration Constant K and Attenuation Index n by Bedrock

Test Blast	data	Reliability	K	n	R2
G.L		95%	200.0	-1.60	-
Granite	437	50%	118	-1.5	0.66
		95%	442		
Gneiss	283	50%	163	-1.66	0.49
		95%	715		
Lime stone	185	50%	148	-1.6	0.72
		95%	413		
Shale	73	50%	85	-1.49	0.88
		95%	240		
Sand stone	74	50%	117	-1.52	0.51
		95%	757		
Basalt & Clinker	462	50%	137.74	-1.46	0.79
		95%	364.81		

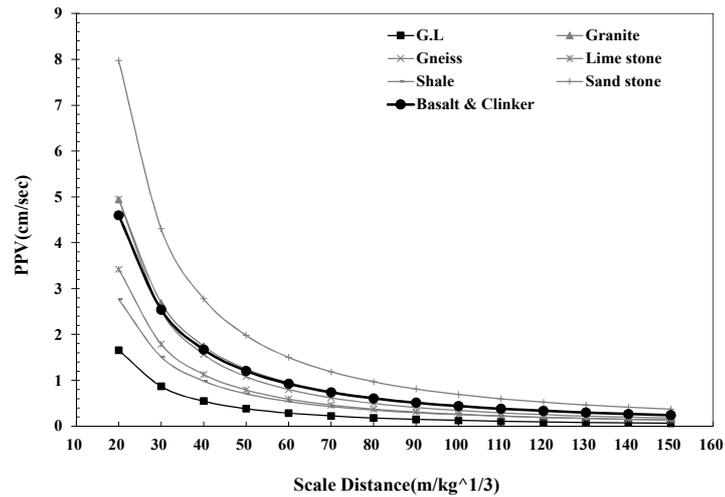


Fig. 3.127 Comparison of Ground Vibration Velocity according to scaled Distance on Ground with diverse bed rock (PPV CRSD)

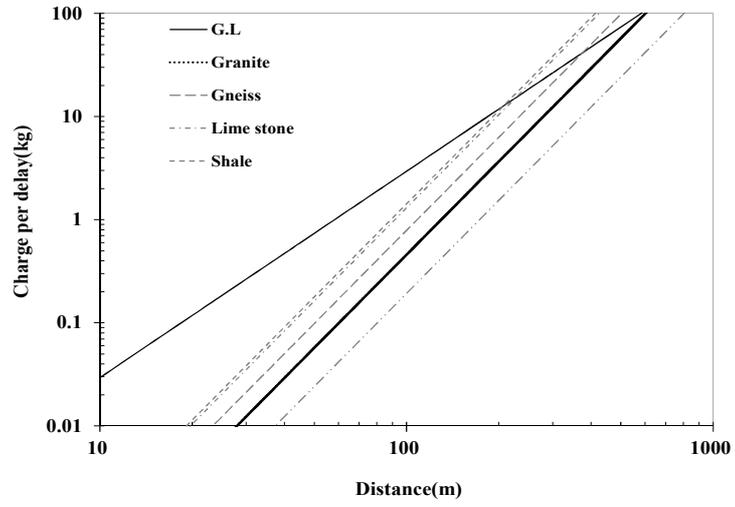


Fig. 3.128 Comparison of allowable Charge per Delay according to scaled Distance on Ground with diverse bed rock (PPV CRSD)

## 제4장 지반 전단파 속도 및 주파수 산정

### 4.1 지반 전단파 속도 분석 방법

#### 4.1.1 탄성파 시험법<sup>3)</sup>

##### 4.1.1.1 탄성파 시험법 개요

현장시험으로 전단파 속도를 측정하는 기법은 원위치의 현장조건을 포함하는 측정값이며 측정 체적이 크다는 장점이 있다. 이와 같이 현장에서 측정하는 지반의 전단파 속도는 부지 특성에 따라서 적절한 방법을 적용하여 정확하게 측정을 해야 한다. 지반의 전단파 속도는 속도 자체의 고유값으로 지반을 분류하기도 하고 심도에 따른 변화에서 지반의 분포특성에 대한 정보를 제공한다.

지반의 동적특성을 파악하기 위한 현장탄성파 탐사는 다양한 방법을 적용할 수 있다. 음원과 수신기의 배열 특성이나 탄성파 현장 시험에 이용하는 탄성파의 전파 특성에 따라서 분류할 수 있다. 각 탐사방법은 부지의 특성에 따라서 적용성이 높은 탐사기법을 적용해야 한다. 부지의 지반특성, 시험비용과 시간, 접근성 등의 다양한 사항을 고려하여 적절한 시험법을 선택하고 적용하는 것이 중요하다. 지반의 탄성파 속도를 측정하는 탄성파탐사 방법들은 가진원과 수신기의 위치에 따라서 지표탐사와 시추공탐사로 분류할 수 있다.

지표탐사로서는 반사법, 굴절법, 표면파 탐사법이 있으며, 시추공을 이용한 탐사로서는 크로스홀 기법(Crosshole seismic method), 다운홀 기법(Downhole seismic test), 업홀 기법(Uphole seismic method), 인홀 기법(Inhole seismic method), 수직 탄성파탐사(Vertical seismic profiling)와 SCPT(Seismic piezo-cone penetration test), 음파검층(Sonic logging) 등이 있다(Table 4.1).

3) 본 절에서는 Jeong et al., 2009의 연구 내용 중 일부를 원용하여 보완하고 재구성하였다.

Table 4.1 Borehole Investigation Method (Jeong et al., 2009)

Method	Crosshole	Downhole	Sonic logging	SPT Uphole
개요	동일한 심도에서 가진과 수신을 수행	지표가진을 통해 시추공내 감지기에서 수신	동일 시추공내에서 음파 발진 및 수신	SPT sampler의 타격가진을 이용하여 지표면에서 수신
가진원	가진공에서 공내 가진원 사용	지표 가진원	시추공내 음파 발생	SPT 타격 가진
감지기	시추공용 3성분 지오폰	시추공용 3성분 지오폰	Probe내 수평감지기 (상하 2개)	지표면 수평, 수직 감지기
시추공	두 개 이상의 시추공	단일 시추공	단일 시추공	시추와 동시 수행 (케이싱 불필요)
해석방법	파의 직접도달시간 (초동이용)	직접법, 간접법, 수정 간접법, 굴절경로법	두 감지기 사이의 도달 시간차 이용	굴절경로법
탄성파 속도	시추공 사이의 심도별 $V_P, V_S$	지표와 각 시추공 사이의 심도별 $V_P, V_S$	시추공벽 주변의 심도별 $V_P, V_S$	지표 감제기와 시추지점 사이의 심도별 $V_P, V_S$
특징	가장 신뢰성이 높음 시험가능 구간이 짧음	가장 빠르고 경제적 감지기 제어가 어려움	분해능이 높음 시추공에 영향을 받음 지하수위 이하에서 수행 가능	시추공이 필요없음 시추와 동시에 수행
전단파 속도 주상도	1D	1D	1D	1D/2D
유의사항	케이싱 및 지반의 접합 상태 시추공의 수직성 및 휨 정도 공간 거리의 타당성	케이싱 및 지반의 접합 상태 파형의 극성특성 확인 적합한 해석법 적용	케이싱 여부 및 지반의 접합 상태 centralizer 장착 여부	정확한 가진심도 파악 적합한 해석법 적용
품질관리를 위한 점검사항	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 현장 사진(시추공 위치 및 사용장비가 명시)</li> <li>- 현장 시험을 통한 심도별 획득신호</li> <li>- 심도별 파형에서 도달시점의 표시 및 도달시간 정보 명시</li> <li>- 해석방법 명시</li> <li>- 깊이별 전단파 속도 주상도</li> </ul>			

지표탐사는 시추공이 없는 경우에도 적용이 가능한 반면에 수직분해능은 시추공 탐사에 비하여 떨어진다. 지반의 전단파속도 측정에 이용하는 지표탐사로는 주로 표면파 탐사법을 많이 적용하고 있다. 반사법 및 굴절법탐사는 원리적으로 표면파 탐사법보다 높은 수직분해능으로 전단파속도의 측정이 가능하지만 전단파발진이 용이한 음원 사용이 어렵기 때문에 표면파 탐사법을 많이 적용하고 하고 있다. 심도가 깊거나 강력한 음원을 이용하기 어려운 경우에는 반사법탐사법이 효과적이며,

이와 같은 경우는 숙련된 고도의 전문지식이 요구된다. 현재 지표에서 지반의 전단파속도 측정은 대부분이 표면파 탐사법을 이용하고 있다. 현장시험에서 획득한 자료는 Table 4.1과 같은 절차에 따라서 이용한다(Kim et al, 2000).

#### 4.1.1.2 다운홀 기법(Downhole seismic test)

1개의 시추공을 이용하여 지표에서 가진된 신호를 지중감지기를 이용하여 획득한 후 지반의 깊이별 압축파 및 전단파 속도를 도출하는 다운홀 기법은 시험 수행 및 해석이 간단하여 현재 육상탐사에서 가장 많이 쓰이는 기법이다.

##### 가. 원리

다운홀 기법은 지표면에서 발생한 가진에 의해 지중으로 전파되는 탄성파(Seismic Wave)를 시추공 내에 위치한 3성분 지오폰에서 측정하며, 측정자료에서 초동(First Arrival)을 발췌(Picking)한 후 이를 해석함으로써 시추공 주변 매질의 탄성파 속도구조를 규명하는 탐사법이다.

다운홀 기법은 거리를 알고 있는 특정 구간에 대해 탄성파의 이동시간을 도출함으로써 그 구간의 탄성파 이동속도를 도출할 수 있다는 기본적인 탄성파 기법의 원리를 기초로 하고 있다. 다운홀 시험 영역에서 지반의 층상구조는 수평한 것으로 간주하고 해석하게 되며, 따라서 1차원적인 탄성파속도 주상도(1-Dimensional Wave Velocity Profile)를 도출하게 된다.

##### 나. 시험 수행 및 자료획득

다운홀 기법의 수행 과정은 현장 시험을 통해 시험 깊이별 탄성파 신호를 획득하는 단계, 획득한 탄성파 신호로부터 도달시간 정보를 추출하는 단계, 그리고 최종적으로 도달시간 정보로부터 탄성파 속도 주상도를 도출하는 단계로 구성된다. 다운홀 기법의 현장 시험 개요도는 Fig. 4.1과 같다.

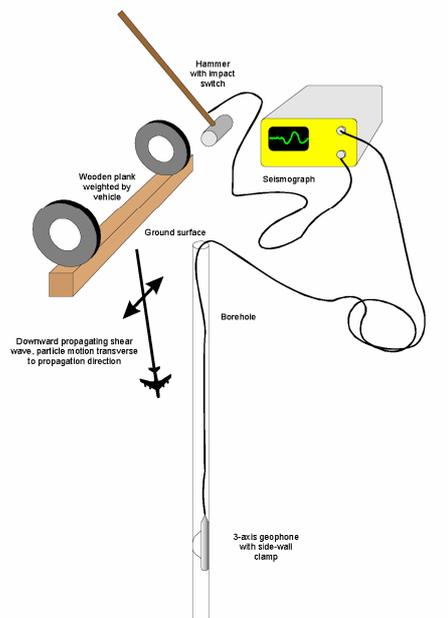
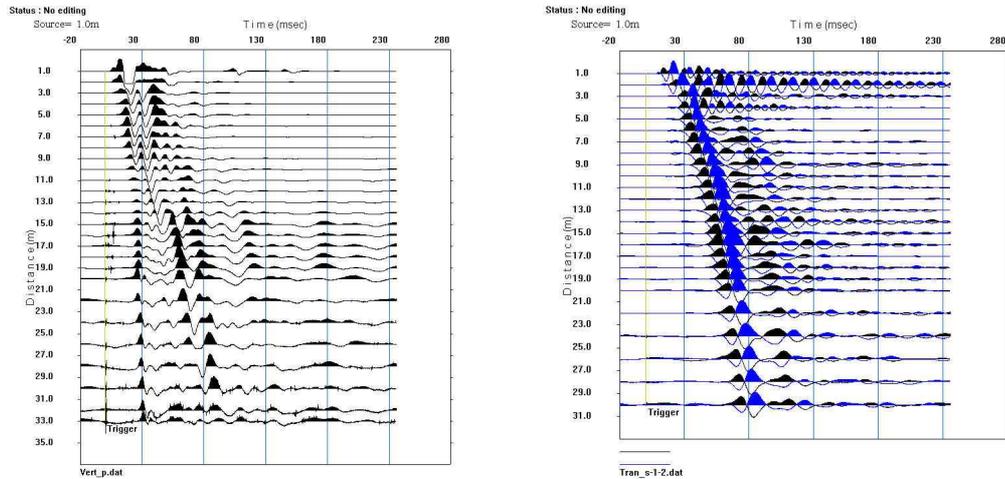


Fig. 4.1 Diagram of Testing (Crice, 2002)

슬러지 해머(Sledgehammer)를 이용하여 지표면에 설치된 가진판(Plank)의 수직 방향 타격을 통해 압축파 성분이 풍부하도록 가진시키며, 측면 타격을 통해서는 전단파 성분을 풍부하도록 가진할 수 있다. 이렇게 발생된 탄성파를 시추공 내에 위치시킨 감지기(Receiver)를 통해 획득하게 되며 전체 시험 깊이에 대해 반복적인 작업을 통해 Fig. 4.2와 같이 압축파 및 전단파에 대하여 각각의 깊이별 탄성파 신호를 획득하게 된다.

Fig. 4.2 (a)는 평판을 수직방향으로 가격하여 발생된 탄성파를 측정된 결과로 수직성분에서 P파가 관측되고 있으며, Fig. 4.2 (b)는 평판의 양면을 수평방향으로 가격하여 측정된 수평방향 성분으로 가격방향이 달라짐에 따라 측정자료에 극성 역전(Polarity Reversal) 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다.



(a) Compressional Wave Signal

(b) Shear Wave Signal

Fig. 4.2 Obtained Time Domain Signal according to Depth (Jeong et al., 2009)

공내 탄성과 탐사에서는 P파 및 S파 측정 시 심도가 증가함에 따라 주기가 증가 되는 것을 확인을 하여야 하며, 이와 함께 수평방향 가격 시 측정된 수평방향 성분의 극성이 역전되는지를 반드시 확인하여야 한다. 이러한 깊이별 탄성과 신호로부터 도달시간 정보를 획득하고 다운홀 결과 해석 기법의 적용을 통해 속도 주상도를 도출하게 된다.

#### 다. 자료처리 및 해석

다운홀 기법에서 자료처리는 획득 신호로부터 도달시간 정보를 도출하는 과정과 도달시간 정보로부터 최종적인 속도 주상도를 도출하는 과정으로 나뉜다. 측정된 자료에서 수직성분과 평판의 S파 가격방향과 동일한 방향의 수평 방향 성분을 추출하여 심도에 따른 탄성과속도 단면을 만든다. 전단파 성분의 극성 특성을 이용한 초동 인식, 전단파 성분의 첫 극대점 이용 방식(Peak to Peak Method), 전단파 성분의 첫 교차지점 이용 방식(Crossover Method)과 같이 전체 신호에서 어느 한 점을 기준으로 하여 도달시간 정보를 도출하는 방식이 단순 명료하여 널리 사용되고 있다. 깊이별 획득 신호 상에서 3가지 방식에 대한 각각의 기준점을 Fig. 4.3의 깊이별 획득 파형상에 다른 기호로 표기하였다.

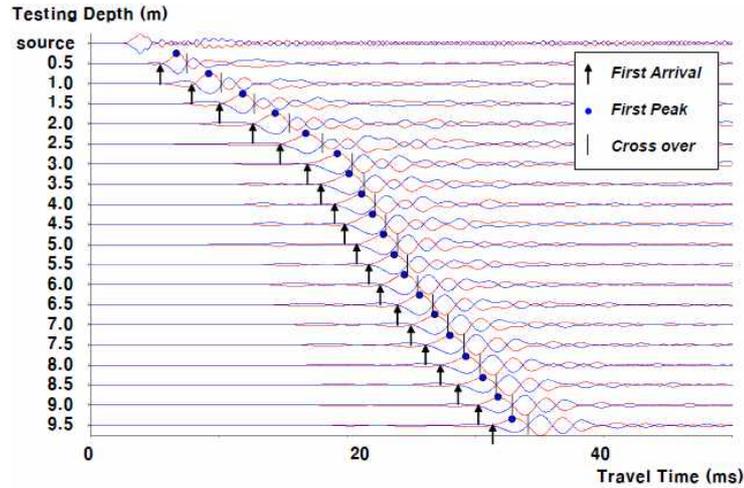


Fig. 4.3 Obtained Travel Time Information (Jeong et al., 2009)

다운홀 결과 도출기법은 크게 시험 간격별로 속도를 자세하게 도출하는 기법과 대상부지의 층상구조를 결정하고 각 층의 평균적인 속도를 도출하는 기법으로 나뉜다. 시험 간격별로 자세한 속도 주상도를 도출하는 기법으로 간접법(Interval Method, IM), 수정간접법(Modified Interval Method, MIM), 굴절 경로법(Refracted Ray Path Method, RRM) 등이 있다(Fig. 4.4). 각각의 해석 기법들은 시험 깊이간의 도달시간차 정보를 이용하여 그 구간의 속도를 도출하는 방식을 취한다.

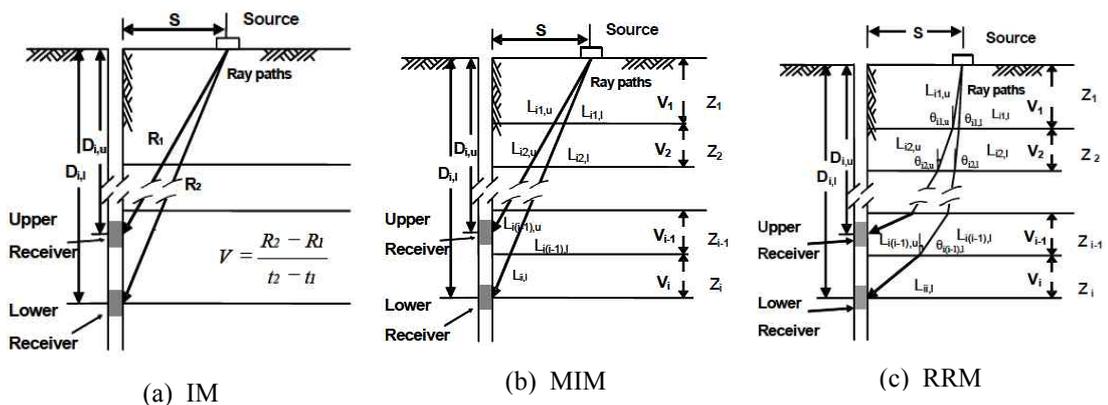


Fig. 4.4 Comparison of Velocity Deduction Method according to Distance (Jeong et al., 2009)

대상 부지의 평균적인 속도 주상도를 도출하기 위한 기법으로 직접법(Direct Method, DM)이 널리 사용되어 왔으며, 최근 굴절 경로를 고려하는 평균 굴절 경로법(Mean Refracted Ray Path Method, MRM)이 소개되었으며(Bang et al, 2006) Fig. 4.5에 나타내었다. 다운홀 시험에서는 가진원의 위치가 시추공 상부에 위치하지 않고 시추공 상부에서 일정거리만큼 이격되어 있으므로 발췌된 도달시간 으로부터 이격거리에 의한 시간을 보정하여 주어야 하며 보정된 도달시간 자료를 이용하여 심도에 따른 탄성파의 도달시간을 나타내는 주시곡선(Traveltime Curve)을 작성하며, 주시곡선에서 직선의 기울기가 탄성파속도의 역수가 된다.

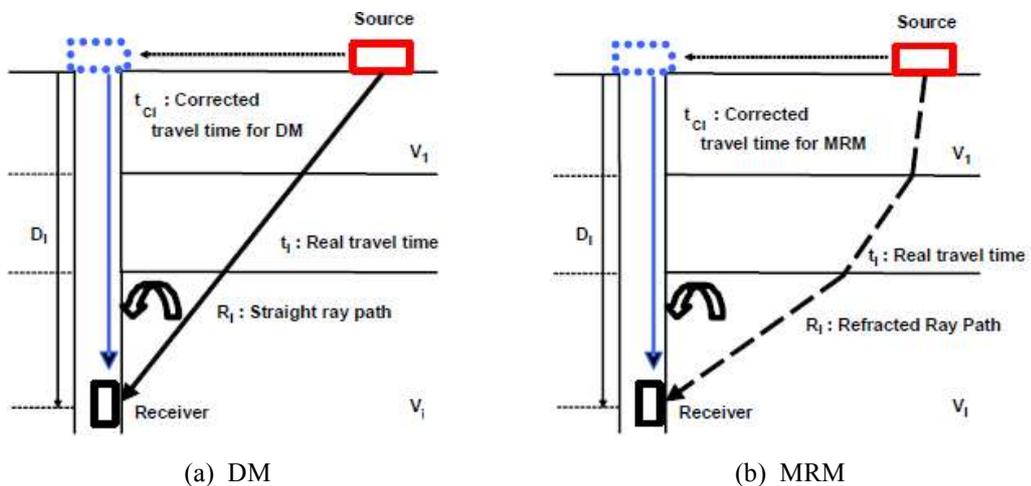


Fig. 4.5 Modified Decision Process of Travel Time (Jeong et al., 2009)

#### 4.1.2 내진설계 적용 방법<sup>4)</sup>

##### 4.1.2.1 지반의 분류

지진에 의한 지반운동은 국지적 지반의 특성에 따라 달라지므로 지반의 특성을 반영할 수 있도록 지반의 특성을 반영할 수 있는 지반을 분류하여 그에 따른 지진 계수를 정의하도록 한다. 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 원칙적으로 지반을 다음의 Table 4.2와

4) 본 절에서는 KGS, 2012의 내용 중 일부를 원용하여 보완하고 재구성하였다.

같이  $S_A, S_B, S_C, S_D, S_E, S_F$ 의 6종으로 분류한다.

Table 4.2 Characteristic of Ground Type (KGS, 2012)

지반 분류	지반종류의 호칭	30m에 대한 평균지반 특성		
		평균 전단파 속도(m/sec)	평균 표준관입 시험 N 값	평균 비배수 전단강도(kPa)
$S_A$	경암지반	1500 초과	-	-
$S_B$	보통암지반	760~1500		
$S_C$	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360~760	>50	>100
$S_D$	단단한 토사지반	180~360	15~50	50~100
$S_E$	연약한 토사지반	180 미만	<15	<50
$S_F$	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

Table 4.2에서 상부 토층의 평균 전단파 속도( $\overline{V_S}$ )는 Eq. 4.1를 이용하여 계산한다. 또한, 지반의 고유주기는 Eq. 4.2을 이용하여 계산하며, 주파수는 고유주기의 역수이다.

$$\overline{V_S} = \frac{H_i}{\sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}}} \quad \text{Eq. 4.1}$$

여기서,  $\overline{V_S}$  = 지반의 평균 전단파 속도(m/sec)

$H_i$  = 토층  $i$ 의 두께(m)

$V_{si}$  = 토층  $i$ 의 전단파 속도(m/sec)

$n_s$  = 상부  $H_i$  토층까지 층의 번호

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^{n_s} \frac{H_i}{V_{si}} \quad \text{Eq. 4.2}$$

여기서,  $T_G$  = 지반의 고유주기(sec)

$$f = \frac{1}{T_G} \quad \text{Eq. 4.3}$$

여기서,  $f$  = 주파수

#### 4.1.2.2 가속도 설계 응답스펙트럼의 작성

지역적인 특성과 지반성질을 고려한 설계지반운동의 특성은 기본적으로 응답스펙트럼으로 표현한다. 표준설계응답스펙트럼의 완전한 결정을 위해 요구되는  $C_a$ 와  $C_v$ 의 값은 Table 4.3과 Table 4.4에 지반종류별, 지진구역별로 각각 주어져 있다. 필요시 구조물의 구조특성과 설계법을 고려하여 작성된 설계응답스펙트럼으로 표준설계응답스펙트럼을 대신할 수 있다. 이때 설계응답스펙트럼은 표준설계응답스펙트럼보다 안전측이어야 한다. 단, 대안으로 제시된 설계응답스펙트럼이 표준설계응답스펙트럼보다도 더 우수하고 합리적임을 입증한다면, 표준설계응답스펙트럼보다도 비안전측인 설계응답스펙트럼이 사용될 수 있다.

Table 4.3 Earthquake Factor  $C_a$

Classification	Seismic Zone Coefficient	
	I	II
SA	0.09	0.05
SB	0.11	0.07
SC	0.13	0.08
SD	0.16	0.11
SE	0.22	0.17

Table 4.4 Earthquake Factor  $C_v$

Classification	Seismic Zone Coefficient	
	I	II
SA	0.09	0.05
SB	0.11	0.07
SC	0.18	0.11
SD	0.23	0.16
SE	0.37	0.23

#### 4.1.2.4 내진해석을 위한 지반의 전단탄성계수 산정

지반의 응력-변형률 관계는 변형률의 크기에 따라 탄성계수가 변하는 비선형 거동을 보인다. 따라서, 실내시험과 현장시험을 통하여 지반의 전단탄성계수 감소 현

상을 평가하고 이를 해석에 이용해야 한다. 지반의 비선형성을 최대한 반영하기 위해서 적합한 구성모델을 선정하여 비선형성을 최대한 반영하기 위해서 적합한 구성모델을 선정하여 비선형 해석을 수행하는 방법이 가장 합리적이거나, 현장에서는 매우 중요한 구조물 이외에는 선형해석을 수행하는 것이 일반적이다. 선형해석을 할 경우 하중수준에 따른 비선형특성을 감안하기 위해 지반의 전단탄성계수를 Eq. 4.5와 같이 보정하여 사용한다.

$$G_D = (\gamma_t/g) V_S^2 \quad \text{Eq. 4.4}$$

여기서,  $G_D$  = 지반의 동적전단탄성계수(tf/m<sup>2</sup>)

$\gamma_t$  = 지반의 단위중량(tf/m<sup>3</sup>)

$g$  = 중력 가속도(m/sec<sup>2</sup>)

$V_S$  = 주변지반의 전단파속도 (m/sec) (해당구조물이 여러층에 걸칠 경우 그 평균치를 사용한다.)

$$V_{Si} = C \cdot V_{\alpha i} \quad \text{Eq. 4.5}$$

여기서,  $V_{Si}$  = 지반의 동적전단탄성계수 산출에 이용되는  $i$ 번째 지층의 전단파 속도

$V_{\alpha i}$  = 해당구조물을 포함하는  $i$ 번째 지층의 전단파 속도

$C$  = 성능수준별 지반변형에 대한 보정계수

$C = 0.8$ (기능수행수준)

$C = 0.5$ (붕괴방지수준)

또한, 지반을 모델화할 때 적용하는 지반의 물성치, 즉, 지반의 탄성계수(또는 전단탄성계수)와 포와송 비는 지진 시 지반에 동적하중이 가해지고 이에 따라 지반이 동적거동을 하므로, 지반의 동적탄성계수  $E_D$  또는 동적전단탄성계수  $G_D$ 와 동적 포와송비  $\nu_D$ 를 적용한다. 이들 계수간의 상호관계는 Eq. 4.6과 같다.

$$E_D = 2(1 + \nu_D) \cdot G_D \quad \text{Eq. 4.6}$$

지반의 동적탄성계수  $E_D$ 는 성능수준을 고려한 지반의 전단파속도  $V_S$ 로부터 산정된다. 동적 포와송비  $\nu_D$ 의 경우에는 해당 지반에 탄성파시험 등을 수행하여 그 결과로부터 산출되는데, 보통 이는 0.40~0.50정도의 값을 나타낸다. 단, 지하수위 이하에서는 동적 포와송비를 구할 수 없으므로 관련 문헌자료를 참조하여 구한다.

## 4.2 제주지역 지반의 전단파속도 분석

본 연구에서는 다양한 시추공시험법 중 제주지역에서 가장 보편적으로 사용되는 다운홀 시험(Downhole seismic test) 결과를 활용하여 제주지역 지반의 전단파속도 특성을 파악하고자 하였다. 제주지역의 전단파 속도 및 표준관입시험 N값에 대한 자료 수집은 김녕리 1개소, 노형동 3개소, 삼도일동 1개소, 이도일동 1개소, 이도이동 2개소, 중문동 1개소, 표선면 1개소, 조천읍 1개소를 대상으로 하였으며, 대상지역의 위치는 Fig. 4.6과 같다.

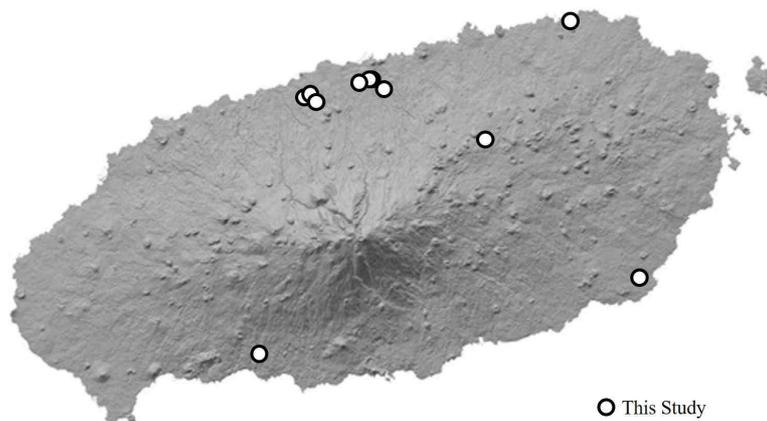


Fig. 4.6 Testing location map

#### 4.2.1 전단파 속도와 N값의 상관관계

50회 이상의 N값은 Eq. 4.7를 이용하여, SPT 결과의 관입깊이와 타격된 N값으로 보정하였다.

$$N' = (30/D) \times N \quad \text{Eq. 4.7}$$

여기서,  $N'$  = 보정된 N값,  $D$  = 관입깊이(cm),  $N$  = 타격횟수

##### 4.2.1.1 클링커층에 대한 상관관계

Fig. 4.7는 제주지역의 클링커층에 대한 표준관입시험 N값과 전단파 속도의 상관관계를 보여준다. 클링커층의 N값은 6~214로써, 전단파 속도는 225~526m/sec의 범위에 분포하고 있다. 또한, 클링커층에서 N값의 평균치는 33이며, 전단파 속도의 평균치는 365.8m/sec로 나타났다. 상관관계식은 Eq. 4.8과 같으며 결정계수는 0.09로 클링커층에서의 N값과 전단파 속도 간에는 신뢰할 수 있는 수준의 상관관계가 나타나지 않았다.

$$V_s = 279.6 \times N^{0.0819} \quad \text{Eq. 4.8}$$

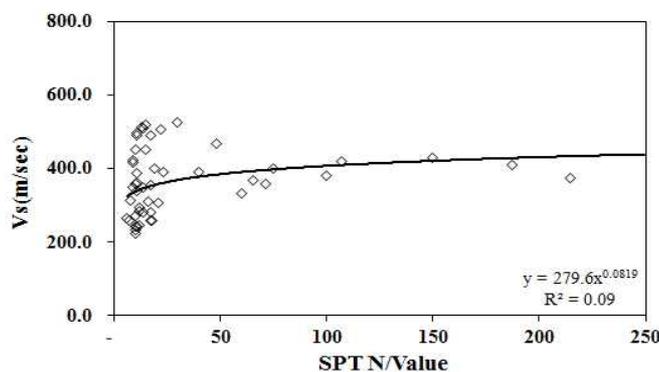


Fig. 4.7 Relationship between N value of Clinker and Shear Wave Velocity

#### 4.2.1.2 퇴적층에 대한 상관관계

Fig. 4.8는 제주지역의 퇴적층에 대한 표준관입시험 N값과 전단파 속도의 상관관계를 보여준다. 퇴적층의 N값은 8~100로써, 전단파 속도는 202~421m/sec의 범위에 분포하고 있다. 또한, 퇴적층에서 N값의 평균치는 33이며, 전단파 속도의 평균치는 297.0m/sec로 나타났다. 상관관계식은 Eq. 4.9와 같으며 결정계수는 0.62로써 대상 지층 중 가장 높은 신뢰도를 보였다.

$$V_s = 141.77 \times N^{0.02404} \quad \text{Eq. 4.9}$$

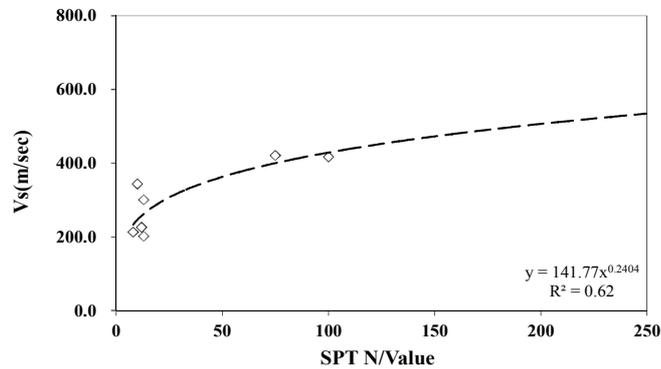


Fig. 4.8 Relationship between N value and Shear Wave Velocity of Sedimentary Layer

#### 4.2.1.3 매립층에 대한 상관관계

Fig. 4.9는 제주지역의 매립층에 대한 표준관입시험 N값과 전단파 속도의 상관관계를 보여준다. 매립층의 N값은 5~125로써, 전단파 속도는 176~398m/sec의 범위에 분포하고 있다. 또한, 매립층에서 N값의 평균치는 22이며, 전단파 속도의 평균치는 258.2m/sec로 나타났다. 상관관계식은 Eq. 4.10과 같으며 결정계수는 0.38으로 대상 지층들의 평균 수준의 신뢰도를 보였다.

$$V_s = 186.78 \times N^{0.124} \quad \text{Eq. 4.10}$$

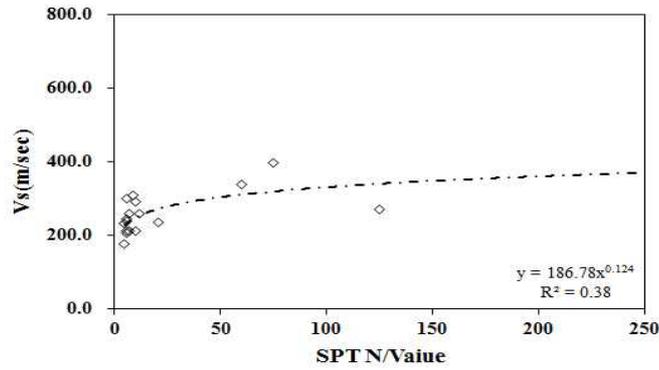


Fig. 4.9 Shear Wave Velocity of burried layer according to N value

#### 4.2.1.4 실트섞인자갈층에 대한 상관관계

Fig. 4.10는 제주지역의 실트섞인자갈에 대한 표준관입시험 N값과 전단파 속도의 상관관계를 보여준다. 실트섞인자갈의 N값은 4~75로써, 전단파 속도는 221~361m/sec의 범위에 분포하고 있다. 또한, 매립층에서 N값의 평균치는 22이며, 전단파 속도의 평균치는 271.8m/sec로 나타났다. 상관관계식은 Eq. 4.11과 같으며 결정계수는 0.53이다.

$$V_S = 205.27 \times N^{0.0717} \quad \text{Eq. 4.11}$$

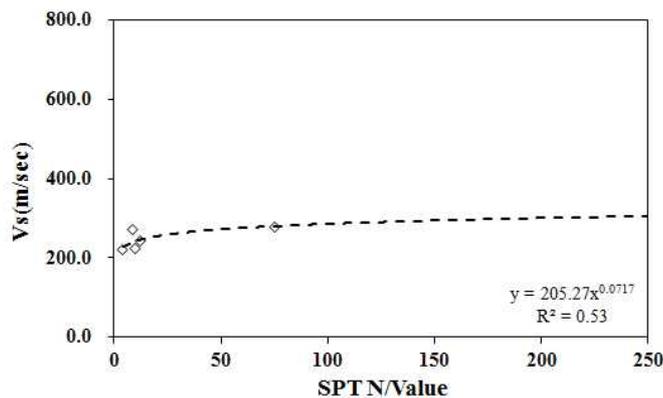


Fig. 4.10 Relationship between N Value and Shear Wave Velocity of silty gravel

#### 4.2.1.5 전단파 속도와 N값의 상관관계 분석 결과

Table 4.5와 Fig. 4.11는 지층에 따른 SPT N값과 전단파속도의 회귀분석 결과이다. 모든 지층에서 N값이 증가함에 따라 전단파 속도가 증가하는 것으로 나타났으나, 전단파 속도의 증가량은 지층의 특성에 따라 차이가 발생했다. N값이 0에 수렴하는 초기 속도의 경우, 퇴적층, 매립층과 실트섞인자갈층의 전단파 속도가 200m/s 가량으로 비슷하게 나타났고, 클링커층에서는 370m/s로 가장 큰 전단파 속도가 나타났다. 그러나 N값의 증가에 따른 전단파 속도 증가율은 클링커 층에서 가장 낮게 나타났으며 실트섞인자갈의 전단파 속도 증가율 가장 크게 나타났다.

Table 4.5 Regression Analysis Result of N value and Shear Wave Velocity

Condition	Estimation Equation( $V_S = \text{m/sec}$ )	$R^2$
Clinker	$V_S = 279.6 \times N^{0.0819}$	0.09
Sedimentary layer	$V_S = 141.77 \times N^{0.2404}$	0.62
Landfill layer	$V_S = 186.78 \times N^{0.124}$	0.38
Silty Gravel	$V_S = 205.27 \times N^{0.0717}$	0.53

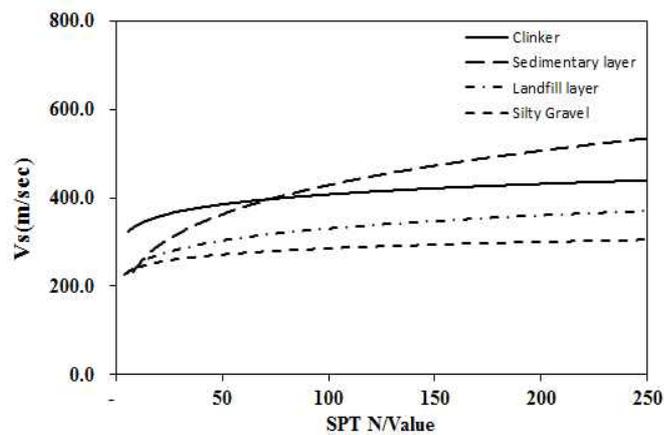


Fig. 4.11 Relationship between N Value and Shear Wave Velocity for Stratums in Jeju

#### 4.2.1.6 클링커층과 내륙 지층의 전단파 속도 상관관계 비교

가. 클링커층과 타 지역 자갈층 비교

Table 4.6과 Fig. 4.12에서 클링커층과 타 지역 자갈층의 회귀분석 결과를 비교하였다. 회귀분석을 통하여 산출된 클링커층의 상관관계식  $V_S = 279.6 \times N^{0.0819}$ 을 Hwang(2011), Seon et al(2007), LH(2009)의 상관관계식과 비교할 때 초기 전단파 속도는 가장 높은 값을 나타내지만, N값에 따른 전단파 속도의 증가율이 가장 낮게 나타나고 있다.

Table 4.6 Regression Analysis Result of N value and Shear Wave Velocity of Gravel and Clinker

Condition	Proponent	Estimation Equation( $V_S = \text{m/sec}$ )
Gravel	Seon et al(2007)	$V_S = 78.63 \times N^{0.351}$
	LH(2009)	$V_S = 175.6 \times N^{0.361}$
	Hwang(2011)	$V_S = 111.1 \times N^{0.161}$
Clinker	This study	$V_S = 279.6 \times N^{0.0819}$

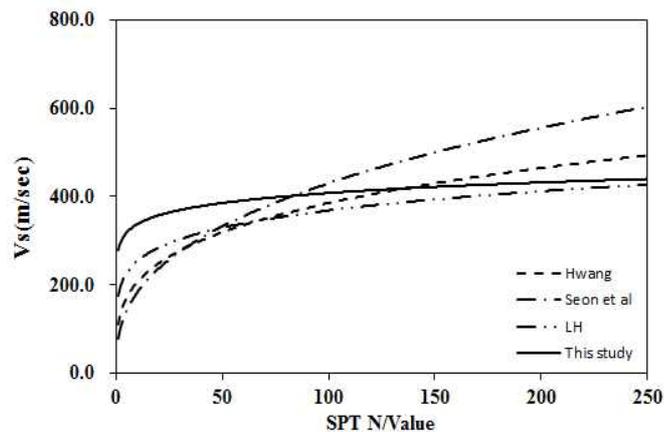


Fig. 4.12 Comparison of Shear Wave Velocity of Gravel and Clinker according to N Value

나. 클링커층과 타 지역 풍화암층 비교

Table 4.7과 Fig. 4.13에서 클링커층과 타 지역 풍화암층의 회귀분석 결과를 비교하였다. Hwang(2011), Seon et al(2007), LH(2009)의 상관관계식과 비교할 때 초기 전단파 속도는 가장 높은 값을 나타내지만 N값이 증가할수록 전단파 속도의 증가율이 가장 낮게 나타나고 있다. 그리고 클링커층의 상관관계식은 결정계수가 0.09로 매우 낮아 클링커층의 경우 N값 평균을 사용하는 것이 보다 적절할 것으로 판단된다.

Table 4.7 Regression Analysis Result of N value and Shear Wave Velocity of Weathered Rock and Clinker

Condition	Proponent	Estimation Equation( $V_S = \text{m/sec}$ )
Weathered rock	Seon et al(2007)	$V_S = 107.94 \times N^{0.418}$
	LH(2009)	$V_S = 182.3 \times N^{0.229}$
	Hwang(2011)	$V_S = 215.5 \times N^{0.18}$
Clinker	This study	$V_S = 279.6 \times N^{0.0819}$

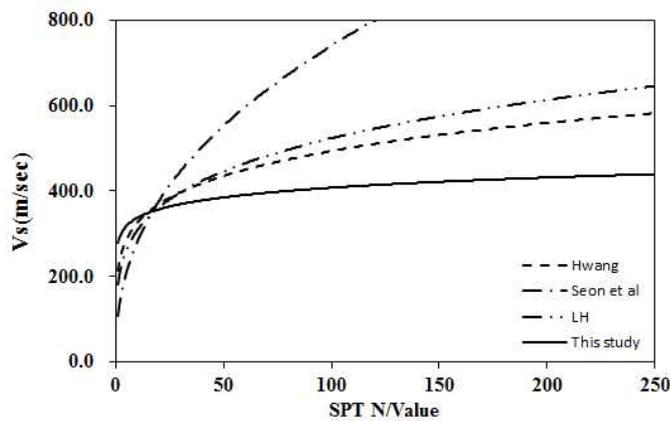


Fig. 4.13 Comparison of Shear Wave Velocity of Weathered Rock and Clinker according to N Value

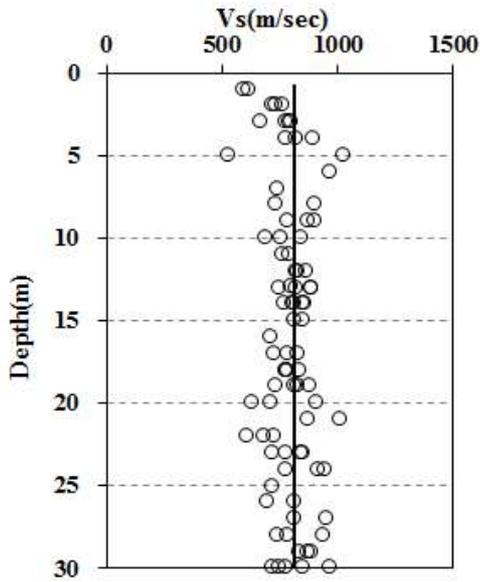
## 4.2.2 전단파 속도와 심도의 상관관계

### 4.2.2.1 전단파 속도와 심도의 상관관계

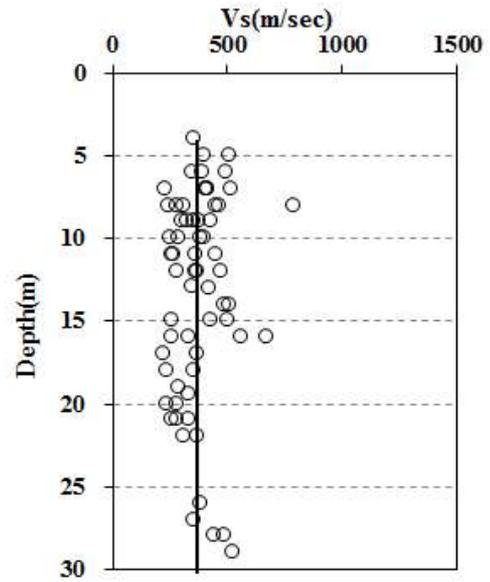
본 연구에서는 제주지역 11개소의 심도에 따른 각 지층별 전단파 속도를 비교하여 Fig. 4.14에 나타내었다. 비교 결과 제주지역 지층의 종류에 따라 전단파 속도는 상이하게 나왔으나, 심도 변화에 따른 전단파 속도는 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다.

연암의 경우 전단파 속도는 최소 533.1m/sec, 최대 1028.8m/sec, 평균 802.7m/sec로 나타났다. 클링커의 경우 전단파 속도는 최소 225.0m/sec, 최대 794.0m/sec, 평균 373.9m/sec로 나타났다. 퇴적층의 경우 전단파 속도는 최소 201.5m/sec, 최대 421.1m/sec, 평균 297.0m/sec로 나타났다. 보통암의 경우 전단파 속도는 최소 865.8m/sec, 최대 1427.0m/sec, 평균 1150.0m/sec로 나타났다. 풍화암의 경우 전단파 속도는 최소 513.1m/sec, 최대 671.1m/sec, 평균 608.1m/sec로 나타났다. 매립층의 경우 전단파 속도는 최소 176.0m/sec, 최대 397.9m/sec, 평균 258.2m/sec로 나타났다. 실트섞인자갈의 경우 전단파 속도는 최소 220.8m/sec, 최대 361.0m/sec, 평균 271.8m/sec로 나타났다. 실트질모래의 경우 전단파 속도는 최소 234.9m/sec, 최대 387.7m/sec, 평균 293.8m/sec로 나타났다.

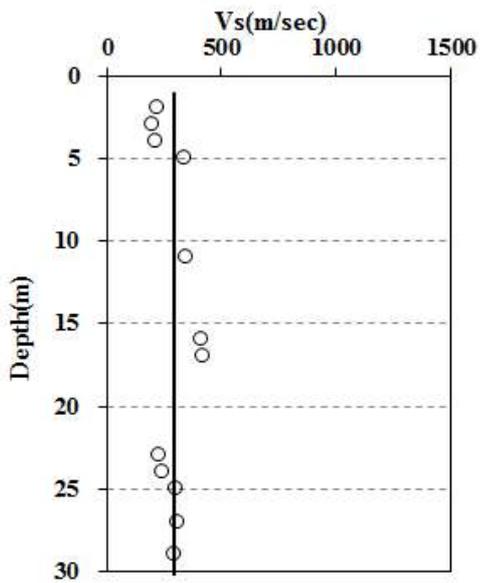
제주지역의 지반 심도와 전단파 속도는 일정한 상관관계를 나타내지 않는 것으로 나타났으나, 지층의 종류에 따른 전단파 속도의 차이가 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 제주지역의 전단파 속도는 각 지층의 평균을 사용하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.



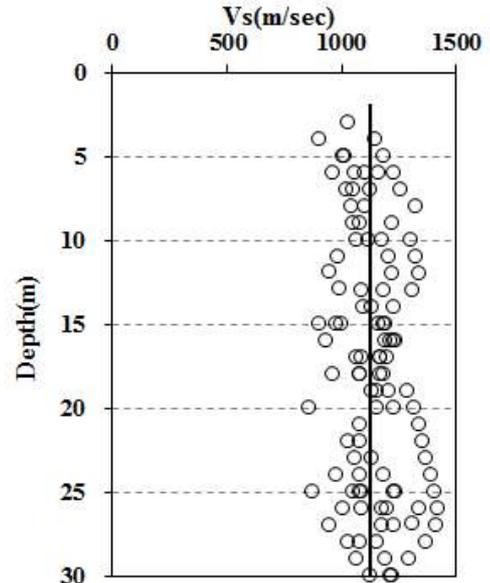
(a) Soft Rock (Average Velocity : 802.7m/s)



(b) Clinker (Average Velocity : 373.9m/s)

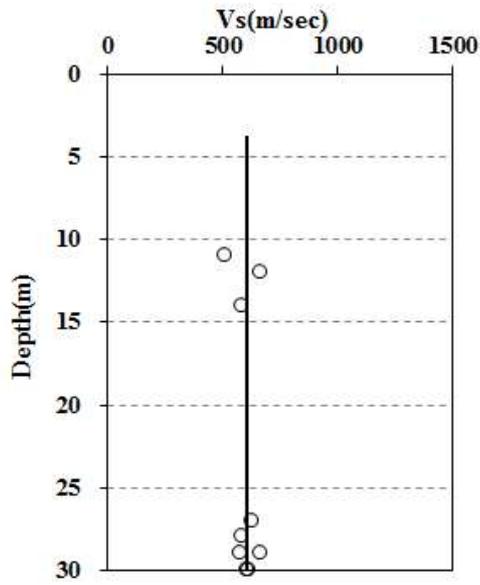


(c) Sedimentary Layer (Average Velocity : 297.0m/s)

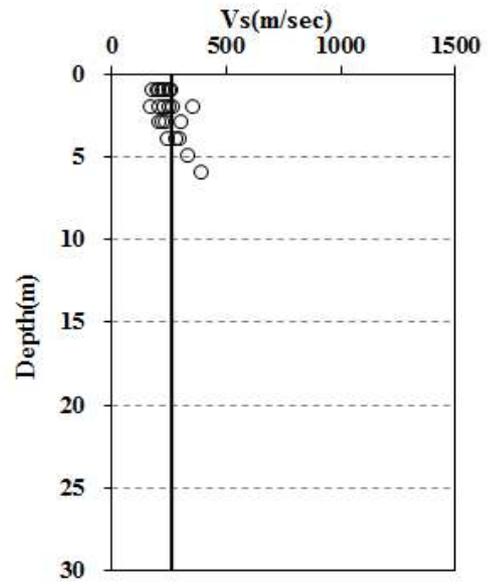


(d) Normal Rock (Average Velocity : 1150.0m/s)

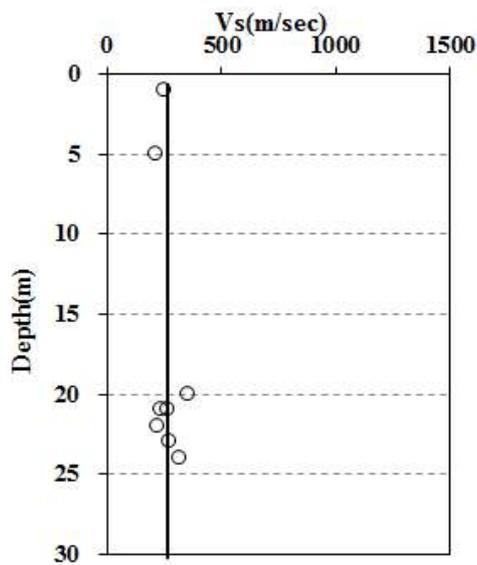
Fig. 4.14 Shear Wave Velocity according to Depth of Ground



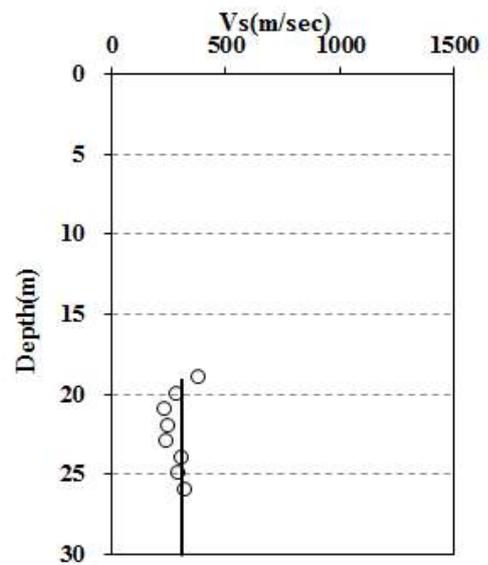
(e) Weathered Rock (Average Velocity : 608.1m/s)



(f) Burried Layer (Average Velocity : 258.2m/s)



(g) Silty Gravel (Average Velocity : 274.2m/s)



(h) Silty Sand (Average Velocity : 293.8m/s)

Fig. 4.14 Continues

#### 4.2.2.2 제주지역과 타 지역의 지반 전단파 속도 비교

제주지역과 내륙지역 지반의 평균 전단파 속도와 심도에 따른 탄성과 속도를 각각 Table 4.8과 Fig. 4.15와 4.16에서 비교하였다. 제주지역과 내륙지역의 평균 전단파 속도를 비교한 결과, 제주지역의 전단파 속도가 내륙지역 보다 약 1.6배 크게 나타났다. 이는 화산활동에 의한 생성기원으로 퇴적층과 매립층이 상대적으로 적어 토심이 얇고, 지표부근부터 노출된 암반과 화산쇄설층이 층상으로 이루어져 있기 때문으로 판단된다.

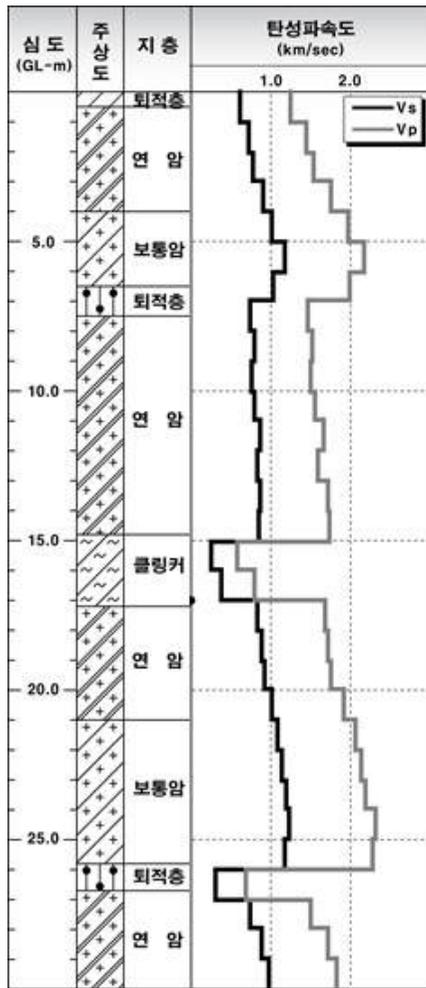
제주지역 3개소와 내륙지역 3개소의 동적전단탄성계수를 산출한 결과는 Table 4.9와 같다. 제주지역의 경우 타 내륙 지역과는 다르게 전단파 속도가 큰 만큼 동적전단탄성계수도 비례적으로 크게 나타났다.

Table 4.8 Shear Wave Velocity according to Ground

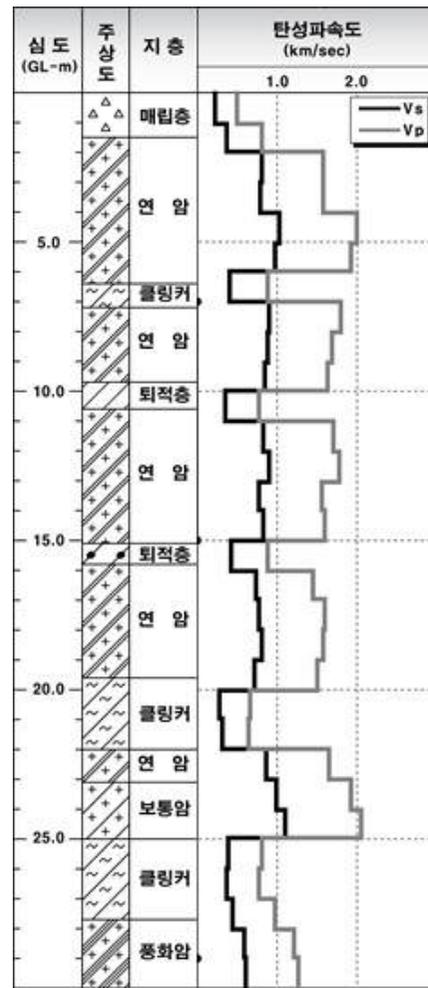
Area	Layer Division	Shear wave average velocity(m/sec)
Jeju	Pyoseon	748.9
	Gimnyeong	554.0
	Ido 2 Dong	562.9
	Average	621.9
Inland	Ansan city	380.7
	Jeonju Deokjin-gu	378.6
	Paju Unjung District	426.1
	Average	395.1

Table 4.9 Dynamic Shear Elastic Modulus according to Area

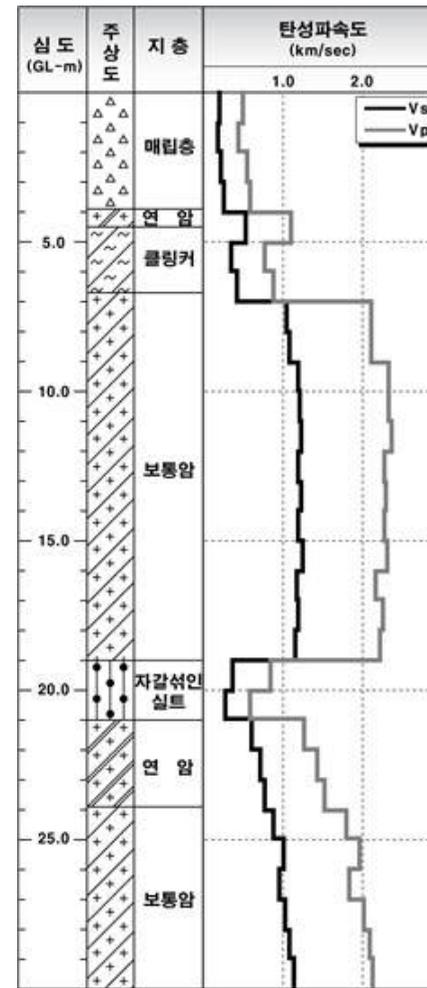
Area	Layer Division	Dynamic Shear Shout Modulus(tf/m2)
Jeju Area	Pyoseon	135,496
	Gimnyeong	69,142
	Ido 2 Dong	74,288
	Average	92,957
Inland Area	Ansan city	30,287
	Jeonju Deokjin-gu	29,661
	Paju Unjung District	40,717
	Average	33,555



(a) Pyoseon



(b) Gimnyeong



(c) Ido 2 Dong

Fig. 4.15 Elastic Test Result of Jeju

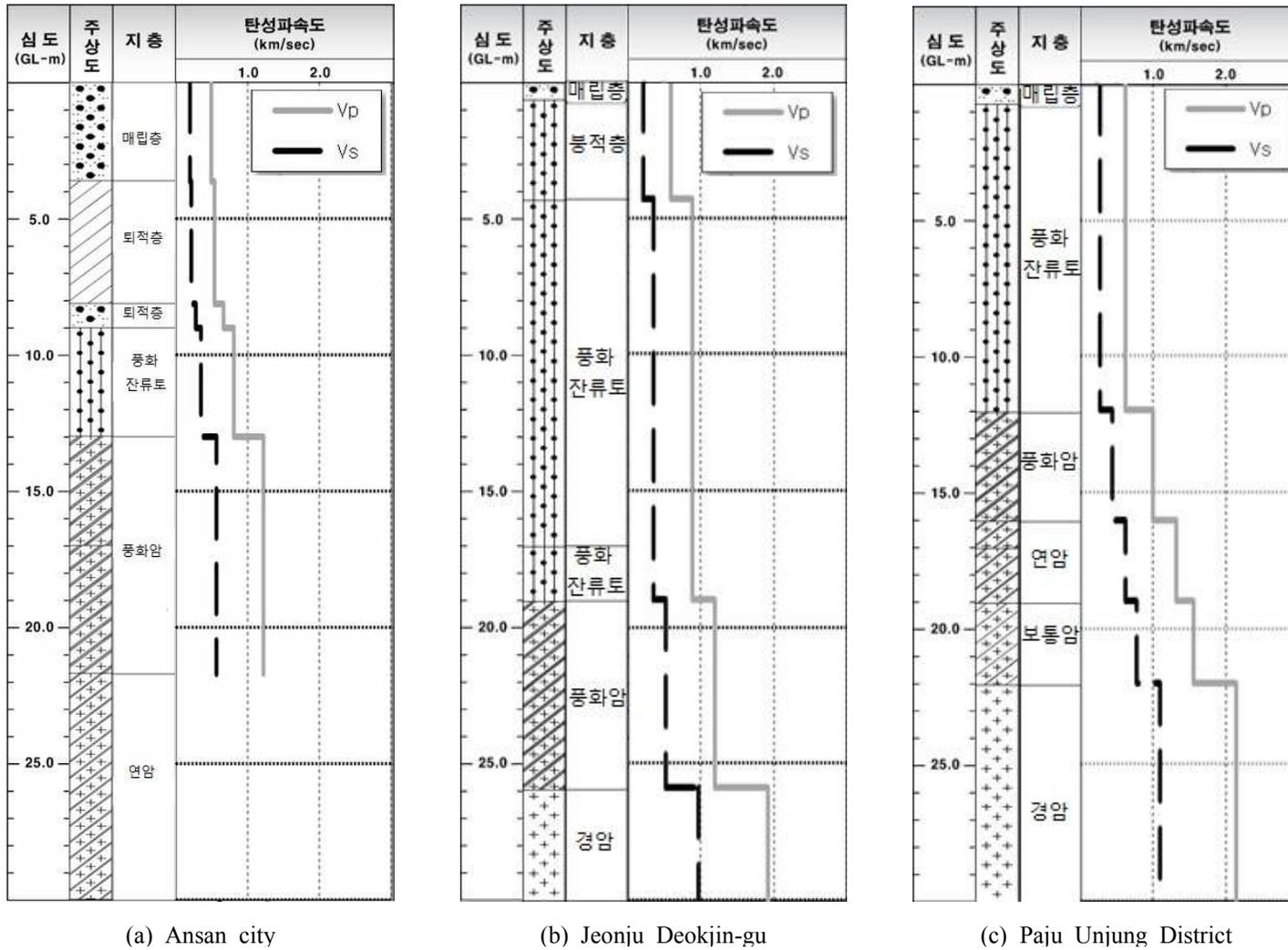


Fig. 4.16 Elastic Test Result of Other Interior Areas

### 4.3 지반 전단파속도 및 주파수 산정

본 연구에서 활용된 제주지역의 지층별 전단파 속도는 Table 4.10과 같다. 각 현장의 시추주상도에 의하면 상부에 표토층이 나타나지만, 시험발파 시에는 상부 표토를 제거한 상태에서 암반을 노출시켜 시험발파가 진행된다.

Table 4.10 Shear Wave Velocities according to Ground in Jeju

$V_s$ (m/s)	Soft rock	Moderate rock	Clinker	Sediment
Mean	803	1150	374	297

#### 4.3.1 지반의 전단파속도 및 주파수 산정 예시

시험발파 지반의 전단파속도는 Fig. 4.17에서와 같이 본 연구의 모델 검증을 위한 시험발파가 이루어진 현장에서 발파 폭원과 계측기의 주 선형을 확인하고 최인근 지점의 시추공을 확인하여 시추공과 시추공사이의 지층단면도를 작성한다. 그 다음 Table 4.11에서와 같이 각 시추공의 전단파속도( $V_s$ )를 Eq. 4.1을 이용하여 구하고 이와 동시에 Eq. 4.2을 이용하여 지반의 고유 주기( $T_G$ )를 구해 Eq. 4.3으로부터 지반의 고유 주파수( $f_G$ )를 구하였다.

그리고, 각 시험발파의 계측기에 대한 전단파속도( $V_s$ )와 주파수( $f_G$ )는 기 작성된 지층단면도상에서 인근 두 개의 시추공에 대한 전단파속도( $V_s$ )와 주파수( $f_G$ )를 이용해 거리에 따라 선형 보간하는 방법으로 계측기 위치에서의 전단파속도( $V_s$ )와 주파수( $f_G$ )를 산정하였다. Table 4.11에 시추공에 대한 전단파속도( $V_s$ )와 주파수( $f_G$ ) 산정결과를 나타내었다.

Table 4.12은 시추공을 기준으로 선형 보간한 계측기의 거리(m)와 전단파속도( $V_s$ ) 및 주파수( $f_G$ )이며, 거리(m)는 시추공마다 0으로 다시 시작해서 계측기까지의 거리이다.

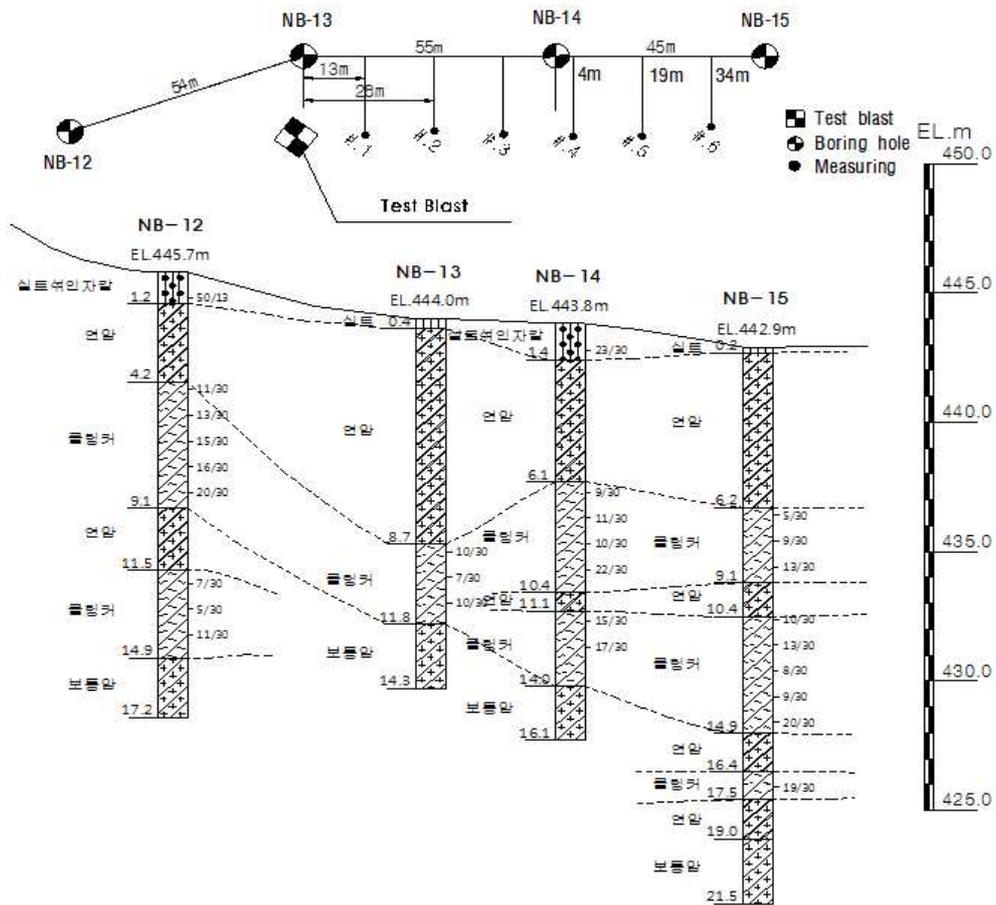


Fig. 4.17 Example for Estimate of Shear Wave Velocity and Frequency of Ground

Table 4.11 Example for Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Borehole

(a) NB-12								
Results		Division	Sum	Layers				
				Soft rock	Clinker	Moderate rock	Clinker	Moderate rock
$V_s$ (m/sec)	533	$H_i / V_{si}$	0.030	0.004	0.013	0.002	0.009	0.002
$T_C$ (sec)	0.120	$H_i$ (m)	16.0	3	4.9	2.4	3.4	2.3
$f_C$ (Hz)	8.3	$V_{si}$ (m/s)		803	374	1150	374	1150

(b) NB-13								
Results		Division	Sum	Layers				
				Soft rock	Clinker	Moderate rock		
$V_s$ (m/sec)	668	$H_i / V_{si}$	0.021	0.010	0.008	0.002		
$T_C$ (sec)	0.083	$H_i$ (m)	13.9	8.3	3.1	2.5		
$f_C$ (Hz)	12.0	$V_{si}$ (m/s)		803	374	1150		

(c) NB-14								
Results		Division	Sum	Layers				
				Soft rock	Clinker	Soft rock	Clinker	Moderate rock
$V_s$ (m/sec)	529	$H_i/V_{si}$	0.028	0.006	0.011	0.001	0.008	0.002
$T_C$ (sec)	0.111	$H_i$ (m)	14.7	4.7	4.3	0.7	2.9	2.1
$f_C$ (Hz)	9.0	$V_{si}$ (m/s)		803	374	803	374	1150

(d) NB-15								
Results		Division	Sum	Layers				
				Soft rock	Clinker	Soft rock	Clinker	Soft rock
$V_s$ (m/sec)	565	$H_i/V_{si}$	0.038	0.007	0.008	0.002	0.012	0.002
$T_C$ (sec)	0.151	$H_i$ (m)	21.3	6	2.9	1.3	4.5	1.5
$f_C$ (Hz)	6.6	$V_{si}$ (m/s)		803	374	803	374	803

(d) NB-15 Continues								
Results		Division	Sum	Layers				
				Clinker	Soft rock	Moderate rock		
		$H_i/V_{si}$		0.003	0.002	0.002		
		$H_i$ (m)		1.1	1.5	2.5		
		$V_{si}$ (m/s)		374	803	1150		

Table 4.12 Example for Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of measuring instrument

Holes/ Measuring	NB-13	1	2	3	NB-14	4	5	6	NB-15
Distance(m)	0	13	28	43	55/0	4	19	34	45/0
$V_s$ (m/sec)	668	635	597	559	529	532	544	556	565
$f_C$ (Hz)	12.0	11.3	10.5	9.7	9.0	8.8	8.0	7.2	6.6

#### 4.3.2 시험발파 지반의 전단파속도 및 주파수 산정 결과

본 연구를 위해 시험발파 자료를 수집한 현장의 지반조사보고서에서 시추공(현장의 시추공 번호)의 시추주상도를 수집하여 시험발파의 폭원과 계측기의 주 선형에 가장 적합한 지층단면도를 만들어 시추공 및 각 계측기의 전단파속도( $V_s$ )와 고유 주파수(Hz)를 산정하였다. 그리고 폭원과 계측기의 주 선형에서 벗어나 보안 물건에 설치된 계측기는 평균값을 적용하였다.

#### 4.3.2.1 시험발파 No. 1, 2, 3

Site. 1에서 진행된 시험발파 No. 1, 2, 3의 현장은 계측기가 고정된 상태에서 발파 폭원의 위치만 변경되었다. 시추공의 전단파속도( $V_s$ )와 고유 주파수(Hz)는 Table 4.13과 같고 시추공을 기준으로 유추된 시험발파 No. 1, 2, 3의 계측기에 적용된 전단파속도( $V_s$ )와 고유 주파수(Hz)는 동일하며 그 결과는 Table 4.14과 같다.

Table 4.13 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Borehole (BT No. 1, 2, 3)

(a) BH-1									
Results		Division	Sum	Layers					
				Soft rock	Clinker	Soft rock	Moderate rock		
$V_s$ (m/sec)	762	$H_i/V_{si}$	0.015	0.005	0.004	0.002	0.004		
$T_G$ (sec)	0.059	$H_i$ (m)	11.2	4.1	1.6	1.4	4.1		
$f_G$ (Hz)	17.0	$V_{si}$ (m/s)		803	374	803	1150		

(b) BH-21									
Results		Division	Sum	Layers					
				Soft rock	Clinker	Soft rock	Clinker		
$V_s$ (m/sec)	466	$H_i/V_{si}$	0.020	0.004	0.003	0.001	0.013		
$T_G$ (sec)	0.082	$H_i$ (m)	9.5	3	1	0.5	5		
$f_G$ (Hz)	12.3	$V_{si}$ (m/s)		803	374	803	374		

(c) BH-3									
Results		Division	Sum	Layers					
				Moderate rock	Soft rock	Clinker	Soft rock	Clinker	Soft rock
$V_s$ (m/sec)	550	$H_i/V_{si}$	0.017	0.002	0.001	0.004	0.001	0.008	0.001
$T_G$ (sec)	0.068	$H_i$ (m)	9.4	2.4	1	1.4	1	3	0.6
$f_G$ (Hz)	14.6	$V_{si}$ (m/s)		1150	803	374	803	374	803

Table 4.14 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Measuring Instrument (BT No. 1, 2, 3)

Measuring Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$V_s$ (m/sec)	549	528	471	516	579	596	576	538	690	703	575
$f_G$ (Hz)	14.6	14.0	12.4	13.1	14.1	15.9	15.4	14.3	15.9	16.1	14.6

#### 4.3.2.2 시험발파 No. 4

시험발파 No. 4의 시추공에 대한 전단파속도( $V_s$ )와 고유 주파수(Hz)는 Table 4.15과 같고 시추공을 기준으로 유추된 계층기의 전단파속도( $V_s$ )와 고유 주파수(Hz)는 Table 4.16과 같다.

Table 4.15 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Borehole (BT No. 4)

(a) BH-15								
Results		Division	Sum	Layers				
				Soft rock	Moderate rock	Clinker	Soft rock	Moderate rock
$V_s$ (m/sec)	584	$H_i/V_{si}$	0.028	0.002	0.005	0.001	0.004	0.001
$T_G$ (sec)	0.111	$H_i$ (m)	16.2	1.6	1.9	0.6	4.1	1.6
$f_G$ (Hz)	9.0	$V_{si}$ (m/s)		803	374	803	1150	1150

(a) BH-15 Continues								
Results		Division	Sum	Layers				
				Clinker	Moderate rock			
		$H_i/V_{si}$		0.014	0.001			
		$H_i$ (m)		5.2	1.2			
		$V_{si}$ (m/s)		374	1150			

(b) NBH-13								
Results		Division	Sum	Layers				
				Clinker	Moderate rock	Clinker	Moderate rock	Clinker
$V_s$ (m/sec)	536	$H_i/V_{si}$	0.028	0.001	0.006	0.001	0.005	0.002
$T_G$ (sec)	0.110	$H_i$ (m)	14.8	0.7	2.2	1	1.7	0.7
$f_G$ (Hz)	9.1	$V_{si}$ (m/s)		803	374	803	374	374

(b) NBH-13 Continues								
Results		Division	Sum	Layers				
				Soft rock	Moderate rock	Clinker	Moderate rock	Clinker
		$H_i/V_{si}$		0.001	0.001	0.004	0.003	0.004
		$H_i$ (m)		1	1.1	1.5	3.4	1.5
		$V_{si}$ (m/s)		803	1150	374	1150	374

Table 4.16 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Measuring Instrument (BT No. 4)

Measuring Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_s$ (m/sec)	539	577	573	569	562	556	550	544	556
$f_G$ (Hz)	9.1	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.1	9.0

4.3.2.3 시험발파 No. 5

시험발파 No. 5의 시추공에 대한 전단파속도( $V_s$ )와 고유 주파수(Hz)는 Table 4.17과 같고 시추공을 기준으로 유추된 계층기의 전단파속도( $V_s$ )와 고유 주파수(Hz)는 Table 4.18과 같다.

Table 4.17 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Borehole (BT No. 5)

(a) NBH-1								
Results	Division	Sum	Layers					
			Clinker	Moderate rock	Clinker	Soft rock	Clinker	
$V_s$ (m/sec)	580	$H_i / V_{si}$	0.020	0.004	0.004	0.005	0.003	0.005
$T_G$ (sec)	0.081	$H_i$ (m)	11.7	1.5	4.5	1.8	2.1	1.8
$f_G$ (Hz)	12.4	$V_{si}$ (m/s)		374	1150	374	803	374

(b) NBH-2								
Results	Division	Sum	Layers					
			Soft rock	Clinker	Moderate rock			
$V_s$ (m/sec)	457	$H_i / V_{si}$	0.021	0.002	0.017	0.002		
$T_G$ (sec)	0.085	$H_i$ (m)	9.7	1.3	6.4	2		
$f_G$ (Hz)	11.8	$V_{si}$ (m/s)		803	374	803		

Table 4.18 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Measuring Instrument (BT No. 5)

Measuring Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_s$ (m/sec)	587	583	579	575	571	566	562	554	545
$f_G$ (Hz)	12.4	12.4	12.4	12.4	12.3	12.3	12.3	12.3	12.2

#### 4.3.2.4 시험발파 No. 6

시험발파 No. 6의 시추공에 대한 전단파속도( $V_s$ )와 고유 주파수(Hz)는 Table 4.19과 같고 시추공을 기준으로 유추된 계측기의 전단파속도( $V_s$ )와 고유 주파수(Hz)는 Table 4.20과 같다.

Table 4.19 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Borehole (BT No. 6)

(a) NBH-10									
Results		Division	Sum	Layers					
				Soft rock	Clinker	Soft rock	Moderate rock	Clinker	Moderate rock
$V_s$ (m/sec)	541	$H_i/V_{si}$	0.023	0.002	0.002	0.002	0.002	0.015	0.001
$T_G$ (sec)	0.093	$H_i$ (m)	12.6	2	0.6	1.5	1.8	5.5	1.2
$f_G$ (Hz)	10.7	$V_{si}$ (m/s)		803	374	803	1150	374	1150

(b) BH-5									
Results		Division	Sum	Layers					
				Soft rock	Clinker	Soft rock	Clinker	Soft rock	
$V_s$ (m/sec)	532	$H_i/V_{si}$	0.028	0.002	0.003	0.002	0.006	0.005	
$T_G$ (sec)	0.114	$H_i$ (m)	15.1	1.7	1.2	1.9	2.3	4.2	
$f_G$ (Hz)	8.8	$V_{si}$ (m/s)		803	374	803	374	803	

(b) BH-5 Continues									
Results		Division	Sum	Layers					
				Clinker	Soft rock				
		$H_i/V_{si}$		0.009	0.001				
		$H_i$ (m)		3.2	0.6				
		$V_{si}$ (m/s)		374	803				

Table 4.20 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Measuring Instrument (BT No. 6)

Measuring Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_s$ (m/sec)	540	540	539	539	539	539	538	538	537
$f_G$ (Hz)	10.4	10.4	10.3	10.3	10.2	10.2	10.1	10.0	9.9

#### 4.3.2.5 시험발파 No. 7

시험발파 No. 7의 시추공에 대한 전단파속도( $V_s$ )와 고유 주파수(Hz)는 Table 4.21과 같고 시추공을 기준으로 유추된 계측기의 전단파속도( $V_s$ )와 고유 주파수(Hz)는 Table 4.22과 같다.

Table 4.21 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Borehole (BT No. 7)

(a) NBH-11								
Results		Division	Sum	Layers				
				Moderate rock	Soft rock	Clinker	Soft rock	Clinker
$V_s$ (m/sec)	503	$H_i/V_{si}$	0.029	0.002	0.003	0.016	0.002	0.006
$T_G$ (sec)	0.117	$H_i$ (m)	14.7	2.1	2.5	6	1.9	2.2
$f_G$ (Hz)	8.6	$V_{si}$ (m/s)		1150	803	374	803	374

(b) NBH-4								
Results		Division	Sum	Layers				
				Soft rock	Moderate rock	Clinker	Soft rock	Moderate rock
$V_s$ (m/sec)	799	$H_i/V_{si}$	0.018	0.004	0.002	0.001	0.004	0.002
$T_G$ (sec)	0.073	$H_i$ (m)	14.5	3.2	1.8	0.3	2.9	2.5
$f_G$ (Hz)	13.8	$V_{si}$ (m/s)		803	1150	374	803	1150

(b) NBH-4 Continues								
Results		Division	Sum	Layers				
				Clinker	Moderate rock			
		$H_i/V_{si}$		0.004	0.002			
		$H_i$ (m)		1.5	2.3			
		$V_{si}$ (m/s)		374	1150			

Table 4.22 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Measuring Instrument (BT No. 7)

Measuring Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_s$ (m/sec)	608	616	624	633	641	649	657	674	690
$f_G$ (Hz)	10.4	10.5	10.7	10.8	11.0	11.1	11.3	11.6	11.9

#### 4.3.2.6 시험발파 No. 8

시험발파 No. 8의 시추공에 대한 전단파속도( $V_s$ )와 고유 주파수(Hz)는 Table 4.23과 같고 시추공을 기준으로 유추된 계측기의 전단파속도( $V_s$ )와 고유 주파수(Hz)는 Table 4.24과 같다.

Table 4.23 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Borehole (BT No. 8)

(a) BH-17									
Results		Division	Sum	Layers					
				Soft rock	Moderate rock				
$V_s$ (m/sec)	803	$H_i/V_{si}$	0.005	0.002	0.003				
$T_G$ (sec)	0.022	$H_i$ (m)	4.4	2	2.4				
$f_G$ (Hz)	45.6	$V_{si}$ (m/s)		803	803				

(b) CB-2									
Results		Division	Sum	Layers					
				Soft rock	Moderate rock	Clinker	Moderate rock	Clinker	Moderate rock
$V_s$ (m/sec)	789	$H_i/V_{si}$	0.021	0.001	0.002	0.007	0.004	0.002	0.005
$T_G$ (sec)	0.083	$H_i$ (m)	16.3	0.9	2.3	2.5	4.5	0.9	5.2
$f_G$ (Hz)	12.1	$V_{si}$ (m/s)		803	1150	374	1150	374	1150

(c) BH-18									
Results		Division	Sum	Layers					
				Soft rock	Moderate rock	Sediment	Soft rock		
$V_s$ (m/sec)	565	$H_i/V_{si}$	0.017	0.001	0.003	0.010	0.002		
$T_G$ (sec)	0.067	$H_i$ (m)	9.5	0.8	3.7	3	2		
$f_G$ (Hz)	14.9	$V_{si}$ (m/s)		803	1150	297	803		

Table 4.24 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Measuring Instrument (BT No. 8)

Measuring Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$V_s$ (m/sec)	801	798	795	793	788	724	713	694	763	763	753
$f_G$ (Hz)	39.6	32.6	25.4	19.6	12.1	12.9	13.0	13.3	20.9	20.9	20.9

#### 4.3.2.7 시험발파 No. 9

시험발파 No. 9의 시추공에 대한 전단파속도( $V_s$ )와 고유 주파수(Hz)는 Table 4.25과 같고 시추공을 기준으로 유추된 계측기의 전단파속도( $V_s$ )와 고유 주파수(Hz)는 Table 4.26과 같다.

Table 4.25 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Borehole (BT No. 9)

(a) BH-12								
Results		Division	Sum	Layers				
				Moderate rock	Clinker	Soft rock	Clinker	Moderate rock
$V_s$ (m/sec)	668	$H_i/V_{si}$	0.015	0.002	0.003	0.003	0.005	0.002
$T_G$ (sec)	0.062	$H_i$ (m)	10.3	2.4	1.1	2.3	2	2.5
$f_G$ (Hz)	16.2	$V_{si}$ (m/s)		1150	374	803	374	1150

(b) CB-13								
Results		Division	Sum	Layers				
				Soft rock	Moderate rock			
$V_s$ (m/sec)	908	$H_i/V_{si}$	0.007	0.005	0.002			
$T_G$ (sec)	0.029	$H_i$ (m)	6.5	4	2.5			
$f_G$ (Hz)	34.9	$V_{si}$ (m/s)		803	1150			

(c) SB-16								
Results		Division	Sum	Layers				
				Clinker	Moderate rock			
$V_s$ (m/sec)	1035	$H_i/V_{si}$	0.007	0.002	0.005			
$T_G$ (sec)	0.027	$H_i$ (m)	7.0	1.8	5.2			
$f_G$ (Hz)	37.0	$V_{si}$ (m/s)		803	1150			

Table 4.26 Estimation Result of Shear Wave Velocity and Frequency of Measuring Instrument (BT No. 9)

Measuring Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$V_s$ (m/sec)	676	919	927	936	942	956	1,032	975	920	920	920	920
$f_G$ (Hz)	16.9	35.1	35.2	35.4	35.5	35.7	36.9	36.0	33.3	33.3	33.3	33.3

## 제5장 지반진동속도의 확률론적 모델 알고리즘 구성

### 5.1 데이터베이스 구축 및 변수 선정

#### 5.1.1 데이터베이스 구축

본 연구에서는 최근 제주지역에서 시행된 9번의 시험발파로부터 61회 총 462개의 데이터를 획득하여 제3장에서 면밀히 분석하였다. 그리고 회귀분석을 위해 데이터를 Table 5.1과 같이 정리하였으며 보다 상세하게는 부록에 정리하였다.

앞 장에서 이루어진 시험발파에 의한 지반진동 분석은 실측데이터에 의한 것으로 시험발파가 실시되지 않으면 결과를 예상할 수 없다. 따라서 본 장에서는 획득된 462개의 시험발파 데이터를 이용해 시험발파 전 단계에서 발파 및 지반 변수들을 이용해 지반진동추정식을 제안하고자 하였다.

Table 5.1 Construction of data for regression analysis

Number	$V_s$ (m/sec)	$f$ (Hz)	Dilling length (m)	Burden (m)	Spacing (m)	D.I	Weight (kg/delay)	Distance (m)	PPV (cm/s)	SRSD (m/kg <sup>1/2</sup> )
1	549	14.6	2.0	0.7	0.8	2.04	0.25	290.3	0.027	580.6
2	549	14.6	2.0	0.7	0.8	2.04	0.25	296.6	0.027	593.2
3	549	14.6	3.4	1.6	1.9	1.52	3.00	289.5	0.063	167.1
4	549	14.6	3.4	1.6	1.9	1.52	3.00	275.6	0.063	159.1
5	549	14.6	4.5	1.8	2.1	1.52	5.00	280.2	0.066	125.3
6	549	14.6	4.5	1.8	2.1	1.52	5.00	295.7	0.093	132.2
7	528	14.0	2.0	0.7	0.8	2.04	0.25	237.1	0.100	474.2
8	528	14.0	2.0	0.7	0.8	2.04	0.25	243.7	0.066	487.4
9	528	14.0	2.7	1.0	1.2	1.59	0.96	244.4	0.029	249.4
10	528	14.0	2.7	1.0	1.2	1.59	0.96	252.9	0.039	258.1
⋮										
246	587	12.4	3.4	1.6	1.9	1.52	3.00	40	0.792	23.1
247	583	12.4	3.4	1.6	1.9	1.52	3.00	60	0.243	34.6
248	579	12.4	3.4	1.6	1.9	1.52	3.00	80	0.208	46.2
249	575	12.4	3.4	1.6	1.9	1.52	3.00	100	0.132	57.7
250	571	12.3	3.4	1.6	1.9	1.52	3.00	120	0.167	69.3
251	566	12.3	3.4	1.6	1.9	1.52	3.00	140	0.179	80.8
252	562	12.3	3.4	1.6	1.9	1.52	3.00	160	0.068	92.4
253	554	12.3	3.4	1.6	1.9	1.52	3.00	200	0.089	115.5
254	545	12.2	3.4	1.6	1.9	1.52	3.00	240	0.073	138.6
⋮										
462	920	33.3	2.7	1.5	1.6	1.52	5.00	744	0.0127	332.7

### 5.1.2 변수 선정

본 연구에서는 선행연구를 고찰하고 제주지역의 측상구조 지반진동 특성을 대변할 수 있는 변수로 제어불가능한 지반의 전단파속도( $V_s$ )와 지반 고유주파수( $f$ )를 선정하였고, 설계단계에서 제어 가능한 변수들을 회귀 모델의 변수들로 선정하여 총 9개의 변수를 선정하였다. Table 5.2은 제주지역의 지반진동속도(PPV)를 추정하기 위한 변수들이다.

Table 5.2 Prediction variables of ground vibration velocity

Division	Variable
Uncontrollable	Shear Wave Velocity( $V_s$ ), Frequency( $f$ )
Controllable	Dilling length, Burden, Spacing, Decoupling Index(D.I), Weight(kg/delay), Distance, SRSD(m/kg <sup>1/2</sup> )

선정된 영향요인은 속성가중치 산정과정을 통하여 유의성 검증을 진행한다. 앞서 회귀분석에서 설명하였던, 개별 독립변수의 유의수준을 확인하는 t값의 유의 확률과 독립변수간의 다중공선성 문제를 확인하는 공선성 통계량의 VIF값 등을 모두 확인한 후, 결과적으로 신뢰할만한 범위 내에 포함되었을 때 최종 영향요인 변수로 선정된다.

또한, 각 독립변수들과 종속변수의 관계를 예측할 수 없어 수리적 기본 알고리즘은 생략하고 다중회귀분석을 실시하였다.

### 5.1.3 변수들의 기술 통계

#### 5.1.3.1 분석대상 변수별 기술 통계량

총 61회 462개의 데이터를 Peak Particle Velocity(cm/s)를 기준으로 분석하였으며, Table 5.3은 입력변수별 기술통계량을 나타낸 것이다. 이처럼 각 변수별 기술통계량을 산정하는 이유는 변수들의 통계적 특성을 파악하고 시뮬레이션 모델에서 각

분포형태별 입력값(모수)으로 활용하기 위해서이다.

Table 5.3 Descriptive statistics of variables

Division	N	N	Min	Max	Mean
P.P.V		0.01	2.84	0.30	0.46
$V_s$		516.00	1032.00	634.13	119.32
$f$		9.00	39.60	15.56	7.55
Dilling length		1.50	4.50	3.11	0.79
Burden	462	0.60	2.00	1.36	0.40
Spacing		0.70	2.50	1.51	0.48
D.I		1.41	2.53	1.57	0.15
Weight		0.25	8.00	3.12	2.27
Distance		31.70	997.60	197.54	162.70
SRSD		13.92	1141.00	148.31	135.06

분석(입력)변수들의 변동 폭에 대한 분석결과 P.P.V와 SRSD가 약 100배 수준의 변동 폭을 보이고 나머지 변수들은 약 2~10배 정도의 변동 폭을 보인다. 변동 폭이 클 경우 시뮬레이션 결과 최소와 최대값의 범위가 넓어지는 문제는 있으나, 범위를 넓히는 것이 극단적인 값을 더 잘 테스트할 수 있다(조나단문, 2005)는 장점도 있다. 그러나 이들 분석 변수들이 합리적인 변동 폭을 갖도록 자료를 수집하거나 수집된 자료를 가공(Data Mining)하는 작업이 필요하다(Lee, 2006).

### 5.1.3.2 분석대상 변수별 상관관계

종속변수를 Peak Particle Velocity(cm/s)로 회귀분석을 실시하였기 때문에 P.P.V를 기준으로 Pearson 상관관계를 확인해 보면 Table 5.4에서와 같이 상관계수들은 모두 0.5이하이며, SRSD가 음의상관 0.45로 가장 높고 D.I가 음의상관 0.15로 가장 낮다.

전반적으로 P.P.V와 상관관계가 높은 변수는 없으며, 천공장과 최소저항선 그리고 공간격은 표준발파패턴에 의해 결정되고 현장에 적용된 변수들로 다중 공선성 문제가 예상된다.

Table 5.4 Pearson correlation of variables

	P.P.V	$V_s$	$f$	Dilling length	Burden	Spacin g	D.I	Weight	Distance	SRSD
P.P.V	1.00	-0.18	-0.21	0.24	0.33	0.21	-0.15	0.42	-0.41	-0.45
$V_s$		1.00	0.82	-0.18	-0.02	-0.16	-0.15	0.07	0.29	0.11
$f$			1.00	-0.13	-0.05	-0.10	-0.01	-0.03	0.30	0.16
Dilling length				1.00	0.90	0.91	-0.34	0.73	0.16	-0.38
Burden					1.00	0.94	-0.45	0.87	0.19	-0.42
Spacing						1.00	-0.39	0.70	0.20	-0.37
D.I							1.00	-0.39	0.03	0.43
Weidht								1.00	0.12	-0.41
Distance									1.00	0.66
SRSD										1.00

### 5.1.3.3 분석대상 변수별 산점도

분석대상 변수별 산점도를 Y축의 PPV를 기준으로 확인해 보면 Fig. 5.1에서와 같이 거리와 SRSD에서는 비선형 관계가 예측되나 나머지 변수들에서는 선형 또는 비선형 관계를 찾기 어렵고 이산형 분포를 보이는 것으로 확인된다.

회귀 모델의 적합도가 부족할 것으로 예측되고 시뮬레이션 모형에서 분포특성에 대한 적합도 문제가 발생할 가능성이 높아 보인다.

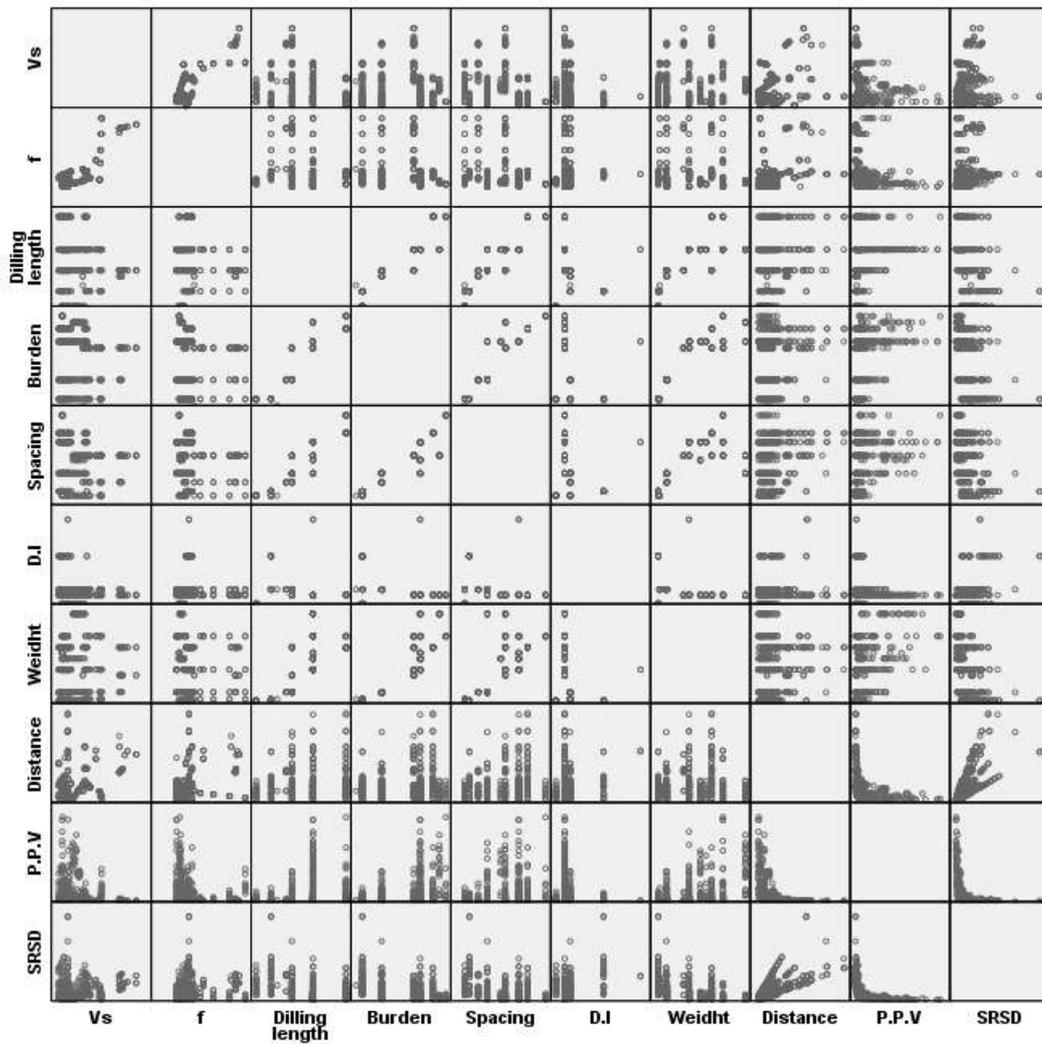


Fig. 5.1 Scatter Plot of Variables of Subject of Analysis

## 5.2 다중회귀 모델 구축

SPSS 18.0을 활용하여 다중회귀 모델 구축을 위한 회귀분석을 실시하였다. 다중회귀분석은 입력변수의 선택방법에 따라 입력선택(All Possible Selection), 전진선택(Forward Selection), 후진제거(Backward Elimination), 단계선택(Stepwise Selection)방법이 있다.

이러한 4가지 방법으로 회귀분석을 실시한 결과, 단계선택 방식과 전진선택 방식에서는  $R_{adj}^2=0.395$ 로 동일하고 종속변수인 P.P.V에 영향력이 가장 크다고 판단되는

SRSD, 지발당 장약량(Weight), 거리(Distance)를 회귀 모델의 변수로 제시하였으나, 지발당 장약량(Weight)과 거리(Distance)가 SRSD를 구성하는 변수이기 때문에 통계 모형에서 공선성에 문제가 없다하여도 세 변수만으로 구성된 회귀 모델은 적합하지 않은 것으로 판단된다.

따라서, 독립변수를 전부 입력하는 입력선택 방식과 모형에 대한 영향력이 가장 적은 변수를 제거하는 후진선택 방식으로 회귀분석을 하였다.

### 5.2.1 입력선택(All Possible Selection) 회귀분석

입력선택에 의한 분석결과(Table 5.5), 종속변수 PPV에 대한 9개의 독립변수에 대한 회귀 모델의  $R_{adj}^2=0.429$ 이고 P-value가 0.00으로 모델은 유의한 것으로 확인되었다. 하지만 각 변수들의 유의수준은 5~10%로 보통 90~95%신뢰구간을 적용하여 유의도를 판단한다. 유의확률을 만족하지 못하는 변수는 주파수( $f$ ), Decoupling Index(D.I), SRSD이다. 그리고 변수들간의 상관관계로 인한 다중 공선성 문제를 분산팽창지수(VIF)로 확인한 결과 최소저항선(Burden)과 공간격(Spacing)이 VIF 값 10을 넘어 만족하지 못하는 것으로 확인된다.

Table 5.5 First Result of Multiple Regression by Input Selection

Model	$R$	$R^2$	$R_{adj}^2$	S.E	Durbin-Watson
Summary	0.664	0.440	0.429	0.346	0.855

Model	Division	Sum of squares	df	Mean square	F	P
Analysis of variance	Regression model	42.657	9	4.74	39.528	.000
	Residual	54.198	452	0.12		
	Sum	96.855	461			

Model	Unstandardized Coefficients		standardized Coefficients	t	p	Collinearity statistic	
	B	S.E	$\beta$			Tol.	VIF
(Constant)	0.346	0.311		1.111			
$V_s$	-0.001	0.000	-0.231	-3.124	0.002	0.226	4.421
$f$	0.005	0.004	0.087	1.317	0.189	0.283	3.531
Dilling length	-0.098	0.055	-0.168	-1.792	0.074	0.141	7.093
Burden	1.208	0.231	1.054	5.234	0.000	0.031	32.769
Spacing	-0.623	0.148	-0.646	-4.218	0.000	0.053	18.935
D.I	0.082	0.133	0.027	0.617	0.538	0.641	1.561
Weight	0.045	0.019	0.223	2.364	0.019	0.14	7.159
Distance	-0.001	0.000	-0.515	-7.18	0.000	0.241	4.15
SRSD	0.000	0.000	0.125	1.635	0.103	0.213	4.691

유의확률을 만족하고 공선성에 문제가 없는 것으로 분석된 전단파속도( $V_s$ ), 천공장(Dilling length), 지발당장약량(Weight) 그리고 거리(Distance)를 독립변수로 한 회귀분석별과는 Table 5.6과 같다.

회귀 모델은  $R_{adj}^2=0.397$ 이고 P-value가 0.000으로 모델은 유의한 것으로 확인되었고 모든 독립변수가 P-value와 VIF를 만족하지만, 전단파속도에 대한 회귀계수가 0.000으로 지반특성을 반영하지 못하고 모형의 설명력도 0.397로 작은 한계를 가지고 있다.

Table 5.6 Second Result of Multiple Regression by Input Selection

Model	$R$	$R^2$	$R_{adj}^2$	S.E	Durbin-Watson
Summary	0.634	0.402	0.397	0.356	0.848

Model	Division	Sum of squares	df	Mean square	F	P
Analysis of variance	Regression model	38.953	4	9.738	76.861	.000
	Residual	57.902	457	0.127		
	Sum	96.855	461			

Model	Unstandardized Coefficients		standardized Coefficients	t	p	Collinearity statistic	
	B	S.E	$\beta$			Tol.	VIF
(Constant)	0.697	0.144		4.851			
$V_s$	0.000	0.000	-0.118	-2.88	0.004	0.783	1.278
Dilling length	-0.075	0.033	-0.128	-2.237	0.026	0.397	2.519
Weight	0.116	0.011	0.573	10.318	0.000	0.425	2.354
Distance	-0.001	0.000	-0.423	-10.854	0.000	0.861	1.161

### 5.2.2 후진제거(Backward Elimination) 회귀분석

후진제거 방식에 의한 분석결과(Table 5.7), 독립변수 D.I와  $f$ 가 순차적으로 제거 되었고 종속변수 PPV에 대한 독립변수의 회귀 모델은  $R_{adj}^2=0.429$ 이고 P-value가 0.000으로 모델은 유의한 것으로 확인되었다. 각 변수들의 유의수준은 5~10%로 보통 90~95%신뢰구간을 적용하여 유의도를 판단하며 유의확률을 만족하지 못하는 변수는 없다. 하지만 변수들간의 상관관계로 인한 다중 공선성 문제를 분산팽창지수(VIF)로 확인한 결과 최소저항선(Burden)과 공간격(Spacing)이 VIF 값 10을 넘어 만족하지 못하는 것으로 확인된다.

Table 5.7 First Result of Multiple Regression by Backward Elimination

Model	$R$	$R^2$	$R_{adj}^2$	S.E	Durbin-Watson
Summary	0.661	0.437	0.429	0.346	0.855

Model	Division	Sum of squares	df	Mean square	F	P
Analysis of variance	Regression model	42.355	7	6.051	50.404	.000
	Residual	54.500	454	0.120		
	Sum	96.855	461			

Model	Unstandardized Coefficients		standardized Coefficients	t	P	Collinearity statistic	
	B	S.E	$\beta$			Tol.	VIF
(Constant)	0.373	0.172		2.166			
$V_s$	-0.001	0.000	-0.156	-3.582	0.000	0.649	1.540
Dilling length	-0.091	0.054	-0.157	-1.683	0.093	0.143	6.983
Burden	1.148	0.227	1.002	5.052	0.000	0.032	31.739
Spacing	-0.583	0.145	-0.605	-4.018	0.000	0.055	18.271
Weight	0.044	0.019	0.220	2.357	0.019	0.142	7.045
Distance	-0.001	0.000	-0.521	-7.365	0.000	0.247	4.042
SRSD	0.000	0.000	0.142	1.964	0.050	0.236	4.246

유의확률을 만족하고 공선성에 문제가 없는 것으로 분석된 전단파속도( $V_s$ ), 천공장(Dilling length), 지발당장약량(Weight), 거리(Distance) 그리고 SRSD를 독립변수로 한 회귀분석별과는 Table 5.8과 같다.

회귀 모델은  $R_{adj}^2=0.398$ 이고 P-value가 0.000으로 모델은 유의한 것으로 확인되었고 천공장(Dilling length)이 P=0.193으로 나타나 제거되었다. 나머지 독립변수는 P-value와 VIF를 만족하지만, 전단파속도( $V_s$ )에 대한 회귀계수가 0.000으로 지반특성을 반영하지 못하고 모형의 설명력도 0.398로 작은 한계를 가지고 있다.

Table 5.8 Second Result of Multiple Regression by Backward Elimination

Model	$R$	$R^2$	$R_{adj}^2$	S.E	Durbin-Watson
Summary	0.635	0.403	0.398	0.356	0.822

Model	Division	Sum of squares	df	Mean square	F	P
Analysis of variance	Regression model	39.077	4	9.769	77.271	.000
	Residual	57.778	457	0.126		
	Sum	96.855	461			

Model	Unstandardized Coefficients		standardized Coefficients	t	p	Collinearity statistic	
	B	S.E	$\beta$			Tol.	VIF
(Constant)	0.361	0.098		3.677			
$V_s$	0.000	0.000	-0.073	-1.915	0.056	0.906	1.104
Weight	0.112	0.010	0.557	11.522	0.000	0.559	1.789
Distance	-0.002	0.000	-0.559	-9.208	0.000	0.355	2.819
SRSD	0.001	0.000	0.157	2.448	0.015	0.318	3.149

결과적으로, 현재의 독립변수들에 대한 회귀 모델은 전단파속도( $V_s$ ), 천공장(Dilling length), 지발당장약량(Weight) 그리고 거리(Distance)를 독립변수로 활용한  $R_{adj}^2 = 0.397$ 인 회귀 모델이 최적으로 분석되었다.

하지만, 통상 공학에서 받아들여지는 결정계수  $R^2$  값은 최소 0.7이상을 요구하기 때문에 수집된 자료를 가공(Data Mining)하여 최소수준 이상의 회귀 모델을 만드는 작업이 필요하다.

### 5.3 변수들의 비선형 회귀분석

선형 회귀 모델에서 “선형”의 의미는 변수들 간의 관계라기보다는 회귀 계수들에 대한 선형임을 뜻한다. 따라서 독립변수들과 종속 변수들은 비선형 관계이지만, 회귀 계수와는 선형인 경우에는, 원래의 변수들을 변환시켜 얻은 새로운 변수를 가지고 분석하는 것이 효과적이다. 이를 비선형 회귀분석이라 한다(Seo, et al., 2009).

따라서 본 연구에서는 종속변수 PPV와 개별 독립변수들과 비선형 회귀분석을 실시하여 독립변수의 원래 데이터를 종속변수에 적합한 형태로 변환하였다. Table 5.9은 회귀분석을 위한 비선형 함수이다.

Table 5.9 Non-linear functions

Name	Non-linear function
Logarithmic	$y = \beta_0 + \beta_1 \log(x) + \epsilon$
Inverse	$y = \beta_0 + \beta_1 (1/x) + \epsilon$
Quadratic	$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \epsilon$
Cubic	$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \epsilon$
Power	$y = \beta_0 + x^{\beta_1} + \epsilon$
Exponent	$y = \beta_0 + e^{\beta_1 x} + \epsilon$

비선형 함수는 SPSS 18.0에서 지원하고 있는 함수들로 선형(Linear), 대수(Logarithmic), 역(Inverse), 2차모형(Quadratic), 3차모형(Cubic), 거듭제곱(Power), 지수(Exponent) 함수들에 대해 검토하여 결정계수가 가장 큰 함수를 활용하여 데이터 마이닝 하였다.

### 5.3.1 전단파속도( $V_S$ )

SPSS의 곡선 추정기능을 이용하여 Table 5.10과 같이 모형 및 모수 추정을 하였다. 비선형 함수 추정결과, 지수(Exponent)함수의 결정계수가 가장 크고 적절한 것으로 판단하였다. Fig. 5.2는 전단파 속도( $V_S$ )의 데이터 마이닝 전, 후 데이터 분포를 비교한 것이다.

Table 5.10 Model and Parameter Estimation of Shear Wave Velocity on PPV

Function	Model		Parameter estimation			
	$R^2$	P-value	Constant	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
Linear	0.031	0.000	0.729	-0.001		
Logarithmic	0.027	0.000	3.131	-0.439		
Inverse	0.023	0.001	-0.142	274.075		
Quadratic	0.039	0.000	-0.524	0.003	-2.55E-06	
Cubic	0.037	0.000	-0.016	0.001	0.000	-1.04E-09
Power	0.072	0.000	48919.392	-1.992		
Exponent	0.080	0.000	0.904	-0.003		

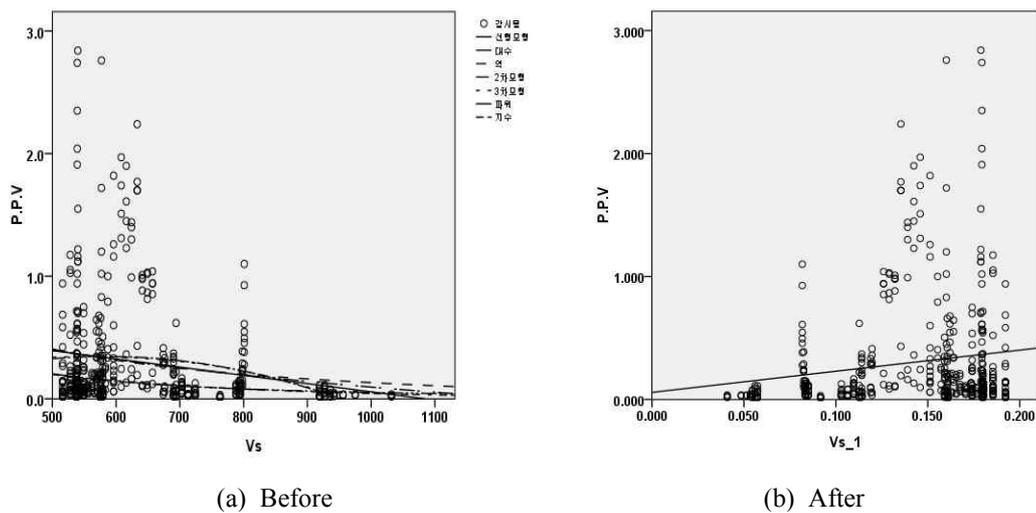


Fig. 5.2 Data Mining of  $V_S$

### 5.3.2 주파수( $f$ )

SPSS의 곡선 추정기능을 이용하여 Table 5.11과 같이 모형 및 모수 추정을 하였다. 비선형 함수 추정결과, 2차모형(Quadratic)함수의 결정계수가 가장 크고 적절한 것으로 판단하였다. Fig. 5.3는 주파수( $f$ )의 데이터 마이닝 전, 후 데이터 분포를 비교한 것이다.

Table 5.11 Model and Parameter Estimation of Frequency on PPV

Function	Model		Parameter estimation			
	$R^2$	P-value	Constant	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
Linear	0.043	0.000	0.499	-0.013		
Logarithmic	0.071	0.000	1.163	-0.323		
Inverse	0.099	0.000	-0.168	6.348		
Quadratic	0.136	0.000	1.545	-0.128	0.003	
Cubic	0.136	0.000	1.684	-0.152	0.004	-1.95E-05
Power	0.098	0.000	2.186	-1.055		
Exponent	0.068	0.000	0.262	-0.044		

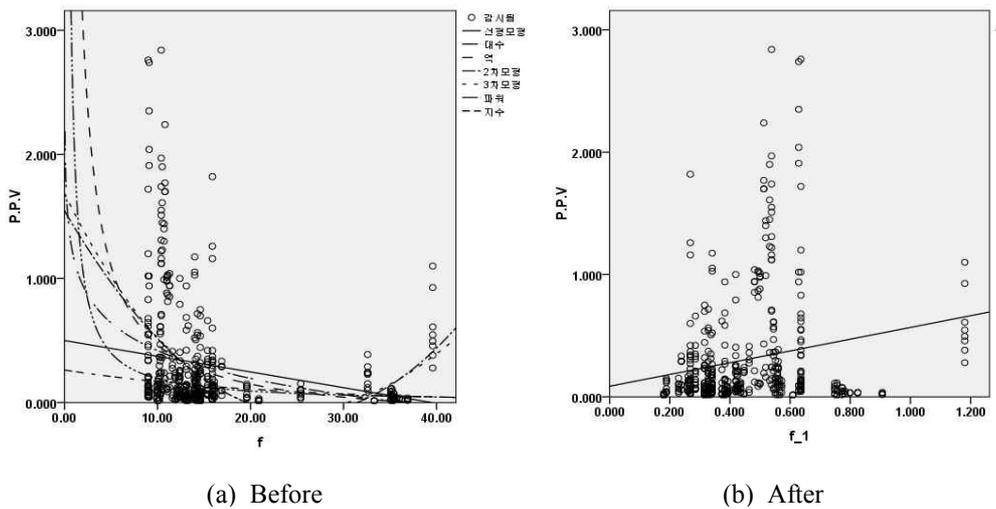


Fig. 5.3 Data Mining of  $f$

### 5.3.3 천공장(Dilling length)

SPSS의 곡선 추정기능을 이용하여 Table 5.12과 같이 모형 및 모수 추정을 하였다. 비선형 함수 추정결과, 3차모형(Cubic)함수의 결정계수가 가장 크고 적절한 것으로 판단하였다. Fig. 5.4는 천공장(Dilling length)의 데이터 마이닝 전, 후 데이터 분포를 비교한 것이다.

Table 5.12 Model and Parameter Estimation of Drilling Length on PPV

Function	Model		Parameter estimation			
	$R^2$	P-value	Constant	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
Linear	0.057	0.000	-0.131	0.140		
Logarithmic	0.064	0.000	-0.165	0.426		
Inverse	0.064	0.000	0.683	-1.097		
Quadratic	0.078	0.000	-0.870	0.646	-0.081	
Cubic	0.123	0.000	3.150	-3.789	1.438	-0.163
Power	0.112	0.000	0.024	1.564		
Exponent	0.103	0.000	0.026	0.522		

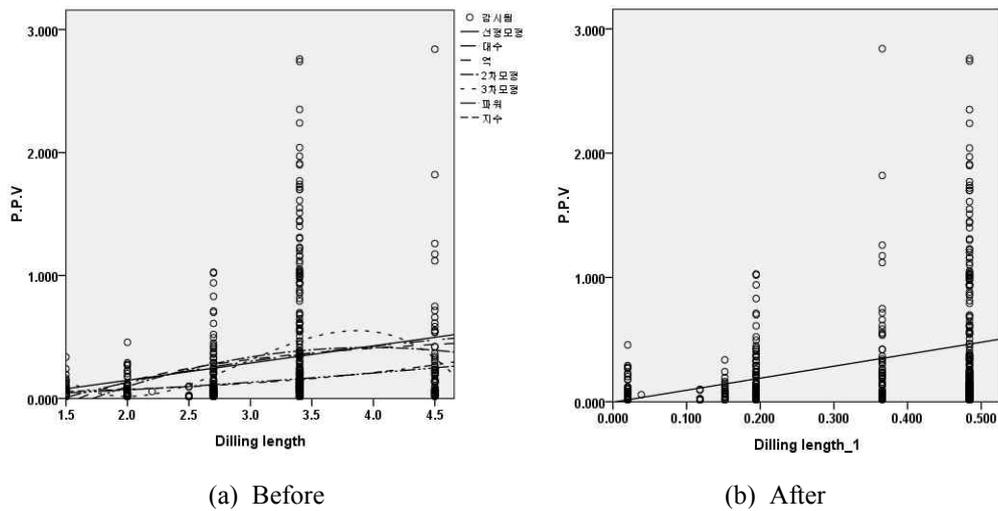


Fig. 5.4 Data Mining of Dilling length

### 5.3.4 저항선(Burden)

SPSS의 곡선 추정기능을 이용하여 Table 5.13과 같이 모형 및 모수 추정을 하였다. 비선형 함수 추정결과, 지수(Exponent)함수의 결정계수가 가장 크고 적절한 것으로 판단하였다. Fig. 5.5는 저항선(Burden)의 데이터 마이닝 전, 후 데이터 분포를 비교한 것이다.

Table 5.13 Model and Parameter Estimation of Burden on PPV

Function	Model		Parameter estimation			
	$R^2$	P-value	Constant	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
Linear	0.111	0.000	-0.216	0.382		
Logarithmic	0.101	0.000	0.193	0.432		
Inverse	0.090	0.000	0.671	-0.446		
Quadratic	0.126	0.000	0.437	-0.767	0.453	
Cubic	0.131	0.000	-0.712	2.209	-1.935	0.606
Power	0.141	0.000	0.092	1.421		
Exponent	0.150	0.000	0.025	1.234		

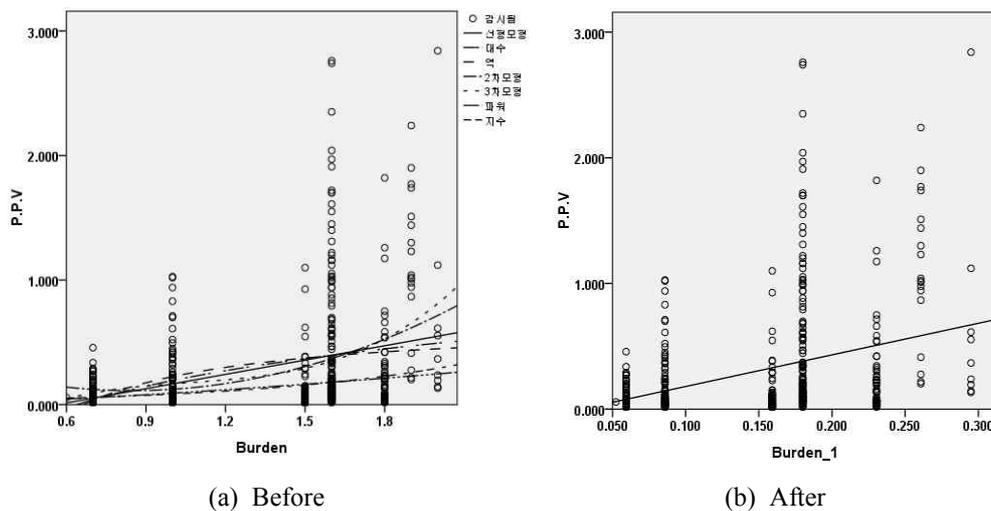


Fig. 5.5 Data Mining of Burden

### 5.3.5 공간격(Spacing)

SPSS의 곡선 추정기능을 이용하여 Table 5.14과 같이 모형 및 모수 추정을 하였다. 비선형 함수 추정결과, 거듭제곱(Power)함수의 결정계수가 가장 크고 적절한 것으로 판단하였다. Fig. 5.6은 공간격(Spacing)의 데이터 마이닝 전, 후 데이터 분포를 비교한 것이다.

Table 5.14 Model and Parameter Estimation of Spacing on PPV

Function	Model		Parameter estimation			
	$R^2$	P-value	Constant	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
Linear	0.045	0.000	-0.006	0.204		
Logarithmic	0.050	0.000	0.201	0.286		
Inverse	0.053	0.000	0.566	-0.351		
Quadratic	0.052	0.000	-0.338	0.716	-0.176	
Cubic	0.057	0.000	-1.153	2.604	-1.506	0.292
Power	0.096	0.000	0.089	1.105		
Exponent	0.089	0.000	0.039	0.800		

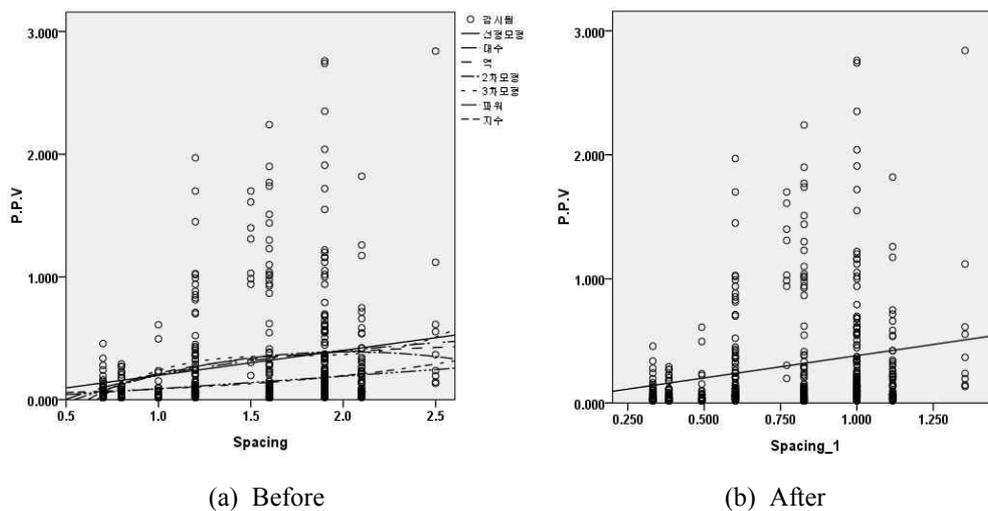


Fig. 5.6 Data Mining of Spacing

### 5.3.6 Decoupling Index(D.I)

SPSS의 곡선 추정기능을 이용하여 Table 5.15과 같이 모형 및 모수 추정을 하였다. 비선형 함수 추정결과, 거듭제곱(Power)함수의 결정계수가 가장 크고 적절한 것으로 판단하였다. Fig. 5.7은 Decoupling Index(D.I)의 데이터 마이닝 전, 후 데이터 분포를 비교한 것이다.

Table 5.15 Model and Parameter Estimation of Decoupling Index on PPV

Function	Model		Parameter estimation			
	$R^2$	P-value	Constant	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
Linear	0.023	0.001	1.020	-0.455		
Logarithmic	0.023	0.001	0.670	-0.816		
Inverse	0.023	0.001	-0.607	1.423		
Quadratic	0.023	0.004	2.027	-1.596	0.315	
Cubic	0.023	0.004	1.724	-1.057	0.000	0.060
Power	0.038	0.000	0.492	-2.923		
Exponent	0.038	0.000	1.748	-1.641		

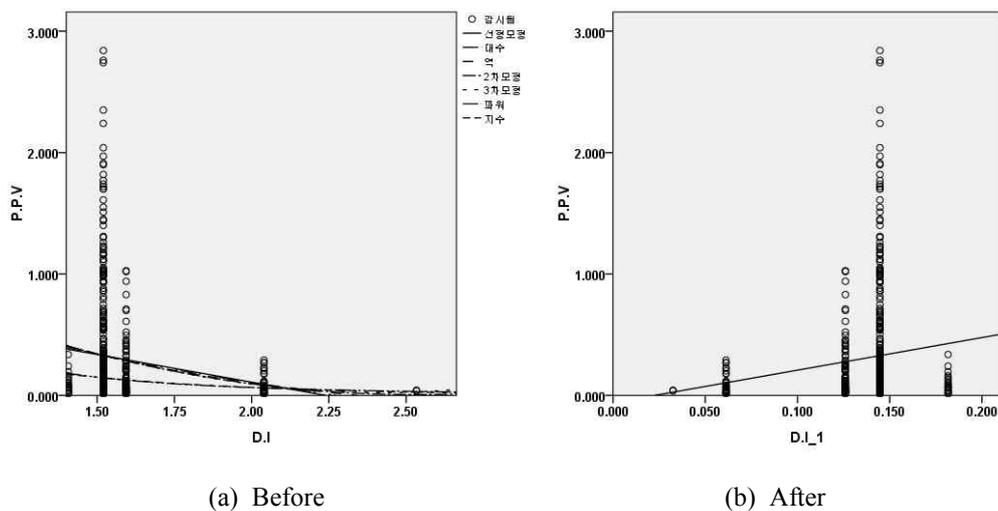


Fig. 5.7 Data Mining of Decoupling Index

### 5.3.7 지발당 장약량(Weight)

SPSS의 곡선 추정기능을 이용하여 Table 5.16과 같이 모형 및 모수 추정을 하였다. 비선형 함수 추정결과, 3차모형(Cubic)함수의 결정계수가 가장 크고 적절한 것으로 판단하였다. Fig. 5.8은 지발당 장약량(Weight)의 데이터 마이닝 전, 후 데이터 분포를 비교한 것이다.

Table 5.16 Model and Parameter Estimation of Charge per Delay on PPV

Function	Model		Parameter estimation			
	$R^2$	P-value	Constant	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
Linear	0.175	0.000	0.039	0.085		
Logarithmic	0.117	0.000	0.200	0.145		
Inverse	0.064	0.000	0.391	-0.093		
Quadratic	0.211	0.000	0.162	-0.035	0.017	
Cubic	0.236	0.000	0.019	0.227	-0.067	0.007
Power	0.147	0.000	0.096	0.450		
Exponent	0.179	0.000	0.063	0.238		

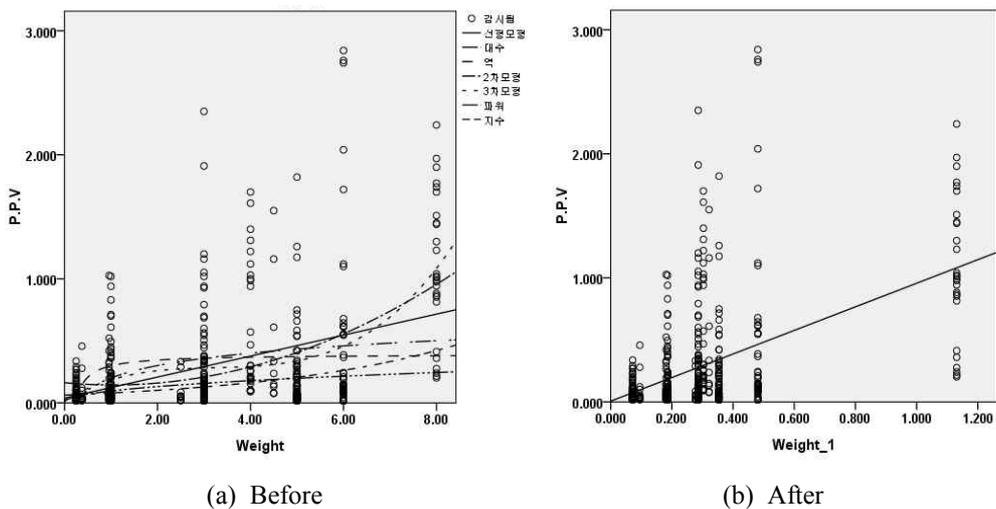


Fig. 5.8 Data Mining of Charge per delay

### 5.3.8 거리(Distance)

SPSS의 곡선 추정기능을 이용하여 Table 5.17과 같이 모형 및 모수 추정을 하였다. 비선형 함수 추정결과, 거듭제곱(Power)함수의 결정계수가 가장 크게 산정되었으나, 회귀 모델에서 영향력을 너무 크게 행사할 가능성이 있어 역(Inverse)함수로 데이터 마이닝을 하였다. Fig. 5.9은 거리(Distance)의 데이터 마이닝 전, 후 데이터 분포를 비교한 것이다.

Table 5.17 Model and Parameter Estimation of Distance on PPV

Function	Model		Parameter estimation			
	$R^2$	P-value	Constant	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
Linear	0.166	0.000	0.530	-0.001		
Logarithmic	0.334	0.000	2.085	-0.356		
Inverse	0.436	0.000	-0.100	46.302		
Quadratic	0.279	0.000	0.799	-0.004	3.49E-06	
Cubic	0.349	0.000	1.087	-0.008	1.61E-05	-9.76E-09
Power	0.546	0.000	75.733	-1.268		
Exponent	0.417	0.000	0.359	-0.005		

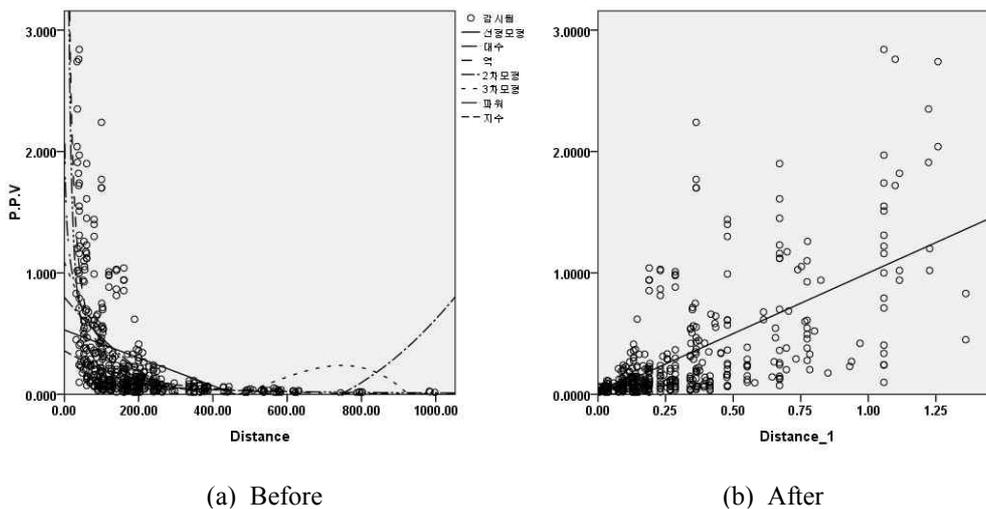


Fig. 5.9 Data Mining of Distance

### 5.3.9 자승근환산거리(SRSD)

SPSS의 곡선 추정기능을 이용하여 Table 5.18과 같이 모형 및 모수 추정을 하였다. 비선형 함수 추정결과, 거듭제곱(Power)함수의 결정계수가 가장 크게 산정되었으나, 회귀 모델에서 영향력을 너무 크게 행사할 가능성이 있어 역(Inverse)함수로 데이터 마이닝을 하였다. Fig. 5.10은 자승근 환산거리(SRSD)의 데이터 마이닝 전, 후 데이터 분포를 비교한 것이다.

Table 5.18 Model and Parameter Estimation of SRSD on PPV

Function	Model		Parameter estimation			
	$R^2$	P-value	Constant	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
Linear	0.200	0.000	0.528	-0.002		
Logarithmic	0.522	0.000	2.110	-0.388		
Inverse	0.741	0.000	-0.112	30.324		
Quadratic	0.328	0.000	0.717	-0.004	3.27E-06	
Cubic	0.475	0.000	1.030	-0.009	2.16E-05	-1.27E-08
Power	0.790	0.000	64.651	-1.331		
Exponent	0.516	0.000	0.361	-0.007		

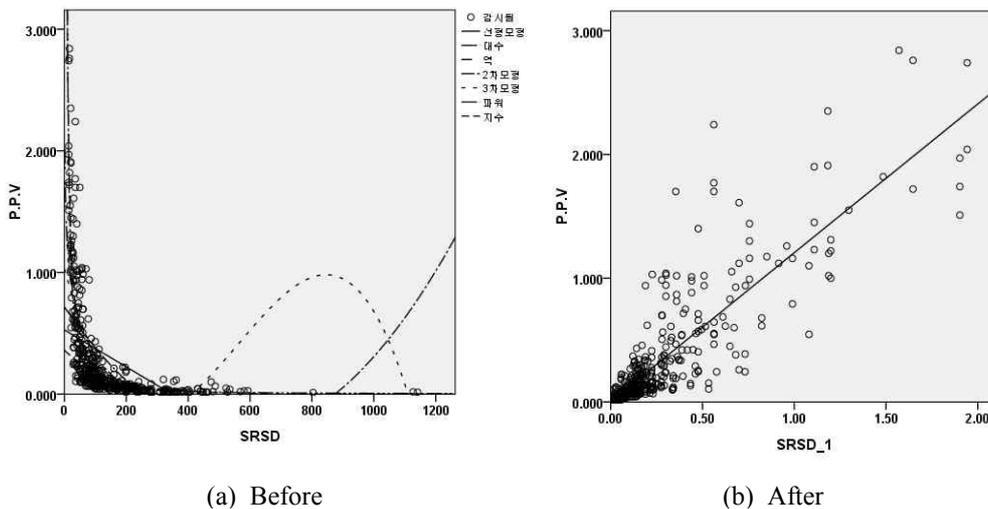


Fig. 5.10 Data Mining of SRSD

## 5.4 데이터 마이닝 후 다중회귀분석

### 5.4.1 변수들의 기술 통계량

총 462개의 데이터를 Peak Particle Velocity(cm/s)를 기준으로 분석하였으며, Table 5.19은 입력변수별 기술통계량을 나타낸 것이다. 이처럼 각 변수별 기술통계량을 산정하는 이유는 변수들의 통계적 특성을 파악하고 시뮬레이션 모델에서 각 분포 형태별 입력값(모수)으로 활용하기 위해서이다.

Table 5.19 Descriptive Statistics Quantity of Variables

Division	N	Min	Max	Mean	S.D
P.P.V	462	0.01	2.84	0.30	0.46
$V_s$ _1		0.04	0.19	0.14	0.04
$f$ _1		0.18	1.18	0.45	0.18
Dilling length_1		0.02	0.48	0.32	0.17
Burden_1		0.05	0.29	0.15	0.06
Spacing_1		0.33	1.35	0.78	0.27
D.I_1		0.03	0.18	0.14	0.02
Weight_1		0.07	1.13	0.31	0.23
Distance_1		-0.05	1.36	0.30	0.30
SRSD_1		-0.09	2.07	0.30	0.39

데이터 마이닝 후 분석(입력)변수들의 변동 폭에 대한 분석결과 데이터 마이닝 전 Raw 데이터의 변동 폭과는 차이를 보이지 않는다. 다만 데이터의 스케일이 줄어 든 것으로 확인된다.

### 5.4.2 변수들의 상관관계

종속변수를 Peak Particle Velocity(cm/s)로 회귀분석을 실시하였기 때문에 P.P.V 를 기준으로 Pearson 상관관계를 확인해 보면 Table 5.20에서와 같다. 데이터 마이닝 전 음의 상관관계를 보이던  $V_s$ ,  $f$ , D.I, Distance, SRSD가 양의 상관관계로 바뀌었고 SRSD의 상관관계가  $R=-0.45$ 에서  $R=0.86$ 으로 개선되었고, 그 다음 Distance,

Dilling length 순으로 상관관계가 개선되었다.

그리고, 여전히 천공장(Dilling length)과 공간격(Spacing) 사이에는 상관계수가 높아 다중 공선성 문제가 예상된다.

Table 5.20 Pearson Correlation of Each Variables after Data Mining

	P.P.V	$V_S$ _1	$f$ _1	Dilling length_1	Burden_1	Spacing_1	D.I_1	Weight_1	Distance_1	SRSD_1
P.P.V	1.00	0.15	0.19	0.35	0.35	0.21	0.15	0.49	0.66	0.86
$V_S$ _1		1.00	-0.28	0.13	0.08	0.18	-0.13	-0.10	0.20	0.14
$f$ _1			1.00	-0.02	-0.01	-0.04	0.19	0.11	0.21	0.22
Dilling length_1				1.00	0.78	0.78	0.51	0.58	0.03	0.45
Burden_1					1.00	0.91	0.42	0.68	-0.10	0.38
Spacing_1						1.00	0.39	0.39	-0.11	0.31
D.I_1							1.00	0.29	0.03	0.21
Weight_1								1.00	0.02	0.45
Distance_1									1.00	0.78
SRSD_1										1.00

#### 5.4.3 변수들의 산점도

데이터 마이닝 후 분석대상 변수별 산점도를 Y축의 PPV를 기준으로 확인해 보면 Fig. 5.11에서와 같이 거리와 SRSD에서 데이터 마이닝 전 강한 비선형 관계가 선형 관계로 변화된 것을 확인할 수 있다. 또한, 다른 변수들에서는 데이터가 전과 다르게 변화된 양상을 확인할 수 있으나 선형 또는 비선형 관계를 찾기 어렵고 여전히 이산형 분포를 보이는 것으로 확인된다.

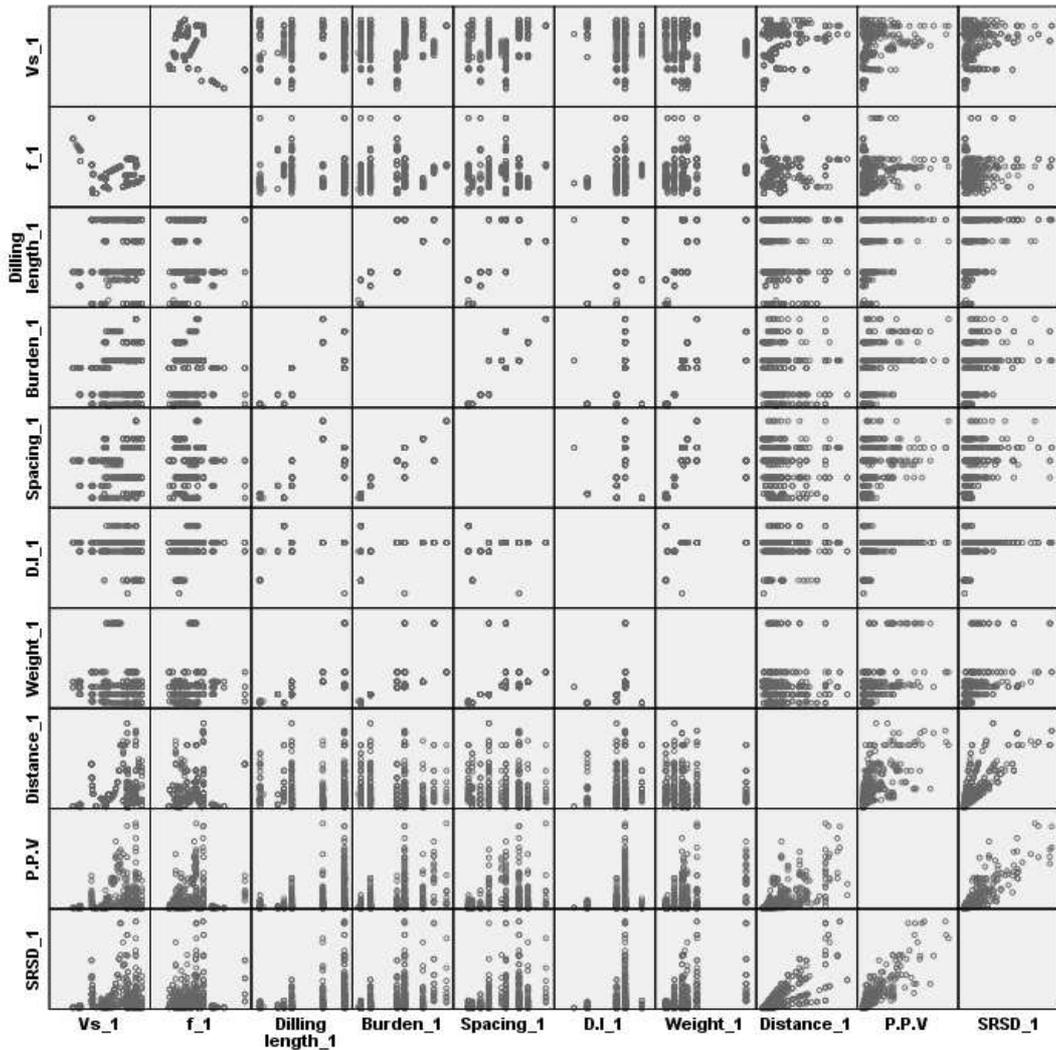


Fig. 5.11 Scatter Plot of Variables of Subject of Analysis

### 5.5 데이터 마이닝 후 회귀 모델 구축

SPSS 18.0을 활용하여 다중회귀 모델 구축을 위한 회귀분석을 실시하였다. 다중회귀분석의 입력변수 선택방법에는 위 절에서 설명한 것처럼 네 가지 방법이 있으나 데이터 마이닝 후 다중회귀 모델 구축에서는 입력선택(All Possible Selection) 방법으로 모든 변수를 입력한 후 다중 공선성 검증을 먼저 실시하여 변수를 제거하고 두 번째 단계에서 유의성 검증을 통해 변수를 제거하였다.

데이터 마이닝 후 회귀분석 결과(Table 5.21), 종속변수 PPV에 대한 9개의 독립변수에 대한 회귀 모델의  $R_{adj}^2=0.786$ 이고 P-value가 0.00으로 회귀모델은 유의한 것으로 확인되었다.

먼저, 다중 공선성 검정을 하기 위하여 그 척도인 분산 팽창 지수(VIF)가 10을 넘는 독립 변수를 살펴보았다. 그 결과 최소저항선(Burden\_1)과 공간격(Spacing\_1)이 각각 VIF값 23.5, 20.4로 확인되었다. 여기서 다중 공선성이 존재하는 최소저항선(Burden\_1)과 공간격(Spacing\_1) 중 VIF가 높은 것을 제거하는 것이 아니라 상관관계를 검토하여 상관 계수가 보다 적은 것을 선택하여 제거한다. 따라서 본 연구에서는 상관계수가 상대적으로 적은 공간격(Spacing\_1)을 1차로 제거 하였다.

더 이상 다중 공선성 문제 변수가 없는 것으로 확인 되어 유의성 검증을 실시하였다. 유효하지 않은 변수라고 해서 반드시 모델에서 제거해야 하는 것은 아니다. 변수의 제거는 연구 의도에 따라 결정된다고 할 수 있다. 비록 유효하지 않은 변수라 하더라도 연구자의 판단에 의해 중요한 변수라고 생각된다면 모델에 포함시킬 수 있다. 물론 그에 따른 타당한 이유와 근거가 제시되어야 한다(Lee & Kang, 2009).

본 연구에서는 우선 유의확률이 높은 순으로 하나씩 제거하면서 최종 모델을 도출하였다. 이 과정에서 Decoupling Index(D.I\_1), 거리(Distance\_1), 지반고유주파수( $f_{_1}$ ), 최소저항선(Burden\_1)이 순차적으로 제거되어 변수제거 5차에서 최종 수정된 결정계수  $R_{adj}^2=0.769$ 이고 이때 F값의 유의확률이 0.000인 통계적으로 유의한 Eq. 5.21과 같은 회귀 모델이 완성되었다.

Table 5.21 Multiple Regression Analysis Result of All Possible Selection after Data Mining

Model	$R$	$R^2$	$R_{adj}^2$	S.E	Durbin-Watson
Summary	0.889	0.790	0.786	0.212	1.179

Model	Division	Sum of squares	df	Mean square	F	P
Analysis of variance	Regression model	76.515	9	8.502	188.922	.000
	Residual	20.340	452	0.045		
	Sum	96.855	461			

Model	Unstandardized Coefficients		standardized Coefficients	t	p	Collinearity statistic	
	B	S.E	$\beta$			Tol.	VIF
(Constant)	0.088	0.087		1.009	0.034		
$V_s\_1$	1.236	0.282	0.110	4.389	0.000	0.744	1.344
$f\_1$	0.100	0.061	0.040	1.640	0.102	0.779	1.283
Dilling length_1	-0.043	0.128	-0.016	-0.334	0.739	0.214	4.664
Burden_1	4.609	0.744	0.647	6.191	0.000	0.043	23.505
Spacing_1	-1.067	0.167	-0.624	-6.401	0.000	0.049	20.437
D.I_1	-0.541	0.497	-0.029	-1.089	0.277	0.636	1.573
Weight_1	-0.167	0.108	-0.085	-1.539	0.124	0.151	6.619
Distance_1	-0.104	0.083	-0.068	-1.254	0.210	0.156	6.403
SRSD_1	1.032	0.071	0.888	14.563	0.000	0.125	8.004

□ Variable Removal 1st (Spacing\_1)

Model	$R$	$R^2$	$R_{adj}^2$	S.E	Durbin-Watson
Summary	0.878	0.771	0.767	0.221	1.103

Model	Division	Sum of squares	df	Mean square	F	P
Analysis of variance	Regression model	74.671	8	9.334	190.598	.000
	Residual	22.184	453	0.049		
	Sum	96.855	461			

Model	Unstandardized Coefficients		standardized Coefficients	t	p	Collinearity statistic	
	B	S.E	$\beta$			Tol.	VIF
(Constant)	-0.133	0.083		-1.599	0.111		
$V_s-1$	0.917	0.289	0.081	3.172	0.002	0.768	1.302
$f_1$	0.024	0.063	0.010	0.390	0.696	0.810	1.235
Dilling length_1	-0.478	0.113	-0.174	-4.216	0.000	0.298	3.352
Burden_1	0.237	0.309	0.033	0.766	0.444	0.269	3.715
D.I_1	-0.012	0.511	-0.001	-0.023	0.981	0.654	1.529
Weight_1	0.392	0.067	0.200	5.828	0.000	0.428	2.335
Distance_1	0.006	0.084	0.004	0.075	0.940	0.163	6.126
SRSD_1	0.952	0.073	0.820	13.088	0.000	0.129	7.759

□ Variable Removal 2st (D.I\_1)

Model	$R$	$R^2$	$R^2_{adj}$	S.E	Durbin-Watson
Summary	0.878	0.771	0.767	0.221	1.103

Model	Division	Sum of squares	df	Mean square	F	P
Analysis of variance	Regression model	74.671	7	10.667	218.307	.000
	Residual	22.184	454	0.049		
	Sum	96.855	461			

Model	Unstandardized Coefficients		standardized Coefficients	t	P	Collinearity statistic	
	B	S.E	$\beta$			Tol.	VIF
(Constant)	-0.135	0.064		-2.102	0.036		
$V_s\_1$	0.919	0.283	0.082	3.248	0.001	0.801	1.248
$f\_1$	0.024	0.061	0.010	0.394	0.694	0.840	1.191
Dilling length_1	-0.479	0.105	-0.174	-4.578	0.000	0.349	2.862
Burden_1	0.236	0.306	0.033	0.770	0.442	0.273	3.659
Weight_1	0.392	0.067	0.200	5.845	0.000	0.430	2.327
Distance_1	0.006	0.083	0.004	0.072	0.942	0.167	6.001
SRSD_1	0.952	0.072	0.820	13.245	0.000	0.132	7.597

Variable Removal 3st (Distance\_1)

Model	$R$	$R^2$	$R_{adj}^2$	S.E	Durbin-Watson
Summary	0.878	0.771	0.768	0.221	1.103

Model	Division	Sum of squares	df	Mean square	F	P
Analysis of variance	Regression model	74.671	6	12.445	255.249	.000
	Residual	22.184	455	0.049		
	Sum	96.855	461			

Model	Unstandardized Coefficients		standardized Coefficients	t	p	Collinearity statistic	
	B	S.E	$\beta$			Tol.	VIF
(Constant)	-0.133	0.059		-2.251	0.025		
$V_s-1$	0.922	0.278	0.082	3.319	0.001	0.828	1.207
$f-1$	0.024	0.061	0.010	0.399	0.690	0.842	1.187
Dilling length_1	-0.480	0.103	-0.174	-4.658	0.000	0.359	2.784
Burden_1	0.228	0.285	0.032	0.800	0.424	0.315	3.173
Weight_1	0.390	0.064	0.200	6.075	0.000	0.466	2.144
SRSD_1	0.957	0.032	0.824	29.928	0.000	0.664	1.506

Variable Removal 4st (f\_1)

Model	<i>R</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>R</i> <sub>adj</sub> <sup>2</sup>	S.E	Durbin-Watson
Summary	.878	0.771	0.768	0.221	1.103

Model	Division	Sum of squares	df	Mean square	F	P
Analysis of variance	Regression model	74.663	5	14.933	306.833	.000
	Residual	22.192	456	0.049		
	Sum	96.855	461			

Model	Unstandardized Coefficients		standardized Coefficients	t	p	Collinearity statistic	
	B	S.E	β			Tol.	VIF
(Constant)	-0.117	0.044		-2.679	0.008		
<i>V<sub>s</sub></i> _1	0.889	0.265	0.079	3.357	0.001	0.910	1.099
Dilling length_1	-0.483	0.103	-0.175	-4.702	0.000	0.361	2.770
Burden_1	0.225	0.284	0.032	0.791	0.429	0.315	3.171
Weight_1	0.391	0.064	0.200	6.090	0.000	0.467	2.143
SRSD_1	0.961	0.031	0.827	31.268	0.000	0.718	1.392

□ Variable Removal 5st (Burden\_1)

Model	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	S.E	Durbin-Watson
Summary	.878	0.771	0.769	0.220	1.100

Model	Division	Sum of squares	df	Mean square	F	P
Analysis of variance	Regression model	74.632	4	18.658	383.698	.000
	Residual	22.223	457	0.049		
	Sum	96.855	461			

Model	Unstandardized Coefficients		standardized Coefficients	t	p	Collinearity statistic	
	B	S.E	β			Tol.	VIF
(Constant)	-0.109	0.042		-2.564	0.011		
V <sub>s</sub> -1	0.905	0.264	0.080	3.431	0.001	0.916	1.092
Dilling length_1	-0.432	0.080	-0.157	-5.404	0.000	0.596	1.679
Weight_1	0.413	0.058	0.211	7.174	0.000	0.579	1.728
SRSD_1	0.959	0.031	0.825	31.315	0.000	0.723	1.384

□ 회귀 모델

$$y = -0.109 + 0.905x_1 - 0.432x_2 + 0.413x_3 + 0.959x_4 \quad \text{Eq. 5.1}$$

여기서,  $x_1$  : V<sub>s</sub>-1,  $x_2$  : Dilling length\_1,  $x_3$  : Weight\_1,  $x_4$  : SRSD\_1

완성된 회귀 모델의 표준화계수 β값으로 변수들의 속성가중치를 확인 할 수 있다. 변수 SRSD\_1의 속성가중치가 0.825로 회귀 모델에서 영향력이 가장 클 것으로 예상되며, 제어 불가능한 지반특성을 대변해 줄 것으로 기대했던 전단파속도(V<sub>s</sub>-1)의 속성가중치가 0.08로 매우 작고 천공장(Dilling length\_1)은 음의 값으로 회귀 모델에서 영향을 주고 있다.

## 5.6 확률론적 시뮬레이션 모델의 구축

Crystal Ball을 이용한 MCS 시뮬레이션 분석법은 사업타당성 분석 시 사업비 및 잠재된 리스크를 확률론적으로 분석하는 기법으로 활용성이 높다.

사업타당성 분석의 예로 시뮬레이션 분석 특성을 파악해 보면, 사업타당성 분석시 기본 알고리즘은 수입, 비용 구성변수들의 입력값을 투입하면 경상이익률 등 결과값이 산출되는 것으로, 입력값의 투입방법에 따라 결정론적 방법과 확률론적 방법으로 구분할 수 있다(Cho, 2002). 결정론적 방법은 스프레드시트에 수입, 비용 구성변수별로 하나의 확정값을 입력하면 하나의 확정된 결과값(경상이익)이 산출되도록 하는 방법이고, 확률론적 방법은 변수별로 변동 가능한 확률적 범위, 즉 확률변수를 입력하면 결과값도 확률분포로 산출되는 방법이다.

여기서 입력값(Assumption, 독립변수, 확률변수)은 변수별로 데이터의 특성에 따라 확률분포형태를 각각 결정하여 입력시켜야 하나, 결과값(Forecast, 종속변수, 출력값)은 항상 하나의 정규분포형태로 출력된다(Lee, 2006).

본 연구에서는 시뮬레이션 분석법을 이용해 매우 복잡한 형태의 불규칙한 층상구조로 이루어진 제주지역의 지반에서 시행된 시험발파 자료의 데이터베이스를 구축하여 계획단계에서 발파로 인한 지반진동속도를 예측해 보고자 하였다.

발파에서 제어 가능한 폭원특성 변수들과 제어 불가능한 암반특성 변수들을 하나의 알고리즘으로 구성하여 시뮬레이션 분석을 실행하였다.

### 5.6.1 입력변수의 선정 및 모델 알고리즘

가장 이상적인 몬테칼로 시뮬레이션은 모든 입력변수를 대상으로 시뮬레이션을 실행하는 것이나, 이는 시간과 비용이 수반되므로 모든 변수를 대상으로 시뮬레이션을 실시하는 것은 비효율적이다(Kim, 2004). 또한 이는 수입, 비용과 같은 기본 알고리즘에서 대부분의 변수가 영향을 미칠 것으로 예상될 때 가능하며, 본 연구에서처럼 기

본적으로 변수들간의 관계를 정의 할 수 없으면 시뮬레이션 분석이 불가능하다.

따라서, 본 연구에서는 시뮬레이션 분석을 위한 알고리즘은 위 절에서 분석된 회귀 모델을 활용하여 회귀 모델의 변수인 전단파속도, 천공장, 지발당장약량, SRSD를 변수로 선정하였으며, Eq. 5.2와 같다.

$$y = -0.109 + 0.905PDF_{Vs1} - 0.432PDF_{Dillinglength1} + 0.413PDF_{Weight1} \quad \text{Eq. 5.2} \\ + 0.959PDF_{SRSD1}$$

여기서,  $PDF_{Vs1}$  : 데이터마이닝 후의 전단파속도 확률밀도함수

$PDF_{Dillinglength1}$  : 데이터마이닝 후의 천공장 확률밀도함수

$PDF_{Weight1}$  : 데이터마이닝 후의 지발당 장약량 확률밀도함수

$PDF_{SRSD1}$  : 데이터마이닝 후의 자승근 환산거리 확률밀도함수

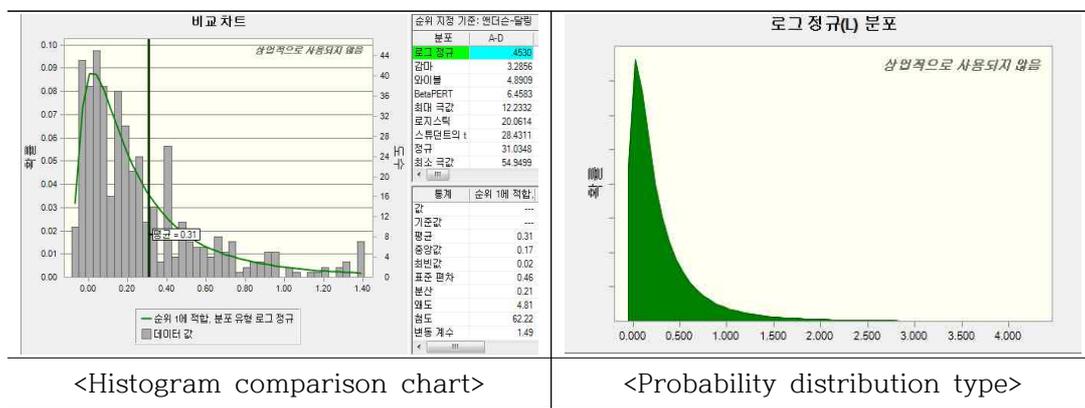
### 5.6.2 입력변수의 분포형태 결정

일반적으로 최적분포의 적합도 검정(Goodness of Fit Tests)을 A-D검정 법에 따라 실시한다. 적합도 검정은 실적자료와 분포형태의 일치(적합)여부를 검정하는 방법으로 A-D통계량이 1.50보다 작으면 분포가 잘 적합 되었다고 알려져 있다(Mun, 2005). 실적데이터를 이용할 경우 관찰된 자료와 일치하는 분포를 찾기 위해 먼저 관찰 자료의 빈도수(Frequency, 도수분포)를 그래프를 그려보는데 가장 많이 사용하는 방법이 막대그래프(Histogram)와 꺾은선그래프(Frequency Polygon)이다. 이 실적자료의 그래프와 앞에서 설명한 이론적 확률분포가 가장 일치하는(유사한) 분포형태를 선택하면 된다(Lee, 2006).

히스토그램 작성시 X축을 몇 개의 구간(계급)으로 나눌 것인가가 중요한데 구간의 수가 너무 많거나 혹은 너무 적어도 좋지 않다. 구간의 수는 관찰된 자료의 수 및 자료의 분석과 관계가 있으나, 일반적으로 자료의 수를 n이라하면  $\sqrt{n}$ 개의 구간이 적절한 것으로 알려져 있다(Kim, 2004).

Table 5.22~5.25에서와 같이 네 개의 변수에 대하여 적합도 검정을 시행하였으나 Crystal Ball에서 지원하는 19개의 확률분포형태에서 유일하게 변수 SRSD\_1만 A-D 통계량 0.453인 로그정규 분포로 적합 되었고, 나머지 변수는 이산형분포와 연속형 분포에서 적합분포를 찾지 못해 임의로 분포특성을 가정하였다. 가정된 분포는 각각 두 가지로 변수의 빈도분석을 통해 확률가중치를 부여하는 사용자정의 분포와 연속확률이 동일한 균등분포를 적용하였다.

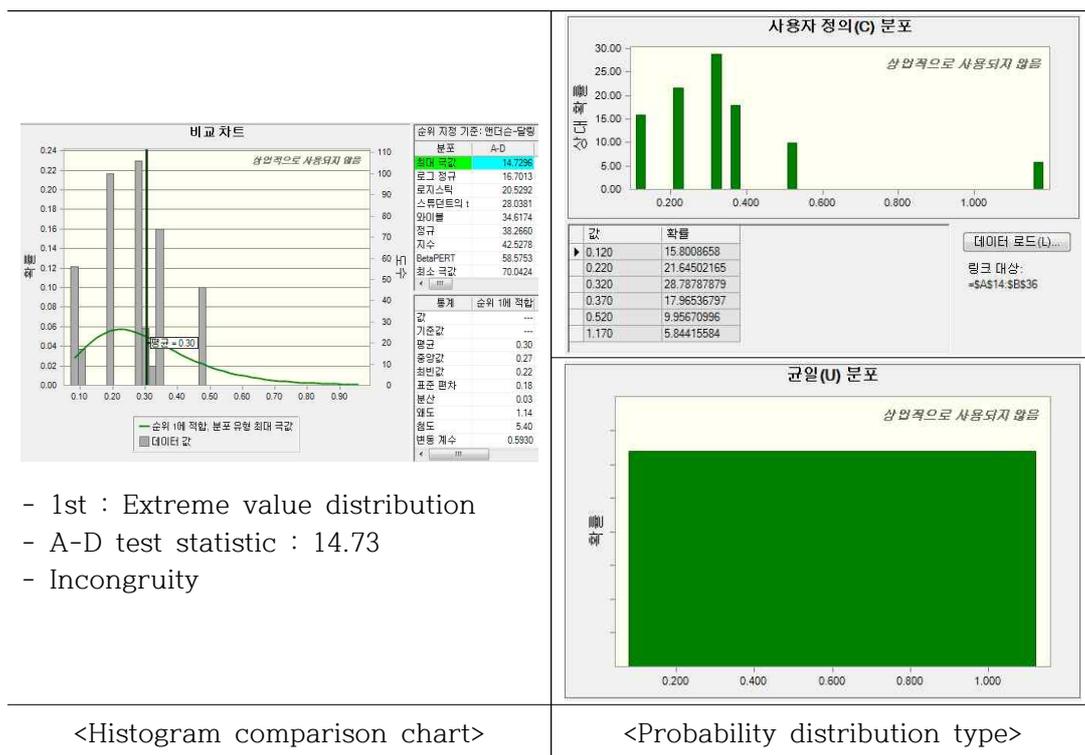
Table 5.22 Probability Distribution of Square Root Scale Distance (SRSD\_1)



<Histogram comparison chart>

<Probability distribution type>

Table 5.23 Probability Distribution of Charge per Delay (Weidht\_1)



- 1st : Extreme value distribution
- A-D test statistic : 14.73
- Incongruity

<Histogram comparison chart>

<Probability distribution type>

Table 5.24 Probability Distribution of Dilling length (Dilling length\_1)

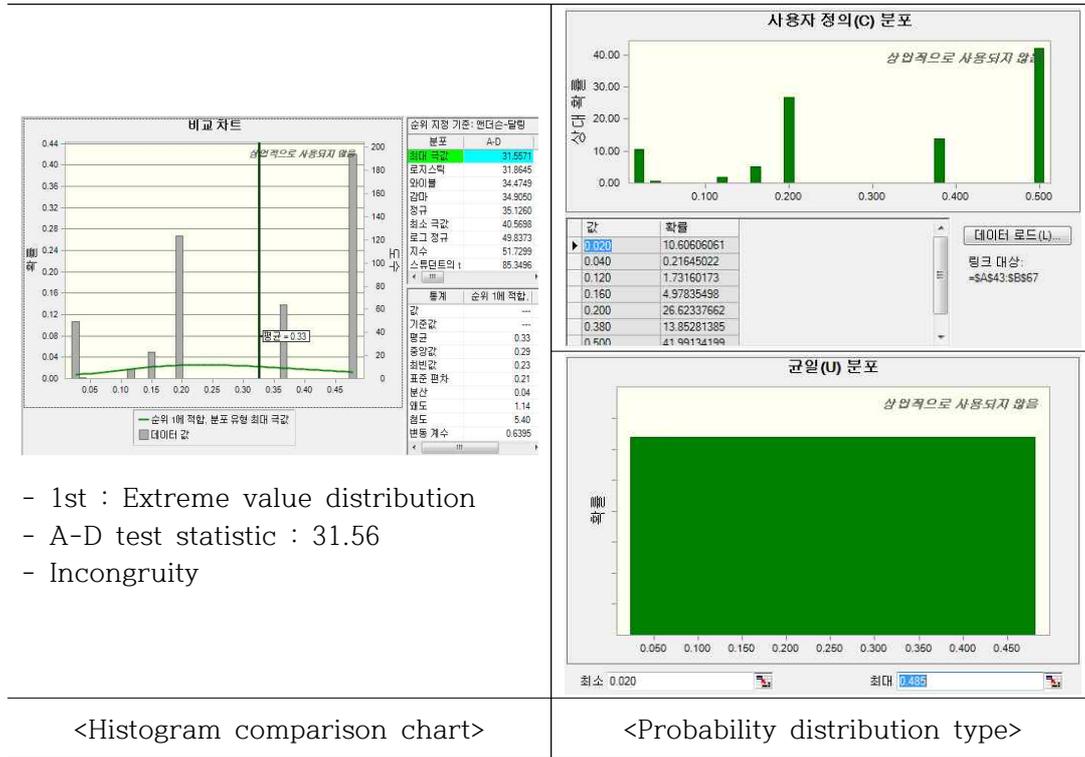
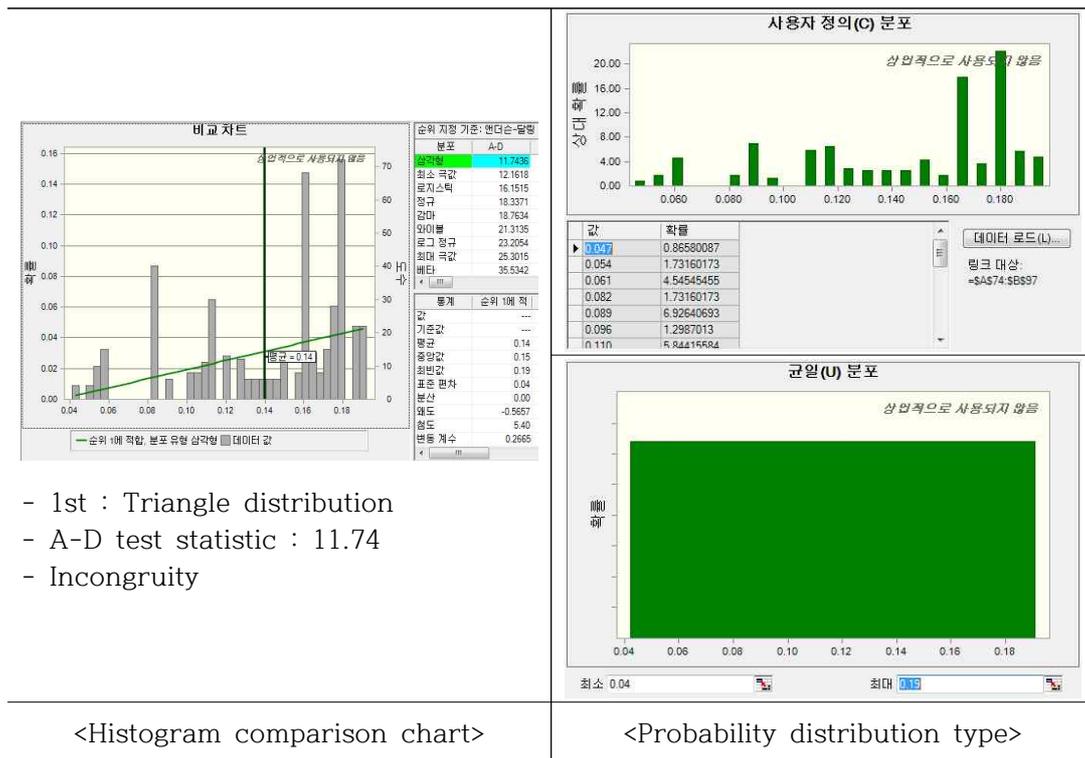


Table 5.25 Probability Distribution of Shear Wave Velocity( $V_{S_1}$ )



그리고 변수데이터는 무한대로 수렴하는(늘어지는) 분포가 아니라 하한과 상한의 양극단이 있으므로 오차발생 가능성을 내포하고 있어 분포의 절단(Distribution Truncation)을 고려해야 한다(Mun, 2005). 본 연구에서도 분포 특성상 양 끝단이 없는 무한대가 될 경우 오차가 발생할 수(발생확률이 대단히 낮은) 있으므로 분석의 정확도를 향상시키기 위해 각 변수들의 최대값과 최소값을 고려하여 확률분포에서 끝단을 절단하였다.

이러한 과정 즉, 변수의 설정과 모델 알고리즘 정의 그리고 변수들의 확률분포형태를 결정하고 결과 예측값을 보기 위한 예측 정의(Define Forecast)가 완료되면 시뮬레이션을 위한 준비가 완료된다. 연구자의 판단에 의해 시뮬레이션 수행 횟수를 결정하여 실행하면 확률론적 예측 결과를 확인할 수 있다.

## 제6장 지반진동속도 추정식 모델 검증

3장과 4장에서 분석된 불규칙한 층상구조 지반에서의 지반진동속도를 결정하는 폭원 특성과 암반특성 변수들을 이용하여 5장에서 회귀 모델과 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 본 장에서는 신규 시험발파를 실시하고 그 결과를 이용해 위 두 가지의 모델과 사례기반 모델의 유효성, 정확성을 평가하여 지반진동속도 추정 모델로서의 타당성, 적합성을 검증하기로 하였다.

### 6.1 모델 검증을 위한 시험발파

#### 6.1.1 사이트. 4

모델 검증을 위한 시험발파지역을 Fig. 6.1에서와 같이 사이트 4번으로 정하였다. 이는 본 연구에서 시험발파가 이루어진 지역의 지질 및 지반 특성과 전단파 속도 등의 자료를 통일성 있게 DB화시키기 위함이다. 위치는 제주특별자치도 제주시 조천읍 교래리 일원이며, 1회 6번의 시험발파가 이루어졌으며 데이터 수는 53개이다.

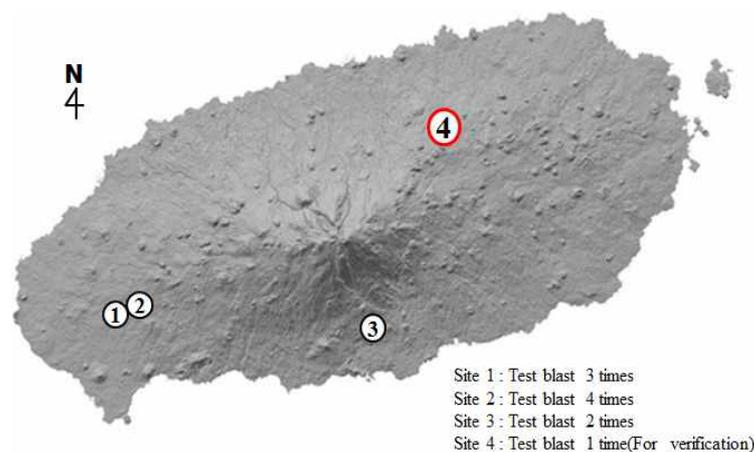


Fig. 6.1 Test Blasting Location for Model Verification

## 6.1.2 시험발파 (Site. 4)

### 6.1.2.1 지질 및 지반 특성

제주특별자치도 제주시 교래리 일원으로 기반암의 특징을 파악하기 위해 한국지질자원연구원 지질정보시스템에서 제공하는 지질도를 확인한 결과 Fig. 6.2과 같이 후기 화산활동시기 화산암인 와산리현무암(Qwsb)으로 조사되었다.

와산리현무암(Qwsb)은 용암류로 구성되어 있으며 회색 내지 암회색의 암색에 기공의 발달이 적은 암석이다. 이 암석은 1~20mm 크기의 투명한 사장석과 휘석 결정이 산점하는 양상을 나타낸다. 감람석 결정의 크기는 5mm에 이르는데, 이들 결정은 극히 드물어 1m<sup>2</sup>의 면적에 3 ~ 10개 정도 분포한다. 화학적 조성은  $SiO_2$ 가 49.84 ~ 50.84wt%,  $Na_2O$ 는 3.43 ~ 3.78wt%,  $K_2O$ 는 1.30 ~ 1.70wt%의 범위이고  $Na_2O + K_2O$ 는 4.73 ~ 5.48wt%의 범위에 해당한다(Park et al., 1998).  $SiO_2$ 와  $Na_2O + K_2O$ 의 조성비를 이용한 화산암류 분류법인 TAS도(Total Alkali-Silica diagram; Le Maitre, 1984)에 도시한 결과는 Fig. 6.3과 같이 현무암내지 조면현무암으로 분류되었다.

암반의 일축압축강도는 25.5~145.8MPa까지 다양하며 연암은 평균 50.13Mpa, 보통암은 평균 122.5Mpa로 추정된다. 그리고 암반과 암반사이에 혼재되어 있는 클링커층의 103회 실시된 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)에 의한 N치 값은 4회/30cm~50회/13cm 범위를 나타내고 있으며 암괴로 구성된 구간은 시험이 실시되지 않았다.

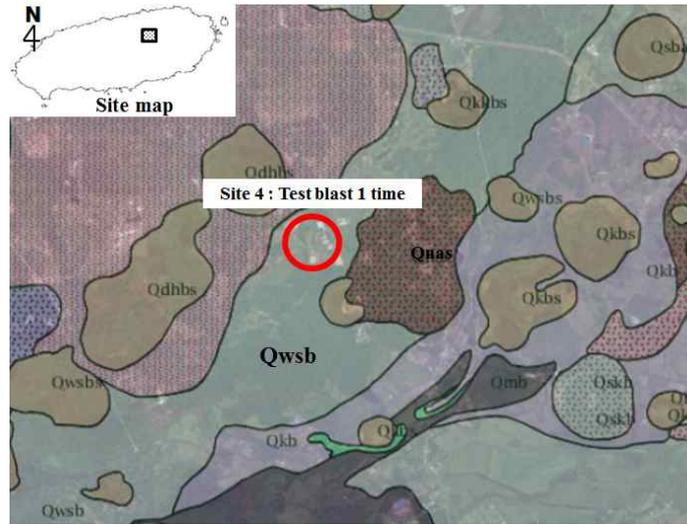


Fig. 6.2 Geologic Map of Site. 4

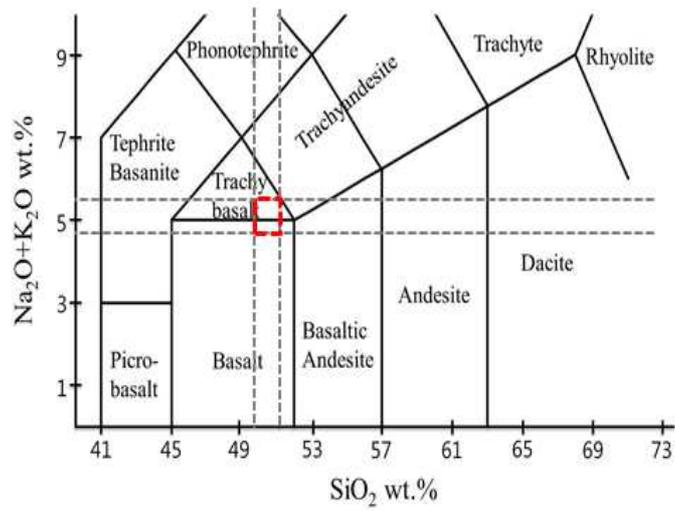


Fig. 6.3 Classification of the Basalt according to TAS Diagram (Site. 4)

### 6.1.2.2 시험방법

시험발파는 자유장이 확보되는 폭원 위치의 시추주상도를 분석하여 천공장 2.7m의 표준발파공법 IV(중규모진동제어발파)를 적용하였으며, 시험발파 조건은 Table 6.1과 같다. 그리고 시험발파 수행 순서는 중규모진동제어발파로 5공→10공→5공→10공→5공→10공의 순으로 진행되었다.

Table 6.1 Experimental Conditions

Description	Unit	TYPE IV	Specification
Drilling length	m	2.7	
Burden	m	1.2	
Spacing	m	1.2	
Drilled hole diameter	mm	76	
Charge per hole	kg	2.0	
Charge per delay	kg	2.0	
Explosive diameter	mm	50	
Explosive	-	Emulsion	
Holes	-	5, 10	

시험발파는 순서는 Table 6.2와 같으며, 발파진동 계측을 위하여 9기의 계측기가 설치되었고 시험발파 폭원으로부터 각 계측기까지의 이격거리는 계측기.1 15m에서 계측기.6 90m까지는 15m 등간격이고 나머지는 3기는 보안물건에 각각 92m, 145m, 170m로 설치되었다.

제어불가능한 발파진동의 영향요인인 지반조건은 4장의 지반 전단파속도 및 주파수 산정예시에서 활용한 Fig. 4.17과 같고 40~50m사이의 시추공 사이에서 전혀 다른 지층을 보이고 있어 층서적으로 매우 불규칙한 분포 특성을 보이고 있다.

Table 6.2 Order of Test Blasting

	
<p>1) Drilling</p>	<p>2) Preparing Charge and Detonator</p>
	
<p>3) Connection of Detonator</p>	<p>4) Detonating Device</p>
	
<p>5) Installation of Protective Mat</p>	<p>6) Installation of Measuring Instrument</p>
	
<p>7) Verification of Crack on Rock</p>	<p>8) Broken Rock</p>

### 6.1.2.3 시험발파 분석

#### 가. 시험발파

6번의 시험발파를 통해 53개의 지반진동 데이터가 계측되었다.

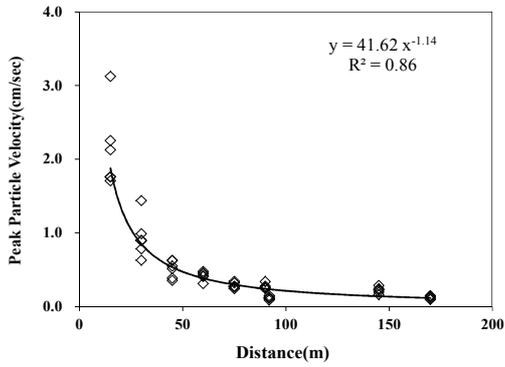
#### 1) 지반진동속도 예측

PPV와 PVS에 대한 거리와의 관계를 Fig. 6.4에서 보여주고 있으며, Table 6.3은 Fig. 6.5와 6.6에서와 같이 시험발파 데이터를 대수눈금 그래프에서 회귀분석한 신뢰도 50%, 95%에서 PPV와 PVS의 지반진동속도 예측식이다.

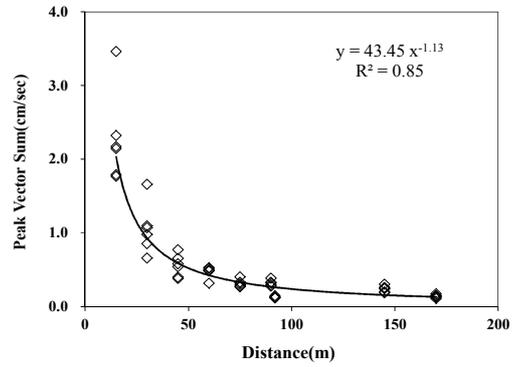
그리고 Fig. 6.7은 시험발파를 통해 계측된 진동데이터에서 각 성분별 진동속도 데이터를 회귀분석한 신뢰도 95%의 결과이며,  $V_T$ 는 접선방향 성분의 진동속도,  $V_V$ 는 수직방향 성분의 진동속도,  $V_L$ 은 진행방향 성분의 진동속도이다.

Table 6.3 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity(PPV) and Peak Vector Sum(PVS) (For verification)

Peak Particle Velocity(PPV, cm/s)				
SD method	Reliability	Predictive Equation	R	S.E
Square root	50%	$V = 28.00(SD)^{-1.14}$	0.93	0.19
	95%	$V = 56.64(SD)^{-1.14}$		
Cube root	50%	$V = 31.95(SD)^{-1.14}$	0.93	0.19
	95%	$V = 64.43(SD)^{-1.14}$		
Peak Vector Sum(PVS, cm/s)				
Square root	50%	$V = 29.36(SD)^{-1.13}$	0.92	0.19
	95%	$V = 59.39(SD)^{-1.13}$		
Cube root	50%	$V = 34.46(SD)^{-1.13}$	0.92	0.19
	95%	$V = 67.69(SD)^{-1.13}$		

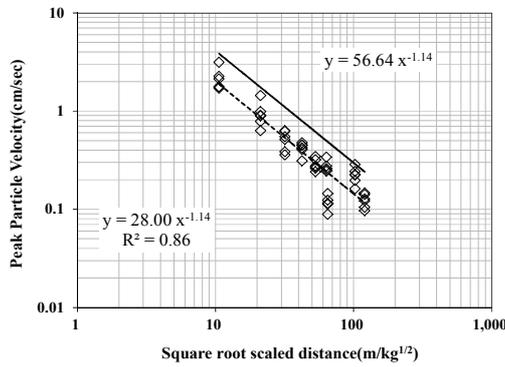


(a) PPV

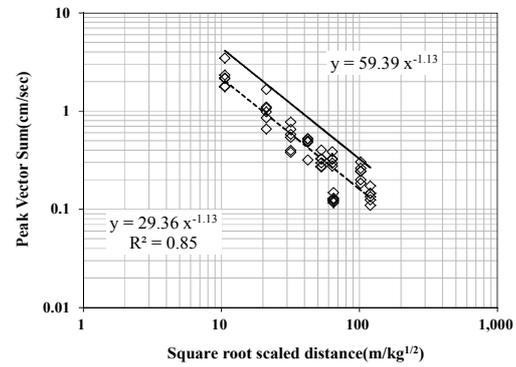


(b) PVS

Fig. 6.4 Relationship between Distance and Velocities (PPV & PVS) (For verification)

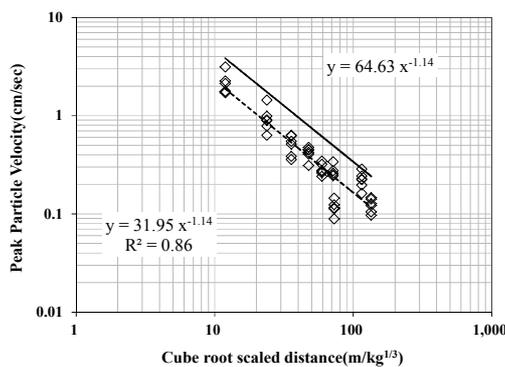


(a) PPV

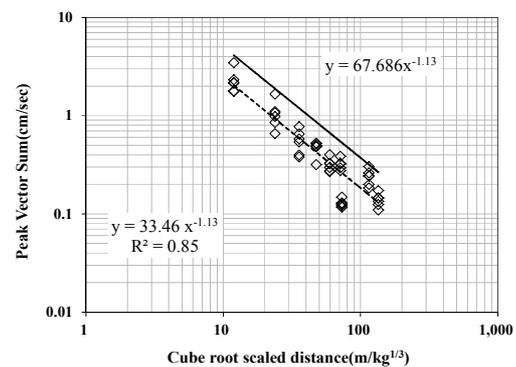


(b) PVS

Fig. 6.5 Prediction Equations of SRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (For verification)



(a) PPV



(b) PVS

Fig. 6.6 Prediction Equations of CRSD Vibration Velocities on PPV and PVS (For verification)

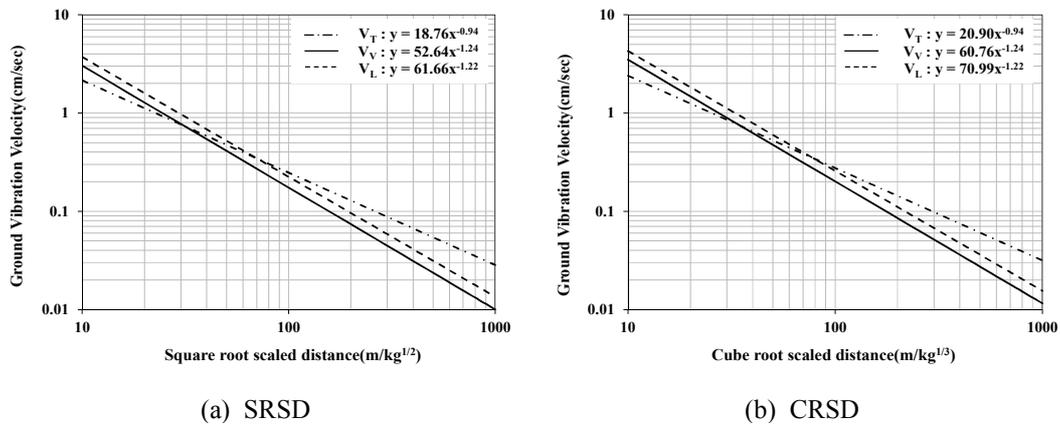


Fig. 6.7 Prediction Equation of Ground Vibration for Component Velocity (For verification)

## 2) 지반 진동 분석

지반진동 예측에 사용된 지발당 장약량은 국토해양부(2006)의 “도로공사 노천발파 설계·시공 지침”에 제시된 표준발파공법의 공법별 경계 기준 장약량인 0.5, 1.6, 5.0, 15.0kg을 적용하였고, Table 6.3에서 예측된 최대입자속도(PPV)와 최대벡터합(PVS)의 95% 지반진동속도 추정식을 이용하여 지발당 장약량을 기준으로 환산거리(Scale Distance) 방식에 따른 지반진동속도의 차이를 Table 6.4와 5.5에서 비교하고 Fig. 6.8과 6.9에 나타내었다.

PPV 추정식의 감쇠지수  $n$ 이 1.14로 SRSD, CRSD에서 동일하고, PVS의 추정식의 감쇠지수  $n$ 도 1.13으로 SRSD, CRSD에서 동일하다. 그 결과, 일반적으로 보이는 거리에 따른 진동속도의 역전 현상 없이 동일한 속도차이를 보인다.

PPV 추정식은 지발당 장약량 0.5kg에서 CRSD 방식이 30.2% 높고, 1.6kg에서 4.4% 높았으나, 지발당 장약량 5.0kg부터는 SRSD 방식이 16.0% 높고 15kg에서는 31.8% 높다. 그리고 PVS 추정식에서도 지발당 장약량 0.5kg에서 CRSD 방식이 29.9% 높고, 1.6kg에서 4.3% 높았으나, 지발당 장약량 5.0kg부터는 SRSD 방식이 15.8% 높고 15kg에서는 31.6% 높다.

지발당 장약량이 커질수록 SRSD 방식의 지반진동속도가 CRSD 방식보다 커지는 것

을 확인하였다. 이는 지반진동속도의 제어측면에서 볼 때 감쇠지수가 동일하면 장약량이 작은 소규모 진동제어발파에서는 SRSD 방식이 효과적이며, 중규모 진동제어발파이상에서는 CRSD 방식이 효과적이다.

Fig. 6.10에서 환산거리(SD)에 따른 PPV와 PVS 추정식을 국내 가이드라인(국토해양부, 2006)과 비교하였다. 우선 PPV와 PVS 추정식은 SD 방식으로 예측되는 지반진동속도의 변화가 거의 유사하다. 그리고 SRSD로 제안된 G.L 추정식과 시험발파에 의한 SRSD 방식의 추정식을 비교해 보면 약 10m의 매우 근거리에서는 G.L의 지반진동속도가 높지만 기울기가 커 진동속도의 감소가 큰 반면 시험발파에 의한 지반진동속도 추정식은 상대적으로 원거리까지 진동이 발생하는 것으로 예측되었다.

Fig. 6.11에서는 지반의 허용 진동속도를 재래주택 수준인 0.3cm/s로 가정하여 PPV와 PVS 지반진동속도 추정식을 이용해 거리에 따른 지발당 허용 장약량을 예측하였다. SD방식에 따라서는 두 가지가 비슷한 경향을 보이며 근거리에서 지반진동속도가 크게 예측되는 CRSD 방식은 SRSD 방식에 비해 지발당 허용 장약량이 작고 반전점 이 후에 커진다. 그리고 G.L 추정식과 유사한 기울기를 보이는 SRSD 방식의 추정식들도 전반적으로 지반진동속도가 더 높게 예측되었기 때문에 지발당 허용 장약량이 작고 원거리까지 유지된다.

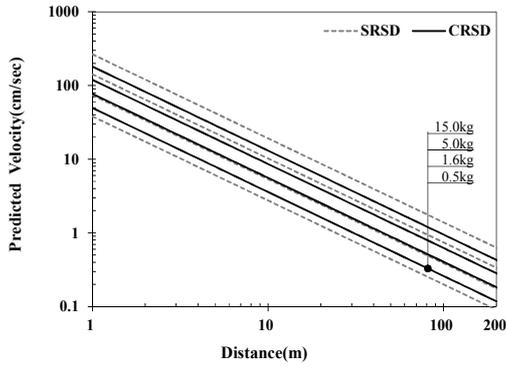
지반진동에 의한 각 성분별(T, V, L) 입자속도와 주파수를 Fig. 6.12에 나타내었고 Fig. 6.13과 같이 도수분포표를 작성하였다. 각 성분별 주파수 평균은 15.3~17.2Hz이고 최빈값은 11.0~20.0Hz로 분석되었으며 도수분포표에서는 9~24Hz에서 빈도가 크고 특히 FV는 9~12Hz에서 가장 크다.

Table 6.4 The Influence of Charge per Delay on the PPV (For verification)

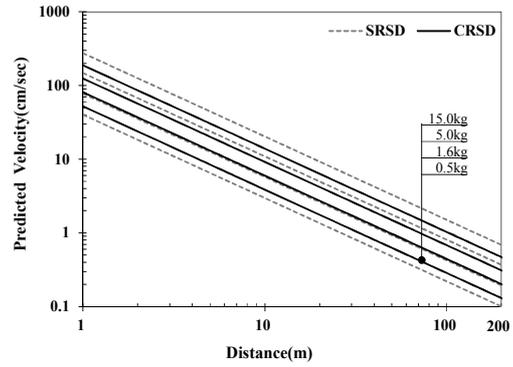
Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	6.09	7.93	30.2	11.82	12.34	4.4	22.63	19.02	-16.0	42.33	28.88	-31.8
10	2.76	3.60	30.2	5.36	5.60	4.4	10.27	8.63	-16.0	19.21	13.10	-31.8
20	1.25	1.63	30.2	2.43	2.54	4.4	4.66	3.92	-16.0	8.72	5.95	-31.8
40	0.57	0.74	30.2	1.10	1.15	4.4	2.11	1.78	-16.0	3.96	2.70	-31.8
60	0.36	0.47	30.2	0.70	0.73	4.4	1.33	1.12	-16.0	2.49	1.70	-31.8
80	0.26	0.34	30.2	0.50	0.52	4.4	0.96	0.81	-16.0	1.79	1.22	-31.8
100	0.20	0.26	30.2	0.39	0.41	4.4	0.74	0.63	-16.0	1.39	0.95	-31.8
120	0.16	0.21	30.2	0.32	0.33	4.4	0.60	0.51	-16.0	1.13	0.77	-31.8
140	0.14	0.18	30.2	0.26	0.28	4.4	0.51	0.43	-16.0	0.95	0.65	-31.8
160	0.12	0.15	30.2	0.23	0.24	4.4	0.44	0.37	-16.0	0.81	0.56	-31.8
180	0.10	0.13	30.2	0.20	0.21	4.4	0.38	0.32	-16.0	0.71	0.49	-31.8
200	0.09	0.12	30.2	0.18	0.18	4.4	0.34	0.28	-16.0	0.63	0.43	-31.8

Table 6.5 The Influence of Charge per Delay on the PVS (For verification)

Charge per delay(kg)	0.5			1.6			5.0			15.0		
	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR	SRSD	CRSD	(CR-SR)/SR
5	6.51	8.46	29.9	12.57	13.11	4.3	23.92	20.13	-15.8	44.50	30.45	-31.6
10	2.98	3.86	29.9	5.74	5.99	4.3	10.93	9.20	-15.8	20.33	13.92	-31.6
20	1.36	1.77	29.9	2.62	2.74	4.3	4.99	4.20	-15.8	9.29	6.36	-31.6
40	0.62	0.81	29.9	1.20	1.25	4.3	2.28	1.92	-15.8	4.25	2.91	-31.6
60	0.39	0.51	29.9	0.76	0.79	4.3	1.44	1.21	-15.8	2.68	1.84	-31.6
80	0.28	0.37	29.9	0.55	0.57	4.3	1.04	0.88	-15.8	1.94	1.33	-31.6
100	0.22	0.29	29.9	0.43	0.44	4.3	0.81	0.68	-15.8	1.51	1.03	-31.6
120	0.18	0.23	29.9	0.35	0.36	4.3	0.66	0.56	-15.8	1.23	0.84	-31.6
140	0.15	0.20	29.9	0.29	0.30	4.3	0.55	0.47	-15.8	1.03	0.71	-31.6
160	0.13	0.17	29.9	0.25	0.26	4.3	0.48	0.40	-15.8	0.89	0.61	-31.6
180	0.11	0.15	29.9	0.22	0.23	4.3	0.42	0.35	-15.8	0.78	0.53	-31.6
200	0.10	0.13	29.9	0.19	0.20	4.3	0.37	0.31	-15.8	0.69	0.47	-31.6

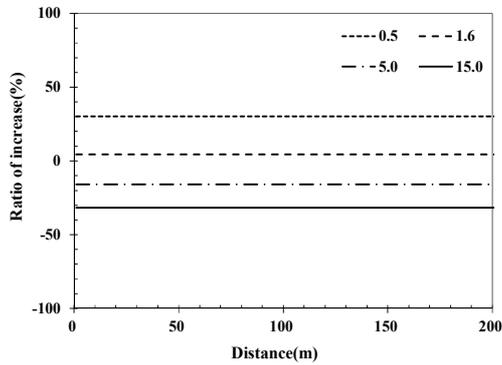


(a) PPV

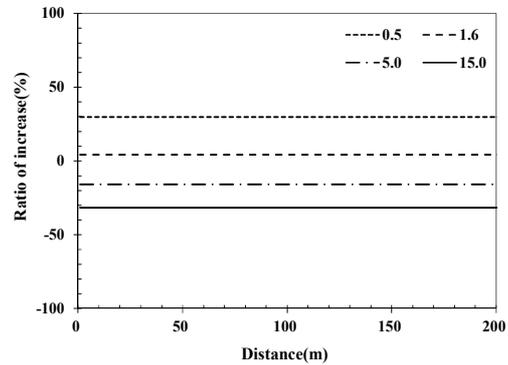


(b) PVS

Fig. 6.8 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (For verification)



(a) PPV



(b) PVS

Fig. 6.9 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (For verification)

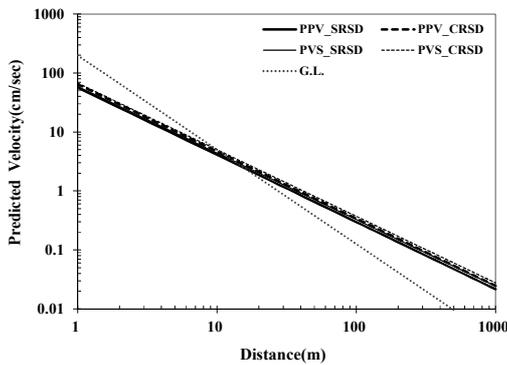


Fig. 6.10 Comparison of Blasting Vibration Velocity according to Distance (For verification)

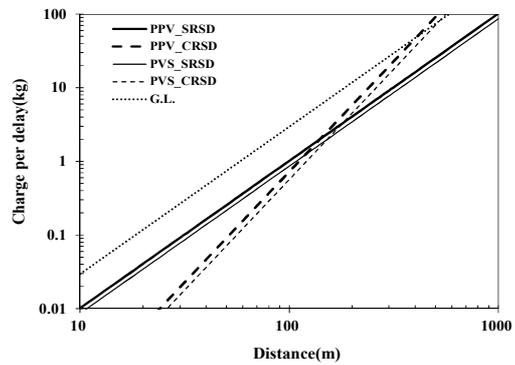


Fig. 6.11 Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance (For verification)

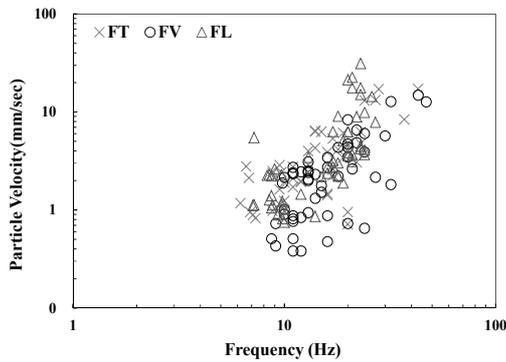


Fig. 6.12 Analysis of Vibrations Frequency (For verification)

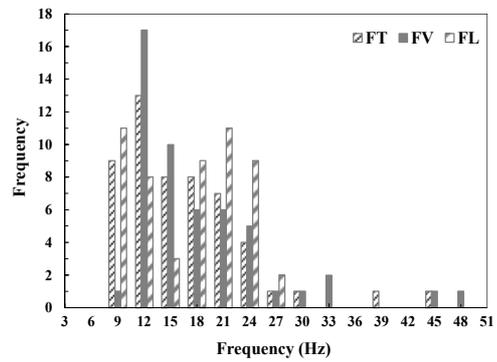


Fig. 6.13 Frequency Distribution (For verification)

## 6.2 회귀 모델 검증

### 6.2.1 회귀 모델에 의한 지반진동속도 추정식

앞의 5장에서 구축된 회귀 모델 지반진동속도 추정식 Eq. 5.1에 대한 검증을 위해, 검증용 시험발파 조건 Table 6.1에서 회귀 모델 변수인 천공장과 지발당 장약량을 사용하였다. 그리고 전단파속도( $V_s$ )는 4장의 Table 4.12 계측기의 전단파속도( $V_s$ )와 주파수( $f_G$ ) 산정결과 예시에서 시추공을 제외하고 계측기의 전단파속도( $V_s$ )와 여기서 다 제시하지 않은 계측기 세 개를 추가하여 평균한 565m/s를 사용하였다.

결과적으로, 회귀 모델의 변수는 총 네 가지이며 이 가운데 SRSD만 변동되는 변수이고 나머지 세 가지는 고정 변수이다.

Table 6.6 Variables of Regression Model

$V_s$ (m/s)	Drilling length(m)	Weight(kg/delay)	SRSD(m/kg <sup>1/2</sup> )
565	2.7	2.0	5, 10, 50, 100, 200, 500

하지만, Table 6.6은 데이터 마이닝 전 변수이기 때문에 회귀 모델 지반진동속도

추정식 Eq. 5.1의 변수조건을 만족하기 위한 데이터 변환이 필요하다. Table 6.7은 데이터 마이닝을 위한 각 변수의 비선형 함수와 모수 그리고 변환된 값이다.

Table 6.7 Transformation Value after Data Mining

Variable	Non-linear function		Transformation Value
$V_{s-1}$	Exponent	$y = \beta_0 + e^{\beta_1 x}$	0.166
		$y = 0.904 + e^{-0.003 * x}$	
Drilling length_1	Cubic	$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3$	0.194
		$y = 3.15 - 3.789x + 1.438x^2 - 0.163x^3$	
Weight_1	Cubic	$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \epsilon$	0.261
		$y = 0.019 + 0.227x - 0.067x^2 + 0.007x^3$	
SRSD_1	Inverse	$y = \beta_0 + \beta_1(1/x) + \epsilon$	5.593, 2.920, 0.494, 0.191, 0.040, -0.051
		$y = -0.112 + 30.324(1/x)$	

위 과정을 거쳐 변환된 변수 전단파속도( $V_{s-1}$ )와 천공장(Drilling length\_1) 그리고 지발당 장약량(Weight\_1)에 대한 변환 값을 입력하고, 변수 SRSD는 5, 10, 50, 100, 200, 500에 대해 변환시킨 SRSD\_1값 5.593, 2.920, 0.494, 0.191, 0.040, -0.051을 각각 입력하여 종속변수 Peak Particle Velocity(PPV, cm/s)에 대한 결과를 각각 얻는다.

그 다음 Log-Log지의 x축에 SRSD 그리고 y축이 PPV인 모노그램을 작도하여 회귀 모델에 대한 신뢰도 50%의 지반진동속도 추정식을 얻고, 회귀 모델의 표준오차 통계 값을 이용해 신뢰도 95%의 지반진동속도 추정식을 완성한다. Fig. 6.14는 위 과정을 거쳐 완성한 회귀 모델의 지반진동속도 추정식이고 Table 6.8에 그 결과를 정리 하였다.

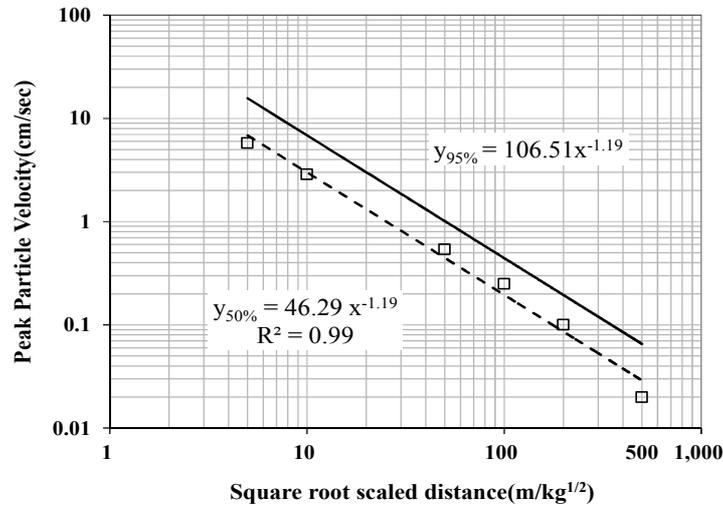


Fig. 6.14 Prediction Equation of Ground Vibration Velocity by Regression Model

Table 6.8 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity(PPV) by Regression Model

Model	Reliability	Prediction Equation	S.E
Regression	50%	$V = 46.29(SD)^{-1.19}$	0.22
	95%	$V = 106.51(SD)^{-1.19}$	

## 6.2.2 시험발파와 회귀 모델의 지반진동속도 추정식 비교

### 6.2.2.1 지반진동속도 비교

Table 6.9는 회귀 모델에 의한 지반진동속도 추정식과 시험발파에 의한 지반진동속도 추정식 그리고 설계단계에서 적용되는 국토해양부(2006)의 가이드라인(G.L)에 의한 지반진동속도 추정식이며, 이 추정식들의 환산거리(SD)에 대한 지반진동속도를 Fig. 6.15에서 비교하였다.

신뢰도 95%의 지반진동속도 추정식들을 비교해 보면 G.L의 경우 SD가 길어질수록 지반진동속도의 감쇠가 크나, 시험발파에 의한 제주지역의 지반진동속도는 비교적 감

최가 적은 특징을 보인다. 회귀 모델에 의한 지반진동속도 역시 제주지역의 지반특성인 감쇠가 상대적으로 적은 특성을 보여주고 있어 지반진동속도의 감쇠 특성을 잘 반영하고 있는 것으로 확인된다.

회귀 모델의 지반진동속도는 시험발파에 의한 지반진동속도 보다 근거리에서 약 50%수준 높게 형성되었고 원거리로 갈수록 그 차이가 줄어든다. 이는 감쇠지수  $n$ 이 시험발파의 추정식에 의한 1.14보다 상대적으로 큰 1.19를 가지고 있기 때문이다.

Table 6.9 Prediction Equation of Guide Line, Test Blasting, and Ground Vibration by Regression Model

Division	Reliability	Prediction Equation	S.E
G.L	95%	$V = 200.0(SD)^{-1.60}$	
Test Blast	50%	$V = 28.00(SD)^{-1.14}$	0.19
	95%	$V = 56.64(SD)^{-1.14}$	
Regression Model	50%	$V = 46.29(SD)^{-1.19}$	0.22
	95%	$V = 106.51(SD)^{-1.19}$	

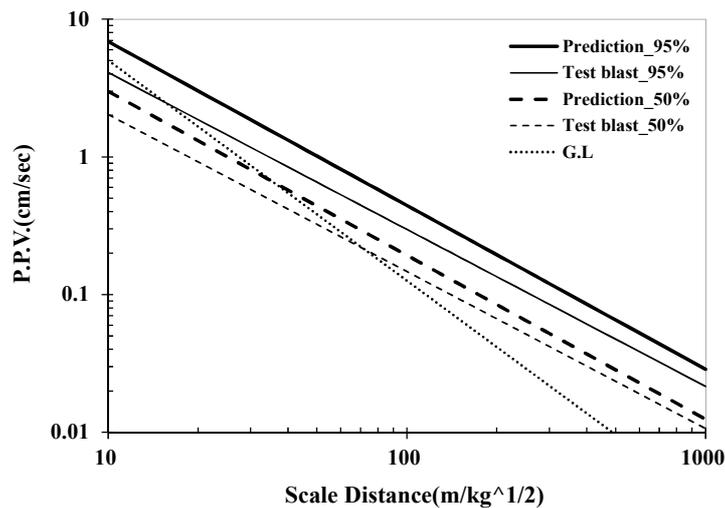


Fig. 6.15 Comparing Prediction Equations on Ground Vibration Velocities of Regression Model, Guide Line, and Test Blasting

#### 6.2.2.2 장약량에 따른 지반진동속도 비교

지반진동속도 예측에 사용된 지발당 장약량은 국토해양부(2006)의 가이드라인에 의한 표준발파공법 Type II, IV의 경계 기준 지발당 장약량인 0.5, 5.0kg을 적용하였고, 회귀모형과 시험발파 그리고 가이드라인(G.L)의 95% 지반진동속도 추정식을 이용하여 지발당 장약량을 기준으로 거리(Distance)에 따른 지반진동속도의 차이를 Table 6.10에서 비교하고 Fig. 6.16과 6.17에 나타내었다.

Fig. 6.16에 의하면 지발당 장약량이 커질수록 지반진동속도가 커지고 진동이 멀리 전달되는 것으로 확인되며 G.L과 지반진동속도가 역전되는 교점이 동일하게 원거리로 이동하였다. 그리고 Fig. 6.17에서 각 추정식의 지반진동속도 차이를 비교해 보았다.

지발당 장약량 0.5kg일 때, 시험발파에 의한 지반진동속도는 G.L의 지반진동속도 비해 5m에서 30.4% 작았으나 20m에서 역전되어 31.8% 크고 200m에서 280% 약 4배 크다. 그리고 회귀 모델에 의한 지반진동속도는 시험발파에 의한 지반진동속도에 비해 5m에서 70.5% 크나 200m에서 41.8%로 줄어들었으며, G.L의 지반진동속도와는 5m에서 18.8%크고 200m에서 438% 5배 더 커졌다.

지발당 장약량 5.0kg일 때, 시험발파에 의한 지반진동속도는 G.L의 지반진동속도 비해 5m에서 25.9% 작았으나 40m에서 역전되어 6.7% 크고 200m에서 123% 크다. 그리고 회귀 모델에 의한 지반진동속도는 시험발파에 의한 지반진동속도에 비해 5m에서 80.6% 크나 200m에서 50.2%로 줄어들었으며, G.L의 지반진동속도와는 5m에서 25.9% 작았으나 20m에서 역전되어 30.8% 크고 200m에서 236% 더 커졌다.

전반적으로 지발당 장약량이 커질수록 근거리에서 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고 G.L 추정식의 증가 폭이 가장 크나 지반진동속도의 감쇠 커 시험발파와 회귀 모델에 의한 지반진동속도 보다 작아진다. 그리고 지발당 장약량이 증가하여도 200m 이내에서는 회귀 모델의 지반진동속도와 시험발파의 지반진동속도 사이의 감쇠비가 유지된다. 즉, 감쇠지수  $n$ 으로 인한 영향이 미미하다.

Table 6.10 The Influence of Charge per Delay (Regression Model)

Charge per delay(kg)	0.5						5.0					
	T_0.5	P_0.5	G_0.5	(P-T)/T	(T-G)/G	(P-G)/G	T_5.0	P_5.0	G_5.0	(P-T)/T	(T-G)/G	(P-G)/G
5	6.09	10.39	8.75	70.5	-30.4	18.8	22.63	40.88	55.19	80.6	-59.0	-25.9
10	2.76	4.55	2.89	64.7	-4.2	57.8	10.27	17.92	18.21	74.5	-43.6	-1.6
20	1.25	2.00	0.95	59.1	31.8	109.6	4.66	7.85	6.01	68.5	-22.4	30.8
40	0.57	0.87	0.31	53.7	81.3	178.6	2.11	3.44	1.98	62.8	6.7	73.7
60	0.36	0.54	0.16	50.6	118.4	228.9	1.33	2.12	1.04	59.5	28.6	105.2
80	0.26	0.38	0.10	48.4	149.3	270.1	0.96	1.51	0.65	57.2	46.8	130.9
100	0.20	0.29	0.07	46.8	176.3	305.6	0.74	1.16	0.46	55.5	62.7	153.0
120	0.16	0.24	0.05	45.5	200.4	337.1	0.60	0.93	0.34	54.1	76.9	172.6
140	0.14	0.20	0.04	44.4	222.5	365.6	0.51	0.78	0.27	52.9	89.9	190.4
160	0.12	0.17	0.03	43.4	242.9	391.8	0.44	0.66	0.22	51.9	101.9	206.7
180	0.10	0.15	0.03	42.6	262.0	416.1	0.38	0.57	0.18	51.0	113.2	221.9
200	0.09	0.13	0.02	41.8	280.0	438.9	0.34	0.51	0.15	50.2	123.8	236.1

여기서, T는 시험발파이고 P는 회귀모델 그리고 G는 가이드라인이다.

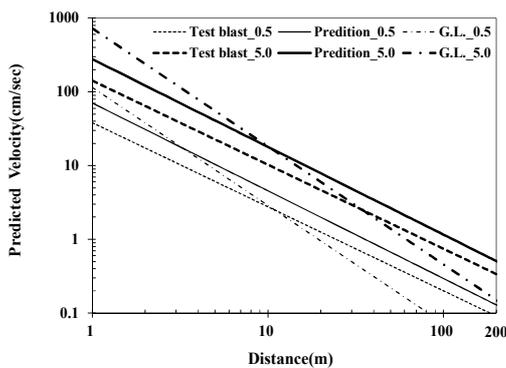


Fig. 6.16 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay

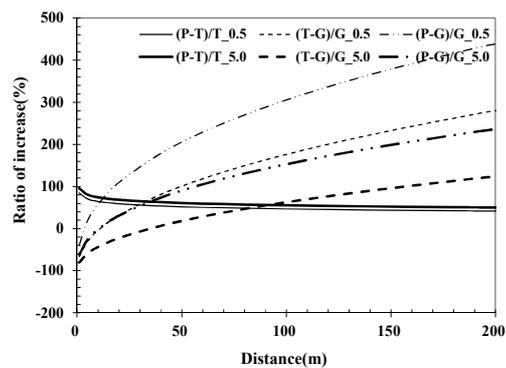


Fig. 6.17 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay

## 6.3 확률론적 모델 검증

### 6.3.1 몬테칼로 시뮬레이션 실행

확률론적 시뮬레이션 분석법의 기본개념은 각 입력변수별 확률분포를 입력값으로 입력하면 결과값도 확률분포형태로 산출되는 것이다. 그러므로 각 입력변수별 입력값의 분포형태결정과 입력기준설정이 중요하다.

입력변수들의 분포형태는 전절에서 결정하였고, 시뮬레이션을 실행할 때 신뢰도 수준 95%이상이 되도록 조건을 부여하였다.

실행횟수는 앞에서 정한 신뢰수준에 도달할 때까지 실행하는 방법과 그래프의 모양이 일정하게 수렴(Convergence)할 때까지 충분히 실행하는 두 가지 방법이 있으나, 본 연구에서는 변수들의 수가 적어 두 가지 모두를 충족시키기에 무리가 없는 것으로 예비실행을 통해 판단한 5,000회를 반복실행토록 설정하였다.

#### 6.3.1.1 시뮬레이션 모델 분석 결과

시뮬레이션 모델 분석 시 변수의 확률분포형태를 분포적합이 되지 않은 변수에 대해서 임의로 두 가지형태의 분포(사용자정의, 균등분포)로 가정했기 때문에 두 가지 경우 모두 분석하였다.

예를 들어 사업타당성 분석 모델의 경우 시뮬레이션 결과를 이익률 또는 이익으로 최종적인 하나의 값을 도출하여 그 결과를 분석하지만, 본 연구에서는 지반진동속도 추정식을 만들기 위한 대수지 그래프에서 자승근환산거리(SRSD)와 Peak Particle Velocity(PPV)의 관계를 모노그램 분석한 추정식을 도출해야하기 때문에 SRSD 5, 10, 50, 100, 200, 500에 대해 변환시킨 SRSD\_1값 5.593, 2.920, 0.494, 0.191, 0.040, -0.051을 입력하여 도출된 결과 값들로 지반진동속도 추정식을 분석하였다.

가. 시뮬레이션 결과 분석 예

하나의 예로 분석결과의 통계량에 대해 설명하겠다. SRSD\_1를 제외하고 균등분포로 정의된 시뮬레이션 모델에서 Fig. 6.18은 SRSD 5(즉, SRSD\_1값 5.593)의 시뮬레이션 결과이다.

시뮬레이션 분석을 통해 확률 50%에서 PPV 값 5.84의 결과를 얻었다. 회귀 모델에 의한 결과 값 5.77과 비교해 약 12% 차이가 나는 결과를 보이고 있는데 이는 각 변수별 확률분포를 고려하였기 때문이다. 만일 변수별 확률분포를 고려하지 않고 모두 표준 정규분포나 삼각분포 등 완전대칭인 분포로 가정하였다면 회귀 모형과 시뮬레이션 모형 두 분석의 평균은 일치하였을 것이다.

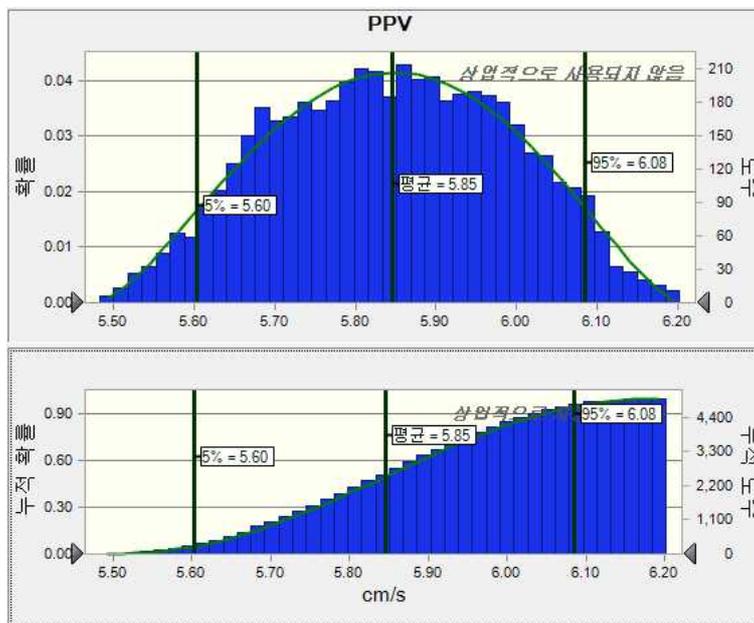


Fig. 6.18 Example for Simulation Result of SRSD (5.593, Value of SRSD 1)

그리고 Table 6.11은 SRSD 5(즉, SRSD\_1값 5.593)의 시뮬레이션 분석의 백분위 수 분석표이다. 확률 10%에서 5.65, 확률 100%에서 6.20을 예측하고 있는데 변동폭이 약 10%내외 수준이다. 이처럼 변동폭이 작은 이유는 SRSD\_1(Log normal distribution)을 제외한 나머지 변수들을 균등분포(Uniform distribution)로 가정하였기 때문에 확률분포의 변동 폭이 매우 작은 것으로 판단된다.

Table 6.11 Analysis of Percentiles of PPV

Percentiles(%)	values(cm/s)
10	5.65
20	5.71
30	5.76
40	5.81
50	5.85
60	5.89
70	5.93
80	5.98
90	6.04
100	6.20

나. 사용자정의 분포에 의한 시뮬레이션 분석결과

Fig. 6.20은 SRSD\_1(Log normal distribution)을 제외한 나머지 변수(전단파속도, 천공장, 지발당 장약량)들의 빈도분석결과를 이용해 사용자정의 분포로 가정한 시뮬레이션 결과이고, Table 6.12에 시뮬레이션 분석 결과를 비교하였다.

시뮬레이션 결과는 정규분포를 가정하고 고른 확률분포를 보여야하나 변수들의 분포 형태를 임의로 사용자정의 분포로 가정하였기 때문에 결과 값에 대한 확률분포가 만족스럽지 못하다.

또한, Crystall ball에서는 결과의 확률분포를 제공할 때 가장 적합한 분포형태를 동시에 제공하는데 여기서는 최대극값분포와 로그정규분포가 제시되었다. 하지만 분포의 적합여부를 판단하는 A-D 통계량이 기준치인 1.50을 모두 초과하는 결과를 보이고 있어 결과값에 대한 확률분포 또한 분포적합이 부족하다.

Fig. 6.19은 사용자정의 분포에 의한 시뮬레이션의 민감도 분석결과로 PPV에 민감하게 영향을 미치는 변수에 따라 순서대로 나타낸 것이다. 시뮬레이션모델에서 민감도 분석은 여러 가정이 동시에 변화하면서 그 상호작용 결과의 변동값을 파악한다는 측면에서 동적(Dynamic)인 분석법으로 상관관계가 존재하는 여러 변수들이 시뮬레이

선 할 때 결과에 미치는 영향을 파악하는데 사용한다(Lee, 2007).

민감도 분석결과, SRSD\_1이 시뮬레이션에 의한 PPV 결과값에 80%이상의 영향을 미치고 있으며 천공장(Dilling length\_1)이 음(-)의 값으로 약 8%정도 영향을 주고 있다. 그리고 SRSD 5에서는 지발당 장약량(Weight\_1)이 두 번째로 큰 영향을 주었으나 SRSD 50에서는 천공장(Dilling length\_1)이 음(-)의 값으로 두 번째로 큰 영향을 주고 있다.

Table 6.12 Analyzed Simulation Result by User-defined Distribution

SRSD		5	10	50	100	200	500
SRSD_1		5.593	2.920	0.494	0.191	0.040	-0.051
Reliability	50%	5.75	2.85	0.52	0.23	0.08	0.003
	95%	5.99	3.08	0.75	0.45	0.32	0.24
Distribution Fit		Extreme	Extreme	Lognormal	Lognormal	Extreme	Extreme
A-D Statistic		5.23	5.83	5.88	5.57	5.56	5.34



Fig. 6.19 Sensitivity Analysis by User-defined Distribution

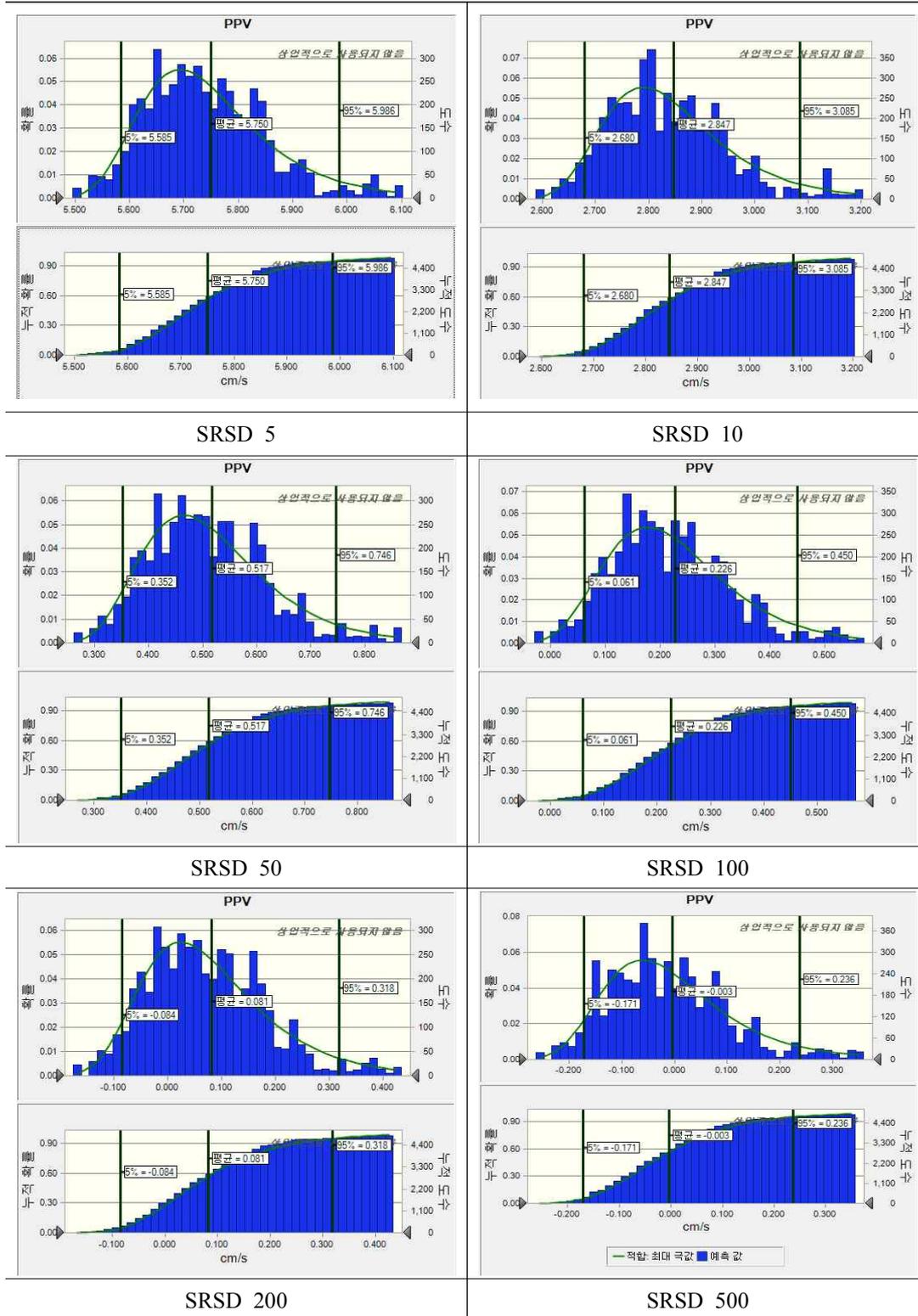


Fig. 6.20 Simulation Result by User-defined Distribution

다. 균등분포에 의한 시뮬레이션 분석 결과

Fig. 6.21은 SRSD\_1(Log normal distribution)을 제외한 나머지 변수(전단파속도, 천공장, 지발당 장약량)들을 발생확률이 동일한 균등분포(Uniform distribution)로 가정한 시뮬레이션 결과이고, Table 6.13에 시뮬레이션 분석 결과를 비교하였다.

시뮬레이션 결과는 정규분포를 가정하고 있으며 비교적 고른 확률분포를 보이고 있다. 그리고 분포형태는 모두 베타분포로 추정되며 적합여부를 판단하는 A-D 통계량이 기준치인 1.50보다 작은 결과를 보이고 있어 결과값에 대한 확률분포모형이 잘 적합된 것으로 확인된다.

Fig. 6.22의 민감도 분석결과, SRSD\_1이 가장 큰 영향을 미치고 있으며 시뮬레이션에 의한 PPV 결과값에 70.5~74.4%정도의 영향을 미치고 있다. 지발당 장약량 (Weight\_1)이 두 번째로 큰 영향을 미치고 있으며 PPV 결과값에 19.7~22.5% 그리고 천공장(Dilling length\_1)은 음(-)의 값으로 4.25~5.35%정도 영향을 주고, 전단파속도 ( $V_s$ -1)는 약 2%내의 작은 영향을 주고 있다.

결과적으로, 사용자정의 분포에 의한 시뮬레이션 결과보다는 균등분포에 의한 시뮬레이션 결과를 활용하여 시험발파 결과와 비교 검증하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

Table 6.13 Simulation Result by Uniform Distribution

SRSD		5	10	50	100	200	500
SRSD_1		5.593	2.920	0.494	0.191	0.040	-0.051
Reliability	50%	5.85	2.93	0.61	0.32	0.18	0.08
	95%	6.08	3.17	0.84	0.55	0.41	0.32
Distribution Fit		beta	beta	beta	beta	beta	beta
A-D Statistic		0.50	1.18	0.68	0.65	0.67	0.70

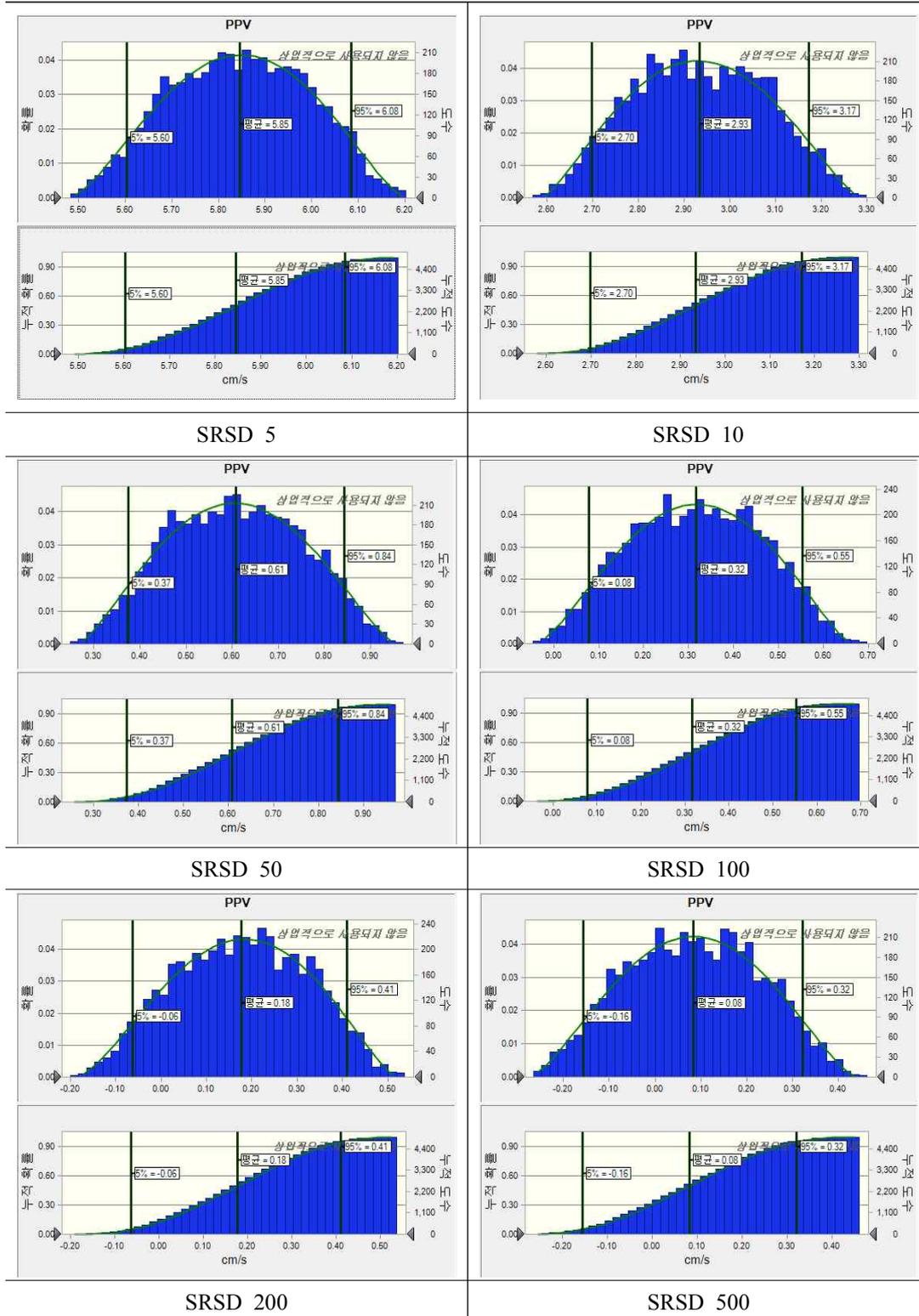


Fig. 6.21 Simulation Result by Uniform Distribution

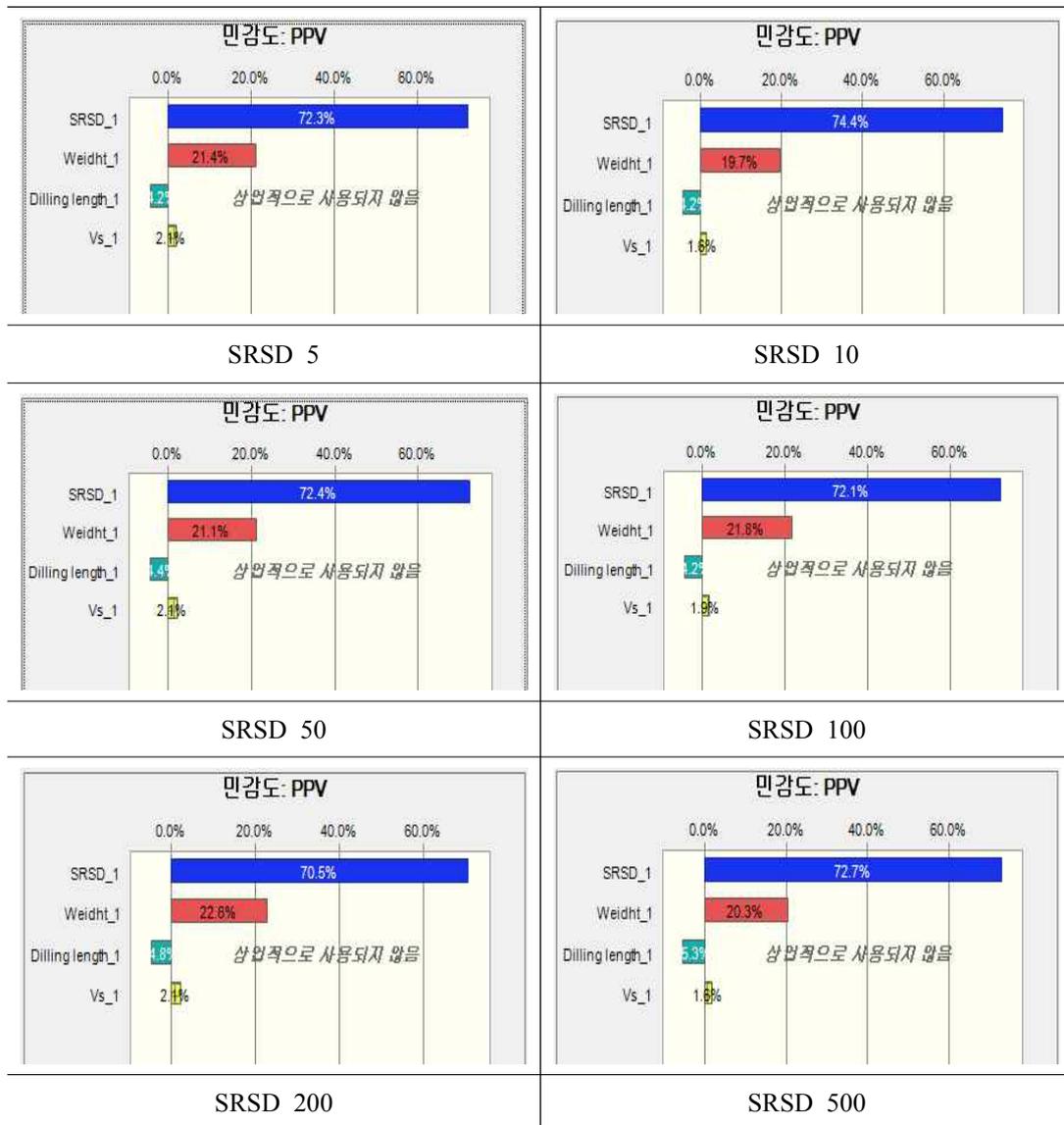


Fig. 6.22 Sensitivity Analysis by Uniform Distribution

### 6.3.2 몬테칼로 시뮬레이션에 의한 지반진동속도 추정식

#### 6.3.2.1 시뮬레이션 모델에 의한 지반진동속도 추정식

위 Table 6.13 균등분포에 의한 시뮬레이션 분석 결과로부터 Fig. 6.23과 같이 Log-Log지의 x축에 SRSD 그리고 y축이 PPV인 모노그램을 작도하여 시뮬레이션 모델에 대한 신뢰도 50%의 지반진동속도 추정식과 신뢰도 95%의 지반진동속도 추정식을 완성한다. Table 6.14에 지반진동속도 추정식을 정리하였다.

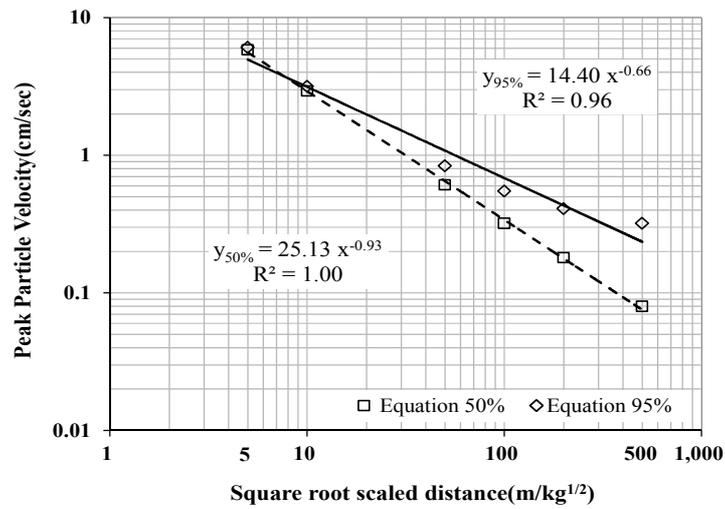


Fig. 6.23 Prediction Equation of Ground Vibration by Simulation Model

Table 6.14 Prediction Equation of Ground Vibration for Peak Particle Velocity (PPV) by Simulation Model

Model	Reliability	Prediction Equation	Remark
Simulation	50%	$V = 25.13 (SD)^{-0.93}$	
	95%	$V = 14.40 (SD)^{-0.66}$	

### 6.3.3 시험발파와 확률론적 모델의 지반진동속도 추정식 비교

#### 6.3.3.1 지반진동속도 비교

Table 6.15은 시뮬레이션 모델에 의한 지반진동속도 추정식과 시험발파에 의한 지반진동속도 추정식 그리고 설계단계에서 적용되는 국토해양부(2006)의 가이드라인 (G.L)에 의한 지반진동속도 추정식이며, 이 추정식들의 환산거리(SD)에 대한 지반진동속도를 Fig. 6.24에서 비교하였다.

신뢰도 50%의 지반진동속도 추정식을 비교해 보면 시험발파에 의한 지반진동속도

보다 시뮬레이션 모델에 의한 지반진동속도의 감쇠가 적은 특성을 보여주고 있어, 원거리로 갈수록 지반진동속도의 차이가 커져 추정식으로 활용 시 진동저감 측면에서는 유리하나 경제적인 측면에서는 불리한 결과를 초래한다.

그러나, 실제 현장에서 사용되는 지반진동속도 추정식은 신뢰도 95%의 추정식이다. 95%의 지반진동속도 추정식들을 비교해 보면 G.L의 경우 SD가 길어질수록 지반진동속도의 감쇠가 크나, 시험발파에 의한 제주지역의 지반진동속도는 비교적 감쇠가 적은 특성을 보인다. 하지만 시뮬레이션 모델에 의한 지반진동속도는 감쇠가 매우 적은 특성을 보여주고 있다.

시뮬레이션 모델의 지반진동속도는 시험발파에 의한 지반진동속도 보다 근거리인 SD 10에서 약 20%수준 작게 형성되었으나 곧 반전되어 커지고, 원거리로 갈수록 감쇠가 적어 지반진동속도 차이가 더 커진다. 이는 감쇠지수  $n$ 이 시험발파의 추정식에 의한 1.14보다 상대적으로 매우 작은 0.66을 가지고 있기 때문이다. 또한 신뢰도 50%와 95%에서 감쇠지수는 동일해야하지만 확률모형인 시뮬레이션 모델에서는 다른 값을 보여 주고 있어 지반진동속도 추정식으로서의 활용에 적합하지 않은 것으로 판단된다.

Table 6.15 Prediction Equation of Guide Line, Test Blasting, and Simulation

Division	Reliability	Prediction Equation	Remark
G.L	95%	$V = 200.0(SD)^{-1.60}$	
Test Blast	50%	$V = 28.00(SD)^{-1.14}$	
	95%	$V = 56.64(SD)^{-1.14}$	
Simulation Model	50%	$V = 25.13(SD)^{-0.93}$	Prediction_S
	95%	$V = 14.40(SD)^{-0.66}$	

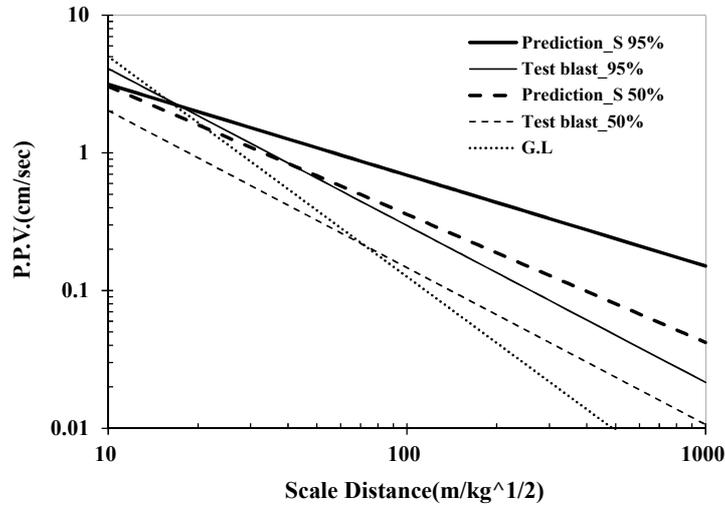


Fig. 6.24 Comparison of Prediction Equation of Guide Line, Test Blasting, and Simulation

### 6.3.3.2 장약량에 따른 지반진동속도 비교

지반진동속도 예측에 사용된 지발당 장약량은 국토해양부(2006)의 가이드라인에 의한 표준발파공법 Type II, IV의 경계 기준 지발당 장약량인 0.5, 5.0kg을 적용하였고, 시뮬레이션 모델과 시험발파 그리고 가이드라인(G.L)의 95% 지반진동속도 추정식을 이용하여 지발당 장약량을 기준으로 거리(Distance)에 따른 지반진동속도의 차이를 Table 6.16에서 비교하고 Fig. 6.25~26에 나타내었다.

Fig. 6.25에 의하면 지발당 장약량이 커질수록 지반진동속도가 커지고 진동이 멀리 전달되는 것으로 확인되며 G.L과 지반진동속도가 역전되는 교점이 동일하게 원거리로 이동하였다. 그리고 Fig. 6.26에서 각 추정식의 지반진동속도 차이를 비교해 보았다.

지발당 장약량 0.5kg일 때, 시뮬레이션 모델에 의한 지반진동속도는 시험발파에 의한 지반진동속도에 비해 5m에서 35% 작았으나 20m에서 역전되어 26.5%커지고 200m에서 280%로 4배 가까이 커진다. G.L의 지반진동속도와는 5m에서 54.7% 작았으나 200m에서 10배 이상 커졌다.

지발당 장약량 5.0kg일 때, 시뮬레이션 모델에 의한 지반진동속도는 시험발파에 의한

지반진동속도에 비해 5m에서 62.6% 작았으나 40m에서 역전되어 1.5%커지고 200m에서 120%로 2배이상 커졌다. G.L의 지반진동속도와는 5m에서 84.7% 작았으나 40m에서 역전되어 8.3%커지고 200m에서 392%로 5배 가까이 커졌다.

전반적으로 지발당 장약량이 커질수록 근거리에서 지반진동속도가 커지는 것으로 예측되고 G.L 추정식의 증가 폭이 가장 크나 지반진동속도의 감쇠 커 시험발파와 시물레이션 모델에 의한 지반진동속도 보다 작아진다. 그리고 지발당 장약량이 증가하면 시물레이션 모델의 지반진동속도와 시험발파의 지반진동속도 사이의 감쇠비가 작아진다. 즉, 상대적으로 시험발파의 지반진동속도가 커진다.

Table 6.16 The Influence of Charge per Delay (Simulation Model)

Charge per delay(kg)	0.5						5.0					
	Distance (m)	T_0.5	PS_0.5	G_0.5	(PS-T)/T	(G-T)/T	(PS-G)/G	T_5.0	PS_5.0	G_5.0	(PS-T)/T	(G-T)/T
5	6.09	3.96	8.75	-35.0	43.6	-54.7	22.63	8.47	55.19	-62.6	143.9	-84.7
10	2.76	2.51	2.89	-9.3	4.4	-13.1	10.27	5.36	18.21	-47.8	77.3	-70.6
20	1.25	1.59	0.95	26.5	-24.1	66.6	4.66	3.39	6.01	-27.2	28.9	-43.5
40	0.57	1.00	0.31	76.4	-44.8	219.7	2.11	2.15	1.98	1.5	-6.3	8.3
60	0.36	0.77	0.16	114.3	-54.2	368.0	1.33	1.64	1.04	23.3	-22.2	58.6
80	0.26	0.64	0.10	146.0	-59.9	513.4	0.96	1.36	0.65	41.6	-31.9	107.8
100	0.20	0.55	0.07	173.8	-63.8	656.5	0.74	1.17	0.46	57.6	-38.5	156.3
120	0.16	0.49	0.05	198.9	-66.7	797.9	0.60	1.04	0.34	72.0	-43.5	204.3
140	0.14	0.44	0.04	221.8	-69.0	938.0	0.51	0.94	0.27	85.2	-47.3	251.7
160	0.12	0.40	0.03	243.1	-70.8	1076.8	0.44	0.86	0.22	97.5	-50.5	298.7
180	0.10	0.37	0.03	263.1	-72.4	1214.5	0.38	0.80	0.18	108.9	-53.1	345.4
200	0.09	0.35	0.02	281.9	-73.7	1351.4	0.34	0.74	0.15	119.8	-55.3	391.8

여기서, T는 시험발파이고 PS는 시물레이션 모델 그리고 G는 가이드라인이다.

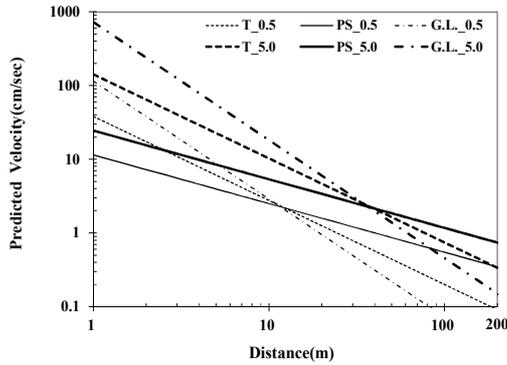


Fig. 6.25 Relationship between predicted Ground Vibration Velocity and Distance by Charge per Delay (Simulation Model)

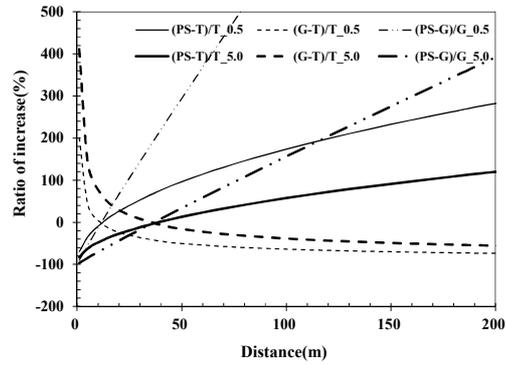


Fig. 6.26 Relationship between Ratio of Increase and Distance by Charge per Delay (Simulation Model)

## 6.4 지반진동속도 추정 모델 적합 검증

연구결과를 종합하여 가이드라인(G.L)과 시험발파 지반진동속도 추정식(Test Blast, 이하 TB), 회귀 모델 지반진동속도 추정식(Regression Model, 이하 PR), 시뮬레이션 모델(확률론적 모델) 지반진동속도 추정식(Simulation Model, 이하 PS) 그리고 시험 발파 데이터를 종합한 사례기반 모델 지반진동속도 추정식(Case based Model, 이하 TB. All)을 자승근환산거리(Square Root Scale Distance, SRSD)에 따른 지반진동속도 Peak Particle Velocity(PPV)와 지반의 허용진동속도 0.3m/s에서 거리(Distance)에 따른 지발당 장약량(kg/delay)을 산정하여 지반진동속도 추정식의 신뢰도 50%와 95%를 비교하였다.

### 6.4.1 신뢰도 50%의 지반진동속도 추정 모델 비교

#### 6.4.1.1 추정 모델의 지반진동속도 비교

각 모델의 신뢰도 50%에서 지반진동속도 추정식은 Table 6.17과 같고 가이드라인(G.L)은 신뢰도 95%의 추정식이라 제외하였다. 우선 발파진동상수 K를 비교해 보면 TB. All의 K가 64.65로 가장 크고 그 다음 PR의 K가 46.29, TB의 K가 28.00, 그리고 PS의 K가 14.40이다. 단순히 K값만으로 지반진동속도를 예측하기에는 무리가 있다. 다음은 감쇠지수 n으로 절대값을 비교하며 n값이 크면 지반진동속도 감쇠가 커진

다. 하지만 단순히 감쇠가 커지는 부분은 예상이 되나, 어느 시점에 얼마만큼의 지반 진동속도가 감쇠되는지는 진동상수 K와 감쇠지수 n 그리고 환산거리 SD를 같이 검토해야만 확인이 가능하다.

Table 6.17 Comparing Prediction Equations of Ground Vibration Velocity (Reliability 50%)

Division	Reliability	Predictive Equation	Remark
Test Blast	50%	$V = 28.00(SD)^{-1.14}$	TB
Regression Model		$V = 46.29(SD)^{-1.19}$	PR
Simulation Model		$V = 25.13(SD)^{-0.93}$	PS
Case based Model		$V = 64.65(SD)^{-1.33}$	TB. All

Fig. 6.27과 Table 6.18에서 SRSD에 따른 추정식들의 지반진동속도와 실제 시험결과와 결과인 TB를 기준으로 추정식들의 지반진동속도 비 즉, 모델들의 적합 정도를 비교하였다.

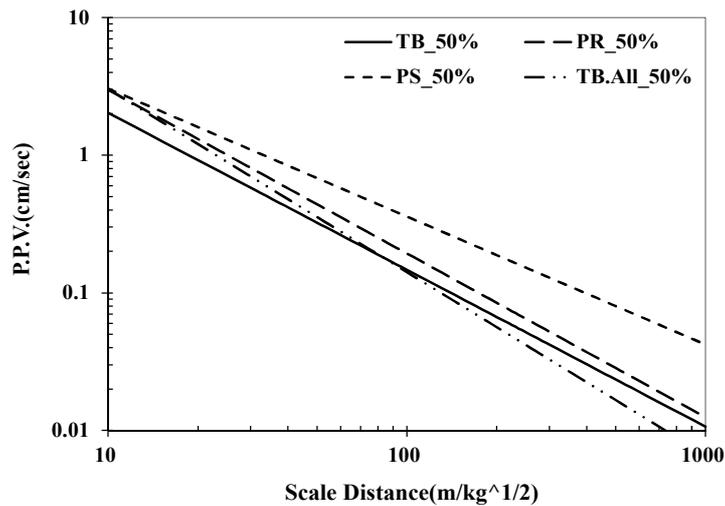


Fig. 6.27 Ground Vibration Velocity according to SRSD (Reliability 50%)

Table 6.18 Ground Vibration Velocity and Change Rate of Prediction Equations (Reliability 50%)

	SRSD(m/kg <sup>1/2</sup> )	10	50	100	200	300	500
PPV (cm/s)	TB_50%	2.03	0.32	0.15	0.07	0.04	0.02
	PR_50%	2.99	0.44	0.19	0.08	0.05	0.03
	PS_50%	3.05	0.68	0.36	0.19	0.13	0.08
	TB. All_50%	3.02	0.36	0.14	0.06	0.03	0.02
Ratio (%)	$1 - \left  \frac{TB - PR}{TB} \right $	53	64	69	73	76	79
	$1 - \left  \frac{TB - PS}{TB} \right $	50	47	41	35	33	29
	$1 - \left  \frac{TB - TB.A}{TB} \right $	51	90	96	84	78	71

제주지역의 다변성 층상구조 지반특성을 반영하고 있는 시험발파에 의한 지반진동속도(TB\_50%)는 약 SD 70까지 TB. All\_50% 보다 진동속도가 작았으나 원거리로 갈수록 진동속도의 감쇠가 작아져 지반진동속도가 큰 것으로 나타났으며, 나머지는 모두 TB\_50% 보다 큰 지반진동속도를 보이고 있다.

회귀 모델에 의한 지반진동속도(PR\_50%)는 TB\_50%을 SD 10에서 53%의 적합률을 보이며 조금 높은 2.99cm/s를 보였으나, 감쇠지수 n이 상대적으로 조금 커 SD 200에서 73%로 커지고 SD 500에서는 79%까지 적합한 수준으로 보인다. 이는 TB의 지반진동속도 기준으로 SD 500까지 고려했을 때 적합률이 약 75% 수준이다.

현장의 실 발파 데이터가 없는 경우 지반 및 지형 등의 다양하고 복잡한 조건으로 인해 지반진동속도를 예단하지 못하고 있는 실정에서 75% 수준의 적합률은 활용이 가능한 수준으로 판단된다.

시뮬레이션 모델에 의한 지반진동속도(PS\_50%)는 TB\_50%을 SD 10에서 50%의 적합률을 보이며 조금 높은 3.05cm/s를 보였으나, 발파진동상수 K와 감쇠지수 n이 상대적으로 작아 SD 200에서 35%로 작아지고 SD 500에서는 25%까지 작아지는 적합수준을 보인다. 이는 TB의 지반진동속도 기준으로 SD 500까지 고려했을 때 적합률이 약 34% 수준을 보이고 있어 시뮬레이션 모델에 의한 지반진동속도 추정식을 신뢰

하기 어렵다.

그리고 9회의 시험발파 데이터를 종합한 사례기반 모델 지반진동속도(TB. All\_50%)는 TB\_50%을 SD 10에서 51%의 적합률을 보였으나, SD 100에서 96%, SD 200에서 84%로 커지고 SD 500에서는 71%까지 적합한 수준으로 보인다. 이는 TB의 지반진동속도 기준으로 SD 500까지 고려했을 때 적합률이 약 81% 수준이다.

계획단계에서 활용되고 있는 가이드라인(G.L) 추정식의  $K : 200$ 와  $n : 1.6$ 이 경험식에 의한 결과값 임을 감안할 때, TB. All\_50%에 의한 지반진동속도 추정식의 결과는 제주지역의 다변성 지반에 대한 지반진동특성을 매우 잘 반영하고 있는 것으로 확인되어, 동일한 지반에서 발파 계획단계에 활용에도 무리가 없을 것으로 판단된다.

#### 6.4.1.2 추정 모델들의 지발당 장약량 비교

거리(Distance)에 따른 지발당 허용 장약량(kg/delay)을 Fig. 6.28에서 비교하였다. 지반진동속도를 크게 예측한 시뮬레이션 모델 PS\_50%가 동일거리에서 지발당 허용 장약량이 가장 작고 그 다음이 회귀 모델 PS\_50%, 데이터를 종합한 TB. All\_50% 순이나, TB. All\_50%은 검증용 시험발파 TB\_50%과 유사한 수준이다.

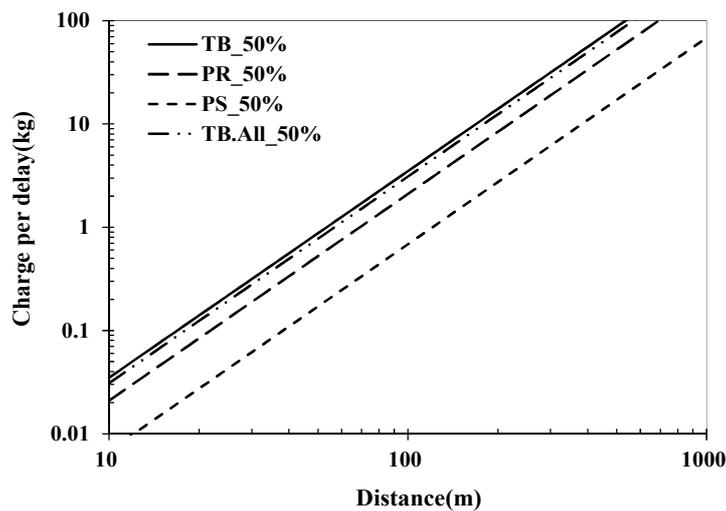


Fig. 6.28 Comparing Charge per Delay of Prediction Models (Reliability 50%)

Table 6.19은 진동규제기준(허용 진동속도 0.3cm/s)에 의한 지반진동속도 추정식들의 표준발파패턴별 이격거리를 나타내고 있으며, Table 6.20는 지반진동속도 추정식들의 표준발파패턴별 이격거리에 대한 적합 정도를 TB\_50%를 기준으로 확인한 결과이다.

표준발파패턴별 이격거리에 대해 시험발파 TB\_50% 대비 TB\_All 50%는 94%의 적합률을 보이고 PR\_50%는 71%, PS\_50%는 44%이다. 지반진동속도 추정식은 발파 현장에서 허용 진동속도가 결정되면, 보안물건을 기준으로 적용할 수 있는 발파패턴별 이격거리를 산정하여 최종적으로 이격거리별 지발당 허용 장약량을 산출하기 위한 방법으로 활용된다. 따라서 지반진동속도 추정식에 대한 최종 적합률은 지발당 장약량을 기준으로 한 발파패턴별 이격거리의 적합률로 판단하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

그리고 Table 6.21은 Table 6.19의 이격거리를 20m 단위로 나누어 제시한 거리에 따른 지발당 장약량 조건표로서 표준발파패턴별 적용 거리와 지발당 허용 장약량을 제시하고 있다.

Table 6.19 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (Reliability 50%)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)			
		TB_50%	PR_50%	PS_50%	TB.All_50%
I	0.125	18.9	24.4	42.7	20.1
II	0.5	37.8	48.8	85.5	40.2
III	1.6	67.6	87.3	152.9	71.9
IV	5.0	119.6	154.3	270.4	127.0
V	15.0	207.1	267.3	468.3	220.0
VI	15 Above				

Table 6.20 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (Reliability 50%)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Relevance ratio(%)		
		$1 - \left  \frac{TB - PR}{TB} \right $	$1 - \left  \frac{TB - PS}{TB} \right $	$1 - \left  \frac{TB - TB.A}{TB} \right $
I	0.125	71	44	94
II	0.5			
III	1.6			
IV	5.0			
V	15.0			

Table 6.21 A Chart for Charge per Delay by Prediction Equations according to Distance (Reliability 50%)

Maximum instantaneous charge-MIC(kg/delay)				
Distance(m)	TB_50%	PR_50%	PS_50%	TB.All_50%
10	0.035	0.021	0.007	0.031
30	0.315	0.189	0.062	0.279
50	0.874	0.525	0.171	0.774
70	1.714	1.029	0.335	1.518
90	2.833	1.700	0.554	2.509
110	4.232	2.540	0.828	3.748
130	5.911	3.548	1.156	5.235
150	7.870	4.723	1.539	6.970
170	10.109	6.067	1.977	8.953
190	12.627	7.578	2.469	11.183
210	15.425	9.258	3.017	13.661
230	18.503	11.105	3.619	16.387
250	21.861	13.121	4.275	19.361
270	25.499	15.304	4.987	22.583
290	29.417	17.655	5.753	26.053
310	33.614	20.174	6.574	29.770
330	38.091	22.861	7.449	33.735
350	42.848	25.716	8.380	37.948
370	47.885	28.739	9.365	42.409
390	53.202	31.930	10.405	47.118
410	58.798	35.289	11.499	52.074
430	64.674	38.816	12.648	57.279
450	70.830	42.511	13.852	62.731
470	77.266	46.373	15.111	68.431
490	83.982	50.404	16.424	74.379
510	90.978	54.603	17.792	80.574

## 6.4.2 신뢰도 95%의 지반진동속도 추정 모델 비교

### 6.4.2.1 추정 모델의 지반진동속도 비교

각 모델의 신뢰도 50%에서 지반진동속도 추정식은 Table 6.22과 같다. 우선 발파진동상수 K를 비교해 보면 TB. All의 K가 169.43으로 가장 크고 그 다음 PR의 K가 106.51, TB의 K가 56.64 그리고 PS의 K가 14.40이다. 단순히 발파진동상수 K값만으로 지반진동속도를 예측하기에는 무리가 있다.

다음은 감쇠지수 n으로 절대값을 비교하며 n값이 크면 지반진동속도 감쇠가 커진다. 하지만 단순히 감쇠가 커지는 부분은 예상이 되나, 어느 시점에 얼마만큼의 지반진동속도가 감쇠되는지는 진동상수 K와 감쇠지수 n 그리고 환산거리 SD를 같이 검토해야만 확인이 가능하다.

Table 6.22 Comparing Prediction Equations of Ground Vibration Velocity (Reliability 95%)

Division	Reliability	Predictive Equation	Remark
G.L	95%	$V = 200.0(SD)^{-1.60}$	G.L
Test Blast		$V = 56.64(SD)^{-1.14}$	TB
Regression Model		$V = 106.51(SD)^{-1.19}$	PR
Simulation Model		$V = 14.40(SD)^{-0.66}$	PS
Case based Model		$V = 169.43(SD)^{-1.33}$	TB. All

Fig. 6.29와 Table 6.23에서 SRSD에 따른 추정식들의 지반진동속도와 실제 시험발파 결과인 TB를 기준으로 추정식들의 지반진동속도 비 즉, 모델들의 적합 정도를 비교하였다.

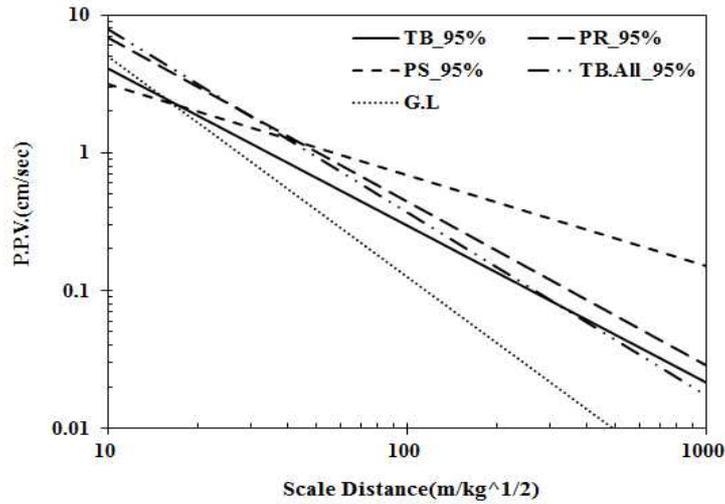


Fig. 6.29 Ground Vibration Velocity according to SRSD (Reliability 95%)

Table 6.23 Change Rate and Ground Vibration Velocity of Prediction Equation (Reliability 95%)

	SRSD(m/kg <sup>1/2</sup> )	10	50	100	200	300	500
PPV (cm/s)	TB_95%	4.10	0.66	0.30	0.13	0.08	0.05
	PR_95%	6.88	1.01	0.44	0.19	0.12	0.07
	PS_95%	3.15	1.09	0.69	0.44	0.33	0.24
	TB. All_95%	7.92	0.93	0.37	0.15	0.09	0.04
Ratio (%)	$1 - \left  \frac{TB - PR}{TB} \right $	32	45	51	56	59	62
	$1 - \left  \frac{TB - PS}{TB} \right $	77	60	43	31	25	20
	$1 - \left  \frac{TB - TB.A}{TB} \right $	7	58	75	91	99	92

시험발파에 의한 지반진동속도(TB\_95%)는 약 SD 15까지 G.L보다 진동속도가 작았으나 원거리로 갈수록 진동속도의 감쇠가 작아져 지반진동속도가 큰 것으로 나타났다. 그리고 TB\_95%에 비해, PR\_95%는 전 SD에서 진동속도가 큰 것으로 예측되고 TB. All\_95%는 감쇠지수가 조금 커 약 SD 200에서 진동속도가 작아진다. PS\_95%는 약 SD 20까지 진동속도가 작았으나 감쇠지수가 작아 원거리로 갈수록 진동속도가 크고, 그 차이가 더 커지고 있다.

회귀 모델에 의한 지반진동속도(PR\_50%)는 TB\_50%을 SD 50에서 45%의 적합률을 보이며 조금 높은 1.01cm/s를 보였으나, 감쇠지수  $n$ 이 상대적으로 조금 커 SD 200에서 56%로 커지고 SD 500에서는 62%까지 적합한 수준으로 보인다. 이는 TB의 지반진동속도 기준으로 SD 500까지 고려했을 때 적합률이 약 60% 수준이다.

현장의 실험발파 데이터가 없는 경우 지반 및 지형 등의 다양하고 복잡한 조건으로 인해 지반진동속도를 예단하지 못하고 있는 실정에서 60% 수준의 적합률은 가히 낮다고만은 할 수 없는 수준으로 판단된다.

시뮬레이션 모델에 의한 지반진동속도(PS\_95%)는 TB\_95%을 SD 50에서 34%의 적합률을 보이며 조금 높은 1.09cm/s를 보였으나, 발파진동상수  $K$ 와 감쇠지수  $n$ 이 상대적으로 작아 SD 200에서 31%로 작아지고 SD 500에서는 20%까지 작아지는 적합수준을 보인다. 이는 TB의 지반진동속도 기준으로 SD 500까지 고려했을 때 적합률이 약 28% 수준을 보이고 있어 시뮬레이션 모델에 의한 지반진동속도 추정식을 신뢰하기 어렵다.

그리고 9회의 시험발파 데이터를 종합한 사례기반 모델 지반진동속도(TB. All\_95%)는 TB\_95%을 SD 50에서 58%의 적합률을 보였으나 SD 200에서 91%로 커지고 SD 500에서는 92%까지 적합한 수준으로 보인다. 이는 TB의 지반진동속도를 기준으로 근거리에서는 적합도가 조금 부족하지만 원거리로 갈수록 접합도가 커져 SD 500까지 고려했을 때 적합률이 약 90% 수준이다.

계획단계에서 활용되고 있는 가이드라인(G.L) 추정식의  $K : 200$ 와  $n : 1.6$ 이 경험식에 의한 결과값 임을 감안할 때, TB. All\_95%에 의한 지반진동속도 추정식의 결과는 제주지역의 다변성 지반에 대한 지반진동특성을 매우 잘 반영하고 있는 것으로 확인되어, 동일한 지반의 발파 계획단계에서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

#### 6.4.2.2. 추정 모델의 지발당 장약량 비교

거리(Distance)에 따른 지발당 허용 장약량(kg/delay)을 Fig. 6.30에서 비교하였다.

지반진동속도를 원거리로 갈수록 크게 예측한 시뮬레이션 모델 PS\_95%가 동일거리에서 지발당 허용 장약량이 가장 작고 그 다음이 회귀 모델 PS\_95%, TB. All\_95%, TB\_95% 순이다. 그리고 약 SD 15에서 G.L의 지반진동속도를 역전해 원거리에서 보다 큰 진동속도를 보인 TB\_95%가 G.L보다 지발당 허용 장약량은 작다.

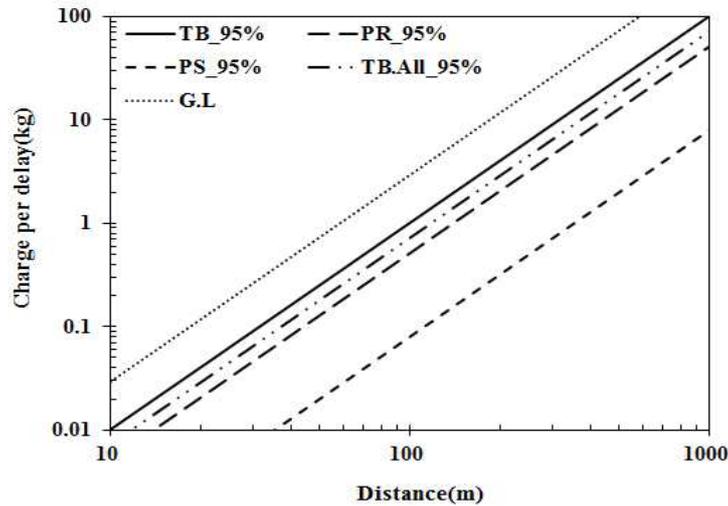


Fig. 6.30 Comparing Delay per Charge of Prediction Models (Reliability 95%)

Table 6.24은 진동규제기준(허용 진동속도 0.3cm/s)에 의한 지반진동속도 추정식들의 표준발파패턴별 이격거리를 나타내고 있으며, Table 6.25는 지반진동속도 추정식들의 표준발파패턴별 이격거리에 대한 적합 정도를 TB\_95%를 기준으로 확인한 결과이다.

표준발파패턴별 이격거리에 대해 시험발파 TB\_95% 대비 TB\_All 95%는 82%의 적합률을 보이고 PR\_95%는 60%, PS\_95%는 28%이다. 지반진동속도 추정식은 발파 현장에서 허용 진동속도가 결정되면, 보안물건을 기준으로 적용할 수 있는 발파패턴별 이격거리를 산정하여 최종적으로 이격거리별 지발당 허용 장약량을 산출하기 위한 방법으로 활용된다. 따라서 지반진동속도 추정식에 대한 최종 적합률은 지발당 장약량을 기준으로 한 발파패턴별 이격거리의 적합률로 판단하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

그리고 Table 6.26는 Table 6.24의 이격거리를 20m 단위로 나누어 제시한 거리에 따른 지발당 장약량 조건표로서 표준발파패턴별 적용 거리와 지발당 허용 장약량을 제시하고 있다.

Table 6.24 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (Reliability 95%)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)				
		G.L	TB_95%	PR_95%	PS_95%	TB.All_95%
I	0.125	20.6	35.1	49.2	124.7	41.5
II	0.5	41.2	70.1	98.3	249.4	82.9
III	1.6	73.6	125.5	175.8	446.1	148.3
IV	5.0	130.1	221.8	310.9	788.5	262.2
V	15.0	225.4	384.2	538.4	1365.8	454.1
VI	15 Above					

Table 6.25 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (Reliability 95%)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Relevance ratio(%)		
		$1 - \left  \frac{TB - PR}{TB} \right $	$1 - \left  \frac{TB - PS}{TB} \right $	$1 - \left  \frac{TB - TB.A}{TB} \right $
I	0.125	60	28	82
II	0.5			
III	1.6			
IV	5.0			
V	15.0			

Table 6.26 A Chart for Charge per Delay by Prediction Equations according to Distance (Reliability 95%)

Maximum instantaneous charge-MIC(kg/delay)					
Distance(m)	G.L	TB_95%	PR_95%	PS_95%	TB.All_95%
10	0.030	0.010	0.005	0.001	0.007
30	0.266	0.091	0.047	0.007	0.065
50	0.738	0.254	0.129	0.020	0.182
70	1.446	0.498	0.254	0.039	0.356
90	2.391	0.823	0.419	0.065	0.589
110	3.572	1.230	0.626	0.097	0.880
130	4.989	1.717	0.874	0.136	1.230
150	6.642	2.287	1.164	0.181	1.637
170	8.531	2.937	1.495	0.232	2.103
190	10.657	3.669	1.868	0.290	2.626
210	13.018	4.482	2.282	0.355	3.208
230	15.616	5.376	2.737	0.425	3.849
250	18.450	6.352	3.234	0.503	4.547
270	21.520	7.409	3.772	0.586	5.304
290	24.826	8.547	4.351	0.676	6.119
310	28.369	9.766	4.972	0.773	6.992
330	32.147	11.067	5.635	0.876	7.923
350	36.162	12.449	6.338	0.985	8.912
370	40.413	13.913	7.083	1.101	9.960
390	44.900	15.457	7.870	1.223	11.066
410	49.623	17.083	8.698	1.352	12.230
430	54.582	18.791	9.567	1.487	13.452
450	59.778	20.579	10.478	1.628	14.732
470	65.209	22.449	11.430	1.776	16.071
490	70.877	24.400	12.423	1.931	17.468
510	76.781	26.433	13.458	2.092	18.923
<b>600</b>	106.271	36.585	18.627	2.895	26.191
<b>700</b>	144.647	49.797	25.353	3.940	35.649
<b>800</b>	188.927	65.041	33.115	5.146	46.562
<b>900</b>	239.111	82.317	41.911	6.514	58.930
<b>1000</b>	295.198	101.626	51.741	8.041	72.753

## 6.5 지반진동속도 추정 모델들의 민감도 분석

본 연구를 통해 만들어진 세 가지 모델 즉, 회귀 모델 지반진동속도 추정식(Prediction Regression, PR), 시뮬레이션 모델 지반진동속도 추정식(Prediction Simulation, PS) 그리고 시험발파 데이터를 종합한 사례기반 모델 지반진동속도 추정식(Case based Model, TB. All)을 9개의 개별 시험발파 지반진동속도 추정식에 대해 민감도를 분석을 실시하였다.

분석조건은 자승근환산거리(Square Root Scale Distance, SRSD)에 따른 지반진동속도 Peak Particle Velocity(PPV)와 지반의 허용진동속도 0.3m/s에서 거리(Distance)에 따른 지발당 장약량(kg/delay)을 산정하여 지반진동속도 추정식의 신뢰도 50%와 95%를 비교하였다.

### 6.5.1 시험발파 No. 1

#### 6.5.1.1 추정 모델의 변수 설정

회귀 모델과 시뮬레이션 모델의 알고리즘은 동일하기 때문에 각 변수들의 입력조건은 동일하다. 모델의 입력변수는 네 가지로 지반 전단파속도( $V_s$ ), 천공장(Drilling length), 지발당 장약량(Weight), SRSD를 데이터마이닝 과정을 거쳐 독립변수로 입력하여 종속변수인 지반진동속도 PPV(cm/s)를 산출한다.

각 변수들의 입력값은 Table 6.27에서와 같이 발파패턴별로 다른 조건을 평균하여 현장의 대표값으로 사용한 세 가지 변수의 고정값과 입력값이 변동되는 변수 SRSD : 5 ~ 500(변형값 5.95 ~ -0.051)의 변동값을 모델에 활용하였다.

Table 6.27 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 1)

Variable	Unit	Blast Type				Mean	Transformation
		II	III	IV	V		
Drilling length	m	2.0	2.7	3.4	4.5	3.15	0.388
Weight	kg/delay	0.25	0.96	3.0	5.0	2.30	0.272
$V_s$	m/sec	471 ~ 703				575	0.161

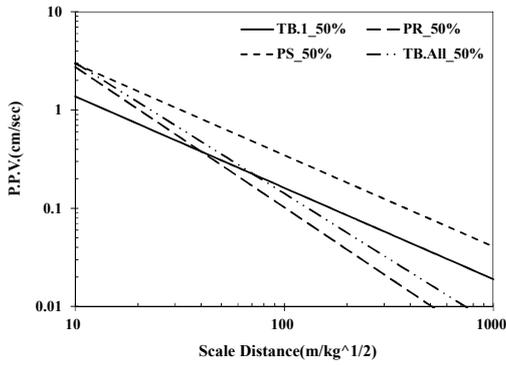
6.5.1.2 시험발파 No.1에 대한 추정 모델의 민감도 분석

각 모델과 시험발파 No.1의 지반진동속도 추정식은 Table 6.28과 같다. 우선 발파 진동상수 K를 비교해 보면 PR의 K가 73.95, 170.15로 가장 크고 그 다음 TB. All이며, 신뢰도 50%에서는 PS가 크고 신뢰도 95%에서는 TB. 1이 크다. 다음 감쇠지수 n의 절대값은 PR이 가장 크고 TB. All이며, 신뢰도 50%에서는 PS가 크고 신뢰도 95%에서는 TB. 1이 크다.

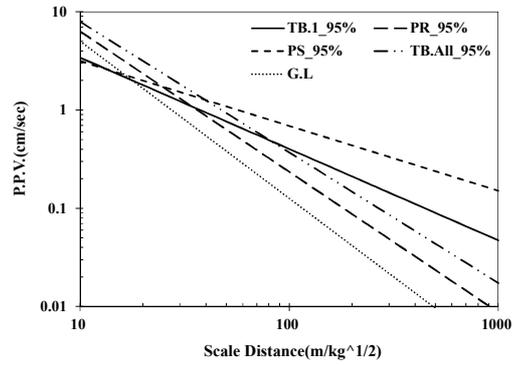
그리고 Fig. 6.31에서 환산거리(SRSD)에 따른 지반진동속도를 비교해 보면 TB. 1은 근거리에서 진동속도를 상대적으로 작게 예측하고 있으나 감쇠가 적어 원거리에서는 PS 다음으로 큰 지반진동속도를 보이고 있다.

Table 6.28 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 1)

Division	Reliability	Predictive Equation	Remark
Test Blast No.1	50%	$V = 11.70(SD)^{-0.93}$	TB. 1
	95%	$V = 29.09(SD)^{-0.93}$	
Regression Model	50%	$V = 73.95(SD)^{-1.43}$	PR
	95%	$V = 170.15(SD)^{-1.43}$	
Simulation Model	50%	$V = 25.13(SD)^{-0.93}$	PS
	95%	$V = 14.40(SD)^{-0.66}$	
Case based Model	50%	$V = 64.65(SD)^{-1.33}$	TB. All
	95%	$V = 169.43(SD)^{-1.33}$	



(a) Reliability 50%

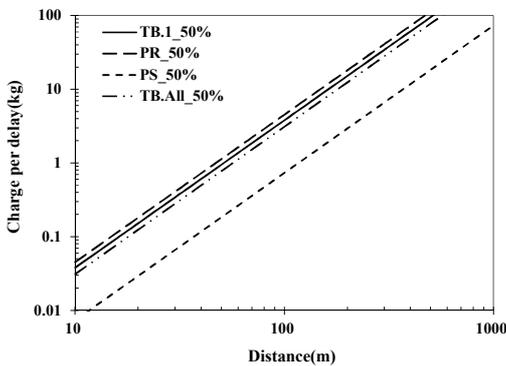


(b) Reliability 95%

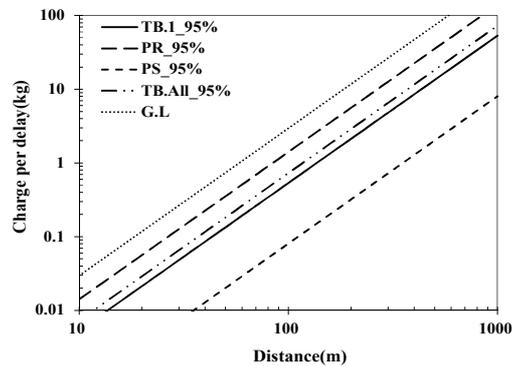
Fig. 6.31 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 1)

거리(Distance)에 따른 지발당 허용 장약량(kg/delay)을 Fig. 6.32에서 비교하였다. 신뢰도 50%에서 동일 거리에 대한 지발당 허용 장약량은 PS가 가장 작고 TB. All, TB. 1, PR 순으로 커진다. 신뢰도 95%에서는 PS가 가장 작고 TB. 1, TB. All, PR 순으로 커진다. 이는 허용 진동속도 0.3cm/s에서 지반진동속도 추정식들의 표준발파 패턴별 이격거리를 나타내고 있는 Table 6.29(b)에 의하면, 각 발파패턴별 적용한계 거리가 PS가 가장 멀고 TB. 1, TB. All, PR 순으로 작아지는 것이 확인된다.

그리고, 시험발파 No.1(TB. 1)에 대한 추정 모델들의 민감도 분석결과는 Table 6.30에서와 같이 기준치인 TB. 1에 대해 오차율을 뺀 적합률(Relevance ratio)로 확인하였다. 적합률은 표준발파패턴별 이격거리에 대해 TB.1\_50% 대비 PR은 92%, PS는 44%, TB\_All은 89%이고 TB.1\_95%에 대비해서 PR은 62%, PS는 39%, TB\_All은 86% 수준이 확인되었다.



(a) Reliability 50%



(b) Reliability 95%

Fig. 6.32 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 1)

Table 6.29 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (TB. 1)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)			
		TB.1_50%	PR_50%	PS_50%	TB.All_50%
I	0.125	18.2	16.6	41.3	20.1
II	0.5	36.3	33.3	82.7	40.2
III	1.6	65.0	59.5	147.9	71.9
IV	5.0	114.9	105.2	261.4	127.0
V	15.0	199.0	182.2	452.8	220.0
VI	15 Above				

(a) Reliability 50%

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)				
		G.L	TB.1_95%	PR_95%	PS_95%	TB.All_95%
I	0.125	20.6	48.4	29.8	124.7	41.5
II	0.5	41.2	96.7	59.6	249.4	82.9
III	1.6	73.6	173.1	106.6	446.1	148.3
IV	5.0	130.1	305.9	188.4	788.5	262.2
V	15.0	225.4	529.9	326.4	1365.8	454.1
VI	15 Above					

(b) Reliability 95%

Table 6.30 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 1)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Relevance ratio(%)					
		$1 - \left  \frac{TB - PR}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB - PS}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB - TB.A}{TB} \right $	
		50%	95%	50%	95%	50%	95%
I	0.125	92	62	44	39	89	86
II	0.5						
III	1.6						
IV	5.0						
V	15.0						

## 6.5.2 시험발파 No. 2

### 6.5.2.1 추정 모델의 변수 설정

회귀 모델과 시뮬레이션 모델의 알고리즘은 동일하기 때문에 각 변수들의 입력조건은 동일하다. 모델의 입력변수는 네 가지로 지반 전단파속도( $V_s$ ), 천공장(Drilling

length), 지발당 장력량(Weight), SRSD를 데이터마이닝 과정을 거쳐 독립변수로 입력하여 종속변수인 지반진동속도 PPV(cm/s)를 산출한다.

각 변수들의 입력값은 Table 6.31에서와 같이 발파패턴별로 다른 조건을 평균하여 현장의 대표값으로 사용한 세 가지 변수의 고정값과 입력값이 변동되는 변수 SRSD : 5 ~ 500(변형값 5.95 ~ -0.051)의 변동값을 모델에 활용하였다.

Table 6.31 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 2)

Variable	Unit	Blast Type				Mean	Transformation
		II	III	IV	V		
Drilling length	m	2.0	2.7	3.4	4.5	3.15	0.388
Weight	kg/delay	0.25	0.96	3.0	5.0	2.30	0.272
$V_s$	m/sec	471 ~ 703				575	0.161

#### 6.5.2.2 시험발파 No.2에 대한 추정 모델의 민감도 분석

각 모델과 시험발파 No.2의 지반진동속도 추정식은 Table 6.32와 같다. 우선 발파 진동상수 K를 비교해 보면 TB. 2의 K가 신뢰도 50%에서 130.30, 신뢰도 95%에서 401.10으로 가장 크고 그 다음 PR, TB. All, PS 순이다.

그리고 Fig. 6.33에서 환산거리(SRSD)에 따른 지반진동속도를 비교해 보면 신뢰도 50%, 95%에서 TB. 2, PR 그리고 TB. All은 유사한 진동속도를 보이고 있으나 TB. All은 원거리로 갈수록 감쇠가 상대적으로 작고, PS는 원거리에서 매우 큰 지반진동속도를 보이고 있다.

Table 6.32 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 2)

Division	Reliability	Predictive Equation	Remark
Test Blast No.2	50%	$V = 130.30 (SD)^{-1.55}$	TB. 2
	95%	$V = 401.10 (SD)^{-1.55}$	
Regression Model	50%	$V = 73.95 (SD)^{-1.43}$	PR
	95%	$V = 170.15 (SD)^{-1.43}$	
Simulation Model	50%	$V = 25.13 (SD)^{-0.93}$	PS
	95%	$V = 14.40 (SD)^{-0.66}$	
Case based Model	50%	$V = 64.65 (SD)^{-1.33}$	TB. All
	95%	$V = 169.43 (SD)^{-1.33}$	

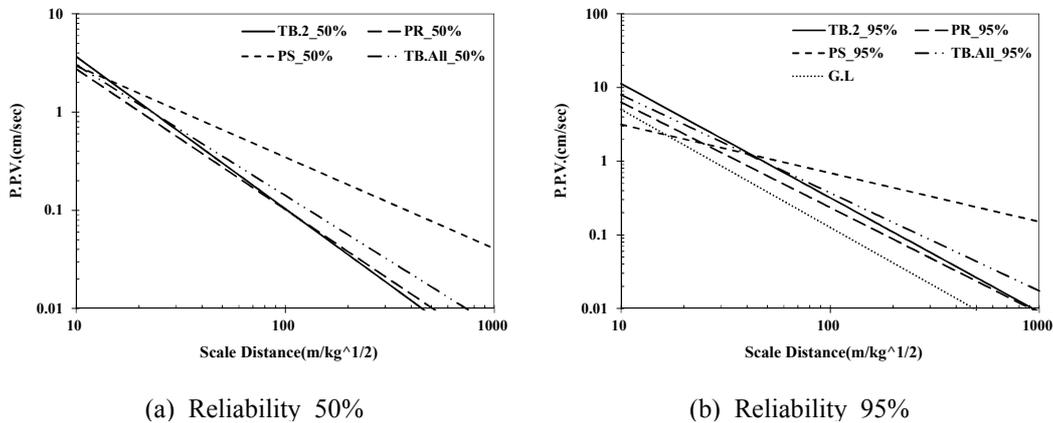
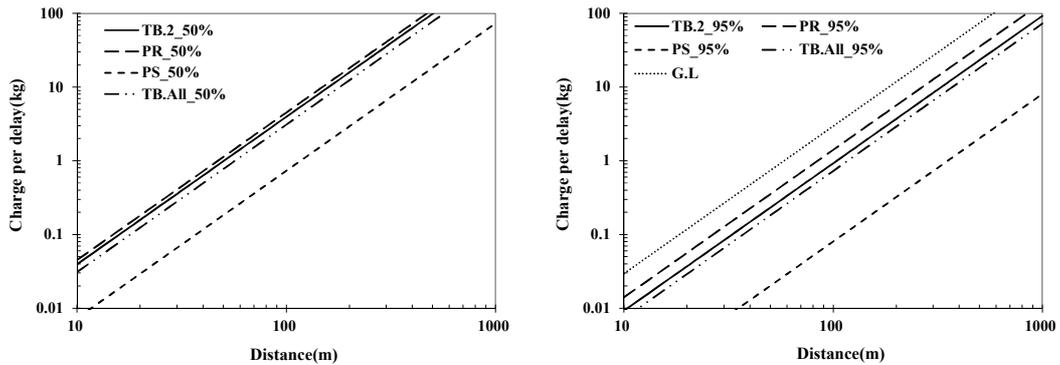


Fig. 6.33 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 2)

거리(Distance)에 따른 지발당 허용 장약량(kg/delay)을 Fig. 6.34에서 비교하였다. 신뢰도 50%에서 동일 거리에 대한 지발당 허용 장약량은 PS가 가장 작고 TB. All, TB. 2, PR 순으로 커진다. 신뢰도 95%에서는 PS가 가장 작고 TB. All, TB. 2, PR 순으로 커진다. 이는 허용 진동속도 0.3cm/s에서 지반진동속도 추정식들의 표준발파 패턴별 이격거리를 나타내고 있는 Table 6.33(a), (b)에 의하면, 각 발파패턴별 적용 한계 거리가 PS가 가장 멀고 TB. All, TB. 2, PR 순으로 작아지는 것이 확인된다.

그리고, 시험발파 No.2(TB. 2)에 대한 추정 모델들의 민감도 분석결과는 Table 6.34에서와 같이 기준치인 TB. 2에 대해 오차율을 뺀 적합률(Relevance ratio)로 확인하였다. 적합률은 표준발파패턴별 이격거리에 대해 TB. 2\_50% 대비 PR은 93%,

PS는 43%, TB. All은 87%이고 TB.2\_95%에 대비해서 PR은 81%, PS는 29%, TB\_All은 87%의 수준이 확인되었다.



(a) Reliability 50%

(b) Reliability 95%

Fig. 6.34 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 2)

Table 6.33 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (TB. 2)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)			
		TB.2_50%	PR_50%	PS_50%	TB.All_50%
I	0.125	17.8	16.6	41.3	20.1
II	0.5	35.6	33.3	82.7	40.2
III	1.6	63.7	59.5	147.9	71.9
IV	5.0	112.5	105.2	261.4	127.0
V	15.0	194.9	182.2	452.8	220.0
VI	15 Above				

(a) Reliability 50%

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)				
		G.L	TB.2_95%	PR_95%	PS_95%	TB.All_95%
I	0.125	20.6	36.8	29.8	124.7	41.5
II	0.5	41.2	73.5	59.6	249.4	82.9
III	1.6	73.6	131.5	106.6	446.1	148.3
IV	5.0	130.1	232.5	188.4	788.5	262.2
V	15.0	225.4	402.6	326.4	1365.8	454.1
VI	15 Above					

(b) Reliability 95%

Table 6.34 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 2)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Relevance ratio(%)					
		$1 - \left  \frac{TB - PR}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB - PS}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB - TB.A}{TB} \right $	
		50%	95%	50%	95%	50%	95%
I	0.125	93	81	43	29	87	87
II	0.5						
III	1.6						
IV	5.0						
V	15.0						

### 6.5.3 시험발파 No. 3

#### 6.5.3.1 추정 모델의 변수 설정

회귀 모델과 시뮬레이션 모델의 알고리즘은 동일하기 때문에 각 변수들의 입력조건은 동일하다. 모델의 입력변수는 네 가지로 지반 전단파속도( $V_s$ ), 천공장(Drilling length), 지발당 장력량(Weight), SRSD를 데이터마이닝 과정을 거쳐 독립변수로 입력하여 종속변수인 지반진동속도 PPV(cm/s)를 산출한다.

각 변수들의 입력값은 Table 6.35에서와 같이 발파패턴별로 다른 조건을 평균하여 현장의 대표값으로 사용한 세 가지 변수의 고정값과 입력값이 변동되는 변수 SRSD : 5 ~ 500(변형값 5.95 ~ -0.051)의 변동값을 모델에 활용하였다.

Table 6.35 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 3)

Variable	Unit	Blast Type				Mean	Transformation
		II	III	IV	V		
Drilling length	m	2.0	2.7	3.4	4.5	3.15	0.388
Weight	kg/delay	0.25	0.96	3.0	5.0	2.30	0.272
$V_s$	m/sec	471 ~ 703				575	0.161

### 6.5.3.2 시험발파 No.3에 대한 추정 모델의 민감도 분석

각 모델과 시험발파 No.3의 지반진동속도 추정식은 Table 6.36과 같다. 우선 발파 진동상수 K를 비교해 보면 TB. 3의 K가 신뢰도 50%에서 83.49로 가장 크고 그 다음 PR, TB. All, PS 순이다. 그리고 신뢰도 95%에서는 PR의 K가 170.15으로 크고 TB. All, TB.3, PS 순이다.

그리고 Fig. 6.35에서 환산거리(SRSD)에 따른 지반진동속도를 비교해 보면 신뢰도 50%에서 PR, TB. All, TB. 3, PS 순으로 진동속도를 크게 예측하고 있으며, 신뢰도 95%에서는 TB. 3과 PR이 유사한 지반진동속도를 보이며 가장 작고 TB. All은 원거리로 갈수록 감쇠가 상대적으로 작고, PS는 원거리에서 매우 큰 지반진동속도를 보이고 있다.

Table 6.36 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 3)

Division	Reliability	Predictive Equation	Remark
Test Blast No.3	50%	$V = 83.49 (SD)^{-1.35}$	TB. 3
	95%	$V = 129.34 (SD)^{-1.35}$	
Regression Model	50%	$V = 73.95 (SD)^{-1.43}$	PR
	95%	$V = 170.15 (SD)^{-1.43}$	
Simulation Model	50%	$V = 25.13 (SD)^{-0.93}$	PS
	95%	$V = 14.40 (SD)^{-0.66}$	
Case based Model	50%	$V = 64.65 (SD)^{-1.33}$	TB. All
	95%	$V = 169.43 (SD)^{-1.33}$	

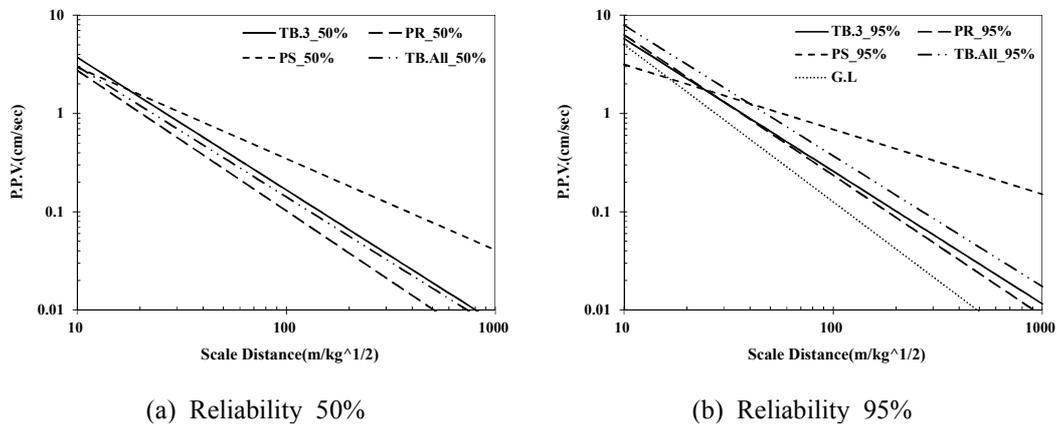


Fig. 6.35 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 3)

거리(Distance)에 따른 지발당 허용 장약량(kg/delay)을 Fig. 6.36에서 비교하였다. 신뢰도 50%에서 동일 거리에 대한 지발당 허용 장약량은 PS가 가장 작고 TB. 3, TB. All, PR 순으로 커진다. 신뢰도 95%에서는 PS가 가장 작고 그 다음 TB. All, TB. 3, PR 순으로 커진다. 이는 허용 진동속도 0.3cm/s에서 지반진동속도 추정식들의 표준발파패턴별 이격거리를 나타내고 있는 Table 6.37(a)에 의하면, 각 발파패턴별 적용한계 거리는 PS가 가장 멀고 TB. 3, TB. All, PR 순으로 작아지는 것이 확인되고, Table 6.37(b)에 의하면 각 발파패턴별 적용한계 거리는 PS가 가장 멀고 TB. All, TB. 3, PR 순으로 작아지는 것이 확인된다.

그리고, 시험발파 No.3(TB. 3)에 대한 추정 모델들의 민감도 분석결과는 Table 6.38에서와 같이 기준치인 TB. 3에 대해 오차율을 뺀 적합률(Relevance ratio)로 확인하였다. 적합률은 표준발파패턴별 이격거리에 대해 TB.3\_50% 대비 PR은 73%, PS는 55%, TB\_All은 88%이고 TB.3\_95%에 대비해서 PR은 94%, PS는 25%, TB\_All은 69%의 수준이 확인되었다.

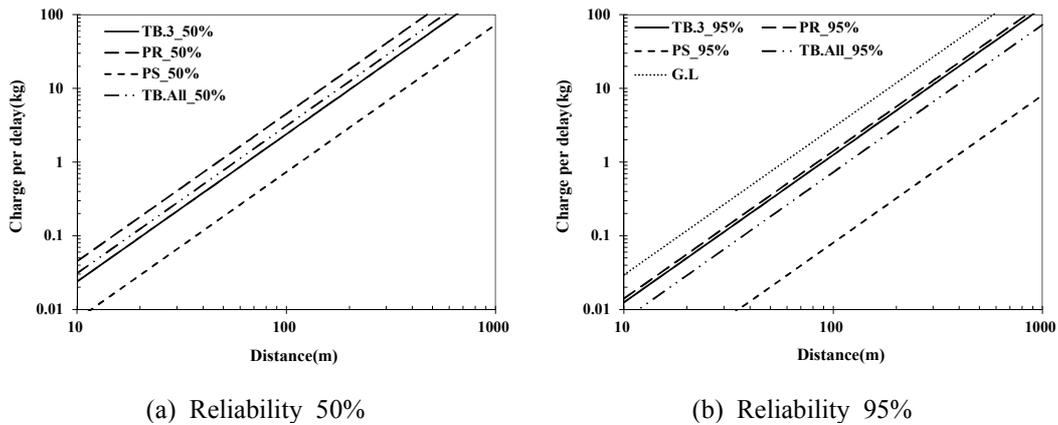


Fig. 6.36 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 3)

Table 6.37 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (TB. 3)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)			
		TB.3_50%	PR_50%	PS_50%	TB.All_50%
I	0.125	22.9	16.6	41.3	20.1
II	0.5	45.7	33.3	82.7	40.2
III	1.6	81.8	59.5	147.9	71.9
IV	5.0	144.6	105.2	261.4	127.0
V	15.0	250.5	182.2	452.8	220.0
VI	15 Above				

(a) Reliability 50%

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)				
		G.L	TB.3_95%	PR_95%	PS_95%	TB.All_95%
I	0.125	20.6	31.6	29.8	124.7	41.5
II	0.5	41.2	63.2	59.6	249.4	82.9
III	1.6	73.6	113.1	106.6	446.1	148.3
IV	5.0	130.1	200.0	188.4	788.5	262.2
V	15.0	225.4	346.4	326.4	1365.8	454.1
VI	15 Above					

(b) Reliability 95%

Table 6.38 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 3)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Relevance ratio(%)					
		$1 - \left  \frac{TB-PR}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB-PS}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB-TB.A}{TB} \right $	
		50%	95%	50%	95%	50%	95%
I	0.125	73	94	55	25	88	69
II	0.5						
III	1.6						
IV	5.0						
V	15.0						

#### 6.5.4 시험발파 No. 4

##### 6.5.4.1 추정 모델의 변수 설정

회귀 모델과 시뮬레이션 모델의 알고리즘은 동일하기 때문에 각 변수들의 입력조건은 동일하다. 모델의 입력변수는 네 가지로 지반 전단파속도( $V_s$ ), 천공장(Drilling length), 지발당 장력량(Weight), SRSD를 데이터마이닝 과정을 거쳐 독립변수로 입

력하여 종속변수인 지반진동속도 PPV(cm/s)를 산출한다.

각 변수들의 입력값은 Table 6.39에서와 같이 발파패턴별로 다른 조건을 평균하여 현장의 대표값으로 사용한 세 가지 변수의 고정값과 입력값이 변동되는 변수 SRSD : 5 ~ 500(변형값 5.95 ~ -0.051)의 변동값을 모델에 활용하였다.

Table 6.39 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 4)

Variable	Unit	Blast Type			Mean	Transformation
		III	IV	V		
Drilling length	m	2.7	3.4	3.4	3.17	0.397
Weight	kg/delay	1.0	3.0	6.0	3.33	0.290
$V_s$	m/sec	539 ~ 577			558	0.169

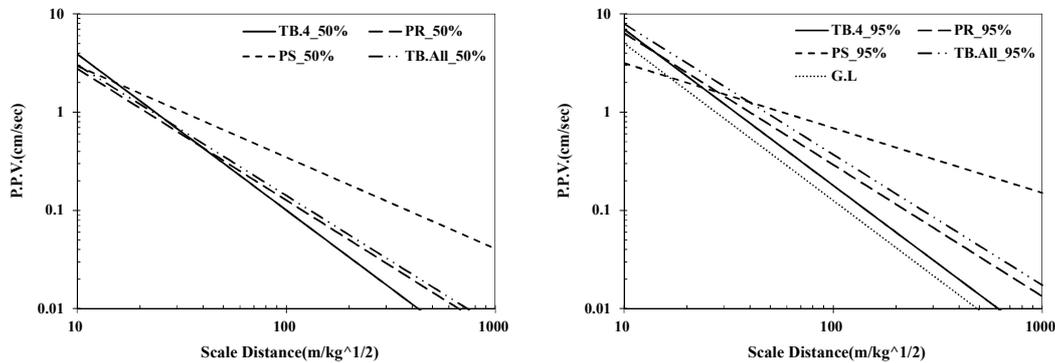
#### 6.5.4.2 시험발파 No.4에 대한 추정 모델의 민감도 분석

각 모델과 시험발파 No.4의 지반진동속도 추정식은 Table 6.40과 같다. 우선 발파 진동상수 K를 비교해 보면 TB. 4의 K가 신뢰도 50%에서 152.09로 가장 크고 그 다음 TB. All, PR, PS 순이다. 그리고 신뢰도 95%에서는 TB. 4의 K가 271.73으로 크고 TB. All, PR, PS 순이다.

그리고 Fig. 6.37에서 환산거리(SRSD)에 따른 지반진동속도를 비교해 보면 신뢰도 50%에서 TB. 4, PR, TB. All, PS 순으로 진동속도를 크게 예측하고 PR과 TB.All은 유사한 수준이며, 신뢰도 95%에서는 TB. 4, PR, TB. All, PS 순으로 진동속도를 크게 예측하고 TB. 4에 비해 PR과 TB. All은 원거리로 갈수록 감쇠가 상대적으로 작고, PS는 원거리에서 매우 큰 지반진동속도를 보이고 있다.

Table 6.40 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 4)

Division	Reliability	Predictive Equation	Remark
Test Blast No.4	50%	$V = 152.09 (SD)^{-1.59}$	TB. 4
	95%	$V = 271.73 (SD)^{-1.59}$	
Regression Model	50%	$V = 60.68 (SD)^{-1.34}$	PR
	95%	$V = 139.62 (SD)^{-1.34}$	
Simulation Model	50%	$V = 25.13 (SD)^{-0.93}$	PS
	95%	$V = 14.40 (SD)^{-0.66}$	
Case based Model	50%	$V = 64.65 (SD)^{-1.33}$	TB. All
	95%	$V = 169.43 (SD)^{-1.33}$	



(a) Reliability 50%

(b) Reliability 95%

Fig. 6.37 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 4)

거리(Distance)에 따른 지발당 허용 장약량(kg/delay)을 Fig. 6.38에서 비교하였다. 신뢰도 50%에서 동일 거리에 대한 지발당 허용 장약량은 PS가 가장 작고 TB. All, PR, TB. 4 순으로 커진다. 신뢰도 95%에서는 PS가 가장 작고 그 다음 TB.All, PR, TB. 4 순으로 커진다. 이는 허용 진동속도 0.3cm/s에서 지반진동속도 추정식들의 표준발파패턴별 이격거리를 나타내고 있는 Table 6.41(a)에 의하면, 각 발파패턴별 적용한계 거리는 PS가 가장 멀고 TB. All, PR, TB. 4 순으로 작아지는 것이 확인되고, Table 6.41(b)에 의하면 각 발파패턴별 적용한계 거리는 PS가 가장 멀고 TB. All, PR, TB. 4 순으로 작아지는 것이 확인된다.

그리고, 시험발파 No.4(TB.4)에 대한 추정 모델들의 민감도 분석결과는 Table 6.42

에서와 같이 기준치인 TB. 4에 대해 오차율을 뺀 적합률(Relevance ratio)로 확인하였다. 적합률은 표준발파패턴별 이격거리에 대해 TB.4\_50% 대비 PR은 95%, PS는 43%, TB\_All은 87%이고 TB.4\_95%에 대비해서 PR은 65%, PS는 21%, TB\_All은 38%의 수준이 확인되었다.

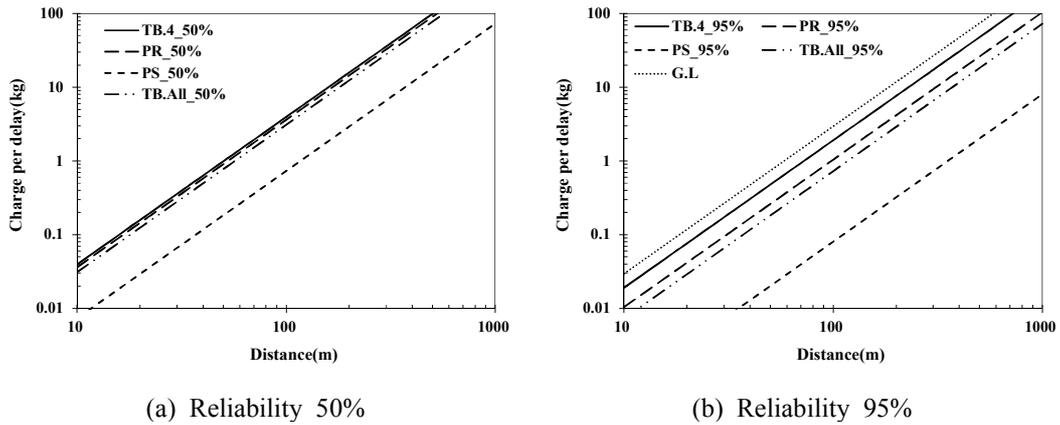


Fig. 6.38 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 4)

Table 6.41 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (TB. 4)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)			
		TB.4_50%	PR_50%	PS_50%	TB.All_50%
I	0.125	17.8	18.6	41.3	20.1
II	0.5	35.5	37.2	82.7	40.2
III	1.6	63.6	66.5	147.9	71.9
IV	5.0	112.4	117.6	261.4	127.0
V	15.0	194.7	203.7	452.8	220.0
VI	15 Above				

(a) Reliability 50%

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)				
		G.L	TB.4_95%	PR_95%	PS_95%	TB.All_95%
I	0.125	20.6	25.6	34.6	124.7	41.5
II	0.5	41.2	51.2	69.2	249.4	82.9
III	1.6	73.6	91.6	123.9	446.1	148.3
IV	5.0	130.1	161.9	219.0	788.5	262.2
V	15.0	225.4	280.4	379.3	1365.8	454.1
VI	15 Above					

(b) Reliability 95%

Table 6.42 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 4)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Relevance ratio(%)					
		$1 - \left  \frac{TB-PR}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB-PS}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB-TB.A}{TB} \right $	
		50%	95%	50%	95%	50%	95%
I	0.125	95	65	43	21	87	38
II	0.5						
III	1.6						
IV	5.0						
V	15.0						

### 6.5.5 시험발파 No. 5

#### 6.5.5.1 추정 모델의 변수 설정

회귀 모델과 시뮬레이션 모델의 알고리즘은 동일하기 때문에 각 변수들의 입력조건은 동일하다. 모델의 입력변수는 네 가지로 지반 전단파속도( $V_s$ ), 천공장(Drilling length), 지발당 장력량(Weight), SRSD를 데이터마이닝 과정을 거쳐 독립변수로 입력하여 종속변수인 지반진동속도 PPV(cm/s)를 산출한다.

각 변수들의 입력값은 Table 6.43에서와 같이 발파패턴별로 다른 조건을 평균하여 현장의 대표값으로 사용한 세 가지 변수의 고정값과 입력값이 변동되는 변수 SRSD : 5 ~ 500(변형값 5.95 ~ -0.051)의 변동값을 모델에 활용하였다.

Table 6.43 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 5)

Variable	Unit	Blast Type				Mean	Transformation
		I	III	IV	IV		
Drilling length	m	1.5	2.7	3.4	3.4	2.75	0.215
Weight	kg/delay	0.25	1.0	4.0	3.0	2.06	0.263
$V_s$	m/sec	545 ~ 587				569	0.164

### 6.5.5.2 시험발파 No.5에 대한 추정 모델의 민감도 분석

각 모델과 시험발파 No.5의 지반진동속도 추정식은 Table 6.44과 같다. 우선 발파 진동상수 K를 비교해 보면 TB. All의 K가 신뢰도 50%에서 64.65로 가장 크고 그 다음 PR, PS, TB. 5 순이다. 그리고 신뢰도 95%에서는 TB. All의 K가 169.43으로 크고 PR, TB.5, PS 순이다.

그리고 Fig. 6.39에서 환산거리(SRSD)에 따른 지반진동속도를 비교해 보면 신뢰도 50%에서 TB. 5, TB. All, PR, PS 순으로 진동속도를 크게 예측하고 PR과 TB.All은 유사한 수준이며, 신뢰도 95%에서는 TB. 5, TB. All, PR, PS 순으로 진동속도를 크게 예측하고 TB. 5에 비해 PR과 TB. All은 근거리에서 지반진동속도를 크게 예측하고 원거리로 갈수록 감쇠가 상대적으로 작고, PS는 원거리에서 매우 큰 지반진동속도를 보이고 있다.

Table 6.44 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 5)

Division	Reliability	Predictive Equation	Remark
Test Blast No.5	50%	$V = 17.51 (SD)^{-1.13}$	TB. 5
	95%	$V = 34.02 (SD)^{-1.13}$	
Regression Model	50%	$V = 61.89 (SD)^{-1.30}$	PR
	95%	$V = 142.40 (SD)^{-1.30}$	
Simulation Model	50%	$V = 25.13 (SD)^{-0.93}$	PS
	95%	$V = 14.40 (SD)^{-0.66}$	
Case based Model	50%	$V = 64.65 (SD)^{-1.33}$	TB. All
	95%	$V = 169.43 (SD)^{-1.33}$	

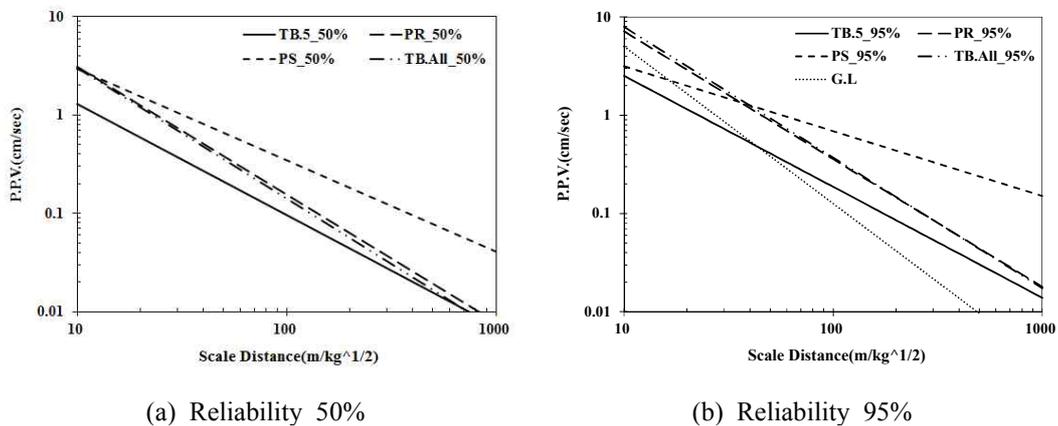


Fig. 6.39 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 5)

거리(Distance)에 따른 지발당 허용 장약량(kg/delay)을 Fig. 6.40에서 비교하였다. 신뢰도 50%에서 동일 거리에 대한 지발당 허용 장약량은 PS가 가장 작고 PR, TB, All, TB. 5 순으로 커진다. 신뢰도 95%에서는 PS가 가장 작고 그 다음 TB, All, PR, TB. 5 순으로 커진다. 이는 허용 진동속도 0.3cm/s에서 지반진동속도 추정식들의 표준발파패턴별 이격거리를 나타내고 있는 Table 6.45(a)에 의하면, 각 발파패턴별 적용한계 거리는 PS가 가장 멀고 PR, TB, All, TB. 5 순으로 작아지는 것이 확인되고, Table 6.45(b)에 의하면 각 발파패턴별 적용한계 거리는 PS가 가장 멀고 TB, All, PR, TB. 5 순으로 작아지는 것이 확인된다.

그리고, 시험발파 No.5(TB. 5)에 대한 추정 모델들의 민감도 분석결과는 Table 6.46에서와 같이 기준치인 TB. 5에 대해 오차율을 뺀 적합률(Relevance ratio)로 확인하였다. 적합률은 표준발파패턴별 이격거리에 대해 TB.5\_50% 대비 PR은 35%, PS는 31%, TB\_All은 45%이고 TB.5\_95%에 대비해서 PR은 26%, PS는 19%, TB\_All은 22%의 수준이 확인되었다.

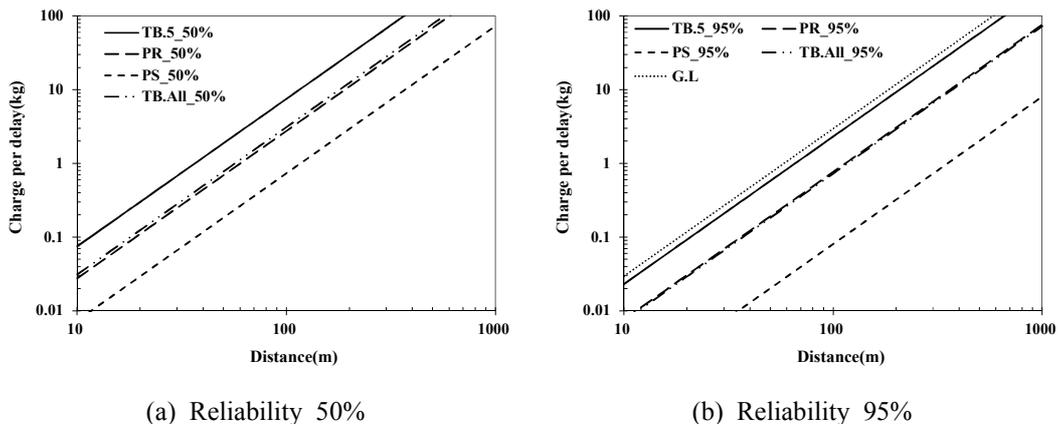


Fig. 6.40 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 5)

Table 6.45 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (TB. 5)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)			
		TB.5_50%	PR_50%	PS_50%	TB.All_50%
I	0.125	12.9	21.3	41.3	20.1
II	0.5	25.9	42.6	82.7	40.2
III	1.6	46.2	76.3	147.9	71.9
IV	5.0	81.7	134.9	261.4	127.0
V	15.0	141.6	233.6	452.8	220.0
VI	15 Above				

(a) Reliability 50%

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)				
		G.L	TB.5_95%	PR_95%	PS_95%	TB.All_95%
I	0.125	20.6	23.3	40.5	124.7	41.5
II	0.5	41.2	46.5	81.0	249.4	82.9
III	1.6	73.6	83.2	144.8	446.1	148.3
IV	5.0	130.1	147.1	256.0	788.5	262.2
V	15.0	225.4	254.9	443.4	1365.8	454.1
VI	15 Above					

(b) Reliability 95%

Table 6.46 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 5)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Relevance ratio(%)					
		$1 - \left  \frac{TB-PR}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB-PS}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB-TB.A}{TB} \right $	
		50%	95%	50%	95%	50%	95%
I	0.125	35	26	31	19	45	22
II	0.5						
III	1.6						
IV	5.0						
V	15.0						

### 6.5.6 시험발파 No. 6

#### 6.5.6.1 추정 모델의 변수 설정

회귀 모델과 시뮬레이션 모델의 알고리즘은 동일하기 때문에 각 변수들의 입력조건은 동일하다. 모델의 입력변수는 네 가지로 지반 전단파속도( $V_s$ ), 천공장(Drilling length), 지발당 장력량(Weight), SRSD를 데이터마이닝 과정을 거쳐 독립변수로 입

력하여 종속변수인 지반진동속도 PPV(cm/s)를 산출한다.

각 변수들의 입력값은 Table 6.47에서와 같이 발파패턴별로 다른 조건을 평균하여 현장의 대표값으로 사용한 세 가지 변수의 고정값과 입력값이 변동되는 변수 SRSD : 5 ~ 500(변형값 5.95 ~ -0.051)의 변동값을 모델에 활용하였다.

Table 6.47 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 6)

Variable	Unit	Blast Type					Mean	Transformation
		I	III	IV	IV	IV		
Drilling length	m	1.5	2.7	3.4	3.4	3.4	2.88	0.271
Weight	kg/delay	0.25	1.0	4.5	4.0	3.0	2.55	0.278
$V_s$	m/sec	537 ~ 540					539	0.179

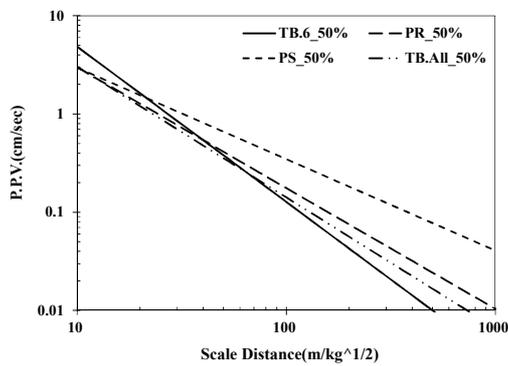
#### 6.5.6.2 시험발파 No.6에 대한 추정 모델의 민감도 분석

각 모델과 시험발파 No.6의 지반진동속도 추정식은 Table 6.48과 같다. 우선 발파 진동상수 K를 비교해 보면 TB. 6의 K가 신뢰도 50%에서 184.10로 가장 크고 그 다음 TB. All, PR, PS 순이다. 그리고 신뢰도 95%에서는 TB. 6의 K가 306.89으로 크고 TB. All, PR, PS 순이다.

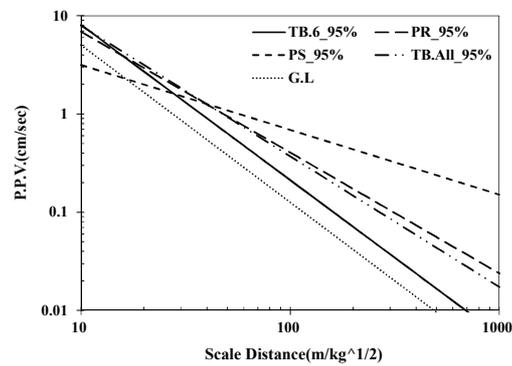
그리고 Fig. 6.41에서 환산거리(SRSD)에 따른 지반진동속도를 비교해 보면 신뢰도 50%에서 TB.6, TB. All, PR, PS 순으로 진동속도를 크게 예측하고 근거리에서 TB.6의 진동속도가 가장 크나 원거리에서 작아진다. 신뢰도 95%에서는 TB. 6, TB. All, PR, PS 순으로 진동속도를 크게 예측하고 TB. 6에 비해 TB. All과 PR은 원거리로 갈수록 감쇠가 상대적으로 작고, PS는 원거리에서 매우 큰 지반진동속도를 보이고 있다.

Table 6.48 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 6)

Division	Reliability	Predictive Equation	Remark
Test Blast No.6	50%	$V = 184.10 (SD)^{-1.58}$	TB. 6
	95%	$V = 306.89 (SD)^{-1.58}$	
Regression Model	50%	$V = 50.76 (SD)^{-1.23}$	PR
	95%	$V = 116.79 (SD)^{-1.23}$	
Simulation Model	50%	$V = 25.13 (SD)^{-0.93}$	PS
	95%	$V = 14.40 (SD)^{-0.66}$	
Case based Model	50%	$V = 64.65 (SD)^{-1.33}$	TB. All
	95%	$V = 169.43 (SD)^{-1.33}$	



(a) Reliability 50%



(b) Reliability 95%

Fig. 6.41 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 6)

거리(Distance)에 따른 지발당 허용 장약량(kg/delay)을 Fig. 6.42에서 비교하였다. 신뢰도 50%에서 동일 거리에 대한 지발당 허용 장약량은 PS가 가장 작고 PR, TB. 6, TB. All 순으로 커진다. 신뢰도 95%에서는 PS가 가장 작고 그 다음 PR, TB. All, TB. 6 순으로 커진다. 이는 허용 진동속도 0.3cm/s에서 지반진동속도 추정식들의 표준발파패턴별 이격거리를 나타내고 있는 Table 6.49(a)에 의하면, 각 발파패턴별 적용한계 거리는 PS가 가장 멀고 PR, TB. 6, TB. All 순으로 작아지는 것이 확인되고, Table 9.49(b)에 의하면 각 발파패턴별 적용한계 거리는 PS가 가장 멀고 PR, TB. All, TB. 6 순으로 작아지는 것이 확인된다.

그리고, 시험발파 No.6(TB. 6)에 대한 추정 모델들의 민감도 분석결과는 Table

6.50에서와 같이 기준치인 TB. 6에 대해 오차율을 뺀 적합률(Relevance ratio)로 확인하였다. 적합률은 표준발파패턴별 이격거리에 대해 TB. 6\_50% 대비 PR은 89%, PS는 50%, TB\_All은 98%이고 TB.6\_95%에 대비해서 PR은 41%, PS는 23%, TB\_All은 54%의 수준이 확인되었다.

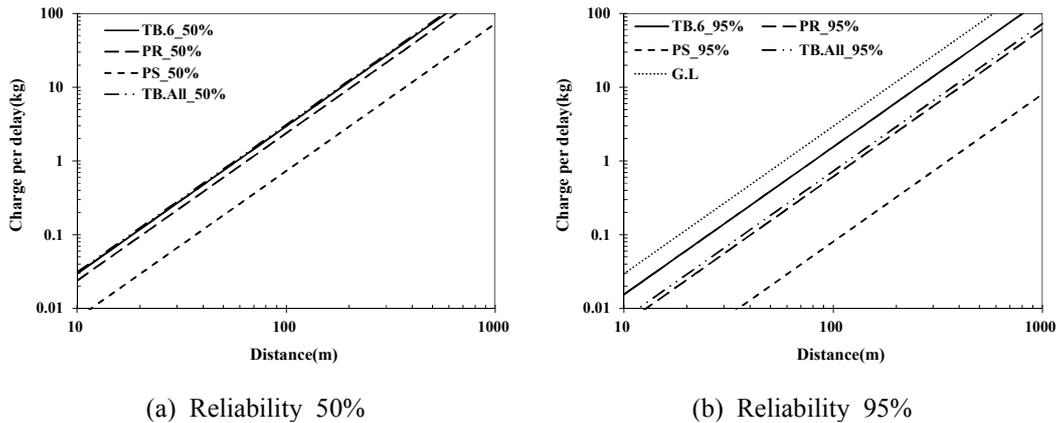


Fig. 6.42 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 6)

Table 6.49 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (TB. 6)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)			
		TB.6_50%	PR_50%	PS_50%	TB.All_50%
I	0.125	20.6	22.9	41.3	20.1
II	0.5	41.1	45.8	82.7	40.2
III	1.6	73.5	82.0	147.9	71.9
IV	5.0	130.0	144.9	261.4	127.0
V	15.0	225.2	251.0	452.8	220.0
VI	15 Above				

(a) Reliability 50%

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)				
		G.L	TB.6_95%	PR_95%	PS_95%	TB.All_95%
I	0.125	20.6	28.4	45.1	124.7	41.5
II	0.5	41.2	56.8	90.2	249.4	82.9
III	1.6	73.6	101.6	161.4	446.1	148.3
IV	5.0	130.1	179.7	285.4	788.5	262.2
V	15.0	225.4	311.2	494.3	1365.8	454.1
VI	15 Above					

(b) Reliability 95%

Table 6.50 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 6)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Relevance ratio(%)					
		$1 - \left  \frac{TB-PR}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB-PS}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB-TB.A}{TB} \right $	
		50%	95%	50%	95%	50%	95%
I	0.125	89	41	50	23	98	54
II	0.5						
III	1.6						
IV	5.0						
V	15.0						

### 6.5.7 시험발파 No. 7

#### 6.5.7.1 추정 모델의 변수 설정

회귀 모델과 시뮬레이션 모델의 알고리즘은 동일하기 때문에 각 변수들의 입력조건은 동일하다. 모델의 입력변수는 네 가지로 지반 전단파속도( $V_s$ ), 천공장(Drilling length), 지발당 장력량(Weight), SRSD를 데이터마이닝 과정을 거쳐 독립변수로 입력하여 종속변수인 지반진동속도 PPV(cm/s)를 산출한다.

각 변수들의 입력값은 Table 6.51에서와 같이 발파패턴별로 다른 조건을 평균하여 현장의 대표값으로 사용한 세 가지 변수의 고정값과 입력값이 변동되는 변수 SRSD : 5 ~ 500(변형값 5.95 ~ -0.051)의 변동값을 모델에 활용하였다.

Table 6.51 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 7)

Variable	Unit	Blast Type						Mean	Transformation
		I	III	IV	V	V	V		
Drilling length	m	1.5	2.7	3.4	3.4	3.4	3.4	2.97	0.309
Weight	kg/delay	0.25	1.0	4.0	8.0	8.0	8.0	4.88	0.344
$V_s$	m/sec	608 ~ 690						644	0.131

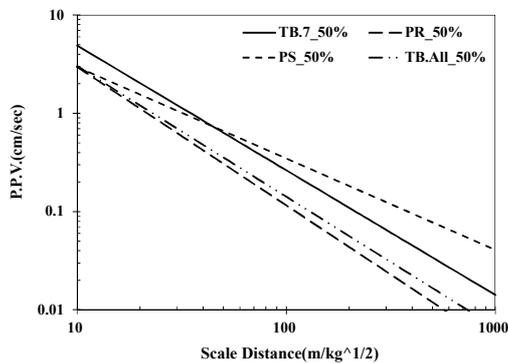
### 6.5.7.2 시험발파 No.7에 대한 추정 모델의 민감도 분석

각 모델과 시험발파 No.7의 지반진동속도 추정식은 Table 6.52과 같다. 우선 발파 진동상수 K를 비교해 보면 TB. 7의 K가 신뢰도 50%에서 91.24로 가장 크고 그 다음 PR, TB. All, PS 순이다. 그리고 신뢰도 95%에서는 TB. 7의 K가 226.79으로 크고 PR, TB. All, PS 순이다.

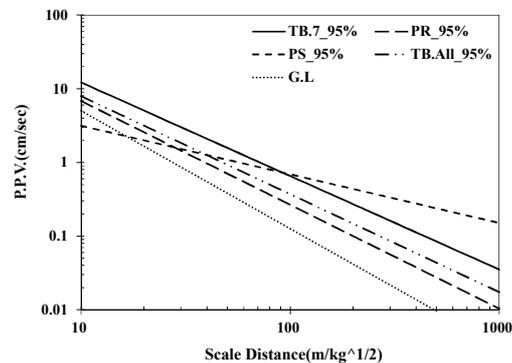
그리고 Fig. 6.43에서 환산거리(SRSD)에 따른 지반진동속도를 비교해 보면 신뢰도 50%에서 PR, TB. All, TB. 7, PS 순으로 진동속도를 크게 예측하고 근거리에서 TB.7의 진동속도가 가장 크다. 신뢰도 95%에서는 PR, TB. All, TB. 7, PS 순으로 진동속도를 크게 예측하고 PR, TB. All 그리고 TB. 7은 근거리와 원거리에서 유사한 진동속도 감쇠를 보이고, PS는 원거리에서 큰 지반진동속도를 보이고 있다.

Table 6.52 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 7)

Division	Reliability	Predictive Equation	Remark
Test Blast No.7	50%	$V = 91.24(SD)^{-1.27}$	TB. 7
	95%	$V = 226.79(SD)^{-1.27}$	
Regression Model	50%	$V = 76.35(SD)^{-1.41}$	PR
	95%	$V = 175.67(SD)^{-1.41}$	
Simulation Model	50%	$V = 25.13(SD)^{-0.93}$	PS
	95%	$V = 14.40(SD)^{-0.66}$	
Case based Model	50%	$V = 64.65(SD)^{-1.33}$	TB. All
	95%	$V = 169.43(SD)^{-1.33}$	



(a) Reliability 50%



(b) Reliability 95%

Fig. 6.43 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 7)

거리(Distance)에 따른 지발당 허용 장약량(kg/delay)을 Fig. 6.44에서 비교하였다. 신뢰도 50%에서 동일 거리에 대한 지발당 허용 장약량은 PS가 가장 작고 TB. 7, TB. All, PR 순으로 커진다. 신뢰도 95%에서는 PS가 가장 작고 그 다음 TB. 7, TB. All, PR 순으로 커진다. 이는 허용 진동속도 0.3cm/s에서 지반진동속도 추정식들의 표준발파패턴별 이격거리를 나타내고 있는 Table 53(a)에 의하면, 각 발파패턴별 적용한계 거리는 PS가 가장 멀고 TB. 7, TB. All, PR 순으로 작아지는 것이 확인되고, Table 6.53(b)에 의하면 각 발파패턴별 적용한계 거리는 PS가 가장 멀고 TB. 7, TB. All, PR 순으로 작아지는 것이 확인된다.

그리고, 시험발파 No.7(TB. 7)에 대한 추정 모델들의 민감도 분석결과는 Table 00에서와 같이 기준치인 TB. 7에 대해 오차율을 뺀 적합률(Relevance ratio)로 확인하였다. 적합률은 표준발파패턴별 이격거리에 대해 TB.7\_50% 대비 PR은 56%, PS는 77%, TB\_All은 63%이고 TB.7\_95%에 대비해서 PR은 50%, PS는 52%, TB\_All은 63%의 수준이 확인되었다.

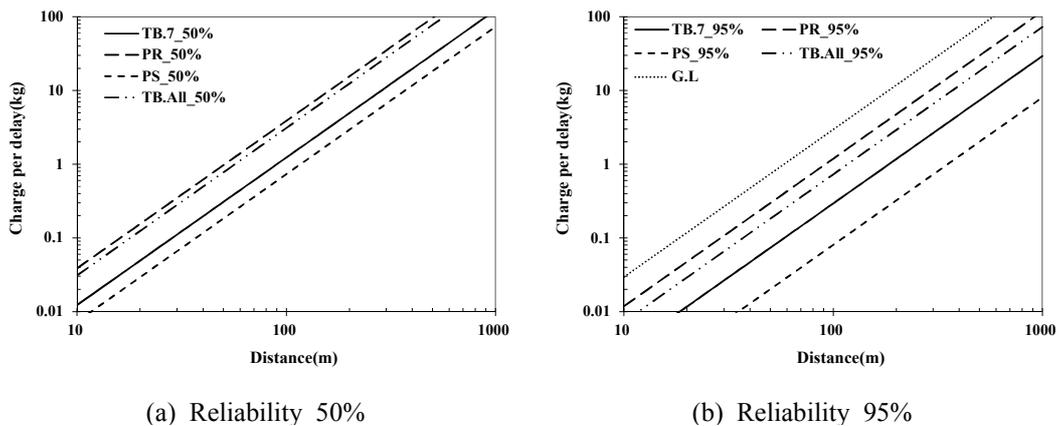


Fig. 6.44 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 7)

Table 6.53 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (TB. 7)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)			
		TB.7_50%	PR_50%	PS_50%	TB.All_50%
I	0.125	31.9	18.0	41.3	20.1
II	0.5	63.8	35.9	82.7	40.2
III	1.6	114.1	64.3	147.9	71.9
IV	5.0	201.7	113.7	261.4	127.0
V	15.0	349.3	196.9	452.8	220.0
VI	15 Above				

(a) Reliability 50%

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)				
		G.L	TB.7_95%	PR_95%	PS_95%	TB.All_95%
I	0.125	20.6	65.3	32.5	124.7	41.5
II	0.5	41.2	130.6	64.9	249.4	82.9
III	1.6	73.6	233.7	116.1	446.1	148.3
IV	5.0	130.1	413.1	205.3	788.5	262.2
V	15.0	225.4	715.5	355.5	1365.8	454.1
VI	15 Above					

(b) Reliability 95%

Table 6.54 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 7)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Relevance ratio(%)					
		$1 - \left  \frac{TB-PR}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB-PS}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB-TB.A}{TB} \right $	
		50%	95%	50%	95%	50%	95%
I	0.125	56	50	77	52	63	63
II	0.5						
III	1.6						
IV	5.0						
V	15.0						

### 6.5.8 시험발파 No. 8

#### 6.5.8.1 추정 모델의 변수 설정

회귀 모델과 시뮬레이션 모델의 알고리즘은 동일하기 때문에 각 변수들의 입력조건은 동일하다. 모델의 입력변수는 네 가지로 지반 전단파속도( $V_s$ ), 천공장(Drilling

length), 지발당 장략량(Weight), SRSD를 데이터마이닝 과정을 거쳐 독립변수로 입력하여 종속변수인 지반진동속도 PPV(cm/s)를 산출한다.

각 변수들의 입력값은 Table 6.55에서와 같이 발파패턴별로 다른 조건을 평균하여 현장의 대표값으로 사용한 세 가지 변수의 고정값과 입력값이 변동되는 변수 SRSD : 5 ~ 500(변형값 5.95 ~ -0.051)의 변동값을 모델에 활용하였다.

Table 6.55 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 8)

Variable	Unit	Blast Type						Mean	Transformation
		II	III	IV	V	V	IV		
Drilling length	m	2.0	2.7	3.4	3.4	3.4	3.4	3.05	0.346
Weight	kg/delay	0.375	1.0	3.0	6.0	6.0	3.0	3.23	0.323
$V_s$	m/sec	694 ~ 801						762	0.092

#### 6.5.8.2 시험발파 No.8에 대한 추정 모델의 민감도 분석

각 모델과 시험발파 No.8의 지반진동속도 추정식은 Table 6.56과 같다. 우선 발파 진동상수 K를 비교해 보면 PR의 K가 신뢰도 50%에서 70.91로 가장 크고 그 다음 TB. All, TB. 8, PS 순이다. 그리고 신뢰도 95%에서는 TB. All의 K가 169.43으로 크고 PR, TB. 8, PS 순이다.

그리고 Fig. 6.45에서 환산거리(SRSD)에 따른 지반진동속도를 비교해 보면 신뢰도 50%에서 TB. 8, PR, TB. All, PS 순으로 진동속도를 크게 예측하고 신뢰도 95%에서는 TB. 8, PR, TB. All, PS 순으로 진동속도를 크게 예측하고 TB. 8은 진동속도의 감쇠가 적어 원거리로 갈수록 상대적으로 지반진동속도가 커지는 양상을 보이고, PS는 원거리에서 큰 지반진동속도를 보이고 있다.

Table 6.56 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 8)

Division	Reliability	Predictive Equation	Remark
Test Blast No.8	50%	$V = 27.74 (SD)^{-1.27}$	TB. 8
	95%	$V = 72.17 (SD)^{-1.27}$	
Regression Model	50%	$V = 70.91 (SD)^{-1.43}$	PR
	95%	$V = 163.16 (SD)^{-1.43}$	
Simulation Model	50%	$V = 25.13 (SD)^{-0.93}$	PS
	95%	$V = 14.40 (SD)^{-0.66}$	
Case based Model	50%	$V = 64.65 (SD)^{-1.33}$	TB. All
	95%	$V = 169.43 (SD)^{-1.33}$	

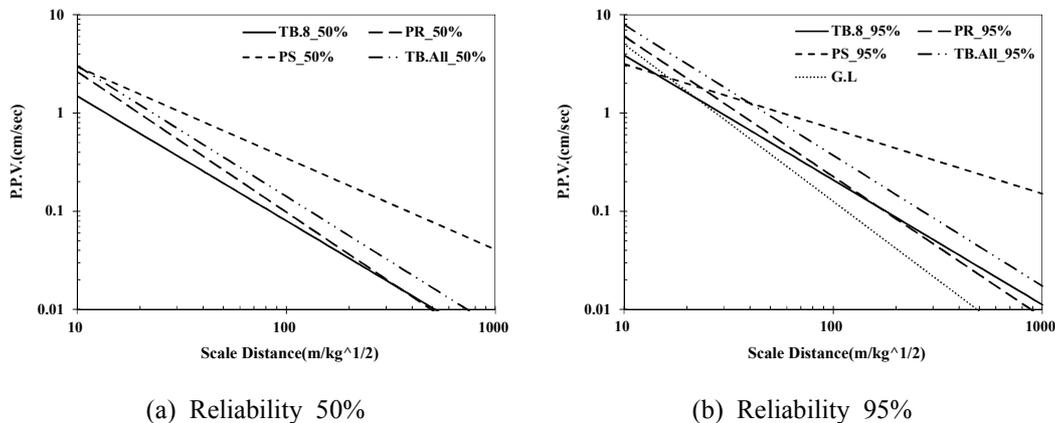


Fig. 6.45 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 8)

거리(Distance)에 따른 지발당 허용 장약량(kg/delay)을 Fig. 6.46에서 비교하였다. 신뢰도 50%에서 동일 거리에 대한 지발당 허용 장약량은 PS가 가장 작고 TB. All, PR, TB. 8 순으로 커진다. 신뢰도 95%에서는 PS가 가장 작고 그 다음 TB. All, PR, TB. 8 순으로 커진다. 이는 허용 진동속도 0.3cm/s에서 지반진동속도 추정식들의 표준발파패턴별 이격거리를 나타내고 있는 Table 6.57(a)에 의하면, 각 발파패턴별 적용한계 거리는 PS가 가장 멀고 TB. All, PR, TB. 8 순으로 작아지는 것이 확인되고, Table 6.57(b)에 의하면 각 발파패턴별 적용한계 거리는 PS가 가장 멀고 TB. All, PR, TB. 8 순으로 작아지는 것이 확인된다.

그리고, 시험발파 No.8(TB. 8)에 대한 추정 모델들의 민감도 분석결과는 Table 6.58에서와 같이 기준치인 TB. 8에 대해 오차율을 뺀 적합률(Relevance ratio)로 확인하였다. 적합률은 표준발파패턴별 이격거리에 대해 TB.8\_50% 대비 PR은 71%, PS는 30%, TB\_All은 39%이고 TB.8\_95%에 대비해서 PR은 91%, PS는 21%, TB\_All은 44%의 수준이 확인되었다.

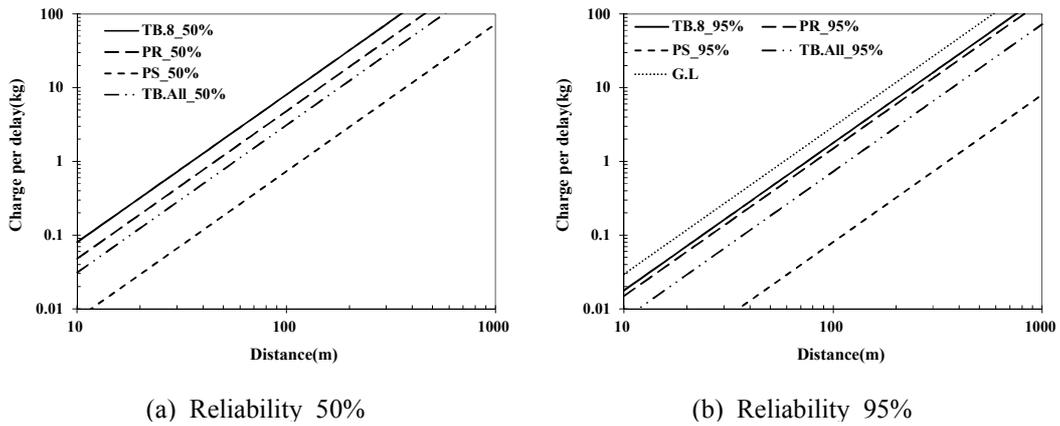


Fig. 6.46 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 8)

Table 6.57 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (TB. 8)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)			
		TB.8_50%	PR_50%	PS_50%	TB.All_50%
I	0.125	12.5	16.2	41.3	20.1
II	0.5	25.0	32.3	82.7	40.2
III	1.6	44.7	57.8	147.9	71.9
IV	5.0	79.0	102.2	261.4	127.0
V	15.0	136.8	177.0	452.8	220.0
VI	15 Above				

(a) Reliability 50%

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)				
		G.L	TB.8_95%	PR_95%	PS_95%	TB.All_95%
I	0.125	20.6	26.5	28.9	124.7	41.5
II	0.5	41.2	53.0	57.9	249.4	82.9
III	1.6	73.6	94.9	103.5	446.1	148.3
IV	5.0	130.1	167.7	183.0	788.5	262.2
V	15.0	225.4	290.4	316.9	1365.8	454.1
VI	15 Above					

(b) Reliability 95%

Table 6.58 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 8)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Relevance ratio(%)					
		$1 - \left  \frac{TB - PR}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB - PS}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB - TB.A}{TB} \right $	
		50%	95%	50%	95%	50%	95%
I	0.125	71	91	30	21	39	44
II	0.5						
III	1.6						
IV	5.0						
V	15.0						

### 6.5.9 시험발파 No. 9

#### 6.5.9.1 추정 모델의 변수 설정

회귀 모델과 시뮬레이션 모델의 알고리즘은 동일하기 때문에 각 변수들의 입력조건은 동일하다. 모델의 입력변수는 네 가지로 지반 전단파속도( $V_s$ ), 천공장(Drilling length), 지발당 장력량(Weight), SRSD를 데이터마이닝 과정을 거쳐 독립변수로 입력하여 종속변수인 지반진동속도 PPV(cm/s)를 산출한다.

각 변수들의 입력값은 Table 6.59에서와 같이 발파패턴별로 다른 조건을 평균하여 현장의 대표값으로 사용한 세 가지 변수의 고정값과 입력값이 변동되는 변수 SRSD : 5 ~ 500(변형값 5.95 ~ -0.051)의 변동값을 모델에 활용하였다.

Table 6.59 The Input Variables Setting of the Prediction Model (TB. 9)

Variable	Unit	Blast Type						Mean	Transformation
		II	III	IV	IV	V	V		
Drilling length	m	2.2	2.5	2.7	2.7	2.7	2.7	2.58	0.148
Weight	kg/delay	0.375	1.0	2.5	2.5	5.0	5.0	2.73	0.282
$V_s$	m/sec	676 ~ 1032						920	0.057

### 6.5.9.2 시험발파 No.9에 대한 추정 모델의 민감도 분석

각 모델과 시험발파 No.9의 지반진동속도 추정식은 Table 6.60과 같다. 우선 발파 진동상수 K를 비교해 보면 TB. 9의 K가 신뢰도 50%에서 601.32로 가장 크고 그 다음 TB. All, PR, PS 순이다. 그리고 신뢰도 95%에서는 TB. 9의 K가 997.24로 크고 TB. All, PR, PS 순이다.

그리고 Fig. 6.47에서 환산거리(SRSD)에 따른 지반진동속도를 비교해 보면 신뢰도 50%에서 PR, TB. All, TB. 9, PS 순으로 진동속도를 크게 예측하고 신뢰도 95%에서는 근거리에서 PS, PR, TB. All, TB. 9 순으로 지반진동속도를 크게 예측되고 원거리에서는 TB. 9, PR, TB. All, PS 순으로 지반진동속도가 크게 예측된다. TB. 9는 진동속도의 감쇠가 커 원거리로 갈수록 상대적으로 지반진동속도가 작아지는 양상을 보이고, PS는 원거리에서 매우 큰 지반진동속도를 보이고 있다.

Table 6.60 Prediction Equation of Ground Vibration for Sensitivity Analysis (TB. 9)

Division	Reliability	Predictive Equation	Remark
Test Blast No.9	50%	$V = 601.32 (SD)^{-1.78}$	TB. 9
	95%	$V = 997.24 (SD)^{-1.78}$	
Regression Model	50%	$V = 60.82 (SD)^{-1.34}$	PR
	95%	$V = 139.94 (SD)^{-1.34}$	
Simulation Model	50%	$V = 25.13 (SD)^{-0.93}$	PS
	95%	$V = 14.40 (SD)^{-0.66}$	
Case based Model	50%	$V = 64.65 (SD)^{-1.33}$	TB. All
	95%	$V = 169.43 (SD)^{-1.33}$	

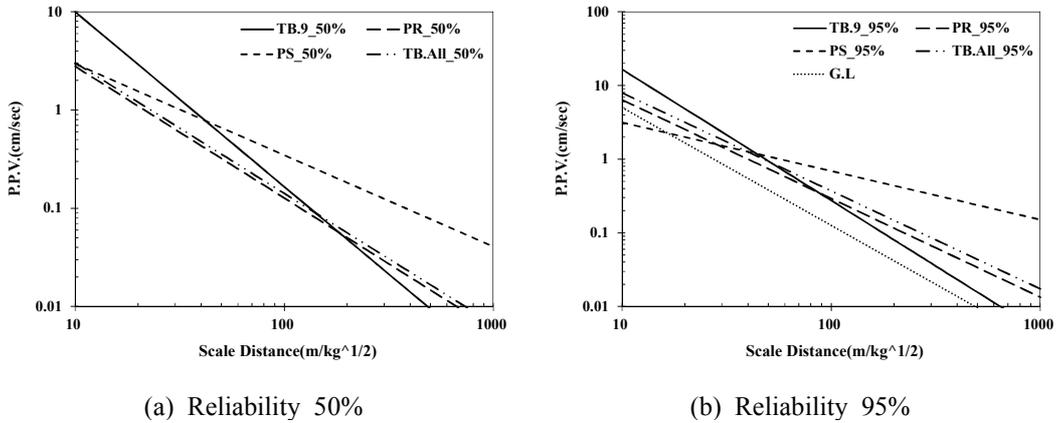
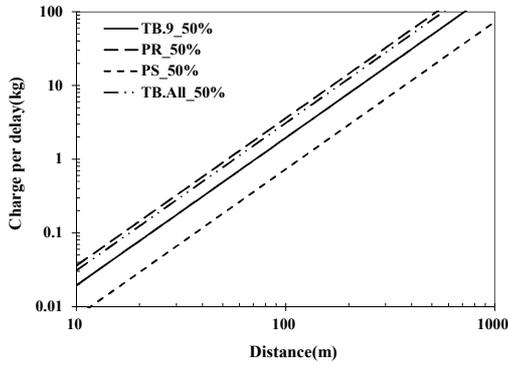


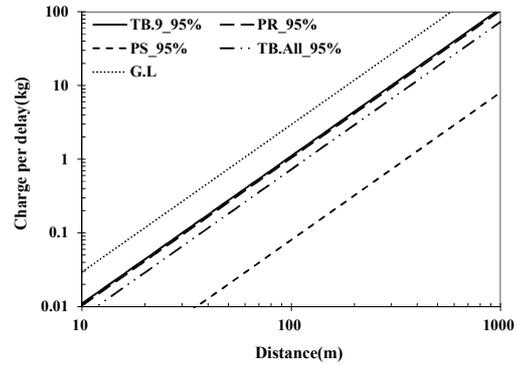
Fig. 6.47 Comparison of Ground Vibration Velocities for Sensitivity Analysis (TB. 9)

거리(Distance)에 따른 지발당 허용 장약량(kg/delay)을 Fig. 6.48에서 비교하였다. 신뢰도 50%에서 동일 거리에 대한 지발당 허용 장약량은 PS가 가장 작고 TB. 9, TB. All, PR 순으로 커진다. 신뢰도 95%에서는 PS가 가장 작고 그 다음 TB. All, PR, TB. 9 순으로 커진다. 이는 허용 진동속도 0.3cm/s에서 지반진동속도 추정식들의 표준발파패턴별 이격거리를 나타내고 있는 Table 6.61(a)에 의하면, 각 발파패턴별 적용한계 거리는 PS가 가장 멀고 TB. 9, TB. All, PR 순으로 작아지는 것이 확인되고, Table 6.61(b)에 의하면 각 발파패턴별 적용한계 거리는 PS가 가장 멀고 TB. All, PR, TB. 9 순으로 작아지는 것이 확인된다.

그리고, 시험발파 No.9(TB. 9)에 대한 추정 모델들의 민감도 분석결과는 Table 6.62에서와 같이 기준치인 TB. 9에 대해 오차율을 뺀 적합률(Relevance ratio)로 확인하였다. 적합률은 표준발파패턴별 이격거리에 대해 TB.9\_50% 대비 PR은 74%, PS는 61%, TB\_All은 79%이고 TB.9\_95%에 대비해서 PR은 97%, PS는 27%, TB\_All은 77%의 수준이 확인되었다.



(a) Reliability 50%



(b) Reliability 95%

Fig. 6.48 Comparison of Charge per Delay for Sensitivity Analysis (TB. 9)

Table 6.61 Separation Distance on Standard Blasting Method of Prediction Equations (TB. 9)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)			
		TB.9_50%	PR_50%	PS_50%	TB.All_50%
I	0.125	25.3	18.6	41.3	20.1
II	0.5	50.6	37.2	82.7	40.2
III	1.6	90.6	66.6	147.9	71.9
IV	5.0	160.2	117.8	261.4	127.0
V	15.0	277.4	204.0	452.8	220.0
VI	15 Above				

(a) Reliability 50%

Blast Type	Charge per delay(kg)	Distance(m)				
		G.L	TB.9_95%	PR_95%	PS_95%	TB.All_95%
I	0.125	20.6	33.6	34.7	124.7	41.5
II	0.5	41.2	67.3	69.4	249.4	82.9
III	1.6	73.6	120.4	124.1	446.1	148.3
IV	5.0	130.1	212.8	219.4	788.5	262.2
V	15.0	225.4	368.6	379.9	1365.8	454.1
VI	15 Above					

(b) Reliability 95%

Table 6.62 Relevance ratio of Separation Distance for the Standard Blasting Pattern (TB. 9)

Blast Type	Charge per delay(kg)	Relevance ratio(%)					
		$1 - \left  \frac{TB-PR}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB-PS}{TB} \right $		$1 - \left  \frac{TB-TB.A}{TB} \right $	
		50%	95%	50%	95%	50%	95%
I	0.125	74	97	61	27	79	77
II	0.5						
III	1.6						
IV	5.0						
V	15.0						

## 6.5.10 민감도 분석 결과

### 6.5.10.1 신뢰도 50%의 민감도 분석 결과

다변성 층상구조로 이루어진 지반에서 실시된 9개의 개별 시험발파(TB. 1 ~ 9) 지반 진동속도 추정식에 대해 본 연구를 통해 만들어진 세 가지 모델 회귀 모델(PR), 시뮬레이션 모델(PS), 사례기반 모델(TB. All)을 이용한 민감도 분석을 실시한 결과, 신뢰도 50%에서는 Fig. 6.49과 같다. PR은 개별 지반진동속도 추정식에 대해 적합률이 35 ~ 95%로 평균 75%이고, 확률론적 모델인 PS는 적합률이 30 ~ 77%로 평균 48%이고, TB. All은 39 ~ 98%로 평균 75%이다.

적합률 80%이상을 만족하는 모델들에 대해 살펴보았다. PR은 개별 시험발파 TB. 1, 2, 4, 6의 지반진동속도 추정식을 만족하였다. 변수들의 평균 범위는 천공장 2.88 ~ 3.15m이고 지발당 장약량은 2.30 ~ 3.17kg이며 지반의 전단파 속도는 539 ~ 575cm/s이다. 상부 암과 하부 클링커층의 두께로 확인한 형상비(클링커/암)는 0.38 ~ 0.50이다. 그리고 TB. All은 TB. 1, 2, 3, 4, 6에 대해 적합률 80%이상을 만족하였으며 변수의 범위는 PR과 동일하다.

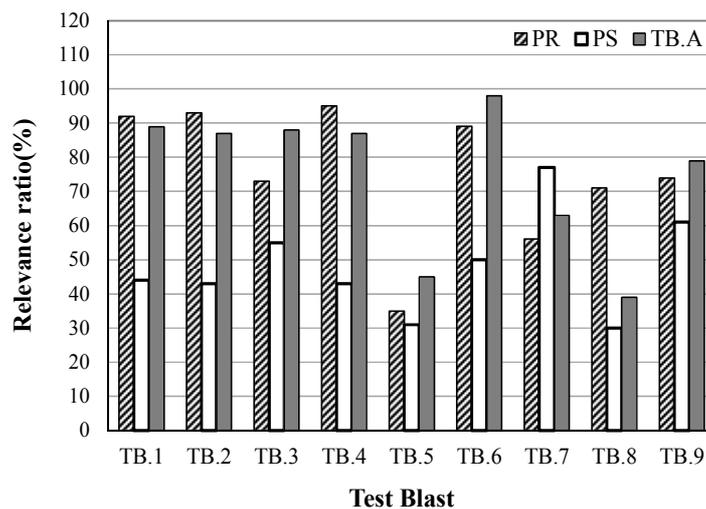


Fig. 6.49 Sensitivity Analysis Result (Reliability 50%)

### 6.5.10.1 신뢰도 95%의 민감도 분석 결과

다변성 층상구조로 이루어진 지반에서 실시된 9개의 개별 시험발파(TB. 1 ~ 9) 지반 진동속도 추정식에 대해 본 연구를 통해 만들어진 세 가지 모델 회귀 모델(PR), 시물레이션 모델(PS), 사례기반 모델(TB. All)을 이용한 민감도 분석을 실시한 결과, 신뢰도 95%에서는 Fig. 6.50과 같다. PR은 개별 지반진동속도 추정식에 대해 적합률이 26 ~ 97%로 평균 67%이고, PS는 적합률이 19 ~ 52%로 평균 28%이고, TB. All은 22 ~ 87%로 평균 60%이다.

적합률 80%이상을 만족하는 모델들에 대해 살펴보았다. PR은 개별 시험발파 TB. 2, 3, 8, 9의 지반진동속도 추정식을 만족하였으며, 변수들의 평균 범위는 천공장 2.58 ~ 3.15m이고 지발당 장약량은 2.30 ~ 3.23kg이며 지반의 전단파 속도는 575 ~ 920cm/s이다. 상부 암과 하부 클링커층의 두께로 확인한 형상비(클링커/암)는 0.38 ~ 0.72이며, 적합률이 매우 부족한 TB. 5의 형상비는 1.89로 암 보다 클링커층이 약 2배가량 더 두껍다. 그리고 TB. All은 TB. 1, 2에 대해 적합률 80%이상을 만족하였으며, 변수들의 평균 범위는 천공장 3.15m이고 지발당 장약량은 2.30kg이며 지반의 전단파 속도는 575cm/s이다.

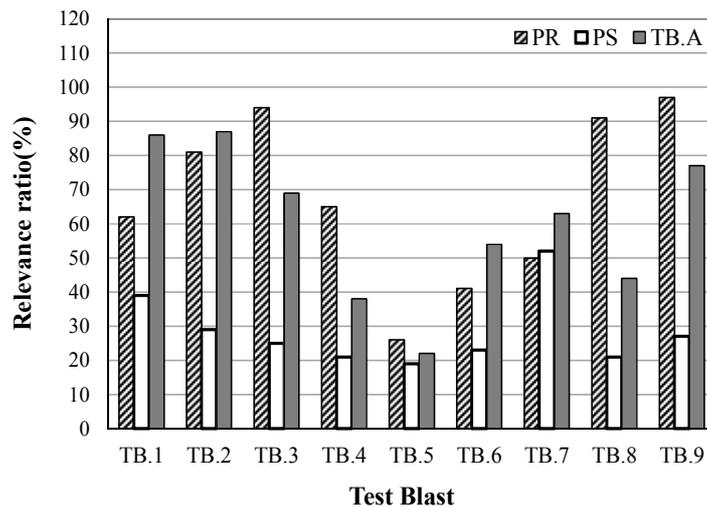


Fig. 6.50 Sensitivity Analysis Result (Reliability 95%)

## 제7장 결 론

제주지역의 다변성 지반특성 즉, 수십 차례에 걸친 화산분출에 의해 현무암층과 화산쇄설층인 클링커층이 불규칙하게 반복되어 층서적으로 불량한 층상구조 지반에 대한 발파진동특성의 충분한 검토가 이루어지지 않은 채, 진동매질 특성인 지반조건이 전혀 다름에도 불구하고 내륙지역의 지반진동속도 추정식을 그대로 계획 단계에서 반영해 사용하는 문제로 인해 발파실무자들의 지반진동 해석 및 평가에 어려움을 겪고 있다.

이에 본 연구에서는 제주지역에서 실시된 9회의 시험발파로부터 총 462개의 데이터를 수집하고 면밀히 분석하여, 제주지역의 지반진동 특성이 반영된 확률론적 지반진동속도 모델을 제시하고자 하였다. 내륙지역의 기반암종별 지반진동속도 추정식과 비교하여 그 수준을 확인하였다. 그리고 제주지역과 같이 불규칙한 층상구조 특징을 보이는 지반조건에서 계획단계에 반영할 수 있는 확률론적 모델을 이용한 지반진동속도 추정식을 개발하기 위해 지반진동 특성을 정량화할 수 있는 변수로 지반 전단파속도 (Shear wave velocity)를 산출하였다.

시험발파 자료에 의한 제어가능한 변수들(천공장, 공간격, 최소저항선, 지발당 장약량, D.I, 폭원으로부터의 거리, 환산거리)과 제어 불가능한 변수들(지반 전단파속도, 지반 고유주파수)을 이용하여 데이터 마이닝을 통한 회귀 모델을 구축하고 확률론적 모델의 알고리즘을 구성하였다.

본 연구를 통해 개발된 다변성지반에서의 지반진동속도 추정 회귀모델과 몬테칼로 시뮬레이션을 이용한 확률론적 모델을 비교하기 위한 시험발파 6회를 수행하였다. 지반진동속도 추정 모델들의 진동속도와 실제 시험발파에 의한 지반진동속도를 비교하여 모델들의 적합도를 검증하였다. 그리고 9개의 개별 시험발파 지반진동속도 추정식에 대해 연구를 통해 제시한 모델들의 민감도 분석을 실시하였다. 그 결과들은 다음과 같다.

1. 화산섬인 제주지역의 층상구조 특징은 기공을 포함하고 있는 현무암과 화산쇄설층인 클링커층이 불규칙하게 반복되어 있다. 특히, 클링커층의 암편 형태 공극은 클링커층과 인접한 위치에 발파착점이 형성되면 발파가스압의 방출경로가 되어 발파 에너지를 소산시키고 지반진동을 더 멀리 보내는 부정적 효과를 가져 온다.
2. 암 파쇄가 목적인 발파에서 기반암의 심도가 얇으면 허용된 발파패턴에 의한 천공 장을 확보할 수 없어, 결과적으로 장약량을 제어하는 제약조건이 되어 낮은 수준의 발파를 반복해야하는 비효율적인 발파시공이 이루어진다.
3. 한 사이트에서 계측기의 위치를 고정시키고 폭원의 위치만 변경하여 동일한 방법으로 시험발파가 실시된 TB. 1, 2, 3의 지반진동특성, 즉 매질의 진동전달을 반영하는 발파진동상수  $K$ 와 감쇠지수  $n$ 의 값은 전혀 다르다. 이처럼 입지상수  $K$ 와  $n$ 이 다른 이유는 폭원에서 시작된 지반진동의 전달과정을 정량적으로 설명하기 어려운 매질특성에 기인한 것으로 판단된다.
4. 제주지역의 지반진동속도 특징은 데이터의 범위 내에서 Peak Particle Velocity(PPV)로 추정된 지반진동속도 보다 Peak Vector Sum(PVS)로 추정된 지반진동속도가 크다. 그리고 국내 가이드라인(G.L)의 지반진동속도 추정식보다 감쇠가 작아 지반진동을 더 멀리 전달한다.
5. 기반암 종류에 따른 지반진동속도를 비교한 결과, 사암이 지반진동속도가 근거리와 원거리에서 가장 높게 추정되었고, 현무암과 클링커층이 두 번째이며 화강암, 편마암은 유사한 수준의 지반진동속도가 예측되었고, 그 다음 석회암, 퇴적암 순으로 낮았다.
6. 그리고 제주지역 지반에서 발파에 의한 지반진동 주파수 대역은 1 ~ 51Hz사이이며, 주주파수 대역은 9 ~ 18Hz사이로 매우 저주파 특성을 보인다. 이러한 저주파수 특징은 기공이 비교적 많은 현무암과 공극이 커 느슨한 클링커층으로 지반진동이 전달되면서 생긴 파로효과(Waveguide effect)로 보여지며, 저주파수 특성은 저층구조물의 공진(Resonance) 위험성을 내제하게 된다.

7. 제주지역에서 시행된 11개소의 다운홀시험(Downhole seismic test) 결과, 각 지층의 전단파속도는 연암 803m/s, 보통암 1150m/s, 클링커층 374m/s이다. 또한 제주지역의 전단파속도(622m/s)가 타 지역 보다 약 1.6배 정도 큰 것으로 분석되었다.
8. 지반진동속도 추정식의 확률론적 모델 알고리즘을 구성하기 위해 데이터 마이닝 기법으로 종속변수와 모든 독립변수에 대해 비선형 적합 분석을 수행하여 지반전단파속도, 천공장, 지발당 장약량, 환산거리를 독립변수로 하는  $R_{adj}^2=0.77$ 인 회귀 모델을 구축하였다.
9. 회귀 모델과 확률론적 모델 그리고 사례기반 모델의 지반진동속도 추정식에 대한 적합도를 검증하기 위해 6회의 시험발파를 실시하였다. 시험발파 지반진동속도 추정식 대비 각 모델의 적합률은 신뢰도 50%, 95%에서 회귀 모델 71%, 60%이고 확률론적 시뮬레이션 모델 44%, 28% 그리고 사례기반 모델은 94%, 82%이다.
10. 모델들의 적합도를 확인하기 위한 민감도 분석 결과 신뢰도 50%에서 회귀 모델 75%, 시뮬레이션 모델 48%, 사례기반 모델 75%이고, 신뢰도 95%에서는 회귀 모델 67%, 시뮬레이션 모델 28%, 사례기반 모델 60%로 분석되었다. 그리고 적합률이 80%이상인 시험발파 조건을 정리하여 모델들의 적합 범위로 제시하였다.
11. 결과적으로, 회귀 모델과 사례기반 모델은 제주지역의 지반특성으로 인한 발파진동의 감쇠 양상을 시험발파 결과들과 유사하게 보여주고 있어 활용 가능한 것으로 판단된다. 그리고 확률모델은 독립변수에 대한 확률분포를 만족하지 못해 적합도가 부족한 시뮬레이션 모델이 도출되었다. 제어 가능한 변수를 확률론적 모델에서 변수로 사용하는 것은 적절하지 않은 것으로 판단된다.
12. 제주 지역의 실측 발파데이터 DB를 지속적으로 업데이트하여 양적·질적 요소를 만족하는 지역 가이드라인으로 활용하기 위한 노력이 필요하다. 그리고 보다 다양한 연구방법론을 활용해 적합률이 우수한 지반진동속도 추정식 개발을 위한 노력이 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- Ahn, M. S. (2000). *study on data analysis of ground vibration-noise-dust dispersion measurement for enhancing safety at the construction sites*, Ph.D. Dissertation, Dong-A University, Korea, pp. 121-125 (in Korean).
- Ahn, M. S. and Park, J. N. (1999). "A Case Study on Variations of the Coefficients K and n with Proceeding of Blasting Events at the Felsite Area, Taegu", *J. of Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, KSMER, Vol. 36, pp. 313-318.
- Altas Power Company (1987). *Explosives and Rock Blasting*, pp. 157-201, 321-406.
- Archibald, J. (1976). *Blasting Vibration Laboratory Manual*. Kingston, Queen's University, Mining Engineering Department, Ontario, Canada.
- Ash, R. L. (1973). *The Influence of Geological Discontinuities on Rock Blasting*, Ph.D. Dissertation, University of Minnesota, U.S.
- Back, E. W., Boles, W. W. and Fry, G. T. (2000). "Defining Triangular Probability Distributions from Historical Cost Data", *J. of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 126, No. 1, pp. 29-37.
- Baek, S. H. (1997). *Validation Methodology of the Statistical Cost Model using Simulation*, Master's Thesis, Kyung Hee University, Korea, pp. 18 (in Korean).
- Bang, E. S., Kim J. T. and Kim D. S. (2006). "Evaluation of Near Subsurface 2D Vs Distribution Map using SPT-Uphole Tomography Method", *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 3C, pp. 143-155 (in Korean).
- Bicholls, H., Johnson, c. and Duvall, W. (1971). *Blasting Vibrations and Their Effects on Structures*, Bulletin 656.
- Bollinger G. A. (1971). *Blasting Vibration Analysis*, Southern Illinois University press, pp. 58-88.
- Chang, H. M. (2014). *A Study on the vibration-controlled blasting in quartz porphyry rock mass*, Ph.D. Dissertation, Chosun University, Korea (in Korean).

- Cho, Y. S., and Song, H. C. (2002). "Probability Analysis Method of Column Shortening for Tall Buildings", *J. of Architectural Institute of Korea*, Architectural Institute of Korea, Vol. 18, No. 1, pp. 53-60 (in Korean).
- Choi, B. H. and Ryu, C. H. (2012). "Consideration on the Relation between Vibration Level and Peak Particle Velocity in Regulation of Ground Vibration", *J. of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 1-8 (in Korean).
- Choo, H. S., Kim, S. M., Song, I. S. and Lee, I. H. (2005). *Easy-to-understand Management Science*, Hyungseul, pp. 22. 23. 24. 36. 79. 540 (in Korean).
- Crice, Doug. (2002). *Borehole shear-wave surveys for engineering Site Investigations*, Geostuff, [www.georadar.com/geostuff](http://www.georadar.com/geostuff)
- Devine, J. R. (1966). *Avoiding Damage to Residences from Blasting Vibrations*, Highway Research Record 135, pp. 35-44.
- Dupont Co., (1980). *Blaster's Hand Book 16th Edition*, pp. 423-446.
- Duvall, W., Johnson, C., Meyer, A. and Devine, J. (1963). *Vibrations from Instantaneous and Millisecond Delayed Blasts*, USBM RI 6151.
- Evans, J. R. and Olson, D. L. (2002). *Introduction to Simulation and Risk Analysis*, Prentice Hall Inc.
- Hwang, P. J. (2011). *Analysis on relation of S-wave velocity and N value for stratum in Chungcheong Buk-Do*, Master's Thesis, Hanyang University, Korea (in Korean).
- ISEE (1998). *Blaster's Handbook*, 17th ed., International Society of Explosives Engineers, Cleveland, Ohio, USA, pp. 594.
- Jeong, J. S., Kim, D. S., Park, J. B., Lim, H. S., Park K. Y. and Oh, W. (2009). *Measurement and Application of Shear Wave Velocity for Reasonable Soil Classification in Seismic Design*, Land & Housing Institute, No. 6, pp. 1~79, 321 (in Korean).
- Jin, Z. X. (2014). *Stochastic Hybrid Cost Prediction Model of Construction Project in Early Stage*, Master's Thesis, University of Seoul, Korea, pp. 25-32 (in Korean).

- Kang, C. W. (2014). *Blasting Engineering A to Z*, 3th Edition, Goomibook, pp. 339-359 (in Korean).
- Kang, T. G. (2004). *Cost Estimation Models for Jobsite Overhead of Public Building Projects*, Ph.D. Dissertation, Chung-Ang University, Korea, pp. 84 (in Korean).
- Kim, D. S. and Kang, N. J. (2008). *Regression Analysis : Bases and Applications*, Nanam, pp. 60 (in Korean).
- Kim, D. S., Bang, E. S., Mok Y. J. and Park S. H. (2000). "Parametric Study for the Reliable Evaluation of Downhole Test Result." *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 20, No.6C, pp. 485-493. (in Korea)
- Kim, G. H. (2003). *A Probabilistic Cost Planning Model for Building Design Decision at the Planning Phase -Focused on the High-Rise Office Building*, Ph.D. Dissertation, Chung Ang University, Korea, pp. 14, 32 (in Korean).
- Kim, G. H. and Kim, Y. I. (2005). *Financial simulation using Crystal Ball*, University of Ulsan Press, pp. 20, 56 (in Korean).
- Kim, J. H. (2004). *Computer Simulation*, Pybook (in Korean).
- Kim, J. H. (2007). *A study on the mechanical characteristics and the strength in pyoseonri basalt*, Master's Thesis, Jeju National University, Jeju, Korea, p.3 (in Korean).
- Kim, K. S., Kang, H. D., Sun, C. G. and Kim, M. M. (2008). "Determination of Site Classification System and Design Response Spectra for Seismic Design.", *Proc. of EESK Conference 2008*, Earthquake Engineering Society of Korea, Korea, pp. 13~20.
- Kim, S. C. (1992). *Study on the Use of a Simulation Technique for Feasibility Analyses*, Master's Thesis, Choonnam National University, Korea, pp. 5, 26 (in Korean).
- Kim, S. H. and Lee, D. W. (2016). "Analysis of Blasting Vibration at the Irregular Layered Structure Ground", *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 36, No. 5, pp. 891-901 (in Korean).
- Kim, S. M. (2002). *Management Simulation*, Hankyungsa, pp. 181-208 (in Korean).

- Kim, S. W. (2007). *Practical Use of SPSS WIN 12.0*, Kyoyookbook, pp. 110 (in Korean).
- Kim, T. G. (2006). *U-Can Regression Analysis, Human and Welfare*, pp. 96-101 (in Korean).
- Koh, G. W. (1997). *Characteristics of the groundwater and hydrogeology implications of the Seogwipo formation in Cheju island*, Ph.D. Dissertation, Pusan National University, Pusan, Korea, pp. 39~61 (in Korean).
- Konya, C. J. and Walter, E. J. (1990). *Surface Blast Design*, Englewood Cliffs, N.J. : Prentice Hall, pp. 35-58
- Korean Geotechnical Society (KGS) (2012). *Seismic Design of Geotechnical Structures*, Goomibook, pp. 34-42, 50-53, 79-95, 261-283, 505-507 (in Korean).
- Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1979). *Soil Mechanics SI Version*, J, Willey & Sons, New York, pp.97-136.
- Langefors U. and Kihlström B. (1978). *The modern technique of Rock Blasting Third edition*, John Wiley & Sons Inc, pp. 258-293.
- Law, A. M. and Kelton, W. D. (1991). *Simulation Modelling and Analysis*, 2nd Ed., Mcgraw Hill Inc.
- Le Maitre, R. W. (1984). "A proposal by the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks for a chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica (TAS) diagram", *Australian J. of Earth Sci.*, Vol. 31, pp. 243-255.
- Lee, K. Y. (1999). *Risk Analysis of Infrastructure Investment Project by Monte Carlo Simulation Approach : With Reference to Market Demand of Shinchon Private-Invested Station*, Master's Thesis, Yonsei University, Korea, pp. 2, 38 (in Korean).
- Lee, et al. (1997). *Noise and Vibration Engineering*, hyungseul, pp. 81 (in Korean).
- Lee, H. S. and Kang, H. M. (2009). *Inside Statistical Analysis and SPSS*, Korean Studies Information Co., Ltd.: Seoul.

- Lee, J. G. (1987). *Management Field Research Methodology*, emun press, pp. 47, 213-214, 236-237 (in Korean).
- Lee, S. D. (2014). *The Soil Test*, 2nd Edition, CIR, pp. 355~363 (in Korean).
- Lee, S. S. (2007). *Development of a Stochastic Financial Analysis Model for Building Development Projects*, Ph.D. Dissertation, Korea University, Korea, pp. 49-67 (in Korean).
- Lee, T. S. (2001). *Practical Regression Analysis*, Free Academy, pp. 3-17 (in Korean).
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT) (2006). *Blasting design and construction guidelines to road construction*. No. 11-1500000-001841-01, Korea (in Korean).
- Ministry of Environment (ME), (2010). *A Study on the Correlation Analysis between Vibration Level and Vibration Velocity*, Korea, pp. 6-9 (in Korean).
- Mun, J. (2005). *Applied Risk Analysis : Moving Beyond Uncertainty in Business*, Eretec., pp. 172-177 (in Korean).
- Nam, J. M., Ko, H. S. and Oh, D. I. (2003). "A Study on Strength Characteristics of Jeju-island's Scoria(Song-E)", *J. of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 5, No. 4, pp.37-47 (in Korean).
- Oh, C. H., Song, H. and Kim, S. W. (2004). "An Experimental Study on the Prediction Equation of Blasting Vibration for Constructive Granite Ground", *J. of Architectural Institute of Korea*, Architectural Institute of Korea, Vol. 20, No. 3, pp. 187-194 (in Korean).
- Park, et al. (1998). *Geologic Report of the Cheju-Aewol Sheet*, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, pp. 40-43 (in Korean).
- Park, et al. (2000b). *Geologic Report of the Segwipo-Hahyori Sheet*, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, pp. 50-51 (in Korean).
- Park, et al. (2009). "Vibration Prediction and Charge Estimation in Hard", *J. of Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, KSNVE, Vol. 19, No. 3, pp. 313-319 (in Korean).

- Park, G. H., Cho, D. L. and Kim, J. C. (2000a). *Geologic Report of the Moseulpo-Hanlim Sheet*, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, pp. 24-25 (in Korean).
- Persson, P. A., Holmberg, R. and Lee, J. (1994). *Rock blasting and explosives engineering*, CRC Press, pp.337-338.
- Ryu, B. H. (2014). *Influence of delay time and priming location on the blast-induced ground vibration*, Ph.D. Dissertation, Chosun University, Korea, pp. 6-30 (in Korean).
- Seo, H. S. Yang, G. S. Kim, N. Y. Kim, H. Y., and Kim, M. G. (2009). *SPSS(PASW) Regression Analysis*. 3rd edition. Hannarae Publishing Co., Ltd.: Seoul.
- Seon, C. G. (2014). "Technical Report : Earthquake Engineering Bedrock Based on the Shear Wave Velocities of Rock Strata in Korea.", *J. of Engineering Geology*, Vol.24, No2, pp. 273-281 (in Korea).
- Sim, D. S. and Kang, D. W. (2004). "A Study on the Reduction Effect of Vibration of NPS Blasting Method on Andesite, Granite and Granitic Gneiss", *J. of Explosives and Blasting*, Vol. 22, No. 2, pp. 13-20 (in Korean).
- Son, M. R., Ryu, J. H., Ahn, S. S., Hwang, Y. C., Moon, D. H., Park, D. H., and Moon, D. H. (2015). "Analysis on the Characteristics of Rock Blasting-induced Vibration Based on the Analysis of Test Blasting Measurement Data", *J of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 16, No. 9, pp. 23-32 (in Korean).
- Song, B. W. (2010). "Determination on Liquefaction with Ground Natural Period", *2010 Korean Geo-Environmental Society Fall Conference(10th Anniversary)*, pp. 459-467 (in Korea).
- Sun, C. G., Chung, C. K., and Kim, D. S. (2007). "Determination of Mean Shear Wave Velocity to the Depth of 30m Based on Shallow Shear Wave Velocity Profile", *J. of The Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 11, No. 1, pp. 45-57 (in Korean).
- Wang, Z., Fang, C., Chen, Y. and Cheng, W. (2013). "A comparative study of delay time identification by vibration energy analysis in millisecond blasting", *Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 60, pp. 389-400.

- Yang, B. H. (2007). *Understand and Application of Multivariate Data Analysis*, Hakjisa, pp. 8 (in Korean).
- Yang, H. S. and Choi, M. J. (2006). "Validity of the Attenuation Equation of MOCT Guide Line for Surface Rock Blasting", *J. of Korean Society for Rock Mechanics, Tunnel & Underground Space*, Vol. 16, No. 2, pp. 189-193.
- Yang, H. S., Kim, N. S., Jang, H. D., Kim, W. B., Ko, Y. H., Kim, S. J., Kim, J. G. and Moon, H. S. (2011). "Study on Optimization of Blast Design for Improving Fragmentation in Jeju Basalt Rock Area", *J. of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering*, Vol. 29, No. 2, pp. 89-99 (in Korean).
- Youn, J. S. (1995). "A study on parasitic cones of the northern parts of Cheju island, Korea", *J. of Marine Science Institute, Cheju National University*, Vol. 19, pp. 25-38 (in Korean).