



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

현무암 석분슬러지의 공학적 특성  
및 활용 방안 연구



濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

金 基 榮

2006年 12月

# 현무암 석분슬러지의 공학적 특성 및 활용 방안 연구

指導教授 南 正 萬

金 基 榮

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2006年 12月

金基榮의 工學 博士學位 論文으로 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

濟州大學校 大學院

2006年 12月

A study on the application of powdered basalt sludge in  
construction engineering and its special characteristic

Ki-Young Kim

(Supervised by Professor Jung-Man Nam)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for  
the degree of Doctor of Engineering

2006. 12

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Byung-Gul Lee, Prof. of Civil engineering

Thesis director, Won-Pyo Hong, Prof. of Civil engineering

Thesis director, Sang-Yeol Park, Prof. of Civil engineering

Thesis director, Tae-Hyung Kim, Prof. of Civil engineering

Thesis director, Jung-Man Nam, Prof. of Civil engineering

December. 2006

Department of Civil & Ocean Engineering

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

List of Figures .....	v
List of Tables .....	xiii
Summary .....	xvii
<b>I. 서 론</b> .....	<b>1</b>
1. 연구 배경 .....	1
2. 연구 내용 .....	2
<b>II. 석재산업 및 석분슬러지</b> .....	<b>4</b>
1. 석재 산업 .....	4
1.1 제주도 지질현황 .....	4
1.2 석재산업 규모 .....	8
1.3 석재생산 현황 .....	9
1.4 석재류 수출·입 현황 .....	10
1.5 석재산업 시장규모 .....	11
1.6 제주도 석재산업 현황 .....	12
2. 석분슬러지 .....	16
2.1 석재 가공 과정 .....	16
2.2 석분슬러지 발생 과정 .....	21
2.3 석분슬러지 발생 현황 .....	27
2.4 처리 현황 .....	29
2.5 석분슬러지 및 폐수 법적 기준 .....	32
2.6 석재폐수 및 석분슬러지의 환경영향 .....	34
2.7 석분슬러지 국·내외 연구 현황 .....	35

<b>III. 기존이론</b> .....	37
1. 투수계수 .....	37
1.1 정수두 및 변수두 투수시험 .....	39
1.2 방사상 투수계수 .....	41
2. 콘크리트 건조수축 및 시멘트 수화열 .....	44
2.1 콘크리트 건조수축 .....	44
2.2 시멘트 수화열 .....	44
2.3 시멘트의 수화열에 의한 강도 관계 .....	46
3. 포졸란 반응 .....	48
4. 차수재 .....	50
4.1 현장 유용 토사 판별 .....	50
4.2 선정시료의 시험 .....	50
4.3 차수재의 종류 .....	51
<b>IV. 재료의 특성 및 실험방법</b> .....	55
1. 재료의 특성 .....	55
1.1 현무암 석분슬러지 .....	55
1.2 현장토사 .....	69
1.3 시멘트 및 혼화제 .....	75
1.4 Fly-ash .....	78
1.5 모래 .....	82
1.6 자갈 .....	84
2. 시험방법 및 장치 .....	86
2.1 시료의 배합 .....	86
2.2 압축강도시험 .....	87
2.3 투수시험 .....	92
2.4 동결융해시험 .....	104
2.5 건조수축균열 및 중량변화 시험 .....	106

2.6 흡착시험 .....	110
<b>V. 실험 결과 .....</b>	<b>111</b>
1. 강도시험 .....	111
1.1 압축강도 Type I (석분슬러지+시멘트+혼화제) .....	111
1.2 압축강도 Type II (석분슬러지+시멘트+Fly-ash) .....	115
1.3 압축강도 Type III (석분슬러지+시멘트+Fly-ash+현장토사2) .....	119
1.4 압축강도 Type IV (석분슬러지+모래+시멘트) .....	122
1.5 인장강도 .....	126
1.6 비교분석 .....	128
2. 투수시험 .....	132
2.1 Type I (석분슬러지+시멘트+혼화제) .....	132
2.2 Type II (석분슬러지+Fly-ash+시멘트) .....	135
2.3 Type III (석분슬러지+시멘트+Fly-ash+현장토사2) .....	136
2.4 Type IV(석분슬러지+시멘트+모래) .....	137
2.5 Type V (석분슬러지+현장토사1) .....	138
2.6 비교분석 .....	143
3. 동결융해 .....	146
3.1 압축강도시험 .....	146
3.2 투수시험 .....	153
3.3 중량변화 .....	159
3.4 포졸란 반응 관찰 .....	162
4. 건조수축에 의한 균열 및 길이변화시험 .....	166
4.1 균열 시험 .....	166
4.2 길이변화시험 .....	168
5. 흡착시험 .....	169
5.1 실제시료량(함수율 0.08%) .....	169
5.2 시료 주입 후 pH값(10분 교반 후 측정) .....	169

5.3 AAS 측정농도(mg/l)-잔류농도 .....	170
5.4 pH별 제거효율 .....	170
5.5 결과 분석 .....	171
<b>VI. 활용방안 .....</b>	<b>173</b>
1. 실내모형시험 .....	173
1.1 시험방법 .....	173
1.2 배 합 .....	174
1.3 모형 모식도 .....	175
1.4 시험 결과 .....	177
2. 현장 시험 .....	183
2.1 시험 방법 .....	184
2.2 시험 결과 .....	185
3. 그 외 활용방안 제안 .....	186
3.1 시추 폐공처리 불투성재료 대체 활용 .....	186
3.2 지하수 개발시 정호시설 그라우팅 재료 활용 .....	189
3.3 소규모 연못 시공 .....	190
<b>VII. 결 론 .....</b>	<b>192</b>
<b>VIII. 참고 문헌 .....</b>	<b>195</b>

## List of Figures

Fig. 2.1 Geologic map of Jeju Island(Park, 2001) .....	7
Fig. 2.2 Location of quarry and a stone processing plant in Jeju .....	13
Fig. 2.3 The Flow chart of the Stone Processing .....	16
Fig. 2.4 The View of the Stone Industry (Outdoor) .....	17
Fig. 2.5 Stone Process .....	17
Fig. 2.6 Stone Process (1st Cutting) .....	18
Fig. 2.7 Stone Process (2nd Cutting) .....	18
Fig. 2.8 Stone Process (Final Cutting) .....	19
Fig. 2.9 Stone Process (Grinding) .....	19
Fig. 2.10 Stone Process .....	20
Fig. 2.11 The View of the Stone Industry (Indoor) .....	20
Fig. 2.12 The Flow chart of the Powdered Basalt Sludge Production .....	22
Fig. 2.13 The photo of the Powdered Basalt Sludge Production (Wastewater) .....	23
Fig. 2.14 The photo of the Powdered Basalt Sludge Production (Collecting Water) .....	23
Fig. 2.15 The photo of the Powdered Basalt Sludge Production (1st Settling) .....	24
Fig. 2.16 The photo of the Powdered Basalt Sludge Production (2nd Settling) .....	24
Fig. 2.17 The photo of the Powdered Basalt Sludge Production (3rd Settling) .....	25
Fig. 2.18 The photo of the Powdered Basalt Sludge Production (Dewatering) .....	25

Fig. 2.19 The photo of the Powdered Basalt Sludge Production (Powdered Basalt Sludge) .....	26
Fig. 2.20 The photo of the Powdered Basalt Sludge Production (Piling) .....	26
Fig. 2.21 Report on Newspaper related to illegal filling-up .....	30
Fig. 3.1 Constant head permeability and falling head permeability tests .....	39
Fig. 3.2 Plane Schematic diagram of radial flow .....	42
Fig. 3.3 Sectional view of specimen .....	43
Fig. 3.4 Heat of hydration speed curve(Kwon, 2004) .....	47
Fig. 4.1 Grain-size distribution curve of powdered basalt .....	57
Fig. 4.2 Compaction curve of powdered basalt .....	57
Fig. 4.3 Relationship between degree of compaction and coefficient of permeability .....	58
Fig. 4.4 Relationship between Shear stress and horizontal displacement (Dr=30%) .....	60
Fig. 4.5 Relationship between Shear stress and Normal stress (Dr=30%) .....	60
Fig. 4.6 Relationship between Shear stress and horizontal displacement (Dr=50%) .....	61
Fig. 4.7 Relationship between Shear stress and Normal stress (Dr=50%) .....	61
Fig. 4.8 Relationship between Shear stress and horizontal displacement (Dr=70%) .....	62
Fig. 4.9 Relationship between Shear stress and Normal stress (Dr=70%) .....	62
Fig. 4.10 Relationship between Shear stress and horizontal displacement (compaction) .....	63
Fig. 4.11 Relationship between Shear stress and Normal stress .....	63
Fig. 4.12 Chemical composition of Powdered basalt .....	65
Fig. 4.13 pH Variation to the Powdered Basalt Sludge and Cement Mixture Ratio .....	66
Fig. 4.14 pH Measurement Picture .....	67

Fig. 4.15 The shape/surface in Powdered basalt by scanning electron micrograph (300:6,000) .....	68
Fig. 4.16 The shape/surface in Powdered basalt by scanning electron micrograph (12,000:50,000) .....	68
Fig. 4.17 Grain-size distribution curve of site soil sample 1-1 .....	71
Fig. 4.18 Compaction curve of site soil sample 1-1 .....	71
Fig. 4.19 Grain-size distribution curve of site soil sample 1-2 .....	72
Fig. 4.20 Compaction curve of site soil sample 1-2 .....	72
Fig. 4.21 Grain-size distribution curve of site soil sample 2 .....	74
Fig. 4.22 Compaction curve of site soil sample 2 .....	74
Fig. 4.23 The shape/surface in Cement by scanning electron micrograph (300:6,000) .....	76
Fig. 4.24 The shape/surface in Cement by scanning electron micrograph (12,000:50,000) .....	77
Fig. 4.25 Chemical composition of Fly-ash .....	80
Fig. 4.26 The shape/surface in Fly-ash by scanning electron micrograph (300:6,000) .....	80
Fig. 4.27 The shape/surface in Fly-ash by scanning electron micrograph (6,500:50,000) .....	81
Fig. 4.28 Grain-size distribution curve of Sand .....	83
Fig. 4.29 The shape/surface in sand by scanning electron micrograph (300:6,000) .....	83
Fig. 4.30 The shape/surface in sand by scanning electron micrograph (12,000 :50,000) .....	83
Fig. 4.31 Grain-size distribution curve of Gravel .....	85
Fig. 4.32 Grain-size distribution curve of materials .....	85
Fig. 4.33 Three Gang Mortar Cylinder Mold .....	87
Fig. 4.34 Digital Portable Compression Tester .....	91
Fig. 4.35 Remolded sample .....	95

Fig. 4.36 Samples saturation .....	95
Fig. 4.37 Schematic diagram of Permeability test container .....	96
Fig. 4.38 Permeability Test Apparatus of concrete .....	97
Fig. 4.39 Schematic diagram of Permeability test setup .....	98
Fig. 4.40 Support Mold .....	99
Fig. 4.41 Setting feature .....	99
Fig. 4.42 Fixing Cap .....	99
Fig. 4.43 Setting feature .....	99
Fig. 4.44 Container Lid .....	100
Fig. 4.45 Setting feature .....	100
Fig. 4.46 Measurement Equipment .....	100
Fig. 4.47 Falling head permeability tester .....	101
Fig. 4.48 Schematic diagram of falling head Permeability test setup .....	102
Fig. 4.49 Making Specimen for Testing-1 .....	102
Fig. 4.50 Making Specimen for Testing-2 .....	103
Fig. 4.51 Making Specimen for Testing-3 .....	103
Fig. 4.52 Freezing and thawing apparatus .....	104
Fig. 4.53 Temperature change of specimen .....	105
Fig. 4.54 The inside of freezing and thawing apparatus .....	105
Fig. 4.55 Prism mould for this study .....	106
Fig. 4.56 Specimen for crack test .....	107
Fig. 4.57 Length change test equipment .....	108
Fig. 4.58 Water curing of specimen .....	109
Fig. 5.1 Relationship between compressive strength and Cement Content (water curing specimen) .....	113
Fig. 5.2 Relationship between compressive strength and Cement Content (air curing specimen) .....	113
Fig. 5.3 Relationship between compressive strength and Curing time (water curing specimen) .....	114

Fig. 5.4 Relationship between compressive strength and Curing time (air curing specimen) .....	114
Fig. 5.5 Relationship between compressive strength and Curing time (water curing specimen) .....	116
Fig. 5.6 Relationship between compressive strength and Curing time (air curing specimen) .....	117
Fig. 5.7 The shape/surface in Type II-1 by scanning electron micrograph (300:6,000) .....	118
Fig. 5.8 The shape/surface in Type II-1 by scanning electron micrograph (12,000:50,000) .....	118
Fig. 5.9 Relationship between compressive strength and Curing time (air curing specimen) .....	120
Fig. 5.10 The shape/surface in Type III-1 by scanning electron micrograph (300:600) .....	121
Fig. 5.11 The shape/surface in Type III-1 by scanning electron micrograph (12,000:50,000) .....	121
Fig. 5.12 Relationship between compressive strength and Curing time (water curing specimen) .....	123
Fig. 5.13 Relationship between compressive strength and Curing time (air curing specimen) .....	124
Fig. 5.14 The shape/surface in Type IV-1 by scanning electron micrograph (300:600) .....	125
Fig. 5.15 The shape/surface in Type IV-1 by scanning electron micrograph (12,000:50,000) .....	125
Fig. 5.16 Relationship between compressive and tensile strength and Cement contents .....	127
Fig. 5.17 The photo of the Tensile Strength Test .....	127
Fig. 5.18 Relationship between compressive strength and Curing time .....	128
Fig. 5.19 Relationship between compressive strength and Cement contents .....	128

Fig. 5.20 Relationship between compressive strength and Sludge contents	129
Fig. 5.21 Relationship between coefficient of permeability and Cement Content	134
Fig. 5.22 Relationship between coefficient of permeability and Curing time	134
Fig. 5.23 Relationship between coefficient of permeability and Powdered basalt Content of Soil 1-1	141
Fig. 5.24 Relationship between coefficient of permeability and Powdered basalt Content of Soil 1-2	141
Fig. 5.25 Relationship between coefficient of permeability and Powdered basalt Content (field density)	142
Fig. 5.26 Relationship between Coefficient of permeability and	143
Fig. 5.27 Relationship between Coefficient of permeability and Cement contents	144
Fig. 5.28 Relationship between Coefficient of permeability and Sludge contents	144
Fig. 5.29 The relation between compressive strength and Cement Content	148
Fig. 5.30 The relation between compressive strength and Curing time	148
Fig. 5.31 Comparison of before and after strength in freezing and thawing (7day curing)	149
Fig. 5.32 Comparison of before and after strength in freezing and thawing (14day curing)	149
Fig. 5.33 Comparison of before and after strength in freezing and thawing (28day curing)	150
Fig. 5.34 strength Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 100% Content	150
Fig. 5.35 strength Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 50% Content	151
Fig. 5.36 strength Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 20% Content	151
Fig. 5.37 strength Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 17% Content	152

Fig 5.38 Relation of permeability coefficient and Curing time .....	154
Fig. 5.39 Relation of permeability coefficient and Cement Content .....	155
Fig. 5.40 Comparison of before and after permeability in freezing and thawing (7day curing) .....	155
Fig. 5.41 Comparison of before and after permeability in freezing and thawing (14day curing) .....	156
Fig. 5.42 Comparison of before and after permeability in freezing and thawing (28day curing) .....	156
Fig. 5.43 Permeability Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 100% Content .....	157
Fig. 5.44 Permeability Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 50% Content .....	157
Fig. 5.45 Permeability Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 20% Content .....	158
Fig. 5.46 Permeability Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 17% Content .....	158
Fig. 5.47 Loss in weight rate (7day curing) .....	160
Fig. 5.48 Loss in weight rate (14day curing) .....	160
Fig. 5.49 Loss in weight rate (28day curing) .....	161
Fig. 5.50 The shape/surface in Cement 100% Content by scanning electron micrograph(1,000:10,000) .....	163
Fig. 5.51 The shape/surface in Cement 100% Content by scanning electron micrograph(1,000:10,000) .....	164
Fig. 5.52 The shape/surface in Cement 50% Content by scanning electron micrograph(1,000:10,000) .....	164
Fig. 5.53 The shape/surface in Cement 33% Content by scanning electron micrograph(1,000:10,000) .....	164
Fig. 5.54 The shape/surface in Cement 20% Content by scanning electron micrograph(1,000:10,000) .....	165

Fig. 5.55 The shape/surface in Cement 17% Content by scanning electron micrograph(1,000:10,000) .....	165
Fig. 5.56 Crack number in a day .....	166
Fig. 5.57 Shape of cracks .....	167
Fig. 5.58 Length change in a day .....	168
Fig 5.59 Elimination Utility Factor .....	172
Fig. 6.1 Permeability Testing Mechanism for Indoor Model .....	176
Fig. 6.2 The Water-stop Liner Application of Permeability Test Result (Type III) .....	178
Fig. 6.3 The Water-stop Liner Application of Permeability Test Result (Type IV) .....	179
Fig 6.4 The Water-stop Liner Application of Permeability Test Result (Type III) .....	180
Fig. 6.5 The Water-stop Liner Application of Permeability Test Result (Type IV) .....	181
Fig. 6.6 The Application of Permeability Test Site View .....	183
Fig. 6.7 Permeability Testing Mechanism on the Site .....	184
Fig. 6.8 Growing a marsh plant on the Site .....	185
Fig. 6.9 The Cross Section of the Underground Water Pumping Facility .....	189
Fig. 6.10 The Pond Construction Process using Powered Basalt Sludge (The Pond Site, Mixing-1) .....	190
Fig. 6.11 The Pond Construction Process using Powered Basalt Sludge (Mixing-2, Mixing-3) .....	190
Fig. 6.12 The Pond Construction Process using Powered Basalt Sludge (Finishing, Slump Testing) .....	191
Fig. 6.13 The Pond Construction Process using Powered Basalt Sludge (After Construction) .....	191

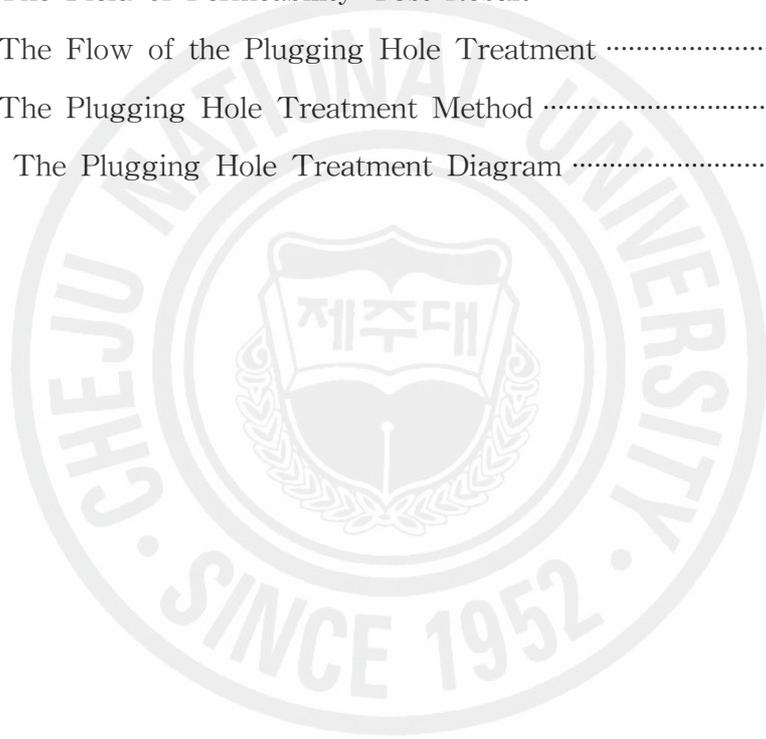
## List of Tables

Table 2.1 Geological Layer in Jeju .....	6
Table 2.2 The Present Status of Stone Processing Industry .....	8
Table 2.3 Private Contract of Korea Stone Industry Cooperative and Actual Supply .....	9
Table 2.4 The Yearly Report on the Stone Material Export Statistics .....	10
Table 2.5 The Yearly Report on the Stone Material Import Statistics .....	11
Table 2.6 Market Scale of Korea Stone Industry .....	11
Table 2.7 The Present Status of Registered Enterprise in the Association .....	13
Table 2.8 The Present Status of Unenrolled Enterprise in the Association .....	14
Table 2.9 Stone Material Production for Government Supply in 2005 .....	15
Table 2.10 The Current Status of the Stone Sludge Production Amount and Treatment Expenses .....	27
Table 2.11 The Present Status of the Scrapped Stone Material Disposal .....	28
Table 2.12 The Production Amount of the Powdered Basalt Sludge .....	28
Table 2.13 The Substance of Water Pollution Emission Test .....	32
Table 2.14 The Standard of Harmful Chemistry Ingredient Content .....	33
Table 2.15 The Analysis of the Stone Industry Wastewater .....	34
Table 3.1 Heat of hydration for cement(Kwon, 2004) .....	45
Table 3.2 Standard Water proof Liner .....	51
Table 3.3 The type of various liner(Korean Geotechnical Society, 1999) .....	52
Table 4.1 The Test Methods for the powered basalt sluge .....	56
Table 4.2 The physical properties of the powdered basalt sluge .....	56
Table 4.3 Coefficient of permeability of Powdered basalt .....	58
Table 4.4 Direct shear test result .....	59
Table 4.5 Chemical composition of Powdered basalt .....	65

Table 4.6 The pH values of the Powdered Basalt Sludge and Cement Mixture Ratio to time elapsed .....	66
Table 4.7 The Analysis of the Harmful Chemistry Ingredient Content .....	67
Table 4.8 The Test Methods for the soil sample 1 .....	70
Table 4.9 The physical of the soil sample 1 .....	70
Table 4.10 The physical of the soil sample 2 .....	73
Table 4.11 Chemical composition of cement .....	75
Table 4.12 Physical composition of cement .....	76
Table 4.13 Chemical composition of quick setting admixtures .....	77
Table 4.14 Physical composition of Fly-ash .....	79
Table 4.15 Chemical composition of Fly-ash .....	79
Table 4.16 The Physical of the sand .....	82
Table 4.17 The Physical property of the gravel .....	84
Table 4.18 Total Mix Proportion Matrix .....	86
Table 4.19 Mix Proportion Ratio of Type I .....	88
Table 4.20 Mix Proportion Ratio of Type II .....	89
Table 4.21 Mix Proportion Ratio of Type III .....	89
Table 4.22 Mix Proportion Ratio of Type IV .....	90
Table 4.23 Mix Proportion Ratio of Type I .....	92
Table 4.24 Mix Proportion Ratio of Type II .....	93
Table 4.25 Mix Proportion Ratio of Type III .....	93
Table 4.26 Mix Proportion Ratio of Type IV .....	94
Table 4.27 Mix Proportion Ratio of Type V .....	95
Table 5.1 Compressive strength of water curing specimen Type I .....	112
Table 5.2 Compressive strength of air curing specimen Type I .....	112
Table 5.3 Compressive strength of water curing specimen Type II .....	116
Table 5.4 Compressive strength of air curing specimen Type II .....	117
Table 5.5 Compressive strength of water curing specimen Type III .....	119
Table 5.6 Compressive strength of air curing specimen Type III .....	120

Table 5.7 Compressive strength of water curing specimen Type IV .....	123
Table 5.8 Compressive strength of air curing specimen Type IV .....	124
Table 5.9 Tensile strength of curing specimen Type II( 7days) .....	126
Table 5.10 Tensile strength of curing specimen Type IV( 7days) .....	127
Table 5.11 Classified of Compressive strength .....	130
Table 5.12 The shape/surface in Cement contents by scanning eletron .....	131
Table 5.13 Coefficient of permeability of specimen Type I .....	133
Table 5.14 Coefficient of permeability of specimen Type II .....	135
Table 5.15 Coefficient of permeability of specimen Type III .....	136
Table 5.16 Coefficient of permeability of specimen Type IV .....	137
Table 5.17 Compaction test result of Powdered basalt and soil sample 1-1	138
Table 5.18 Coefficient of permeability of Powdered basalt and soil Specimen 1-1 .....	139
Table 5.19 Compaction test result of Powdered basalt and soil sample 1-2	139
Table 5.20 Coefficient of permeability of Powdered basalt and soil Specimen 1-2 .....	140
Table 5.21 Coefficient of permeability of Powdered basalt and soil Specimen ..	142
Table 5.22 Classified of Coefficient of permeability .....	145
Table 5.23 Freezing and thawing after Compressive strength .....	146
Table 5.24 Coefficient of permeability of specimen after Freezing and thawing .....	153
Table 5.25 Freezing and thawing before weight of Specimen .....	159
Table 5.26 The Sample Amount for pH .....	169
Table 5.27 The pH Variation after Pouring Sample .....	170
Table 5.28 Remaining pH Density .....	170
Table 5.29 Elimination Utility Factor .....	171
Table 6.1 Mix Proportion Ratio of Type III .....	174
Table 6.2 Mix Proportion Ratio of Type IV .....	174

Table 6.3 The Water-stop Liner Application of Permeability Test Result Type III .....	177
Table 6.4 The Water-stop Liner Application of Permeability Test Result Type IV .....	178
Table 6.5 The Water-stop Liner Application of Permeability Test Result Type III .....	180
Table 6.6 The Water-stop Liner Application of Permeability Test Result Type IV .....	181
Table 6.7 The Field of Permeability Test Result .....	185
Table 6.8 The Flow of the Plugging Hole Treatment .....	187
Table 6.9 The Plugging Hole Treatment Method .....	188
Table 6.10 The Plugging Hole Treatment Diagram .....	188



## Summary

According to the Unified Soil Classification System (USCS), Jeju powdered basalt sludge that is produced during the stone treatment process is similar to ML & CL. The materials found from our surroundings such as site soil, cement (hardening material), compounds (quick setting admixtures), fly-ash and sand were mixed with the Jeju powdered basalt sludge. The strength test results for these mixed materials showed that the intensity decreased as the powdered basalt sludge content increased. As the curing day extended the intensity also increased. The most mixtures with powdered basalt sludge were satisfied with the standard intensity of the water-stop material, except when the mixtures were used as following percentages: the powdered basalt sludge below 18%, cement below 2%, fly-ash and sand over 80%. With the soil ratio over 20%, the formation did not occur during the test of water curing, and because it is hard to manifest over the regular intensity, the test results concluded that it cannot be utilized as the water stop material. The tensile strengths of mixtures were found about 9-14% of the compressive strength, although they can be different depending on the curing condition.

After compaction the powdered basalt sludge, the coefficient of permeability was  $4.67E-06\text{cm/sec}$ . The permeability test results for the combination of various samples and powdered basalt sludge showed that the permeability decreased as the powdered basalt sludge content decreased and as the cement content and curing day increased. Also, when the amount of the used powdered content was below 50%, the coefficient of permeability was very small changed. The mixtures formed with the ratio of powdered content below 83%, and cement content over 17% showed the permeability standard

of the water-stop material in satisfactory with the coefficient of permeability below  $1.00E-07\text{cm/sec}$ . The mixtures formed with the powdered sludge below 50%, fly-ash, and cement below 50%, were not satisfied with the standard permeability as a water-stop material. In addition, in case with the site soil mixture testing, it was found that the sample formation was difficult to do conducting tests. However, for the mixed proportion ratio for the powdered sludge and site soil with 4:6, it was considered as being close to the permeability standard of water-stop material.

The strength test result for the powdered basalt sludge, cement, and compounds (quick setting admixtures) after freezing and thawing showed that its resistance dropped as the content of powdered sludge increased. While the change of the coefficient of permeability was relatively small with increasing the content of cement to before and after freezing and thawing, the coefficient of permeability was increased as the content of powdered sludge increased. This is because of the increase in gap that is caused by the expansive force and moisture in the process of freezing and thawing.

In the weight change testing, 9% of the weight dropped as the content of powdered sludge increased. The examination of Pozzolan reaction revealed that with the increase of cement content, the combination was good and the size of gap was small, but as the content of powdered sludge increased, the size of gap was larger. Also, during the crack & length change test that is based on the drying shrinkage, the shrinkage amount was high, and the number of cracks was low as the content of powdered sludge increased.

The adsorption tests were conducted to determine the detergency of powdered sludge. The test results for each of the heavy metal, pH, and sample amount revealed that whole eliminate efficiency resulted  $\text{pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Cr}$ , and the eliminate efficiency increased as pH increased.

In order to develop a water-stop method by utilization of the powdered basalt sludge, the permeability tests were conducted on specimens formed the conditions of sedimentation and dryness for seven days after dropped the mixed sample from the water. As results, the permeability was very low with the ratio of powered sludge 50%, cement 10%, and fly-ash 40%. But as the use of site soil increased, the permeability tended to be higher. In case with the combination of powdered sludge, cement, and sand, if the mix proportion ratio of the powered sludge and cement was high, the result of permeability was low. Thus, it was concluded that the proposed method could be applicable to the water-stop method.

There are many other ways to recycle the powdered sludge: it can be used as impermeability material for filling holes after drilling; filling material for the underground water pumping facility; grouting material for surrounding space, and for the small scaled pond ground construction.

# I. 서론

## 1. 연구 배경

우리나라의 석재산업은 1960년대 말에 일본으로 화강암 원석을 수출하면서 산업화되기 시작하였다. 그 전에는 묘비나 기념비를 만들고 건축의 제한된 부분에 사용되는 정도의 영세한 수공업 형태였으나 경제가 발전하면서 건축자재 중에서 최고의 자재로 수요가 차츰 증가했고 1980년대 Jet burner, slot drill 등 생산시설의 기계화로 석재 가공기술이 발달하여 석재산업은 한동안 호황이었다(한국석재산업총람, 2005). 그러나, 이러한 석재산업의 발전으로 인해 전국의 석산 및 석재가공 업체에서 제품의 생산과 더불어 부산물로 발생하는 분진, 소음, 폐수 및 슬러지 등은 환경문제를 야기 시키고 있으며, 특히, 석재 가공과정에서 발생하는 슬러지의 양은 가공 제작에서 투입되는 원석의 1/3정도로 추정하고 있다. 또한 가공시 소비되는 물의 양도 석재 최종 제품의 20~30배로 사용되는 물을 포함해 실제 많은 양의 부산물이 발생하는 것을 알 수 있다.

부산물의 일부인 폐석은 도로포장용 쇄석골재로 재활용이 일부 될 뿐 석분슬러지와 함께 방치되거나 환경처리업체에서 위탁 처리하여 대부분 매립하고 있는 실정이다(하은용, 2005). 전국에 있는 각 사업장에서는 자체처리를 위하여 매립용 부지의 확보 및 처리시설에 대한 많은 비용을 핑계로 불법매립 등 처리에 애로를 겪고 있는 실정이다.

대한민국의 대표적인 청정지인 제주지역도 마찬가지이다. 제주도는 예로부터 돌과 바람과 여자가 많아서 ‘삼다(三多)의 섬’이라 불려왔다. 三多 중 하나인 제주의 돌은 오래전 선조들에 일상적인 생활의 도구와 멧돌, 방아돌 등을 만들어 사용하였고, 또한 마을 어귀마다 우리에게 친숙하면서도 깨끗한 자세를 자랑하며 지키는 수호신 돌하르방을 만드는 등 일상생활의 밀접한 재료로 활용되어졌다. 이러한 이유로 제주도에서는 다른 어느 산업보다 석재산업이 꾸준하게 성장하여 왔으며 이로 인해 위에 거론되었던 문제점은 제주지역에서도 발생할 수 밖에 없는 실정이다.

이에 석재 가공 과정에서 폐기물로 배출되고 있는 현무암 석분슬러지를 재활용

재료로 활용하면 어떨까 하는 생각에서 출발하여 본 연구는 시작이 되었다. 또한 석분슬러지의 물리적, 화학적 성분을 분석하고 활용시 위해성 여부 등에 대한 연구가 필요하게 되었다. 이와 더불어 석분슬러지가 발생에 따른 공급보다 수요 될 수 있는 방안을 모색하게 되어 차수공법 개발을 위한 실내 모형 시험 등 공학적 활용에 대한 연구도 필요하게 되었다. 이들 연구를 통하여 석분슬러지를 자원화 하여 재활용할 수 있는 방안이 마련 될 수 있을 것이다.

## 2. 연구 내용

현무암 석재가공 과정에서 발생하는 석분슬러지는 일반폐기물로서 처리되면서 이에 대한 처리 공간 및 비용이 생산업체들에게는 부담이되 이를 재활용하여 자원화 할 수 있는 방안을 찾기 위한 연구내용을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

1. 현무암 석분슬러지의 재료특성에 대한 연구와 현장에서 비교적 구입이 쉬운 재료(현장토사, 경화재, 혼화재, Fly-ash, 모래)를 선택하여 그 재료의 기본 성질을 알아본 후 석분슬러지와 혼합하여 일정시간 경과 후 압축강도시험과 투수시험을 시행하여 차수재료로서의 활용 여부 등을 검토하고자 한다.

2. 현무암 석분슬러지와 시멘트, 혼화제가 혼합된 시료가 저온 한랭지역에서 수분이 동결함에 의하여 혼합시료의 압축강도와 투수성 등 품질 변화가 어떻게 변화되는가를 알아보고자 한다. 또한 혼합시료의 건조수축 및 수화열에 의한 균열과 길이변화에 대하여 검토 하고자 한다.

3. 현무암 석분슬러지의 정화능력을 알아보기 위하여 흡착시험에 대하여 검토하고자 한다.

4. 현무암 석분슬러지를 활용하여 현장에서 사용할 수 있는 공법개발을 위하여 바닥부위에 누수가 많은 저수지와 유사한 지반모형을 실내에 제작하여 지반모형상부가 수중상태와 건조상태인 경우를 가정 배합된 시료를 자유 낙하시켜 일정시간 경과후 시험 전·후의 투수성을 측정 바닥지반 차수보강 재료로서의 적용

여부를 검토하고자 한다. 또한 실제 시공된 현장에 투수시험을 실시하여 현장 공법으로서의 적용 여부도 검토하고자 한다.

5. 그 외에도 현무암 석분슬러지를 활용할 수 있는 방안에 대하여 알아보하고자 한다.



## II. 석재산업 및 석분슬러지

석재(stone materials)라 함은 통상적으로 토목용과 건축용 판재와 공예품용 및 쇄석용 등으로 활용되는 암석을 지칭하는 것으로 한국공업규격(KS F 2530)에서는 천연슬레이트, 쇄석, 궤도용 부석 및 도로용 쇄석을 제외한 주로 토목, 건축에 사용되는 천연산 석재를 규정하고 있다. 많이 사용되는 석재로는 화강암, 대리석, 석회석, 사암, 현무암, 안산암, 점판암, 오석류 등 그 수가 많으나 한국에서 주로 사용하는 석재는 대리석과 화강암이고 대리석은 건축내장재와 공예품용으로 활용되고 있으며, 대리석은 법정광물이기 때문에 광업법의 적용을 받고 있다.

### 1. 석재 산업

#### 1.1 제주도 지질현황

제주도는 신생대 제3기~4기에 수십 차례에 걸친 화산분출에 의해 형성되어 화산원 지형이 많이 보전되어 있는 신생 화산섬이다. 제주도는 북동동-남서서 방향의 장축(74km)과 북서서-남동동 방향의 단축(32km)을 갖는 타원형의 섬으로 면적은 1,825km<sup>2</sup>이다. 중앙부에는 1,950m 높이의 한라산이 위치하고, 정상에는 지름이 575m×400m, 깊이가 100m에 이르는 분화구가 있으며 돛상의 조면암이 분화구 주변에 관입상으로 분포해 있다.

제주도 전역에는 360여개의 오름(분석구, 응회환, 응회구, 용암돔 일부가 포함됨)이 분포하고 있다. 제주도의 서측과 동측은 완만한 경사를 갖는 저지대가 형성되어 있고, 서귀포시와 제주시에서 한라산 쪽으로는 좁은 구역에서도 지형의 변화가 심하고 험준하다. 이와 같은 지형적 특징은 분포 암석의 물성과 관련되는데, 완만한 경사 혹은 저지대에는 pahoehoe 용암류가 분포하고, 지형 기복이 있는 지역이나 고지대에는 aa용암류 및 치밀 견고한 조면암류가 분포하여 기본 암석의 변화를 보인다.

지형 기복이 큰 지역에는 용암분출에 따른 클린커와 화산폭발에 의해 형성된 스크리아가 재 이동되어 표면을 피복하고 있어서 용암류 외에 돌 부스러기가 집적된 양상을 보인다.

제주도의 지질에 대한 연구는 농업진흥공사(1971) 1/10만 지질도, 국립지질광물연구소(1973) 및 한국지질자원연구원(2002)의 1/25만 지질도, 한국자원연구소(1995)의 1/100만 지질도와 1/5만 지질도(성산도폭:원종관 외, 1993; 표선도폭; 원종관 외, 1995; 제주·애월도륙; 제주도, 1998, 모슬포·한림도륙; 한국자원연구소, 2000:서귀포 하효리도륙; 제주도, 2000)가 작성되어 상세한 지질분포 및 층서가 제시 되었다. 제주도의 지질층서는 Table 2.1과 같고, 제주 지질도폭상에 제시된 지질도는 Fig. 2.1과 같다.

제주도의 구성 암석은 역암(암), 용암분출에 의해 형성된 화산암, 화산폭발에 의해 형성된 화산쇄설암이 있다. 화산암들은 광물조성과 화학성분에 있어서 현무암, 조면현무암, 현무암질조면안산암, 조면안산암, 안산암 및 조면암류로 분류된다(한국자원연구소, 2000). 조면암은 한라산 정상과 산방산의 한정된 곳에 분포한다. 제주도 현무암류는 Wahlstrom(1947) 조직에 따른 암석의 분류에서 반성조직(Porphyritic texture)과 반정광물이 나타나지 않는 비현정-미정질 조직(Aphanitic texture)으로만 나타나는 암석이다. 그러므로 반정광물이 나타나는 현무암과 반정광물이 없거나 매우 소량 나타나는 현무암으로 구분할 수 있다.

제주도 현무암류에서 반정광물로 나타나는 광물은 거의 대부분 사장석, 휘석, 감람석이며, 일반적으로 가장 많이 포함된 반정광물을 암석명 바로 앞에 표기하여 암석명을 수식하는데 사용하는 데 반정광물이 유무와 가장 많이 포함된 반정광물이 종류에 따라 (1) 반정광물이 나타나지 않거나 거의 없는 경우 비현정질현무암 계열(aphanitic basalt series, Ap-B series)로 분류하며 가장 많이 포함된 반정광물에 따라 (2) 장석현무암 계열(feldspar basalt series, FB series), (3) 휘석현무암계열 (augite basalt series, AB series), (4) 감람석현무암 계열(olivine basalt series, OB series)로 분류할 수 있다.

Table 2.1 Geological Layer in Jeju

Geology	Sym bol	Geology	Sym bol	Geology	Sym bol	Geology	Sym bol
해빈사	S-b, S-B	서구층	SD	만세동산역암	Sm	윗세오름조면현무암	D9
하모리층	HA MO	송악산옹회암	M12	왕이메조면현무암	B2	고산층	Sks
술악조면현무암	M11	병악현무암질 조면안산암	M10	광해악현무암	A7	법정동조면현무암	S7
호근동역암	Sh	백록담 조면현무암	A6	입석동역암	Sy, St	대포동조면현무암	D8
성천포역암	S	시오름 조면현무암	S6	범호촌역암	Sbh	성널오름조면현무암	M9
한라산조면암	T6	물장을 조면현무암	M8	굴전동역암	Sk	큰드레조면현무암	D7
보리악조면현무암	S5	조근대비악 조면현무암	D6	한북교하와이 아이트	M7	소록산조면현무암	D5
대천동현무암	A5	위미리역암	Sw m	신례리조면현무암	M5	봉개동현무암	D4
태흥리조면현무암	M4	설오름조면 현무암	S4	공천포현무암	A4	어도리현무암	B1
선흘리 현무암질안산암	A3	서김녕리퇴적층	DON GB	영평동현무암	M3	거로교퇴적층	Skr
건입동 하와이아이트	S3	일도조면안산암	T5	도만동조면현무암	M2	정실현무암	S2
이호동현무암	D3	해안동현무암질 조면안산암	T4	신흥리현무암	A2	가문동현무암	D2
중엄리현무암	S1	이수동현무암	A1	신엄리현무암	D1	과오름현무암	M1
산방산조면암	T3	당산봉옹회암	YO NG	군산옹회암	KU NSA	강정동현무암질 조면안산암	T2
월평동역암	Sw	천지연 조면안산암	T1	송산동역암	Ss	정방동조면안산암	T1_1
소정방현무암질 조면안산암	T1_2	서귀포층	SG	남성리옹회암	T1_ T		

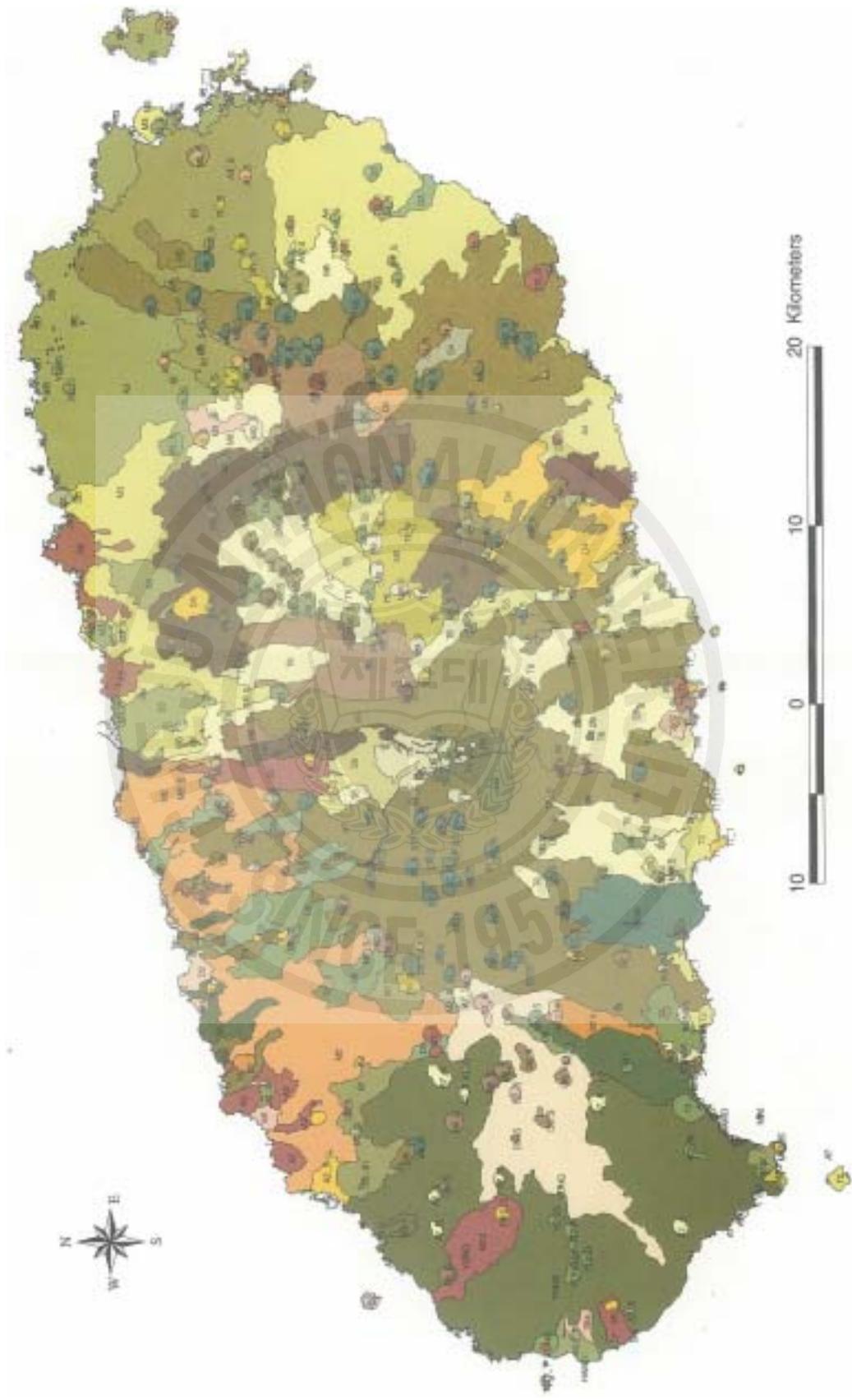


Fig. 2.1 Geologic map of Jeju Island(Park, 2001)

## 1.2 석재산업 규모

석재산업은 채석, 가공, 시공, 공예품 생산 등의 분야에서 가공분야가 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 가공기계와 공구 등 관련 산업과의 관계도 많을 뿐 아니라 종사원도 가장 많다(한국석재산업총람, 2005).

원석을 가공하여 건축용 판재, 석조각품 등 제품을 생산하여 부가가치를 향상시키는 석재가공업체의 현황을 살펴보면 Table 2.2에서 보는 바와 같으며, 2003년도까지 조사된 자료에 의하면 전국적으로 가행 업체 수는 505개 업체, 업체 평균 생산액은 10.6억원, 평균 종업원수는 10명 내외로 일부업체를 제외하고는 대부분 업체가 영세한 실정이다.(하은용, 2005)

**Table 2.2 The Present Status of Stone Processing Industry**

Section	'97	'99	'00	'01	'02	'03	Note
Number of Industry	686	453	427	427	499	505	
Number of Employees	8,239	4,560	4,302	4,285	4,997	4,903	
Number of Production (hundred million won)	7,453	4,461	4,428	4,432	5,277	5,368	
Average of Production (hundred million/industry)	10.9	9.8	10.4	10.4	10.6	10.6	
Amount of Production (thousand ton)	1,666	1,626	1,324	1,249	1,403	1,818	

또한, 다른 자료 분석에 의하면 2005년 1월 현재 석재가공 업체 수는 218개 업체이고, 1개 업체에 평균 종업원수가 5명 내외로 줄어들어 종원수는 약 1,100명으로 추정하고 있다.(한국석재산업총람, 2005)

### 1.3 석재생산 현황

한국석재공업협동조합은 1970년대 초반 원석 수출을 하면서 (사)한국수출석재생산업조합으로 발족되어 현재까지 약 25년이 넘게 우리나라 석재산업 전반에 대하여 관리하고 있으며, 한국석재공업협동조합을 통해서 관급자재용 단체수의계약으로 납품하는 도로 보·차도 경계석 등의 연도별 실적을 보면 1995년도에 167억원, 1997년에 254억원, IMF 기간인 1998년도에는 224억원으로 다소 주춤했으나 2001년도에 354억원으로 늘어났고 2004년도에는 475억원으로 크게 증가했다. (한국석재산업총람, 2005)

**Table 2.3 Private Contract of Korea Stone Industry Cooperative and Actual Supply**

Year/Item	3rd unit cost and total amount	Total amount (landscape architecture)	Jeju Basalt Stone	Total
1995	15,795,183		990,000	16,785,183
1996	16,324,366		919,000	17,243,366
1997	24,617,728		878,000	25,495,728
1998	20,284,566	85,798	2,073,000	22,443,364
1999	18,532,937	1,606,257	2,374,000	22,513,194
2000	16,745,422	2,408,759	5,043,000	24,197,181
2001	22,623,254	8,296,351	4,572,000	35,491,605
2002	24,138,717	5,289,600	2,984,000	32,412,317
2003	25,289,852	12,505,228	2,265,277	40,060,357
2004	28,696,892	16,116,888	2,738,060	47,551,840

※ Unit: one thousand won

#### 1.4 석재류 수출·입 현황

석재류의 수출은 일본이 외국산 석재를 수입하기 시작한 1960년대로 거슬러 올라가 일본의 석재 수입실적 통계에 따르면 1967년도 한국에서 화강암 원석 658톤을 수입해간 것이 우리나라로서는 처녀 수출로 보이며, 1973년부터는 석등, 석탑, 묘비 등 석제품까지 수출하기 시작하면서 석재류 수출은 매년 경이적인 실적 경신을 가져왔다.

1970년대 석재류는 수출의 성장기로서 매년 100% 이상의 수출신장을 가져왔으나, 1980년대 후반기에 부터는 감소 추세로 진행되어 1989년도 616,559톤의 석재류 수출을 최고로 한 이후 10년이 지난 1999년에는 10분의 1수준으로 석재류의 수출은 계속 감소 하고 있으며, 반대로 수입은 계속 증가일로에 있다. 석재류 수출과 수입현황은 Table 2.4, 2.5와 같다.(한국석재산업총람, 2005)

**Table 2.4 The Yearly Report on the Stone Material Export Statistics**

Item number	2001		2002		2003		2004	
	Volume	Amount	Volume	Amount	Volume	Amount	Volume	Amount
2515			23	9	110	17	339	36
2516	58,073	2,298	8,346	1,777	4,353	1,252	5,204	1,701
6801	48	26	10	1	2	3	1	1
6802	13,539	16,274	8,663	10,582	6,215	6,998	8,095	6,855
Total	71,660	18,598	17,042	12,369	10,680	8,270	13,639	8,593

\* Unit (Volume: ton, Amount :1,000\$)

**Table 2.5 The Yearly Report on the Stone Material Import Statistics**

Item number	2001		2002		2003		2004	
	Volume	Amount	Volume	Amount	Volume	Amount	Volume	Amount
2515	1,973	348	5,523	883	2,992	792	2,163	880
2516	44,942	5,282	39,492	5,031	62,794	7,077	50,143	7,782
6801	2,225	477	551	89	4,317	382	5,881	648
6802	753,541	164,864	1,423,464	282,106	1,784,049	358,930	1,757,497	3980,859
계	802,781	170,971	1,469,030	288,109	1,854,152	367,181	1,815,684	390,169

※ Unit (Volume: ton, Amount :1,000\$)

### 1.5 석재산업 시장규모

한국 석재산업에 관한 통계는 작성하는 곳도 없고 또 원석채취와 석재가공, 석재수출입, 건축석재시공 등 여러 갈래로 나뉘어져 있기 때문에 석재산업 전체 통계를 집계해서 시장 규모를 알아본다는 것은 어려운 실정이나, 부분적으로 정리가 된 여러 기관의 통계를 종합하여 분석한 결과 Table 2.6에서 보는 바와 같이 한국석재산업의 시장 규모는 약 23,581억원 규모로 계산되고 있으며, 향후 전망은 건축경기의 회복과 납골묘 등의 수요가 증가하는 경우 시장규모는 점차 커질 것으로 전망하고 있다.(한국석재산업총람, 2005)

**Table 2.6 Market Scale of Korea Stone Industry**

Standard	Amount (hundred million)	Ratio	Note
Domestic Raw Ore	5,083	21.56%	
Manufactured Stone	700	2.97%	
Tombstone, Urn Tomb	3,000	12.72%	
Stone Material Import	86	0.36%	
Stone Material Export	3,900	16.54%	
Construction	10,812	45.85%	
Total	23,581	100.00%	

## 1.6 제주도 석재산업 현황

### 1.6.1 석산 및 가공장 현황

(1) 제주도에 석재가공용 원석 생산을 위한 채석 석산은 12개정도가 있는 것으로 조사가 되었으며, 지역별로 북동쪽에 6개, 북서쪽 1개, 남서쪽 4개, 남동쪽 1개가 분포하고 있다.

한라산을 경계로 하여 석산 위치별로 제주도의 동쪽과 서쪽으로 나누어 암석의 압축강도를 시험한 결과 동쪽지역에서 생산되는 원석의 압축강도는 306.0~888.5 kgf/cm<sup>2</sup> 서쪽지역에서 생산되는 원석의 압축강도는 531.2~2,200kgf/cm<sup>2</sup>로 서쪽지역(무결암) 현무암이 동쪽지역(다공질암)의 현무암 보다 강도가 더 좋음을 알 수 있다. Fig. 2.2는 제주도에 있는 석산과 석재가공 공장의 분포도이다.

(2) 제주도에 석재가공공장 현황은 제주도석재공업사업협동조합에 등록된 업체 기준으로 알아 보았다., 그 결과 제주도에 석재가공공장 현황은 Table 2.7과 Table 2.8과 같으며, 총 13개업체에 근로자수는 약 180여명 정도로 운영되고 있었다. 가공장 마다 일부 자동화가 되었지만, 육체노동과 근무조건이 열악 등을 이유로 근로자 대부분이 고령이었으며, 부분적으로 해외 인력이 근무하는 업체도 있었다. 운영되는 대부분 영세한 실정이었다.

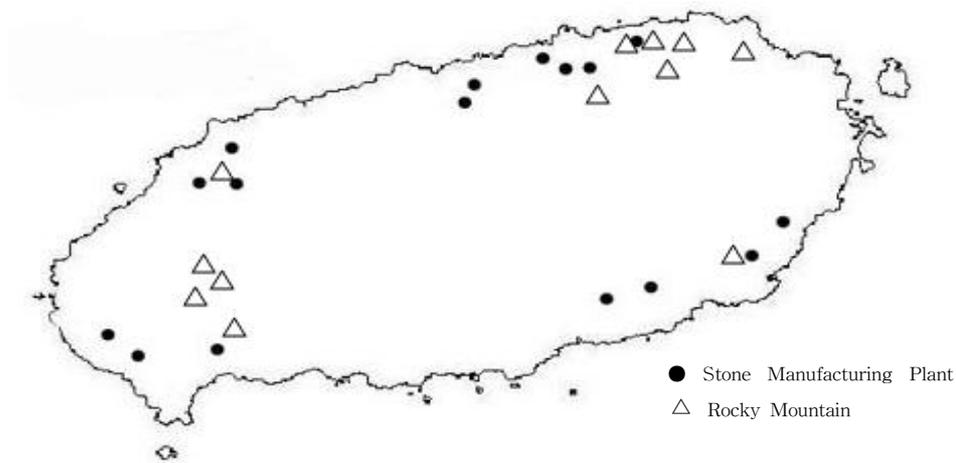


Fig. 2.2 Location of quarry and a stone processing plant in Jeju

Table 2.7 The Present Status of Registered Enterprise in the Association

Name of Industry	Address	Main Products	Number of Employees	Note
○○개발	제주시 화북2동	석재 가공품	18명	
○○개발	조천읍 함덕리	석재 가공품	16명	
○○석재	구좌읍 동북리	석재 가공품	32명	
○○개발	한림읍 금능리	석재 가공품	6명	
○○산업	조천읍 함덕리	석재 가공품	11명	
○○산업개발	조천읍 북촌리	석재 가공품	13명	
○○개발	남원읍 의귀리	석재 가공품	21명	
○○개발	대정읍 안성리	석재 가공품	10명	
○○개발	대정읍 일과리	석재 가공품	9명	
○○산업	표선면 하천리	석재 가공품	25명	
○○석재	남원읍 태흥리	석재 가공품	5명	
Total			166명	

**Table 2.8 The Present Status of Unenrolled Enterprise in the Association**

Name of Industry	Address	Main Products	Number of Employees	Note
○○산업	한림읍 상대리	석재 가공품	10명	
○○석재	조천읍 북촌리	석재 가공품	5명	
Total			15명	

### 1.6.2 석재산업 규모

제주도내의 석재산업 규모를 확인하기 위하여 제주석재공업사업협동조합을 통해 확인한 결과 2005년도 관급납품 생산량은 Table 2.9와 같다. 지난 2005년도 관급 납품 석재가공품 생산량은 약 9,106톤이며, 사급자재인 경우 공장별로 주문 생산이 되어 석재공업사업협동조합에서는 파악이 어려웠으나, 관계자의 말을 들어 보면 일반적으로 사급자재의 생산량은 관급자재의 4~5배 정도로 추정되었다. 결과적으로 2005년도 제주도내에서 생산된 관급과 사급을 포함한 석재가공품 생산량은 약 45,530톤 정도로 추정되었다.

**Table 2.9 Stone Material Production for Government Supply in 2005**

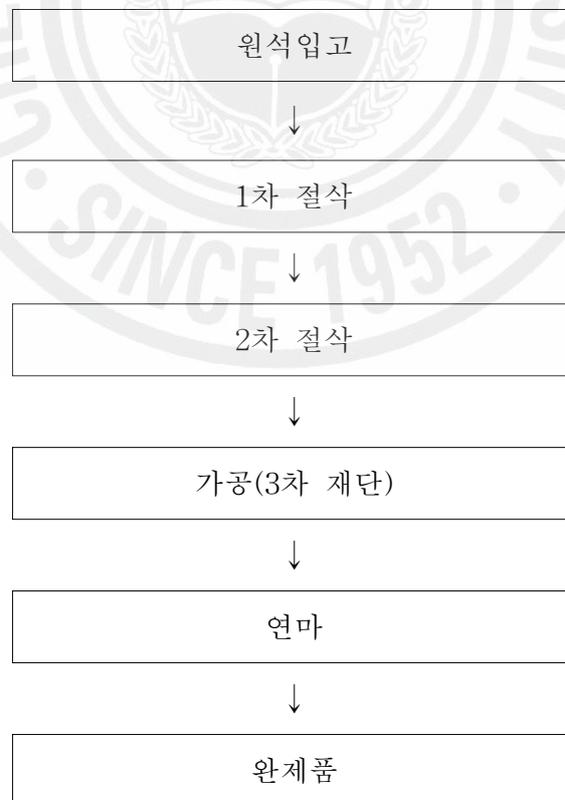
Section	Size	Quantity /Volume	Unit: kg (Piece, m <sup>2</sup> )	Weight (kg)
Bumpy Stone	300×150×20	41,601개	2.3	9,682
	300×150×30	9,000개	3.3	29,700
Plate Stone	300×300×30	1,222개	6.9	8,432
	300×300×40	784m <sup>2</sup>	9.2	7,213
	300×450×50	316m <sup>2</sup>	13.8	4,361
	200×200×50	353m <sup>2</sup>	8.6	3,036
	350×440×50	6,000m <sup>2</sup>	14.2	85,200
	300×600×40	153m <sup>2</sup>	18.4	2,815
	500×500×50	208개	31	6,448
Irregular Stone		4,938m <sup>2</sup>	102	503,676
Road Boundary	120×120×500	3,400개	18.4	62,560
	120×150×500	32,474개	22.9	743,655
	150×150×500	27,179개	28.5	774,602
Boundary of Sidewalk/Road way	170×270×500	11,370개	43.4	493,458
	200×250×500	65,575개	64.7	4,242,703
	210×300×500	25,437개	80.3	2,042,591
Total				9,106,132

## 2. 석분슬러지

### 2.1 석재 가공 과정

석재를 가공하는 과정은 석산으로부터의 채석된 원석을 가공공장 부지내로 운반된 후 지게차 등 운반기를 통해 공장내부에 운반되어 돌을 절단하는데 사용되는 다이아몬드 쏘브레드(등근톱)을 이용 절단기와 절삭기를 통해 2차에 걸쳐 제품 크기에 맞게 원석을 절단된다.

이후 중간톱과 작은톱, 연삭기 등을 이용하여 가공하는 3차 재단 후 형태가 완성되면, 제품 표면에 수동이나 자동 연마기를 통해 연마작업 및 모따기 과정을 거쳐 완제품이 된다. Fig. 2.3은 석재가공과정 Flow이며, Fig. 2.5~2.10은 가공과정마다의 사진촬영 자료이며, Fig. 2.4와 2.11은 가공장 내·외부 전경사진이다.



**Fig. 2.3 The Flow chart of the Stone Processing**



Fig. 2.4 The View of the Stone Industry  
(Outdoor)



Fig. 2.5 Stone Process  
(Bringing in the Raw Material)



Fig. 2.6 Stone Process (1st Cutting)



Fig. 2.7 Stone Process (2nd Cutting)



Fig. 2.8 Stone Process (Final Cutting)



Fig. 2.9 Stone Process (Grinding)



Fig. 2.10 Stone Process  
(Finished Product)



Fig. 2.11 The View of the Stone Industry  
(Indoor)

## 2.2 석분슬러지 발생 과정

석재 가공과정에서 발생하는 석분슬러지는 기계의 냉각수로 사용되는 물과 절삭 및 연마시 발생하는 석분이 혼합되어 현탁액으로 분출되는데 원폐수인 현탁액이 기계하부의 수로와 공장내부에서 외부로 보내지는 수로를 통해 이동하여 1, 2, 3차 침전지와 저수조 중화및 응집조, 농축 및 침전조를 거친 후 탈수과정 이후 석분슬러지가 발생하게 되는데 소규모 영세 업체에서는 처리단계를 1, 2, 3차 침전지만을 통해 석분을 침전시키는 등 가공공장마다 다소 차이가 있다. Fig. 2.12는 계통에 따라 처리과정에서 석분슬러지가 발생하는 과정이며, Fig. 2.13~2.20은 단계별 사진촬영 자료이다.

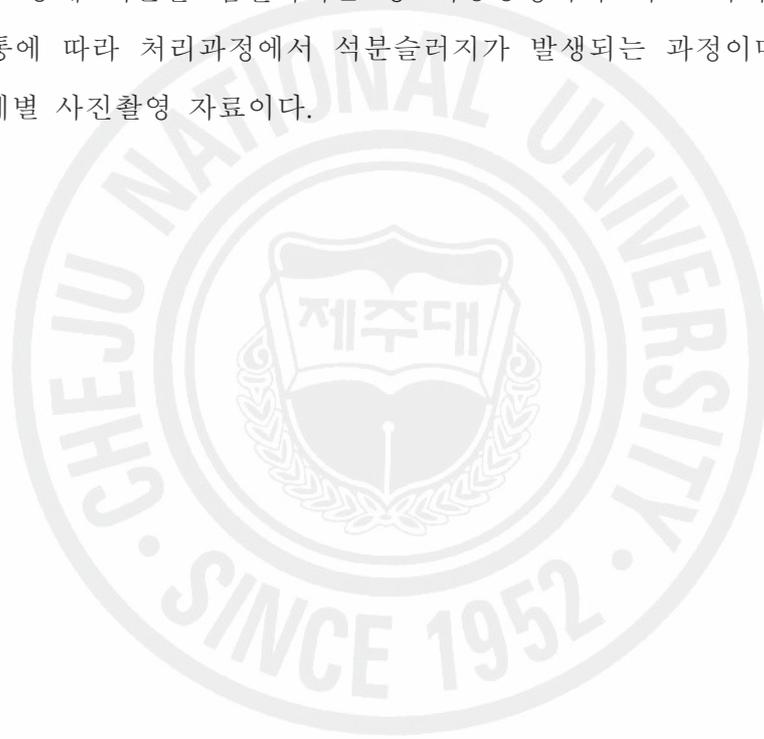




Fig. 2.12 The Flow chart of the Powdered Basalt Sludge Production



Fig. 2.13 The photo of the Powdered Basalt Sludge Production (Wastewater)



Fig. 2.14 The photo of the Powdered Basalt Sludge Production (Collecting Water)



Fig. 2.15 The photo of the Powdered Basalt Sludge Production (1st Settling)



Fig. 2.16 The photo of the Powdered Basalt Sludge Production (2nd Settling)



Fig. 2.17 The photo of the Powdered Basalt Sludge Production (3rd Settling)



Fig. 2.18 The photo of the Powdered Basalt Sludge Production (Dewatering)



Fig. 2.19 The photo of the Powdered Basalt Sludge Production (Powdered Basalt Sludge)



Fig. 2.20 The photo of the Powdered Basalt Sludge Production (Piling)

## 2.3 석분슬러지 발생 현황

### 2.3.1 전국 발생 현황

전국적으로 석재 가공과정에서 발생하는 석분슬러지의 연간 발생량 및 처리비용은 Table 2.10에 나타내었다. Table 2.10에서 보는 바와 같이 석분슬러지 발생량은 2003년을 기준으로 약 80만톤으로 톤당 처리 비용을 15,000원 정도로 계산할 때 연간 처리 비용은 약 120억원 정도 소요되고 있다.(하은용, 2005)

**Table 2.10 The Current Status of the Stone Sludge Production Amount and Treatment Expenses**

Section	'97	'99	'00	'01	'02	'03	Note
Stone Sludge (ton)	987,200	983,800	780,000	733,500	790,300	787,800	
Cost of Disposal (one hundred million won)	148	147.6	117	110	118.5	118.2	15,000 won/ton

### 2.3.2 제주도 발생 현황

제주도에서 발생하는 석분슬러지양은 현재 정확한 집계는 어려우며, 폐기물을 처리하는 업체에서 입고된 폐기물의 양을 근거로 추정하여 산출하였다. 제주도는 석분슬러지를 처리할 수 있는 면허를 가진 폐기물처리업체는 한군데로 여기에 집계되는 석분슬러지는 2개의 석재 가공공장에서 나오는 수량이 집계되고 있는 실정이다. 제주도내 석재가공공장이 13개소 정도이므로 공장마다 규모가 조금씩 다르지만 개략 추정하여 발생량을 추정하면 Table 2.11과 Table 2.12와 같다.

**Table 2.11 The Present Status of the Scrapped Stone Material Disposal**

Section	'03	'04	'05	'06. 9 Present	Note
Amount of Construction Wastes (ton)	169	4,380	6,524	2,493	①
Amount of Basalt Stone Sludge Wastes(ton) (two plants)	68	1,752	2,610	997	About 40% of ①
Amount of Production per Industry (ton)	34	876	1,305	499	
Amount of Estimated Production (ton)	442	11,388	16,965	6,481	13 Plants

**Table 2.12 The Production Amount of the Powdered Basalt Sludge**

Section	'03	'04	'05	'06. 9 Present	Note
Basalt Stone Sludge(ton)	442	11,388	16,965	6,481	
Cost of Disposal (one million won)	6.6	170	254	97	15,000 won/ton

석분슬러지의 발생의 추정은 '03년도부터 조사가 되었으나, '03년도의 조사는 신뢰성이 없으며, '04년도와 '05년도의 발생량을 표에서 보는 것과 같이 50%정도가 늘어났다. 실제 폐기물처리 업체를 통해 처리되는 석분슬러지는 1년에 약 15,000톤로 추정되지만, 2005년도 관급자재와 사급자재 생산량을 기준으로 산출한다면 생산량 45,530톤의 40%정도로 약 18,000톤 이상이 발생되는 것으로 추정되어진다. 언론보도를 통해 불법 매립하다 적발되는 사례가 있는 것으로 보아 사업장마다 음성으로 처리하는 경향이 있어 실제 발생량을 산출하기는 어려움이 있었다.

## 2.4 처리 현황

### 2.4.1 석분슬러지 처리

석분슬러지는 단순 물리적 침전방식과 물리·화학적처리 방식에서 발생한 슬러지를 콘크리트 침전조를 여러개 만들어 자연 침전시키며 슬러지가 쌓이면 중기(백호우)을 이용하여 슬러지를 퍼내어 구조물 건조장에서 자연건조 및 필터프레스로 여과한 후 폐기물처리업자에게 위탁처리하고 있는 실정이다.

현재 석분슬러지의 처리는 전량 환경처리업자에게 위탁처리하도록 되어 있기 때문에 석재 가공공장에서 환경처리 업자에게 처리비용을 지급하면서도 보관기관을 넘기게 되면 슬러지가 사업장 내부에 쌓이게 되어 가공업체 대표가 구속되는 등 현장에서의 어려움이 상존하고 있는 실정이었다. Fig. 2.21은 지난 2004년도 제주지역에서 발생되었던 불법매립 언론 보도내용이다.



## 2.4.2 석재가공 폐수 처리

석재 가공시 발생하는 폐수는 석재 가공 기계의 냉각수로 사용되는 물과 절삭 및 연마시 발생하는 석분이 혼합된 현탁액으로서 미량의 광유가 포함되어 있으며 슬러지의 광물구성은 사용 원석의 성분에 따라 구성되어 진다. 가공업체에서의 폐수 처리방식은 단순 물리적 침전방식과 물리 화학적처리 방식으로 대별할 수 있다.

단순 물리적 침전방식은 소규모 영세업자들이 주로 사용하는 간이 폐수처리방식으로 가공공장에서 배출된 폐수를 1차 침사지로부터 2, 3차 침전지를 통하여 석분을 침전시킨 후 폐수를 재순환 사용하는 방식이다. 단순물리 침전방식은 과거 공해단속 규제가 심하지 않을 때에 폐수를 일체 방류하지 않고 계속 재사용하는 전제 조건으로 폐수 배출 등록이 허가되었으나 최근 공해단속 규제가 강화됨에 따라 상기 폐수처리 방식은 허가를 받기 어려운 상태이다. 석재폐수의 특성에 대하여 조사한 결과는 아래와 같다. (하은용, 2005)

### (1) 석재 폐수의 물리적 특성

폐수 중 입자의 입도 범위 :  $7\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$

- 1~ $10\mu\text{m}$ 입도 : 5 ~ 10%

- 10~ $100\mu\text{m}$ 입도 : 80 ~ 90%

-  $10\mu\text{m}$ 입도 : 5 ~ 10%

폐수 슬러지의 구성물질

- 각종 원석의 석분 : 99%이상

- 각종 연삭기구의 마모된 철 성분 : 1%미만

침전도

- 1일 이내 침전물 : 95%이상

- 1일 이후 침전물 : 5%미만

법규상의 배출 허용 기준 : 부유물질 - 150ppm 이하

광유(N-HEX) - 5ppm이하

## 2.5 석분슬러지 및 폐수 법적 기준

석제가공시 발생하는 폐수와 석분슬러지의 법적기준은 수질환경보전법상의 기준에 의해 수질오염물질을 공공수역에 배출하는 “폐수배출시설”로 규정되었으며 석분슬러지는 폐기물관리법 2조(정의)에 의해 사업장 폐기물로 정의되며, 석제품 제조업에서 발생하는 폐수처리오니에 해당된다.

적정 보관기간을 경과하여 보관하는 것은 폐기물관리법 제12조 및 동법 시행규칙 제6조의 규정에 위배되며, 폐석을 사업장내 매립하는 행위는 폐기물관리법 제 7조 규정에 위반이며, 불법으로 야적하는 행위는 폐기물관리법 제12조 규정에 위반되므로 폐기물처리업장에 위탁 처리하는 실정이다.

**Table 2.13 The Substance of Water Pollution Emission Test**

Section	Discharged Facility	Total Facility	Included Facility
비금속광물 제품제조시 설(석유 및 석탄제품 제외)	세척시설	용적2m <sup>3</sup> 이상또는 용수1m <sup>3</sup> /시간이상	도기·자기 및 토기제조시설, 유 리 및 유리제품 제조시설, 구조점 토 제품 제조시 설, 시멘트, 콘크 리트제품, 제조시 설,내화물 제조시 설, 석제품제조시 설, 암면 및 기타 비금속광물 제품 제조관련 시설
	성형가공시설	용적1m <sup>3</sup> 이상	
	수양생시설	용적1m <sup>3</sup> 이상 (수중기 양생시설의 경우에는 용적5m <sup>3</sup> 이상)	
	혼합시설	용적2m <sup>3</sup> 이상	
	수세식과쇄시설	용적2m <sup>3</sup> 이상	
	분리시설	용적2m <sup>3</sup> 이상 또는 동력 2마력이상	
	약품시설	용적1m <sup>3</sup> 이상	
	연삭시설	동력 5마력이상	
	수냉식절단시설	동력 5마력이상	

석분슬러지는 1987년 노동부 고시가 있기 전까지는 특정폐기물로서 공해 유발  
업종으로 분류되어 왔지만 지금은 일반폐기물로 분류되어 다소 처리 규정이 완  
화되어 왔다.

현재 폐기물관리법 상에서 석분슬러지의 기준은 폐기물관리법 시행규칙 제46조 별표11-2에 “재활용대상폐기물은 광재, 분진, 도자기조각, 석탄재, 연탄재, 점토점결폐주물사, 폐석회, 폐석고, 폐내화물, 폐콘크리트전주(사업장폐기물에 한한다), 석재가공과정 또는 벤토나이트 제조공정에서 발생하는 폐석재, 레미콘제조공정에서 발생되거나 건설현장에서 반품된 페레미콘, 무기성오니(토기, 자기, 내화물, 시멘트, 콘크리트, 석제품의 제조시설, 수도사업용 정수시설, 비금속광물 분쇄시설(굴착시설을 포함한다) 또는 토사세척시설에서 발생하는 무기성오니로서 수분함량 70%이하로 탈수, 건조한 것에 한한다)에 한한다.”고 명시되었다.

또한 재활용할 경우에 준수해야 할 사항으로서 첫째 “석탄재, 연탄재, 점토점결폐주물사, 무기성오니는 일반토사류 또는 건설폐자류를 재활용한 토사류를 50% 이상 혼합하여 사용하여야 한다.”라고 명시되어 있고, 둘째로 “재활용대상 폐기물은 별표 1의 유해물질 함유기준 이내이어야 하며, 시험방법은 폐기물공정시험방법에 따라야 한다.”고 명시되어 있다. Table 2.14는 폐기물 공정시험법에 의한 유해 물질함유량 기준을 나타내었다(하은용, 2005).

**Table 2.14 The Standard of Harmful Chemistry Ingredient Content**

Item	Density (mg/ℓ)	Item	Density (mg/ℓ)	Note
Pb	3 or above	Cr <sup>+6</sup>	1.5 or above	1 ℓ of effluent from the elute test result based on the processed waste test and its contained amount
Cu	3 or above	CN	1 or above	
As	1.5 or above	aerobic(P)	1 or above	
Hg	0.005 or above	PCE	0.1 or above	
Cd	3 or above	TCE	0.3 or above	

## 2.6 석재폐수 및 석분슬러지의 환경영향

일반적인 석재 폐수의 유해 중금속의 존재 여부와 수소이온 농도를 측정한 결과를 Table 2.15에 나타내었다. 유해 중금속은 배출허용 기준치 이하로 나타났지만, 부유물질농도는 문제가 되고 있다. 이를 해결하기 위해 침전지를 설치한 다음 방류하고 있으며, 부유물의 응집을 촉진시키기 위하여 응집제나 화학처리를 하는 경우도 있다. 침전지에 퇴적된 침전물인 석분슬러지는 석재 가공량이 많을수록 그 발생량은 더욱 증가한다. 석분슬러지는 미세한 입자로 탈수, 건조하면 분진상태로 되기 때문에 적절한 처리가 요망되며, 사업자들은 이러한 석분슬러지는 처리비용이 가공공장에 방치하거나 폐수로 무단 배출시 하천바닥에 침적해서 생태계 오염을 시킬 우려가 있다.

석분슬러지는 유해 중금속이 함유되어 있지 않고 석재와 동일한 재질이므로, 이를 석재자원으로 재이용 할 수 있는 방안을 강구하는 것이 석재 산업체의 절실한 요구로, 석분슬러지의 재활용은 매립비용의 절감은 물론 폐자원의 재이용에 의한 새로운 부가가치 창출도 가능하다고 할 수 있다(산업자원부, 2000).

**Table 2.15 The Analysis of the Stone Industry Wastewater**

Test Item	Standard Allowance of Discharge	Test Result	Note
pH	5.8~8.6	7.39	※ Unit: mg/ℓ ※ ND : none detected ※ TDS : Total Dissolved Solid
Fe	2	0.03	
Cu	0.5	ND	
Pb	0.2	ND	
Zn	1	0.04	
Cr	0.1	ND	
Cd	0.02	ND	
SO <sub>4</sub>	200	24.9	
SiO <sub>2</sub>		21.9	
TDS		274	

## 2.7 석분슬러지 국·내외 연구 현황

### 2.7.1 국내 연구 현황

국내외를 막론하고 석분슬러지의 재활용에 관한 연구 또는 실제 적용 사례는 미흡한 실정으로 이는 석재산업이 지역적인 문제뿐만 아니라 산업규모도 크지 않다는 점에서 사회적 주목을 받지 못한 원인으로 분석된다.

먼저 국내에서 수행된 석분슬러지의 재활용 연구 사례를 살펴보면 산성 토양의 토지개량제로 사용한 예가 있다. 석분슬러지는 지역적으로 생산되는 암의 종류에 따라 조금은 다르겠지만 일반적으로 칼륨(K) 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg), 철(Fe) 및 규소(Si) 성분이 다량으로 함유되어 있어 이러한 성분이 산성화된 토양이 중성화에 도움이 될 수 있는 것으로 알려져 있다. 석분슬러지의 또 다른 재활용 사례로서 고구배 자력 선별공정(HGMS)에 의해서 규장 성분을 추출하여 도자기 원료로서 응용한 경우가 있지만 수요가 한정되어 있다는 단점을 가지고 있다.

현재 석분슬러지의 재활용을 여러 가지 관점에서 검토하고 있는 것 중에서 특히 건축용 내외장재, 장식재용으로 인조대리석 제조에 관한 연구가 한국산업자원부(2000)에서는 이루어졌는데, 석분의 원료는 화강암으로 하였고 인조석 판재를 제조하여 이에 대한 물성치는 흡수율이 0.31~0.45, 압축강도 730~790kgf/cm<sup>2</sup>, 인장강도 60.0~61.9kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났다. 이는 원재료인 화강암에 비해 다소 낮은 값을 보이거나 사암이나 콘크리트 보다는 높은 값을 보였으며 천연석재에 비해 비중이 낮은 특성 등을 보였다. 이러한 인조석재 고유의 특성과 다양한 문양 및 색상 등 인조석재만이 갖는 장점을 활용한다면 내장재 및 바닥재 등 건축용 자재로서의 활용가능성이 매우 높다고 제시하였다.

성찬용(2003)은 석분과 황토를 이용하여 건자재 제품 개발에 대하여 연구를 하였다. 공시체를 석분, 황토, 시멘트, 모래를 배합비별 단위중량, 흡수율, 강도, 동탄성계수에 대하여 연구를 하였다. 단위중량은 2,050~2,135kg/cm<sup>3</sup> 범위이고 황토와 석분을 첨가할수록 무게가 감소하였다. 흡수율은 8.25~18.16정도로 황토와 석분을 첨가 할수록 흡수율이 증가 하였다. 재령 28일 압축강도는 107~451kgf/cm<sup>2</sup>, 휨강도는 23~81kgf/cm<sup>2</sup>의 범위로 나타났고, 황토와 석분의 사용량이 증가할수록 감소하고, 황토 사용량을 40%까지 증가하여도 벽돌의 강도 기준을 만족하는 것

으로 나타났다. 동탄성 계수는 강도의 증가와 비례하여 증가하고 황토의 사용량에 따라 영향이 더 큰 것으로 나타났으며, 바닥 타일 또는 벽돌 제조에 활용한 연구도 있지만 제조방법의 난이성과 낮은 부가가치로 인하여 상용화가 이루어지지 못하고 현재 실험적 수준에 그치고 있다.

그리고, 폴리머 복합소재를 이용한 폴리머 콘크리트 맨홀이나 하수도관 제조에 석분슬러지를 재활용한 사례가 있지만 이 또한 석분슬러지의 사용량이 적고 현재는 석분슬러지 대신에 다른 원료로 대체시켜 생산하고 있는 실정이다. 전반적으로 볼때 석재산업과 관련하여 발생하는 석분슬러지의 재활용 연구나 실제 적용사례는 매우 드물었다.

## 2.7.2 국외 연구 현황

석분슬러지 재활용에 대한 외국자료는 흔하지 않지만 폐석이나 폐석분을 건설 폐기물 처리에 바탕을 두고 관리하고 있는 것으로 판단되었다. 독일의 경우 1900년부터 가장 일찍 재활용의 중요성을 인식하여 건설폐기물 중에서 폐콘크리트를 도로기층재로 재활용하였다. 특히 세계 제1, 2차 대전 후 발생한 막대한 양의 건물벽돌 조각의 처리를 위해 재생골재와 관련한 재활용에 대한 많은 연구와 경험이 축적되어 있는 편이다.

그리고, 덴마크의 경우도 1929년 도로포장에 폐콘크리트 사용을 시작으로 1969년에는 자동차 도로에 폐콘크리트를 활용하였다. 미국의 경우는 1970년대부터 폐콘크리트 재활용에 관한 연구를 시작하였으며 1990년에는 오염방지법령(Pollution Prevention Act)과 폐기물 처리지침(Agenda for Action)을 통하여 발생 억제와 재활용 추진 중에 있으며 50개 주 모두에서 재활용법을 제정함과 동시에 처리장에서 처리 또는 처분을 금지하는 종목 수를 확대해 가고 있다.

일본의 경우는 1990년에 건설폐기물 대책 연구회를 설치하여 환경청, 건설청, 통산청 등 8개 부처의 공동 법안으로 1991년 재활용법 및 건설부산물 적정처리 추진 요강을 제정하여 건설부산물의 재활용을 추진하였다. 또한 폐콘크리트는 도로노반재용 또는 성토재료의 활용은 보편화되어 있는 실정이다(하은용, 2005).

### III. 기존이론

연구에 따른 이론적 배경은 흙과 암반의 투수계수, 콘크리트 건조수축, 시멘트 수화열, 포졸란 반응 등이며, 특히 석분슬러지의 광범위한 활용을 위하여 차수 재료층 기준을 바탕으로 하였다.

#### 1. 투수계수

투수율이 비교적 큰 점토질 암석이나 토사의 투수계수를 실험실내에서 측정하는 경우, 보통 전통적인 투수계수 측정법은 정상류를 이용한다. 시험편 내에 정상류가 형성되면 단위시간동안 시험편을 통과한 유량과 시험편 양단의 수두구배를 측정하여 이를 Darcy 법칙에 적용하는 것에 의해 투수계수를 계산할 수 있으며 이에는 다음과 같은 두 가지 방법이 있다.

첫째, 시험편에 일정유량(constant flow rate) 조건을 부여하고 공극수가 시험편 내를 통과함에 따라 시험편의 상, 하부에서 발생하는 공극수압의 차이를 일정 시간동안 측정하는 방법

둘째, 시험편 내에 일정간극압력수두(Constant pore pressure head) 조건을 부여하고 일정시간동안 시험편내로 유동하는 유량을 측정하는 방법

본 연구에서는 다공질 시험편 내 유체 유동을 설명하는 기본 유동식인 Darcy 방정식을 이용한다. Darcy 방정식은 다음과 같은 가정이 전제 되어 있다.

- 비압축성 유동

압력변화에 따라 부피의 변화가 없으므로 밀도는 일정하다.

- 층류유동

유체입자들이 하나의 유선을 따라 층을 이루며, 전체 흐름을 입자들의 거동이 아닌 층서적인 개념으로 파악한다.

- 뉴턴유체운동

유동의 용이도는 점성계수 혹은 점성도,  $\mu$ 라는 성질에 반비례하여 결정된다.

- 투수계수  $k$ 가 다공질 매체의 특징을 대표하는 유일한 물성이므로  $k$ 가 정의되기 위해서는 다공질 매체의 균질한 단상유체가 100%포화 되었다 가정한다.
- 다공질 매체의 고체입자와 유체 간에 상호 화학반응이 일어나지 않아야 한다.

일반적인 Darcy 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{Q}{A} = u = \frac{dl}{dt} = -\frac{k}{\mu} \left[ \frac{dp}{dl} \right] \quad (3.1)$$

여기서,

$Q$ =유량,

$k$ =투수계수

$A$ =시험편의 단면적

$u$ = 단위면적당 유체의 유속으로 다공질 매체 체적에 대한 평균속도

$\mu$ =유체의 점성

$l$ =시험편의 길이

$p$ =시험편에 가해지는 간극수압

$dp/dl$ = 다공질 시험편에 발생하는 간극수압구배

위의 식에서 - 부호는 간극수압이 감소하는 방향으로 유체가 흐른다는 것을 뜻한다.

## 1.1 정수두 및 변수두 투수시험

실내시험에 의한 흙의 투수계수를 측정하는 방법에는 2가지의 표준 실험방법 즉, 정수두 투수시험과 변수두 투수시험이 있다.

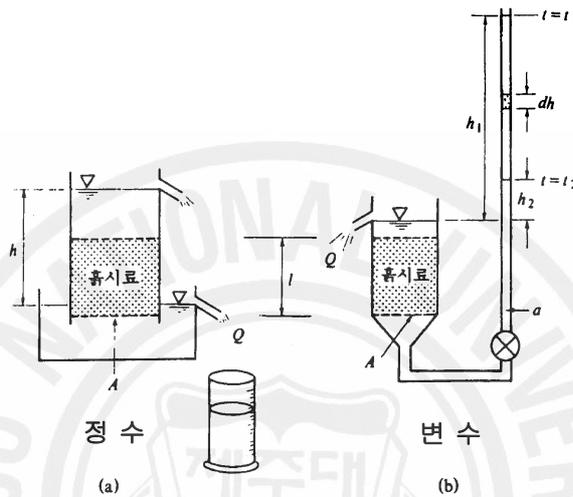


Fig. 3.1 Constant head permeability and falling head permeability tests

정수두 투수시험의 대표적인 장치는 Fig. 3.1(a)와 같다. 실험 장치에서는 물을 공급하는 입구를 조정함으로써 실험하는 동안 물의 입구와 출구사이의 수두차를 일정하게 유지하도록 한다. 물의 흐르는 양이 일정하게 되었을 때, 물을 일정한 시간동안 실린더에 접수한다. 접수된 총 유량으로부터 투수계수를 다음과 같이 계산한다. 일반적으로 투수계수가 높은 사질토에 적용한다.

$$k = \frac{QL}{Aht} \quad (3.2)$$

여기서, k: 투수계수

Q: 집수량

A: 흙시료의 단면적

t : 접수시간

i : 동수경사 ( $\frac{h}{L}$ )

변수두 투수시험의 대표적인 시험 장치는 Fig. 3.1(b)와 같다. 그림에 나타낸 바와 같이 물이 스텐드파이프를 통하여 흡 속으로 자유롭게 유입하도록 하고, 유입하는 수위의 침하속도를 측정하여 투수계수를 산정한다.

임의의 시간  $t$ 에서 시료를 통해 흐르는 유량은 다음과 같다.

$$-a \frac{dh}{dt} = k \frac{h}{l} A \quad (3.3)$$

$$-a \frac{dh}{h} = k \frac{A}{l} dt \quad (3.4)$$

만일,  $t_1$ 시간에서 수위가  $h_1$ 이고,  $t_2$ 시간에서 수위가  $h_2$ 라면

$$- \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h} = k \frac{A}{l} \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (3.5)$$

이것을 적분하여 정리하면 투수계수  $k$ 는 다음과 같다.

$$k = \frac{al}{A} \frac{l}{t_2 - t_1} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3.6)$$

## 1.2 방사상 투수계수

일반적으로 Darcy 방정식을 방사상 유동에 대하여 적용 시켜보고자 한다. 여기서 한 가지 주의 할 점은 선형유동에서는 단면적이 상수인 반면 방사상 유동에서는 단면적이 거리 변수인  $r$ 의 함수라는 것이다.

Fig. 3.2과 Fig. 3.3은 이러한 방사상 유동의 모형을 보여 주고 있다.

일반적인 Darcy 방정식 (3.1)을 이용하여 비압축성유체의 정상 방사상 유동식을 유도할 수 있다. 수평 방사상 유동의 정의로부터

$$dl = dr \quad (3.7)$$

이므로, 식(3.1)을 다시 쓰면

$$\frac{Q}{A} = u = -\frac{k}{\mu} \left[ \frac{dp}{dr} \right] \quad (3.8)$$

따라서

$$\frac{Q}{2\pi rh} = -\frac{k}{\mu} \left[ \frac{dp}{dr} \right] \quad (3.9)$$

식 (3.4)를 변수 분리하여 적분하면

$$\begin{aligned} \frac{Q}{2\pi h} \int_r^R \frac{dr}{r} &= -\frac{k}{\mu} \left[ \int_{p_0}^p dp \right] \\ Q &= \frac{2\pi kh (p_w - p)}{\mu \ln(r/r_w)} \end{aligned} \quad (3.10)$$

$p_0$ 는 내부 압력,  $p$ 는 외부압력,  $R$ 은 시료의 외부반경,  $r$ 은 시료의 내부반경이다.

이식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = \frac{2\pi kh \Delta p}{\mu \ln(R/r)} \quad (3.11)$$

식(3.6)을 투수계수에 대한 식으로 다시 정리 하면

$$k = \frac{Q \mu \ln(R/r)}{2\pi h \Delta p} \quad (3.12)$$

여기서  $R$ 은 외부반경,  $r$ 은 내부반경,  $\Delta p = p_i - p_o$ ,  $p_i$ 는 내부 압력,  $p_o$ 는 외부 압력으로 대기압과 같다.

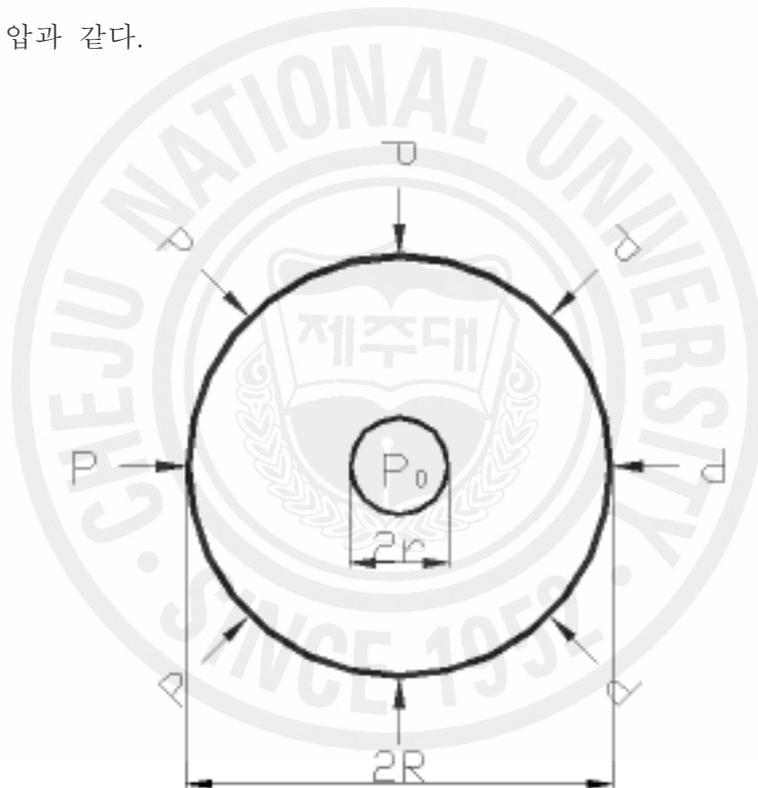


Fig. 3.2 Plane Schematic diagram of radial flow

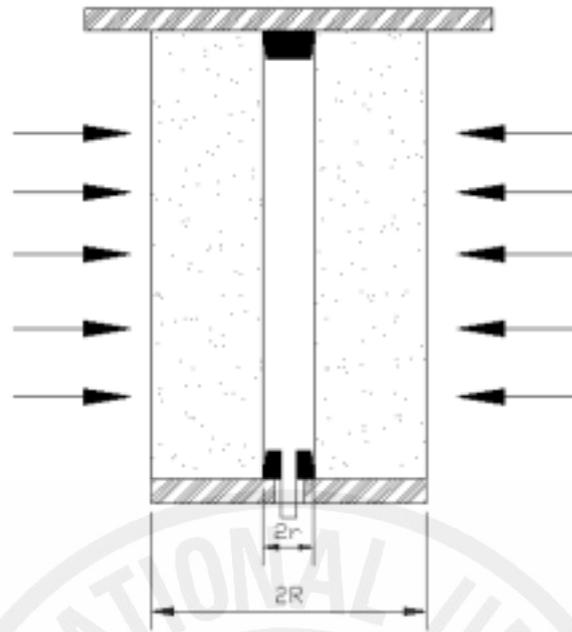
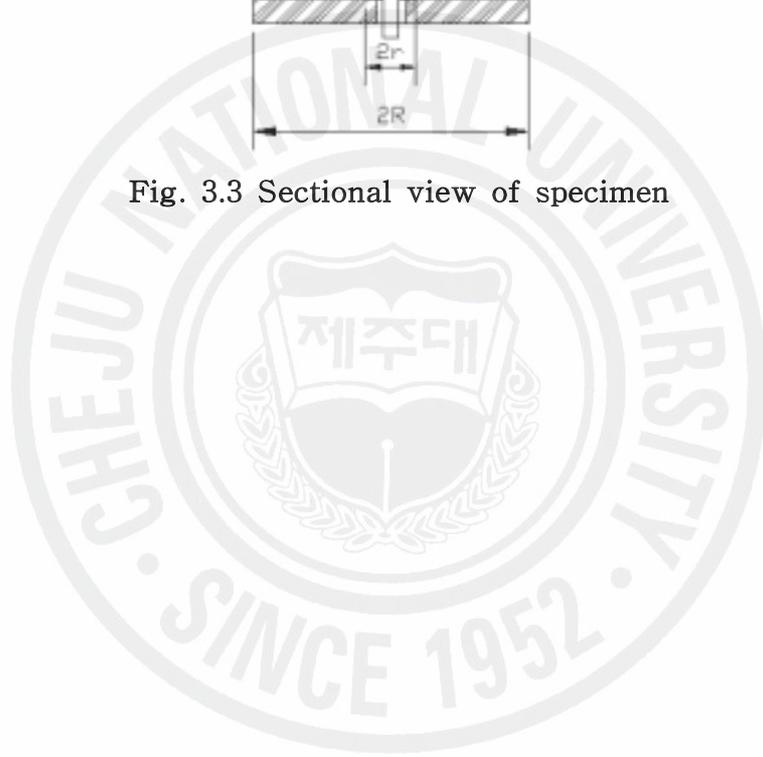


Fig. 3.3 Sectional view of specimen



## 2. 콘크리트 건조수축 및 시멘트 수화열

### 2.1 콘크리트 건조수축

콘크리트는 습기를 흡수하면 팽창하고 건조하면 수축한다. 이것은 경화한 시멘트풀이 팽창하고 수축하기 때문이다. 즉, 경화한 시멘트풀은 주위의 습도가 높을 때는 수분을 흡수하여 팽창하고 주위의 습도가 낮을 때는 수분을 방출하여 수축한다. 그러므로 콘크리트 속에서 자유로이 이동할 수 있는 물이 적을수록, 또 경화한 시멘트풀 속의 공극이 적을수록 팽창과 수축은 적게 일어난다.

경화한 시멘트풀 속의 공극이 같다면, 시멘트풀 양이 적을수록 팽창과 수축은 적게 일어난다. 결국, 콘크리트의 팽창과 수축을 적게 하려면 단위수량을 줄여야 하고 부배합을 피해야 한다. 단위 시멘트량이 적을수록 시멘트풀 경화체의 건조수축은 적어진다. 보통 모르타르는 콘크리트의 약 2배정도의 수축을 나타낸다.

콘크리트의 건조수축(drying shrinkage)은 단위 시멘트량과 단위수량의 영향을 크게 받지만, 그 밖에 골재의 종류와 최대치수, 시멘트의 종류와 품질, 다지기 방법과 양생상태, 부재의 단면치수 등의 영향도 받는다.

### 2.2 시멘트 수화열

포틀랜드 시멘트 화합물은 고온 반응의 비평형 생성물로 그 결과 높은 에너지 상태로 된다. 시멘트가 수화하면 화합물은 물과 반응하여 에너지가 낮은 안정한 상태에 이르는데 이 과정에서 열의 형태로 에너지를 방출한다. 바꿔 말하면 포틀랜드 시멘트의 수화반응은 발열반응이다.

시멘트의 수화열은 몇 가지 의미에서 중요하다. 때로는 수화열이 장애가 되지만(예를 들면, 매스콘크리트), 때로는 도움도 준다(예를 들면, 한중 콘크리트에서 기온이 너무 낮아 수화 반응을 위한 활성화 에너지가 부족할 때). 개개 화합물의 전체 수화 열량과 발열 속도는 각각 반응성을 나타내는 지표로서 사용할 수가

있다.

콘크리트의 온도상승을 일으키는 인자로서는 시멘트의 종류, 골재, 부재단면의 특성, 의기온도의 변동 및 시공방법 등이 있으며, 특히 단위시멘트량 및 시멘트의 종류 등에 따른 시멘트의 수화열이 주원인이 된다.

Table 3.1은 시멘트의 주요화합물의 수화열을 나타낸 것으로 화합물에 따라 차이가 있음을 알 수 있다.

**Table 3.1 Heat of hydration for cement(Kwon, 2004)**

Compound (Molecular formula)	Heat of Hydration per day(cal/g)						
	3 days	7 days	28 days	90 days	1 year	6.5 years	13 years
$C_3S(3CaO \cdot SiO_2)$	58	53	30	104	117	117	122
$C_2S(2CaO \cdot SiO_2)$	12	10	25	42	54	53	59
$C_3A(3CaO \cdot Al_2O_3)$	212	372	329	311	279	328	324
$C_4AF$ ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ )	69	118	118	98	90	111	102

포틀랜드시멘트 중의  $C_3A$ 와  $C_3S$ 는 반응속도가 빠르며, 수화열에 대한 기여가 크다.  $C_3S$ 가 6% 증가 및  $C_3A$ 가 5% 증가하면 각각의 수화열은 1일 5.5cal/g 및 4.1cal/g이 증가하며, 3일에 9.8cal/g 및 8.0cal/g, 7일에 9.9cal/g 및 18.9cal/g이 증가하며, cal/g는 3일 이전에 반응성이 크다고 보고되고 있다.(권오준, 2004)

### 2.3 시멘트의 수화열에 의한 강도 관계

시멘트의 종류에 따라 단열온도상승곡선은 다르게 나타난다. 온도분포상태가 초기에 변화한다면, 그 온도변화에 따라 콘크리트는 팽창 또는 수축한다. 이 팽창 또는 수축에 의해서 발생하는 응력보다 콘크리트의 인장강도가 작아지면 균열이 발생할 확률은 높아진다. 따라서, 온도균열에 강한 시멘트는 수화열이 작고 강도 발현이 좋아야 한다.

시멘트의 수화는 온도가 클수록 촉진되므로 콘크리트의 강도는 양생온도가 클수록 초기강도 발현도 크다. 양생방법으로 증기양생인 경우에 오토클레이브양생을 했을 때와 비슷한 고강도를 얻을 수 있으며, 이것은 고강도용 혼화제를 첨가하면 증기양생 중에 실리케이트 생성물의 수화가 진행되며, 공극에 에트링가이트를 생성함으로 미세공극이 치밀화 되기 때문에 보다 고강도가 얻어진다.

일반적으로  $C_3S$ 는 수화가 빠르며 초기강도 발현에 큰 반면,  $C_2S$ 는 수화속도가 느리기 때문에 초기강도에 비하여 장기강도 발현에 영향이 크다.  $C_3A$ 는 수화반응이 빠르며,  $C_4AF$ 는  $C_3A$ 다음으로 초기반응성이 크지만 강도에서는 기여하지 않는다.

조강 포틀랜드시멘트는 보통 포틀랜드시멘트와 중용열 포틀랜드시멘트에 비하여  $C_3S$ 가 많기 때문에 초기강도가 크다. 일반적으로 중용열 포틀랜드시멘트는  $C_2S$ 가 많기 때문에 장기강도의 발현이 좋으며, 장기재령에는 보통 포틀랜드시멘트에 비하여 우수한 점이 많다.(권오준, 2004)

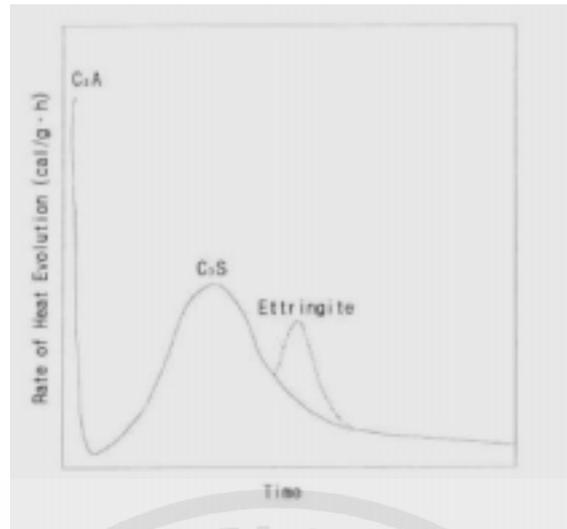


Fig. 3.4 Heat of hydration speed curve(Kwon, 2004)

Fig. 3.4는 수화발열속도 곡선을 나타낸 것으로 다음과 같이 3개의 피크로 분류된다. 제 1피크는 물을 혼합한 직후 수분 간에 나타나는 발열피크이다. 이 발열피크는 주로 시멘트의 접촉 습윤열과 시멘트 중의  $C_3A$  및 유리석회의 수화에 의한 것으로 발열시간이 짧기 때문에 적산발열량으로는 4~5cal/g로 작게 나타난다.

그 후 수화반응이 1~2시간 지나서 제2피크가 나타난다. 이것은 시멘트 중의  $C_3S$ 의 수화에 의한 것이며, 수화열 전체 중에서도 큰 부분을 차지하고 있다. 1일 수화발열은 보통포틀랜드시멘트에서 30~50cal/g에 달하며, 이후 수화발열속도는 서서히 작아지지만 발열은 수개월에 걸쳐 완료된다.(권오준, 2004)

### 3. 포졸란 반응

포졸란이란 활성이 없어 그자체로는 경화성이 없으나 물의 존재로 상온에서  $Ca(OH)_2$ 와 반응하여 안정된 불용해성 화합물을 생성하여 경화할 수 있는 물질을 말한다.



이들은  $SiO_2$ 가 많으며 활성으로서  $Ca(OH)_2$ 와 화합하기 쉬운 가용성 실리카 및 가용성 알루미늄이 높은 것 이여야 한다. 알루미늄이 많은 것은 초기강도가 높아지고 또한 가용성 실리카가 많은 것은 장기강도가 높아진다.

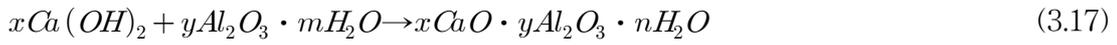
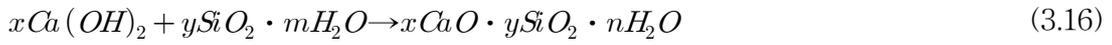
포졸란 활성을 가지는 물질로는 화산재나 응회암 등의 자연산과 Fly-ash와 같은 인공적인 것이 있다. 자연산의 포졸란 물질중의 하나인 규조토(Diatomite)도 있다. 규조토는 규조(Diatom)의 껍질로 바다 또는 호수 밑바닥에 침적하여 이루어지며 연질의 암석 또는 토양으로서 약 95%가 Silica로 구성 되어 있으며, 포졸란 물질 중에 가장 많이 사용 되는 비산재는 전형적으로  $SiO_2$  45%,  $Fe_2O_3$  15%,  $CaO$  10%,  $MgO$  1%,  $K_2O$  1%,  $Na_2O$  1%,  $SO_3$  1%로 구성 되었다.

포졸란 물질 중에는  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ , 등이 함유되어 있으며 이들 중 활성에 기여하는 성분은  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ 로서 이것들이 시멘트와 수화할 때 생성되는  $Ca(OH)_2$ 와 반응하므로 콘크리트의 강도 증가에 효과가 있고 일반적으로 다음과 같은 식이 사용 되어 왔다.



그리고, 이러한 유리  $Ca(OH)_2$ 와 더불어 Soluble Silica 및 Alumina를 함유하고 있는 포졸란 물질이 작용할 때 일어나는 반응은 아래 식과 같이 되어 Calcium

Silica 및 Calcium Aluminate의 수화물이 생성됨으로서  $Ca(OH)_2$ 의 용출이 방지되고 포졸란 효과를 얻게 되는 것이다.



본 연구에서는 석분슬러지내의 실리카와 알루미늄이 시멘트내의 Ca성분과의 결합인 포졸란 반응과 현무암 석분의 입자변화에 대해 SEM(Scanning Electron Microscopy)을 통해 관찰하였다.



#### 4. 차수재

석분슬러지를 자원화하여 재활용 재료로 활용하기 위해 지반의 차수재료로서의 검토를 위해 차수재료의 현황에 대하여 알아보하고자 한다. 일반 폐기물 매립지의 차수층은 침출수의 외부로 누출방지와 집수, 배수, 주변부로부터 지하수가 유입하는 것을 방지하는 기능을 한다.

매립지 차수재료는 투수성이 낮은 점토재와 차수시트를 주로 사용하며, 배수층에는 투수성이 큰 모래나 자갈을 사용한다. 차수층은 두께 50cm 이상, 투수계수가 1초당 1/1백만cm 이하가 되도록 설치한다. 지정폐기물 매립지의 차수층은 점토·점토광물혼합토 등으로 두께 100cm 이상, 투수계수가 1초당 1/1백만cm 이하가 되도록 설치한다.

##### 4.1 현장 유용 토사 판별

현장 유용토가 자갈 섞인 사질토나 자갈군이 형성된 지층을 제외하고는 매립장 조성시 현장유용토를 대체로 이용하게 된다. 이때 차수층 재료를 현장유용토로 할 것인지는 신중히 검토하여야 하며, 현장의 모든 여건을 반영하여야 한다. 이를 위해 대표적인 샘플을 구간별, 심도별로 채취하여 적절한 시험을 거친 후에 사용 판단을 하는 것이 좋다.

##### 4.2 선정시료의 시험

물리·역학적 실험을 통하여 흙의 특성을 알아야 하며, 시험 항목에는 입도, 액성한계, 소성한계, 비중, 자연함수비, 다짐, 투수시험이 있다. 흙의 특성을 기초로 하여 혼합하고자 하는 재료와 배합설계를 행하여야 하며, 항목으로는 다짐시험, 투수시험, 일축압축강도시험, 할렬인장강도시험 등이며 기준은 Table 3.2와 같다.

**Table 3.2 Standard Water proof Liner**

Material Item	Compressive Strength	Tensile Strength	Calculation of Water Permeability
Standard Water-stop Liner	5kgf/cm <sup>2</sup>	1kgf/cm <sup>2</sup>	$1.0 \times 10^{-7}$ cm/sec or below

### 4.3 차수재의 종류

일반적으로 대표적인 차수재로는 다짐점토가 있으며, 차수층 자체는 물과 침출수에 대하여 “불투수층”일 뿐만 아니라 오염수, 이온교환 및 희석(확산 및 분산에 의한)을 통하여 거동을 방해하는 기능을 가지고 있다.

차수층 설계는 보통 점토의 투수계수 안에서 오염물질의 이동, 확산, 화학적 특성 및 동수경사 등에 대하여 층의 두께를 어떻게 결정하는가에 기준을 두고 있다. 그러나 실제적으로 차수층의 설계에 있어서 중요한 것은 설계기준에 맞는 투수계수(국내·외 기준  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하)를 가질 수 있는 적당한 차수물질을 선택하는 것이다.

차수층의 조건으로는 이류와 확산으로 인한 오염물 이동의 최소화, 오염물에 대한 높은 흡착력과 지연효과, 화학물질과 침식에 대한 저항성, 자가 치유능력 등이 있으며, 차수물질과 라이너 사이에서 발생하는 반응을 파악하여야 한다.

Table 3.3 The type of various liner(Korean Geotechnical Society, 1999)

Item	Contents (breakdown)
점토차수재 (clay liner)	가. 자연점토 차수재(natural clay liner) 나. 다짐점토 차수재(compactd clay liner)
지오멤브레인 (geomembrane)	가. 열가소성 · PVC · HDPE · CPE · EIA · ECB 나. 열경화성 · EVA · EPDM · IIR · CR · EPT 다. 혼합성 · CSPE · PVC-nitrile rubber · PVC-ethyl vinyl acetate · Cross-linged CPE
GCL차수재 (geosyntethic clay liner)	가. 지오텍스타일과 벤토나이트 결합재 나. 지오멤브레인과 벤토나이트 결합재
혼합차수재	가. 흙-벤토나이트 나. 흙시멘트 다. 흙회석 라. 콘크리트 · 포틀란트 시멘트 콘크리트 · 로라 다짐 콘크리트 마. 아스팔트 · 아스팔트 콘크리트 · 고무아스팔트 콘크리트 · 흙/모래 아스팔트
스프레이차수 (spray on liner)	가. 아스팔트 코팅 나. 숯크리트
토질안정차수재	가. BEE Star 나. EM 다. Condor SS 라. Ion-X System
산업폐기물 재활용 차수재	가. 플라이 애쉬 나. 폐타이어 다. 폐석고 라. 폐석회 마. 광산폐기물 바. 건설폐기물
흡착차수재 (absorptive liner)	가. 활성탄 나. 폐타이어 다. 석탄회 라. 데오라이트 마. 석회석

Table 3.3에는 매립지에 사용되는 각종 차수재에 대하여 소개하였는데 점토 차수재, 지오멤브레인 차수재, 혼합차수재, 스프레이 차수재 및 기타 등으로 분류되고 이들 차수재는 많은 종류로 세분되어 전체 종류로는 수십 종에 이른다.

#### 4.3.1 점토

점토는 토양의 분류에서 점토함량의 정도에 따라 낮은 투수계수를 보장하기 때문에 차수층의 가장 중요한 구성 성분이다. 대체로 두 가지 토양분류 시스템이 사용되며, 그중 하나인 American Society of Testing and Materials(ASTM, 美國材料試驗協會)에 의한 토양분류법이 우선적으로 사용된다.

그리고, The U.S Department of Agriculture's(USDA's, 美國農務部)과 American Association of State Highway and Transportation Officials(AASHTO, 美國公立道路局) 혹은 Unified Soil Classification System(USCS, 統一分類法) 등의 토양분류시스템은 주로 토양학자, 농업경제학자, 그리고 토양 물리학자들에 의해 사용된다.

점토는 일반적으로 소성과 낮은 투수계수( $K=10^{-6} \sim 10^{-7}$  cm/sec)를 갖고 있다. 자연 상태의 점토는 내륙 지역의 양질의 점토 또는 해안지역의 해성점토를 예로 들 수 있다. 차수재로 선정된 차수 점토재료는 입도분포, 액·소성한계, 다짐, 투수성, 전단강도 등의 실험을 실시하여 차수재료로서의 적합성을 검사하여야 한다.

#### 4.3.2 혼합토

차수재 층을 형성함에 있어 투수계수가 낮은 점토가 충분하지 않은 실정이므로 현장토에 소성이 높은 외부 점토 또는 벤토나이트와 같은 상업적 점토 등을 혼합함으로써 투수기준을 만족하고 있다. 투수기준을 만족하기 위해 토양-벤토나이트, 토양-시멘트, 일반시멘트 콘크리트, 황산염 콘크리트, 플라이애쉬-시멘트/석회/벤토나이트 등이 있다.

#### 4.3.3 지오멤브레인(Geomembrane)

최근 인공차수재인 지오멤브레인이 차수재로서 많이 사용되고 있는데 지오멤브레인은 화학성분에 대한 내화학성이 크고 투수계수가  $10^{-12} \sim 10^{-14}$  cm/sec로서 매우 낮은 장점을 가지고 있다.

지오멤브레인에는 합성수지류, 합성고무류 및 아스팔트가 있는데 이중에서 주로 많이 사용되는 것은 HDPE(High Density poly Ethylene), EPDM(Ethylene propylene Diene)등이다.

#### 4.3.4 토목합성수지라이너

Geosynthetic Clay Liner(GCL)는 지오멤브레인과 점토의 장점을 고루 갖고 있는 차수재라고 할수 있는데 취급이 용이하며 점토보다 상대적으로 두께가 얇은 특성을 가지고 있다. 지오멤브레인은 천공이 되면 자체 복원 능력이 없으나 GCL 차수재는 벤토나이트의 팽창 및 점성에 의하여 자체복원능력이 있기 때문에 천공에 의한 누수저감 효과가 크다.



## IV. 재료의 특성 및 실험방법

본 연구에 사용된 현무암 석분슬러지는 제주시 조천읍 북촌지역 석산에서 채석하여 조천읍 함덕리에 위치한 석재 가공공장에서 나온 현무암 석분슬러지를 사용하였다. 석분슬러지는 암회색으로 나타났으며, 석산이 채석되는 위치에 따라 색상이나 일부 화학적 성분이 다를 수 있으며, 사용된 재료의 특성은 다음과 같다.

### 1. 재료의 특성

#### 1.1 현무암 석분슬러지

##### 1.1.1 물리적 특성

실험에 사용된 시료는 100°C 이상으로 24시간 이상 완전 건조 한 다음 재분쇄하여 No.4체를 통과한 시료를 사용하였다.

Table 4.1은 석분슬러지의 기본 물성을 파악하기 위해 실시하는 실험의 한국산업규격(Korean Industrial Standards)이며 실험 결과는 Table 4.2에 제시하였다.

각 측정치는 3회 측정치의 평균값이다. Fig. 4.1은 연구에 사용된 현무암 석분의 입도분포 곡선을 나타내었다. 입도분포곡선에서 미세입자들의 함량이 비교적 크게 나타났다. 입자의 직경이 0.002mm보다 작은 부분이 약 20%정도로 나타나고 있다. 비중은 2.87~2.97로서 일반적인 토사의 비중값, 2.65~2.7에 비해 크다. 액성한계(LL)는 22.3%~23.00%, 소성한계(PL)는 16.57%~18.7%로; 소성지수(PI)는 3.46%~5.73%로 소성이 작은 것으로 나타났다. 다짐시험결과 최적함수비는 21%~25%에 분포하며, 최대건조단위중량은 1.62g/cm<sup>3</sup>~1.675g/cm<sup>3</sup>의 범위에 분포하고 있다. Fig. 4.2는 석분의 다짐곡선을 보여주고 있다. 다짐 석분슬러지의 투수계수 5.42E-06cm/sec으로 나타나고 있다.

현무암 석분은 토사와 다르므로 토질의 분류기준을 적용하기는 어려우나 통일 분류법에 의하여 분류하면 무기질의 실트 및 매우가는 모래의 ML과 소성이 보 통이하인 무기질 점토인 CL과 유사한 것으로 나타났다.

**Table 4.1 The Test Methods for the powdered basalt sluge**

Item	Korean Industrial Standards
비중시험	KS F2308
액·소성한계 시험	KS F2303, KS F2304,
입도분석	KS F2309, KS F2302
다짐시험	KS F2312
투수시험	KS F2322-95
직접전단시험	KS F2343

**Table 4.2 The physical properties of the powdered basalt sluge**

Tests	Test Result	
	Contents	Powdered basalt
Specific gravity	Specific gravity(Gs)	2.92
Water contents	Water contents(%)	35%
Liquid & Plastic Limits	Liquid limit (LL,%)	22.67
	Plastic limit (PL,%)	17.97
	plastic index (PI)	4.7
Shrinkage Limit	Shrinkage Limit (SL,%)	15.32
	Shrinkage Ratio (SR)	2.43
	Volume Change (Sv,%)	9.77
	Linear Shrinkage (Ls,%)	3.06
Compaction	Optimum moisture content(%)	21.57
	Maximum dry unit weight (g/cm <sup>3</sup> )	1.65

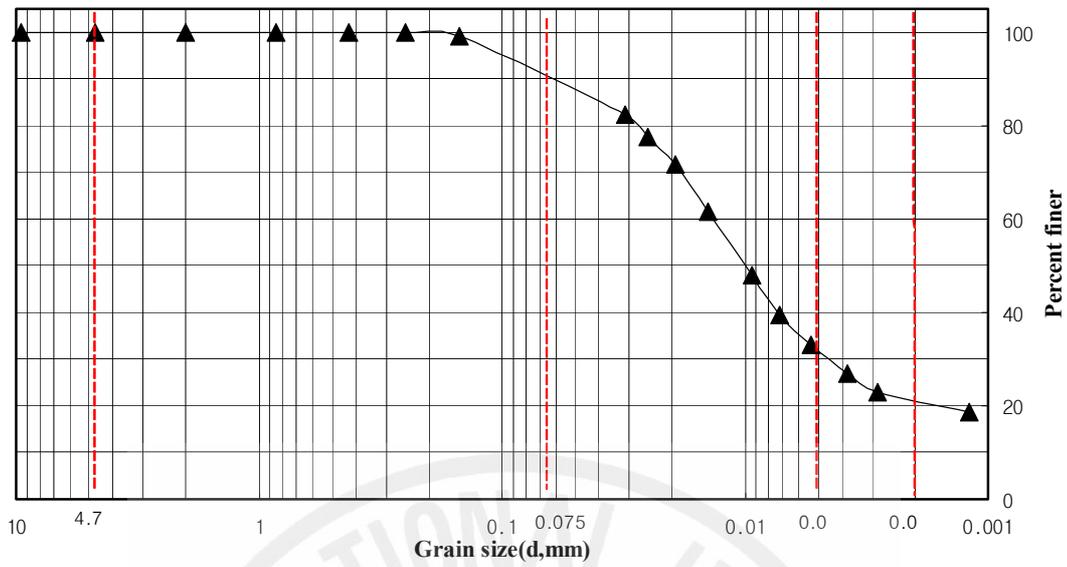


Fig. 4.1 Grain-size distribution curve of powdered basalt

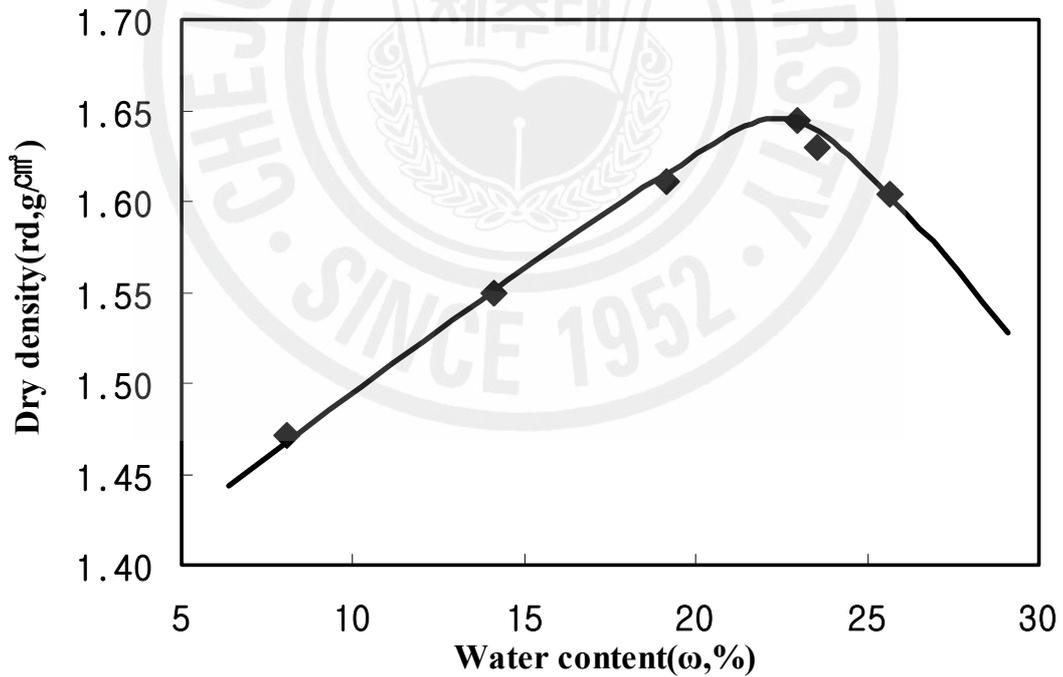


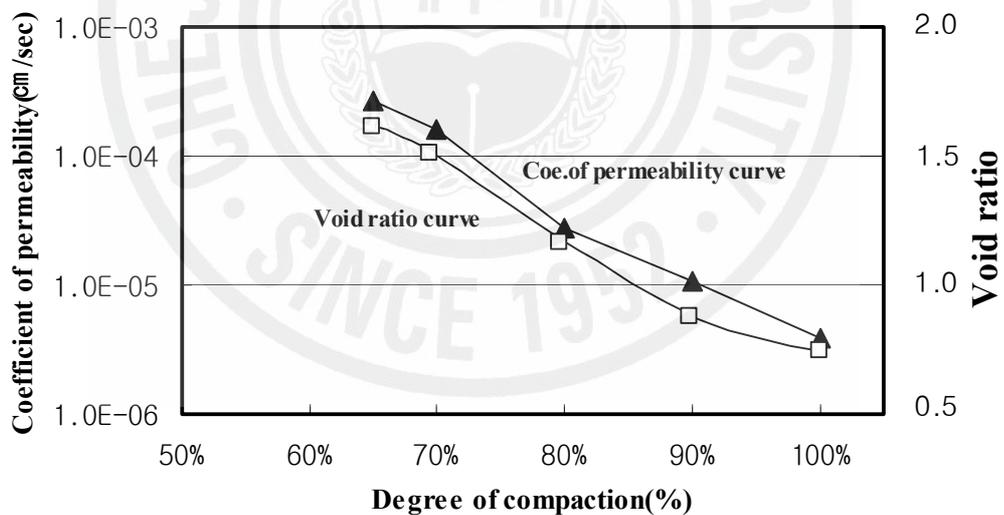
Fig. 4.2 Compaction curve of powdered basalt

Table 4.3은 석분슬러지의 다짐도에 따른 투수계수와 간극비를 나타낸 것이다. 시험결과로부터 다짐도가 높아짐에 따라 석분슬러지의 간극비는 감소하고 투수

계수도 이에 비례하여 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 4.3은 다짐도와 투수계수 및 간극비의 관계를 나타낸 것이다.

**Table 4.3 Coefficient of permeability of Powdered basalt**

degree of compaction	void ratio (e)	k(cm/sec)
100%	0.747	3.905E-06
90%	0.845	1.072E-05
80%	1.191	2.790E-05
70%	1.503	1.616E-04
65%	1.605	2.636E-04



**Fig. 4.3 Relationship between degree of compaction and coefficient of permeability**

Table 4.4는 석분슬러지에 대하여 상대밀도가 각각 30%, 50%, 70%인 경우와 다짐시험 결과 시료에 대하여 직접전단시험을 한 결과를 나타내었다. Fig. 4.4~

Fig. 4.9는 여러가지 상대밀도로 시료를 성형하여 실시한 전단시험의 전단응력과 수평변위관계 및 전단응력과 수직응력의 관계를 나타내었고, Fig. 4.10과 Fig. 4.11은 다짐시험으로 성형한 시료에 실시한 전단시험의 전단응력과 수평변위관계 및 전단응력과 수직응력의 관계를 나타내었다. 전단시험 결과 전단저항각은 29.2°, 31.5°, 33.7°도 다짐시험결과로 성형한 시료의 전단강도는 37.34°로 나타났

다. 상대밀도가 증가할수록 파괴강도는 증가하는 것으로 나타나고 있으나 파괴점이 명확히 나타나지 않고 있다. 전단응력이 파괴응력( $\tau_f$ )에 도달할 때까지 전단변위는 계속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 그 이후에는 변형률이 계속 증가하더라도 응력은 감소하지 않고 일정하게 수렴되고 있어 느슨한 모래의 거동과 매우 유사한 것을 알 수 있다.

현무암 석분슬러지의 전단저항각( $\Phi$ )은 29°~34° 정도이고, 점착력(c)은 0.01~0.15kg/cm<sup>2</sup> 정도 이다. 따라서 다짐시험 및 직접전단시험 결과에 의하면 석분슬러지는 느슨한 모래와 유사한 역학적 특성을 지니고 있음을 알 수 있다.

**Table 4.4 Direct shear test result**

Tests	Test Result		
	Contents	Powdered basalt	
direct shear	angle of shear resistance( $\Phi$ )	relative density30%	29.16°
		relative density50%	31.49°
		relative density70%	33.74°
		compaction test result	37.34°
	cohesion(c)	relative density30%	0.0962
		relative density50%	0.1565
		relative density70%	0.0144
		compaction test result	0.7628

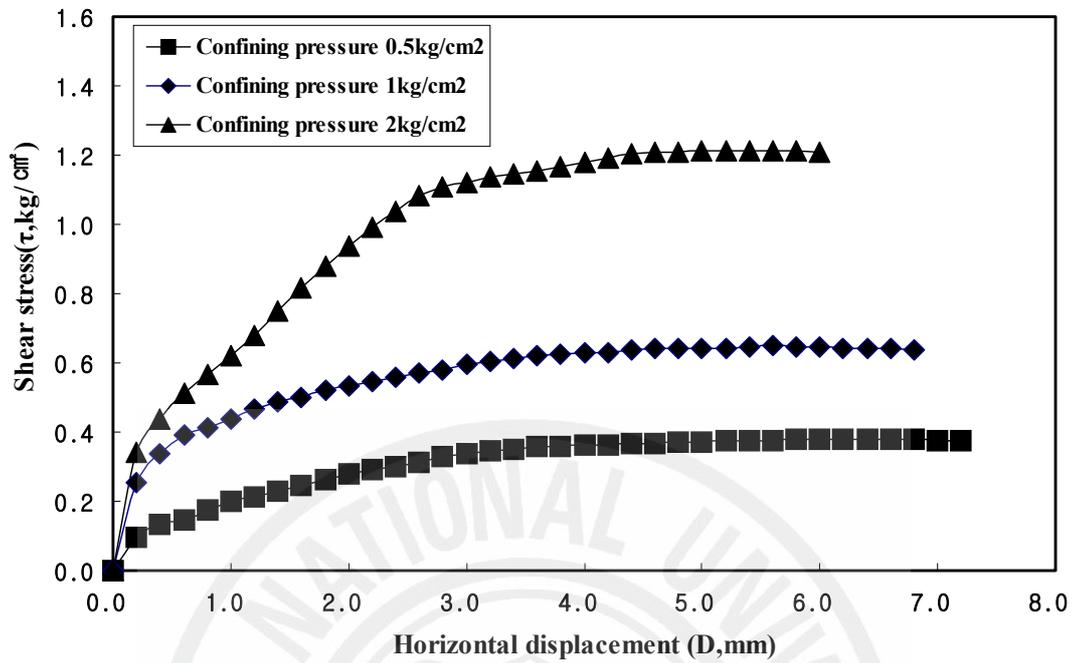


Fig. 4.4 Relationship between Shear stress and horizontal displacement (Dr=30%)

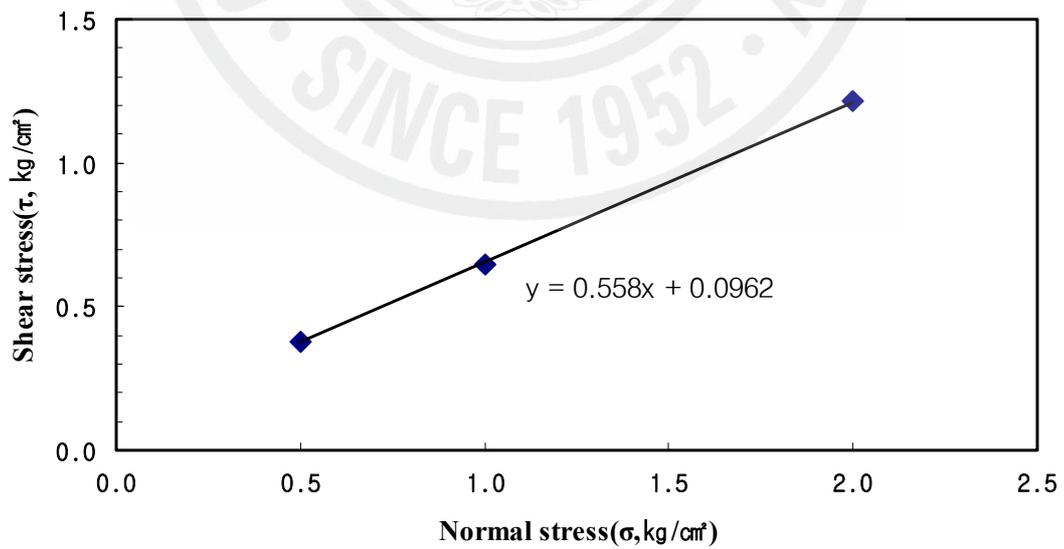


Fig. 4.5 Relationship between Shear stress and Normal stress (Dr=30%)

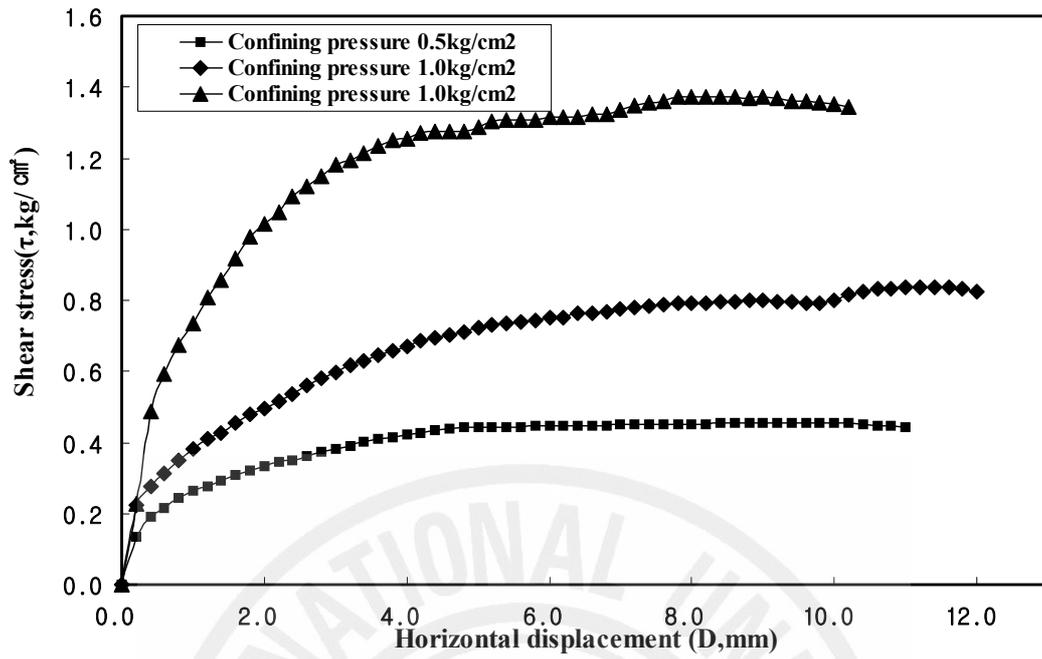


Fig. 4.6 Relationship between Shear stress and horizontal displacement (Dr=50%)

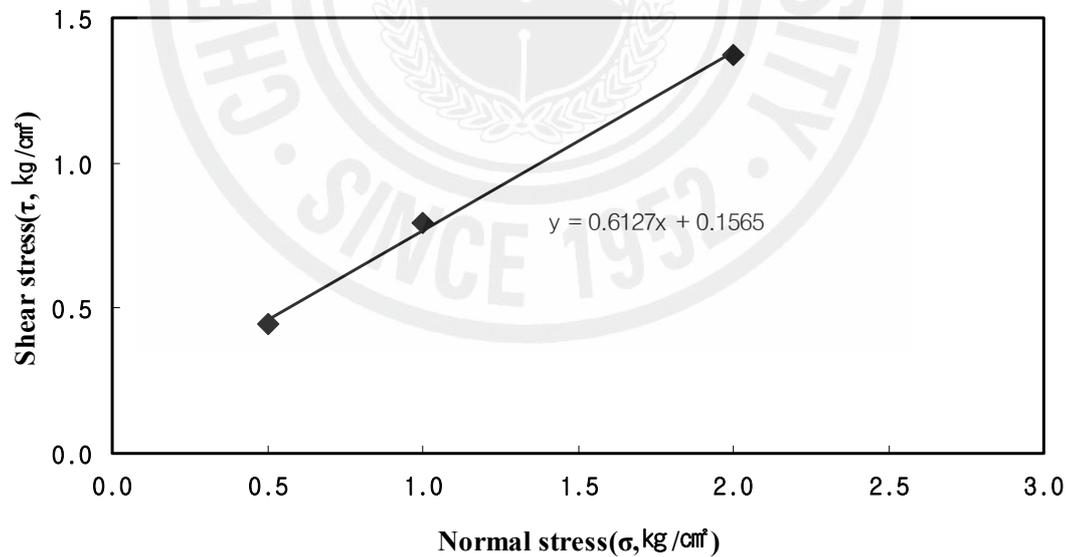


Fig. 4.7 Relationship between Shear stress and Normal stress (Dr=50%)

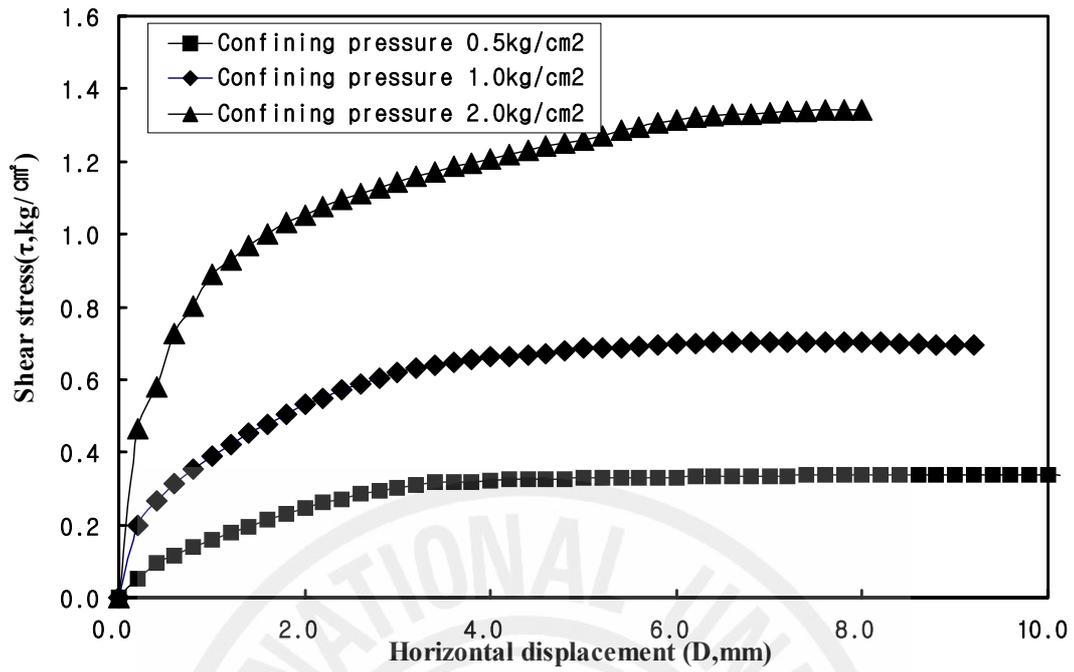


Fig. 4.8 Relationship between Shear stress and horizontal displacement  
( $D_r=70\%$ )

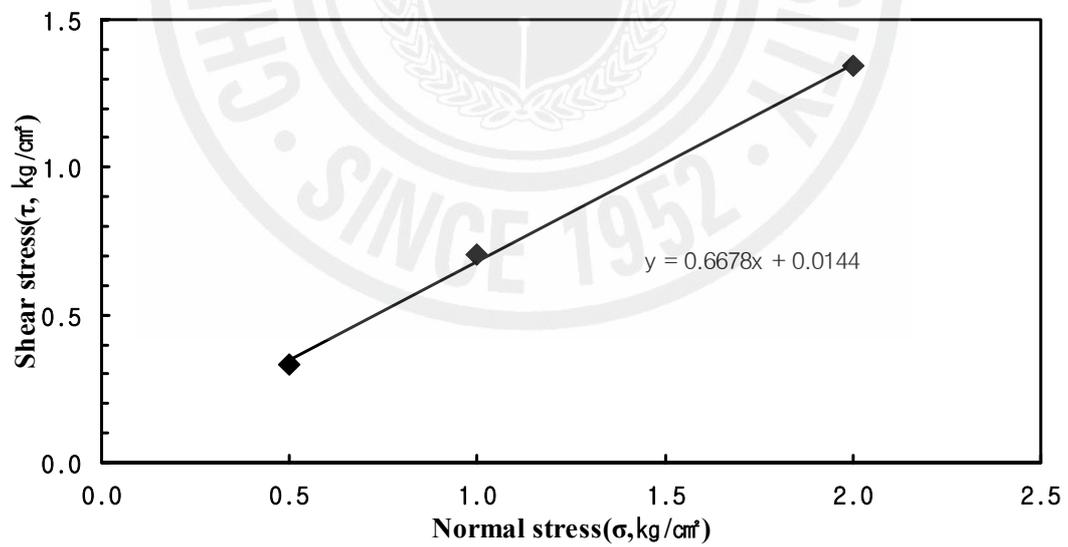


Fig. 4.9 Relationship between Shear stress and Normal stress ( $D_r=70\%$ )

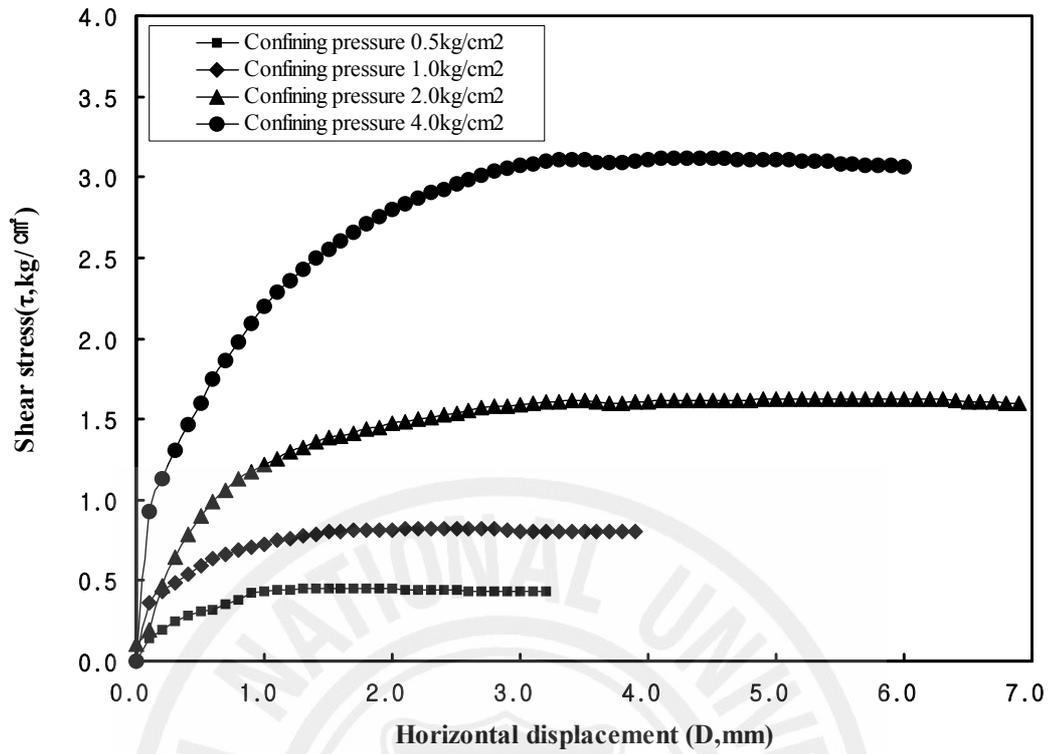


Fig. 4.10 Relationship between Shear stress and horizontal displacement (compaction)

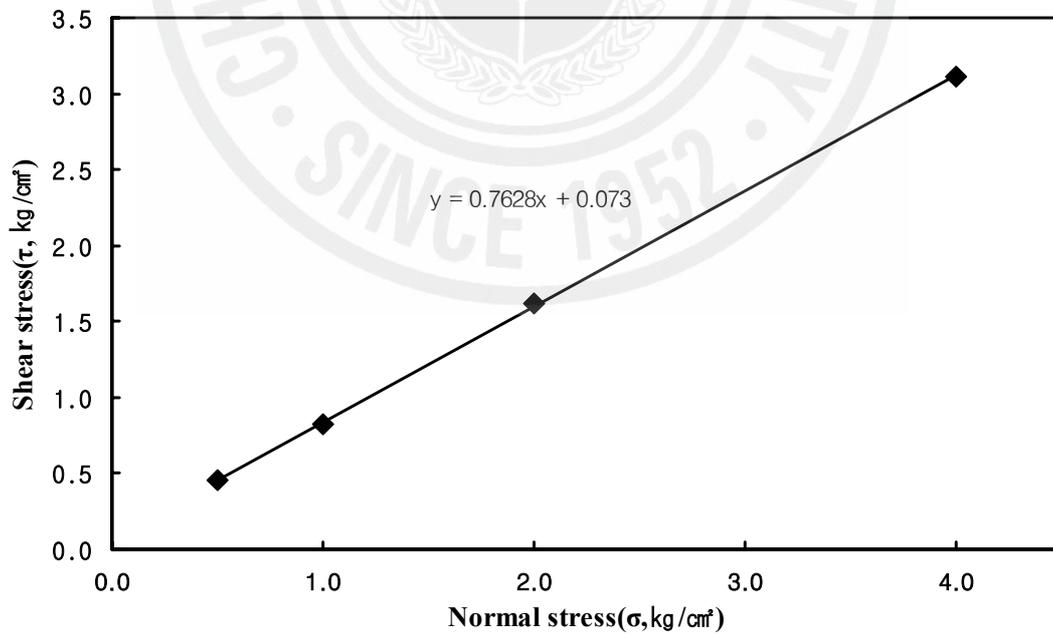


Fig. 4.11 Relationship between Shear stress and Normal stress (compaction)

### 1.1.2 화학적 특성

현무암 석분슬러지의 화학적 특성을 알아보기로 서울대학교 기초과학 교육연구 공동기기에 의뢰 X선 형광분석기(X-Ray Fluorescence, XRF)를 통해 40kv의 전류와 30mA 전압으로 Rh target를 사용하여 X선을 주사하여 주요성분을 분석하였다.

주성분은  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ 가 78.39%로 주종을 이루고 있는 것으로 나타났다. 석분슬러지의 pH는 약 8.67로 나타나 약알카리성을 띠고 있다. pH 상승물질인  $CaO$ 와  $MgO$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ 가 약 18%를 차지하고 있어 이들의 가수분해 작용에 의해 생성된 2 mole의  $OH^-$ 에 의해 알카리성 상태를 나타내는 것으로 판단된다.



여기서 M:  $Ca, Mg, K, Na$

Table 4.5와 Fig. 4.12는 XRF를 통해 현무암 석분에 대하여 분석한 현무암 석분슬러지의 화학적 조성 분석결과를 나타내었다. 화학적 조성을 보면 실리카성분인  $SiO_2$ 의 함량이 52.66%로 나타나 가장 많은 비율을 나타내었으며  $CaO$ 의 함유율은 8.31%로  $Al_2O_3$ 가 14.67%,  $Fe_2O_3$ 가 11.06%로 나타났다.

$SiO_2$  및  $Al_2O_3$ 는 경화과정 중에 형성되는  $Ca(OH)_2$ 와 반응하여 터버모라이트(tobermorite :  $CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ )를 형성할 수 있을 것으로 판단된다.  $Al_2O_3$ 의 경우  $Ca(OH)_2$ 와 반응하여  $3CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ 를 형성하며 석고와 반응하여 에트링가이트를 형성하는 포졸란 반응을 일으킬 것으로 판단된다. Table 4.6과 Fig. 4.13은 석분슬러지와 시멘트와 혼합비율별로 경과시간에 대한 pH 값을 나타내었다.

Table 4.5 Chemical composition of Powdered basalt

Sample constituent	Contents(%)
<i>SiO<sub>2</sub></i>	52.66
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	14.67
<i>TiO<sub>2</sub></i>	1.93
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	11.06
<i>MgO</i>	6.33
<i>CaO</i>	8.31
<i>Na<sub>2</sub>O</i>	2.84
<i>K<sub>2</sub>O</i>	0.98
<i>MnO</i>	0.14
<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>	0.34
<i>LOI</i>	-
<i>total</i>	99.26

※ LOI : Loss of Ignition

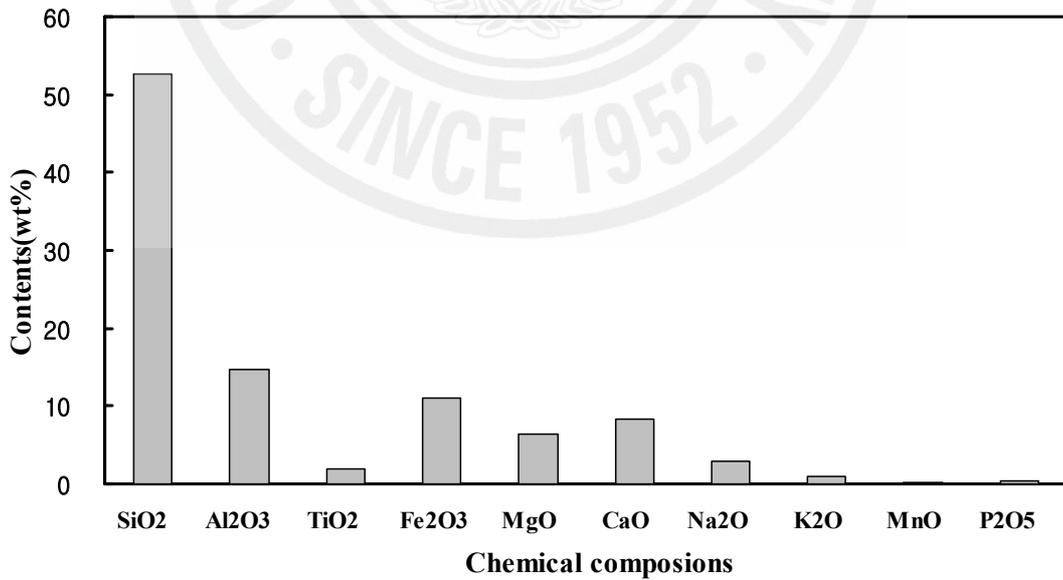


Fig. 4.12 Chemical composition of Powdered basalt

Table 4.6 The pH values of the Powdered Basalt Sludge and Cement Mixture Ratio to time elapsed

Ratio	Day										
	1	3	5	6	7	9	11	13	15	18	20
1:1	12.47	12.4	12.37	12.33	12.23	12.03	11.81	11.53	11.35	11.16	11.11
1:3	12.3	12.27	12.18	12.09	11.96	11.74	11.56	11.31	11.16	11.04	10.95
1:5	12.22	12.11	11.94	11.92	11.79	11.60	11.43	11.26	11.18	11.09	10.99
1:7	12.12	11.95	11.83	11.75	11.63	11.45	11.34	1.25	11.06	11.00	10.91
1:10	12.03	11.76	11.59	11.50	11.39	11.17	11.07	10.98	10.85	10.81	10.73
Cement	12.61	12.6	12.54	12.51	12.41	12.19	11.96	11.64	11.43	11.23	11.10
P.B.S	9.47	8.73	8.81	8.95	8.92	8.88	8.87	8.86	8.79	8.78	8.67
Water	7.99	7.84	7.83	7.83	7.81	7.76	7.89	7.91	7.94	7.92	7.92
1:5	11.79	11.89	11.80	11.78	11.70	11.38	11.26	11.11	10.87	10.54	

※ 혼합비율 시멘트:석분비율임

혼합중량은 100g, 물300g 혼화제는 시멘트 중량의 1%사용

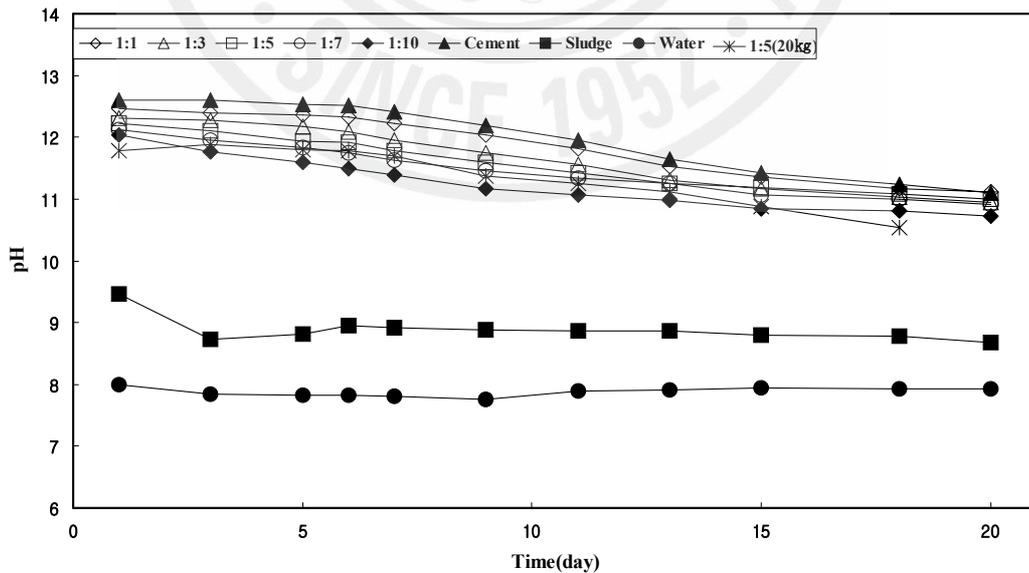


Fig. 4.13 pH Variation to the Powdered Basalt Sludge and Cement Mixture Ratio



Fig. 4.14 pH Measurement Picture

### 1.1.3 유해 물질함유량 분석

석분슬러지의 유해물질 함유량을 분석하기 위하여 토양환경보전법에서 규정하는 토양오염 공정시험법을 실시하였다. 이에 따라 유해물질 함유량을 분석한 결과는 Table 4.7과 같으며, 시험 항목별 분석결과는 기준치 이하로 나타났다. Fig. 4.15와 4.16은 석분슬러지의 입상을 장방출주사 전자현미경을 통해 관찰한 결과이다.

Table 4.7 The Analysis of the Harmful Chemistry Ingredient Content

Item	Standard	Result	Item	Standard	Result
Pb	3 or above	0.000	Cr <sup>+6</sup>	1.5 or above	0.000
Cu	3 or above	0.163	CN	1 or above	0.000
As	1.5 or above	0.000	Aerobic(P)	1 or above	0.000
Hg	0.005 or above	0.000	PCE	0.1 or above	0.000
Cd	3 or above	0.027	TCE	0.3 or above	0.000

※ Unit: mg/ℓ

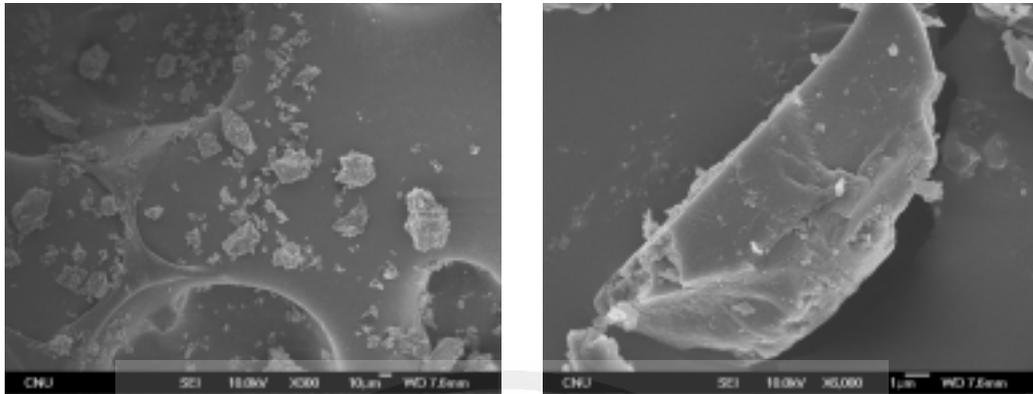


Fig. 4.15 The shape/surface in Powdered basalt by scanning electron micrograph(300:6,000)

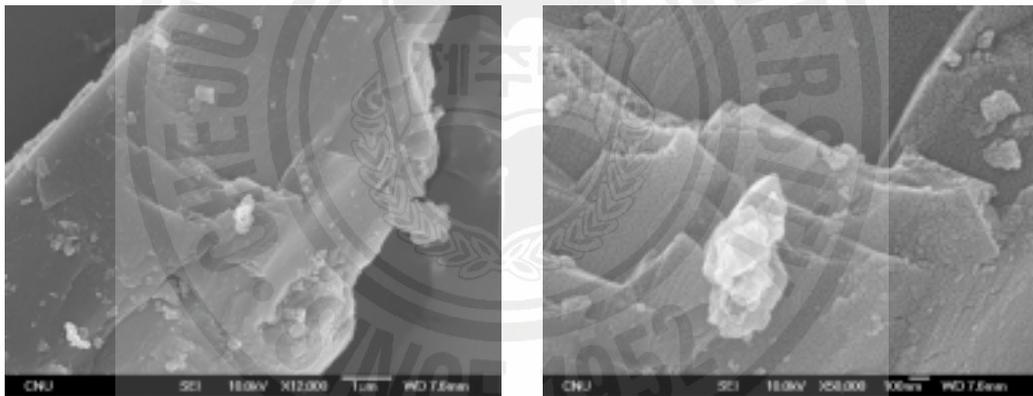


Fig. 4.16 The shape/surface in Powdered basalt by scanning electron micrograph(12,000:50,000)

## 1.2 현장토사

현장에서 발생하는 유용토는 자갈 섞인 사질토나 자갈균이 형성된 지층을 제외하고는 차수재료로 활용할 수 있다. 차수층 재료를 현장유용토로 활용하기 위하여 2개 지역에서 채취한 현장토를 시험 재료로 사용하였으며, 시험에 사용된 토사의 성질에 대하여 시험을 실시하였다.

### 1.2.1 토사시료 1

제주시에 위치한 S골프장 공사 현장에서 발생하는 2개의 지점에서 토사 재료를 구하였으며, 시험에 사용된 시료는 100°C 이상으로 24시간 이상 완전히 건조한 시료를 사용하였다. Table 4.8은 현장토사의 기본 물성을 파악하기 위해 실시한 시험의 한국산업규격(Korean Industrial Standards)을 나타내었다.

각 측정치는 3회 측정치의 평균값으로 시험 결과는 Table 4.9에 제시하였다. Fig. 4.17과 Fig. 4.19는 현장상태 시료의 입도분포곡선을 나타내었다. 비중의 값은 2.58~2.67이다. 액성 및 소성한계는 시험결과 액성한계는 40%~41%, 소성한계는 22.65%~25.48%로; 소성지수는 15.52~17.35로 나타났다.

현장상태의 시료에 대해 다짐 시험한 결과 최적함수비는 18.6%~19%, 최대건조단위중량은 1.715g/cm<sup>3</sup>~1.73g/cm<sup>3</sup>으로 나타나고 있다. Fig. 4.18과 Fig. 4.20은 현장상태시료의 다짐곡선을 보여주고 있다.

사용된 토사시료 1은 토질 분류기준인 통일분류법에 의하여 분류하면 SW(입도 분포가 좋은 모래 또는 자갈질의 모래)에 분류되는 것으로 나타났다.

**Table 4.8 The Test Methods for the soil sample 1**

Item	Korean Industrial Standards
비중시험	KS F2308
액·소성한계 시험	KS F2303, KS F2304,
입도분석	KS F2309, KS F2302
다짐시험	KS F2312
투수시험	KS F2322-95

**Table 4.9 The physical of the soil sample 1**

Tests	Test Result		
	Contents	Sample 1-1	Sample 1-2
Specific gravity	Specific gravity(Gs)	2.58	2.67
Field density	dry unit weight (g/cm <sup>3</sup> )	1.48	1.49
Water contents	Water contents(%)	15.27	13.51%
Grain size analysis	coefficient of uniformity $C_u$	13.33	13.33
	coefficient of curvature $C_c$	1.67	1.67
Liquid & Plastic Limits	Liquid limit (LL,%)	41.00	40
	Plastic limit (PL,%)	25.48	22.65
	plastic index (PI)	15.52	17.35
Compaction	Optimum moisture content(%)	18.60	19.00
	Maximum dry unit weight (g/cm <sup>3</sup> )	1.72	1.73
Permeability Test	coefficient of permeability of compaction sample (cm/sec)	7.50E-04	1.01E-05

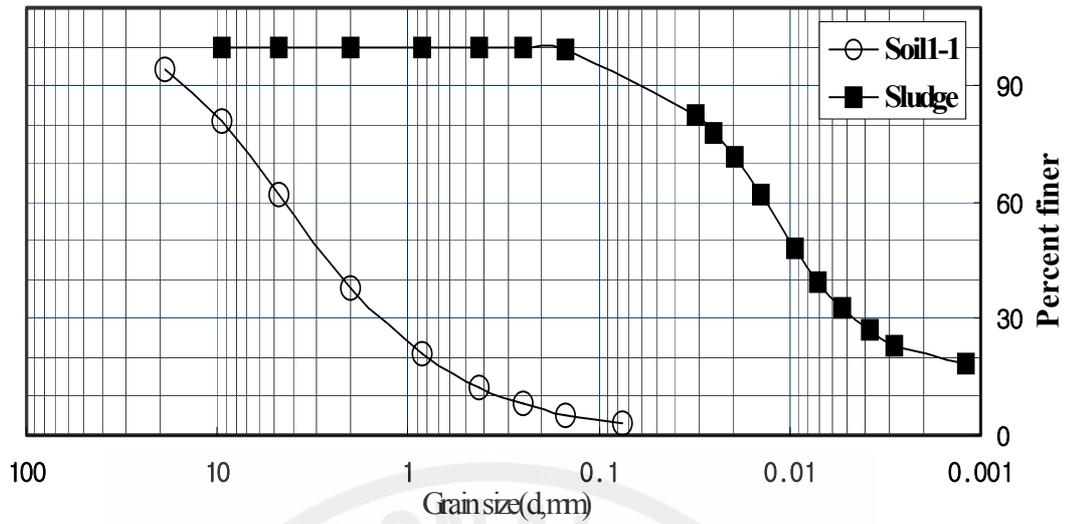


Fig. 4.17 Grain-size distribution curve of site soil sample 1-1

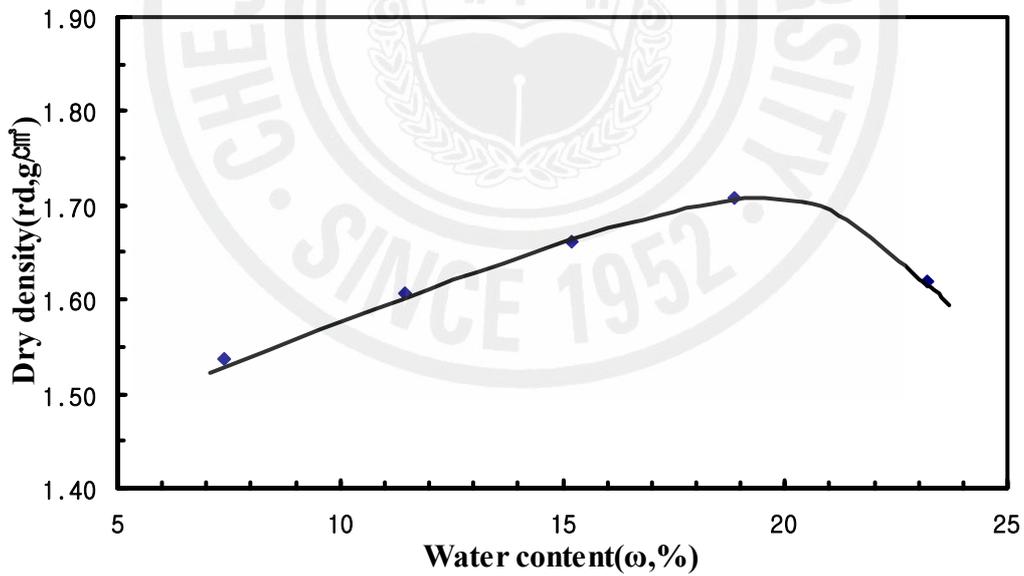


Fig. 4.18 Compaction curve of site soil sample 1-1



### 1.2.2 토사 시료 2

시험에 사용된 토사시료 2는 서귀포시에 위치한 S조성사업장에서 재료를 구하였으며, 100°C이상으로 24시간 이상 완전히 건조한 시료를 사용하였다. 시험방법은 토사 시료1과 같다.

각 측정치는 3회 측정치의 평균값으로 실험 결과는 Table 4.10에 제시하였다. Fig. 4.21은 현장상태 시료의 입도분포곡선을 나타내었다. 비중의 값은 2.44이다. 액성 및 소성한계는 시험결과 액성한계는 50.00%, 소성한계는 35.48%로; 소성지수는 14.52로 나타났다.

현장상태의 시료에 대해 다짐 시험한 결과 최적함수비는 25%, 최대건조단위중량은 1.48g/cm<sup>3</sup> 으로 나타나고 있다. Fig. 4.22는 현장상태시료의 다짐곡선을 보여주고 있다.

사용된 토사시료 2는 토질의 분류기준인 통일분류법에 의하여 분류하면 SW-SM(입도분포가 좋은 모래 또는 자갈질의 모래-실트질의 모래)에 분류되는 것으로 나타났다.

**Table 4.10 The physical of the soil sample 2**

Tests	Test Result	
	Contents	Sample 2
Specific gravity	Specific gravity(Gs)	2.44
Field density	dry unit weight (g/cm <sup>3</sup> )	1.22
Water contents	Water contents(%)	21.03
grain size analysis	coefficient of uniformity $C_u$	10.0
	coefficient of curvature $C_c$	1.37
Liquid & Plastic	Liquid limit (LL,%)	50.00
	Plastic limit (PL,%)	35.48
	plastic index (PI)	14.52
A compaction	Optimum moisture content(%)	25.0
	Maximum dry unit weight (g/cm <sup>3</sup> )	1.48
permeability Test	coefficient of permeability of compaction sample (cm/sec)	8.11E-04



### 1.3 시멘트 및 혼화제

혼합시료의 배합시에 경화를 목적으로 사용된 시멘트는 일반적으로 콘크리트 공사용으로 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 국내 D사의 포틀랜드 1종 보통시멘트를 사용하였으며, 혼화제는 D사 제품을 사용하였다.

사용된 시멘트 화학적·물리적 특성은 시멘트 제조회사의 시험성적을 통해 확인 하였으며, Table 4.11과 Table 4.12와 같다. Fig. 4.23과 4.24는 사용된 시멘트의 입상을 장방출주사 전자현미경을 통해 관찰한 결과이다.

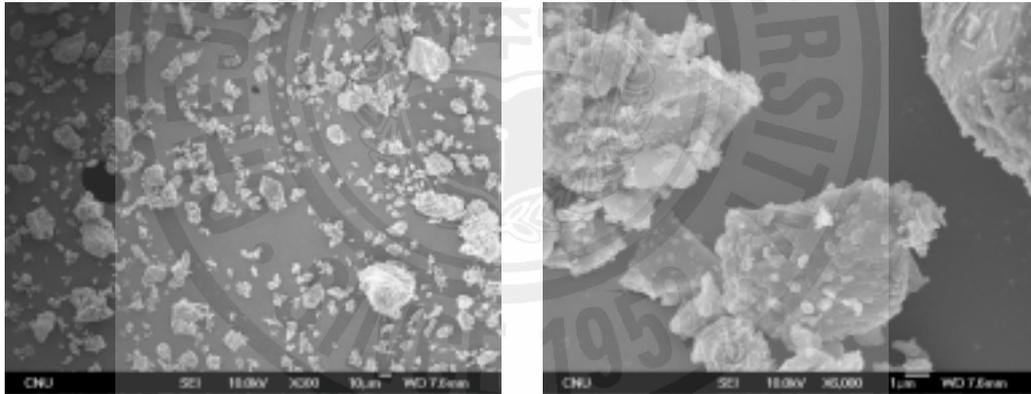
혼화제는 X선 형광분석기(X-Ray Fluorescence, XRF)을 통해 분석하였다. Table 4.13은 혼화제의 화학적 특성을 나타내었다.

**Table 4.11 Chemical composition of cement**

constituent		chemical composition (%)
	MgO(%)	5.0 or below
SO <sub>3</sub> (%)	3CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 8% or below	3.0 or below
	3CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 8% (exceeded)	3.5 or below
	L.O.I	3.0 or below

**Table 4.12 Physical composition of cement**

Contents			physical composition
Fineness ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )			2800 or below
Stability (%)			0.8 or below
Setting Time	Gillmore Test	Start (min)	60 or above
		Finish (min)	10 or below
	Beaker Test	Start (min)	45 or above
		Finish (min)	375 or below
Compressive Strength	3 days		130 or above
	7 days		200 or above
	28 days		290 or above



**Fig. 4.23 The shape/surface in Cement by scanning electron micrograph(300:6,000)**

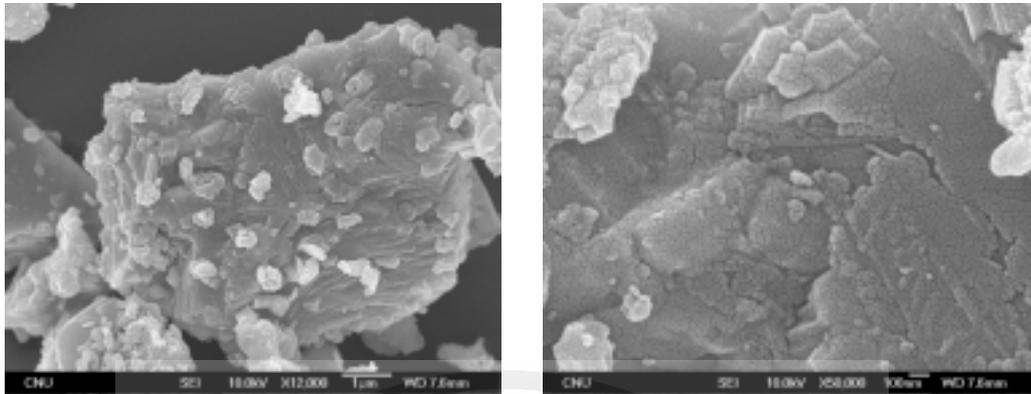


Fig. 4.24 The shape/surface in Cement by scanning electron micrograph(12,000:50,000)

Table 4.13 Chemical composition of quick setting admixtures

constituent	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$Na_2O$	$K_2O$	$MnO$	$P_2O_5$	LOI	total
Contents (%)	-	6.59	-	-	36.41	-	-	-	37.87	80.86

LOI : Loss of Ignition

## 1.4 Fly-ash

화력발전소 등에서 미분탄을 연소 했을 때 생기는 폐가 TM속에 포함되어 있는 탄의 미립자를 집진기에 의하여 포집한 Fly-ash는 입자가 대부분이 구형으로 콘크리트 믹싱시 골재와의 접촉면에서 볼 베어링(Ball-Bearing)과 같은 작용을 하여 시멘트풀과 골재와의 사이에 마찰저항을 줄여주므로써 콘크리트 워커빌리티를 개선, 증대시키며 단위수량과 물-시멘트비도 아울러 감소 시키는 효과를 가지고 있다.

Fly-ash를 콘크리트용 재료로 사용하므로써 보통포틀랜드 시멘트만으로 만족시킬 수 없는 콘크리트의 제성질을 개선 내지는 향상시킬 수 있는 장점을 유효 적절하게 잘 활용하고 석분슬러지와 함께 재활용 재료로서의 활용 등을 연구하기 위하여 시험에 사용된 재료는 Fly-ash 2종이다.

### 1.4.1 물리적 성질

Fly-ash의 모양은 거의 대부분의 구형이지만 구가 연결된 형태로 존재하는 경우도 있으며, 비교적 큰 입자 가운데는 중앙부분이 비어 있는 것도 있다. 또한 내부에 미세한 구상입자가 생선의 알과 같은 모양으로 채워져 있는 경우도 있다. 일반적으로 조개껍질 모양 또는 불규칙한 형상의 입자도 있으나 대부분의 Fly-ash입자는 구 모양으로 되어 있다. 이러한 점이 다른 포졸란에서 발견 할 수 없는 특징에 해당되며 Fly-ash가 workability를 개선하는 가장 큰 요인이 된다고 한다. Table 4.14는 시험에 사용된 Fly-ashes 물리적 성질이다.

**Table 4.14 Physical composition of Fly-ash**

Test Item		Result	Korean Industrial Standards
Density (g/cm <sup>3</sup> )		2.24	KS L 5405-04
fineness	non surface area brain method (cm <sup>2</sup> /g)	4232	
	Ratio of the flow value(%)	99	
Activity index (%)	28 days	92	
Water (%)		0.1	
LOI(%)		3.3	
SiO <sub>2</sub> (%)		58.4	

1.4.2 화학적 성질

Fly-ash의 화학성분은 원탄의 성분에 크게 좌우될 뿐만 아니라, 또한 지역별 제조 공장 및 시기에 따라 다소 차이가 있다. 사용된 Fly-ash의 화학적 특성을 알아보하고자 한국건설자재 시험연구원에 의뢰 분석한 결과는 Table 4.15와 Fig. 4.25와 같다. Fig. 4.26과 4.27은 Fly-ash의 입상을 장방출주사 전자현미경을 통해 관찰한 결과이다.

**Table 4.15 Chemical composition of Fly-ash**

Sample constituent	Contents(%)	Korean Industrial Standards
SiO <sub>2</sub>	53.30	KS L 4007-96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.28	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.00	
CaO	6.79	
MgO	1.11	
K <sub>2</sub> O	0.84	
Na <sub>2</sub> O	0.55	
SO <sub>3</sub>	0.82	
LOI	4.60	

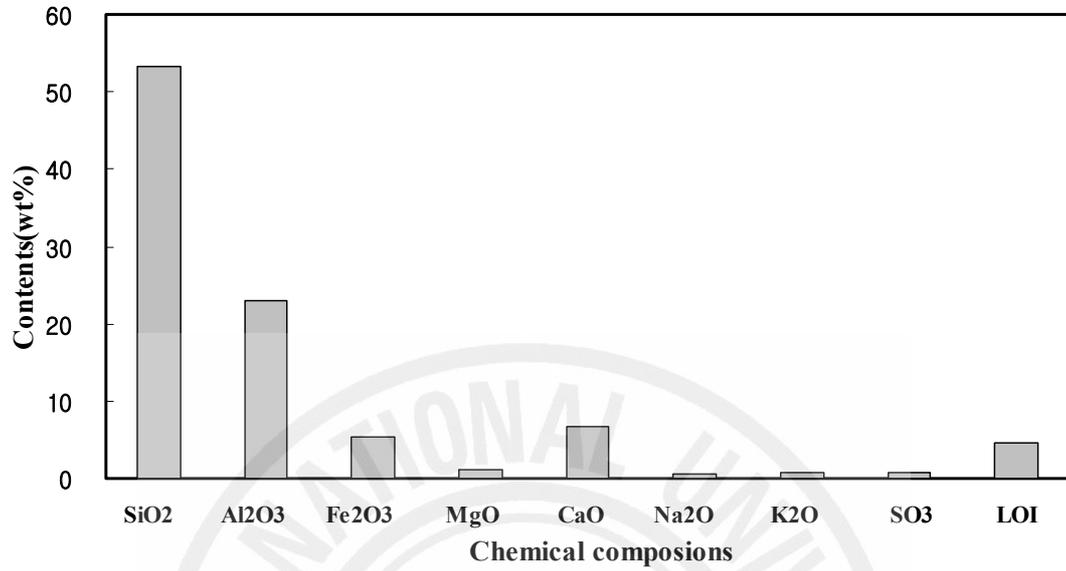


Fig. 4.25 Chemical composition of Fly-ash

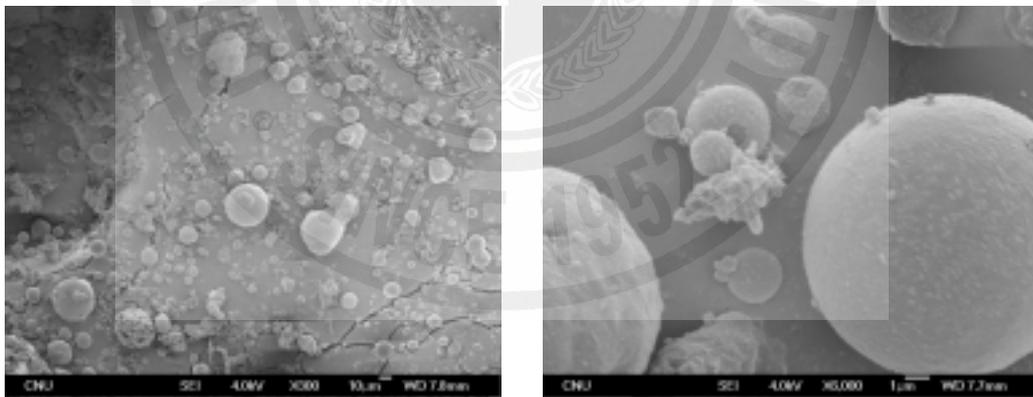


Fig. 4.26 The shape/surface in Fly-ash by scanning electron micrograph(300:6,000)

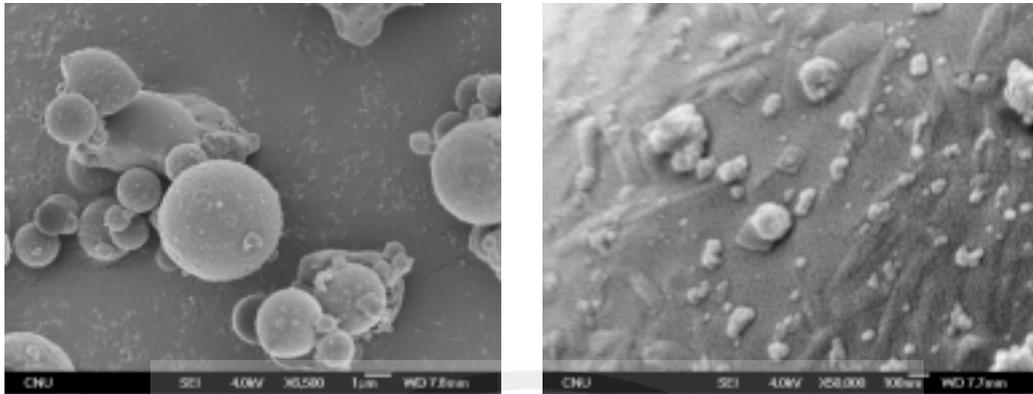
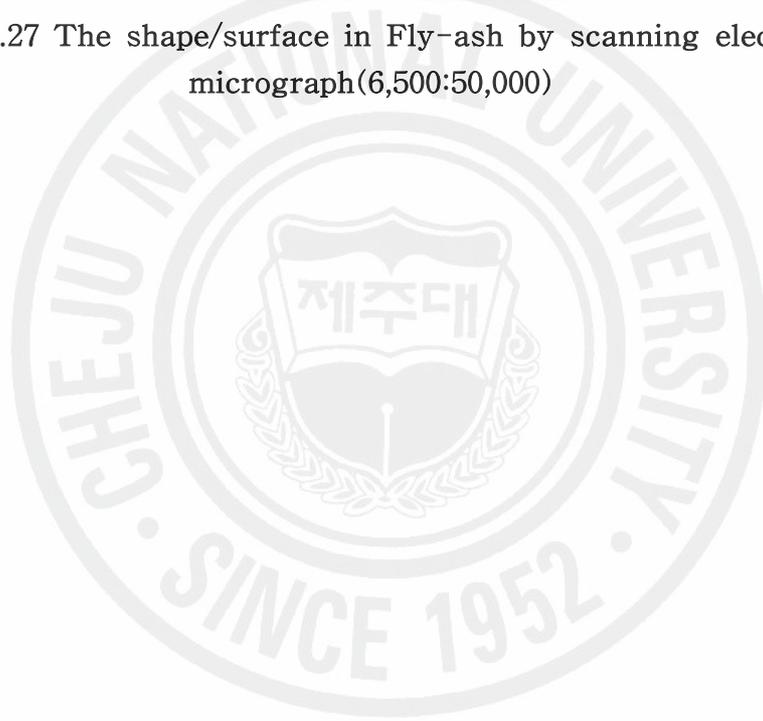


Fig. 4.27 The shape/surface in Fly-ash by scanning electron micrograph(6,500:50,000)



## 1.5 모래

일반적으로 건설현장에서 잔골재로 가장 많이 사용되어지는 모래에 대하여 석분슬러지와 혼합하여 공학용 재료로 활용방안을 연구하였다. 시험에 사용된 모래는 100°C이상으로 24시간 이상 완전히 건조한 시료를 사용하였다. 각 측정치는 Table 4.16에 제시하였다.

Fig. 4.28은 현장상태 시료의 입도분포곡선을 나타내었다. 비중의 값은 2.62이다. 최대건조단위중량은 1.68g/cm<sup>3</sup>, 최소건조단위중량은 1.37g/cm<sup>3</sup>이다. 균등계수 1.46이고 곡률계수는 1.04이다.

토질의 분류기준인 통일분류법에 의하여 분류하면 모래는 SP(입도분포가 나쁜 모래 또는 자갈질의 모래)에 분류되는 것으로 나타났다. Fig. 4.29와 Fig. 4.30은 사용된 모래의 입상을 장방출주사 전자현미경을 통해 관찰한 결과이다.

**Table 4.16 The Physical of the sand**

Tests	Test Result	
	Contents	sample
Specific gravity	Specific gravity(Gs)	2.62
density	minium dry unit weight (g/cm <sup>3</sup> )	1.37
	maximum dry unit weight (g/cm <sup>3</sup> )	1.68
grain size analysis	coefficient of uniformity $C_u$	1.46
	coefficient of curvature $C_c$	1.04

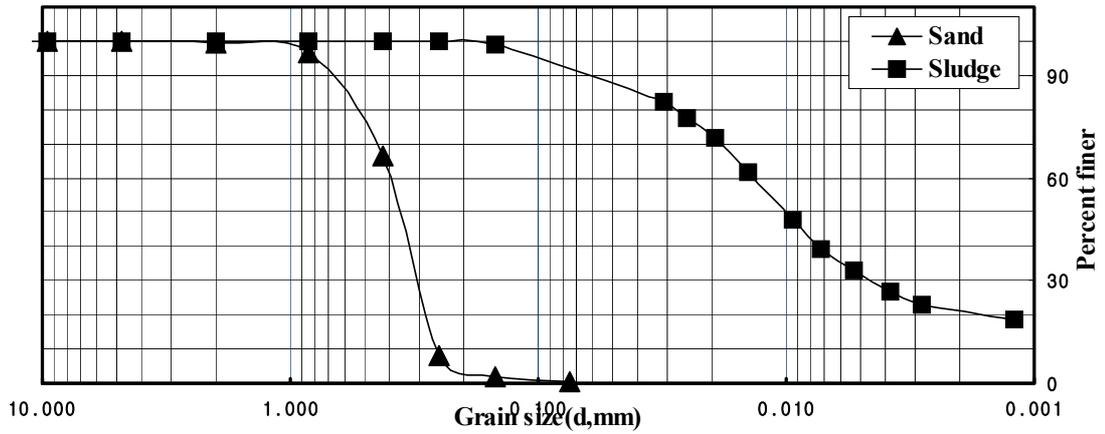


Fig. 4.28 Grain-size distribution curve of Sand

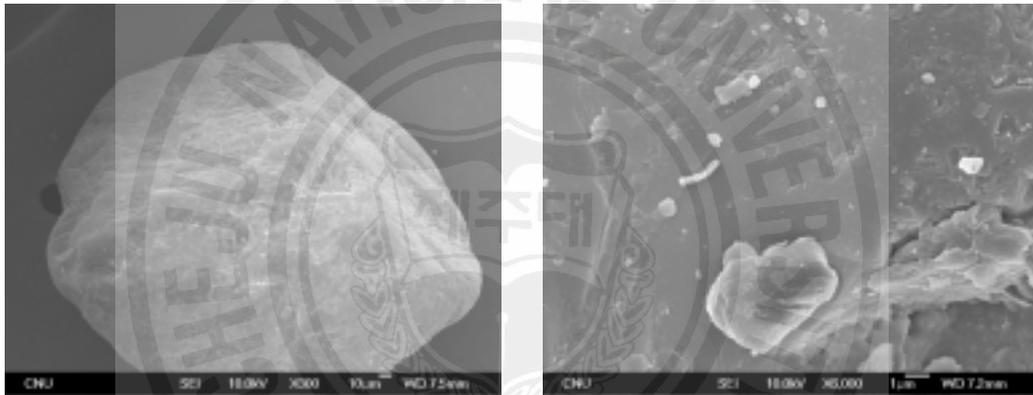


Fig. 4.29 The shape/surface in sand by scanning electron micrograph(300:6,000)

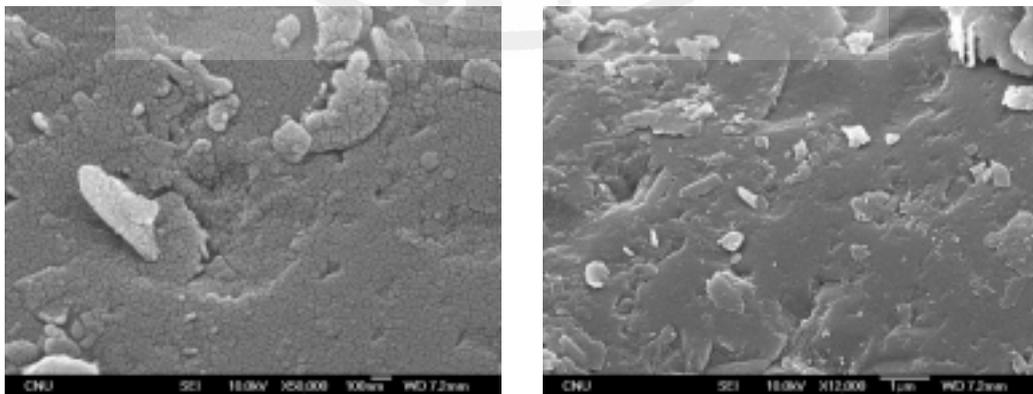


Fig. 4.30 The shape/surface in sand by scanning electron micrograph(12,000 :50,000)

## 1.6 자갈

현무암 석분슬러지를 활용 현장에서 사용할 수 있는 공법개발을 위하여 바닥부 위에 누수가 많은 저수지와 유사한 지반모형을 실내에 제작하기 위하여 자갈을 사용하였다.

지반모형 상부에 수중상태와 건조상태에서 배합된 시료를 자유 낙하시켜 일정 시간 경과 후 시험 전·후의 투수성을 측정하여 바닥지반 차수보강 재료로서의 적용여부를 검토하기 위하여 사용된 자갈에 대하여 입도분석을 하였다.

시험에 사용된 자갈은 100°C이상으로 24시간 이상 완전히 건조한 시료를 사용하였다. 각 측정치는 Table 4.17에 제시하였다. 균등계수 1.60이고 곡률계수는 0.99이다. Fig. 4.31은 자갈의 입도분포곡선이다.

토질의 분류기준인 통일분류법(Unified Soil Classification System)에 의하여 분류하면 자갈은 GP(입도분포가 나쁜 자갈)에 분류되는 것으로 나타났다.

**Table 4.17 The Physical property of the gravel**

Tests	Test Result	
	Contents	sample
Grain size analysis	coefficient of uniformity, $C_u$	1.60
	coefficient of curvature, $C_c$	0.99

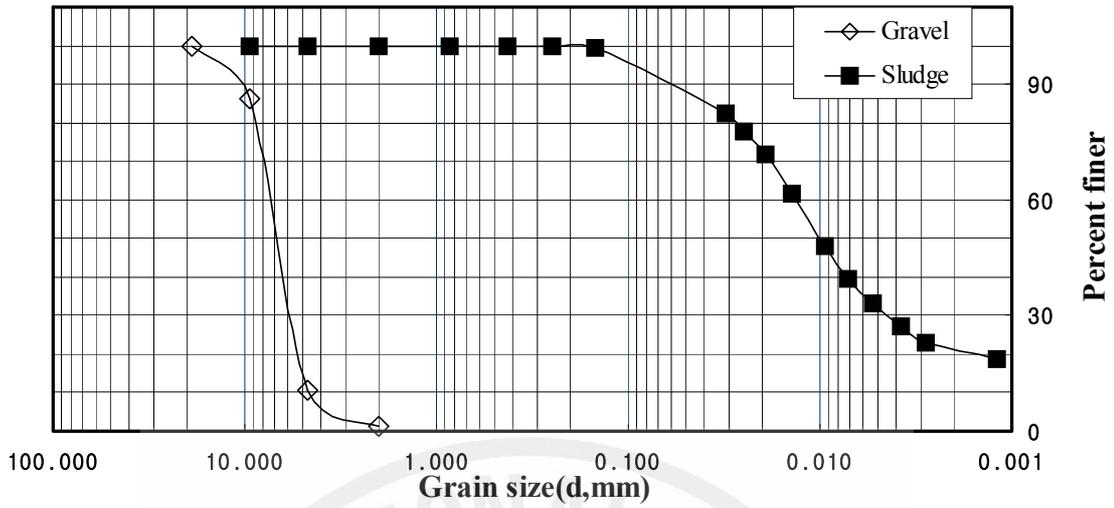


Fig. 4.31 Grain-size distribution curve of Gravel

사용된 재료의 특성을 입도분포 곡선을 종합하면 Fig 4.32와 같다.

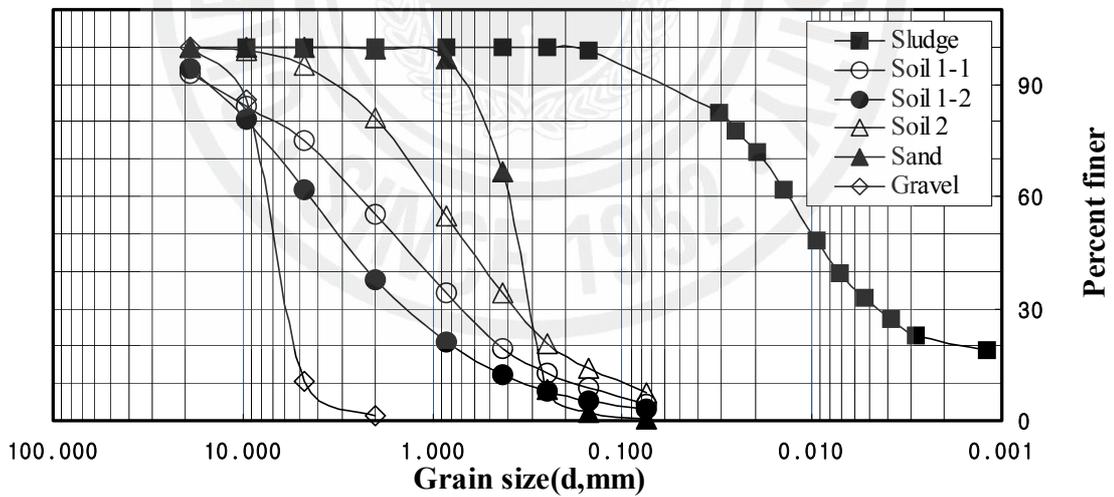


Fig. 4.32 Grain-size distribution curve of materials

## 2. 시험방법 및 장치

### 2.1 시료의 배합

석분슬러지와 현장토사, 시멘트 및 혼화제, Fly-ash, 모래와 적정비율로 배합하여 여러가지 Type의 시료를 만들어 시험을 실시하였다. 시료의 배합비율은 적정하게 운용하여 여러 Type으로 하였으며, Type별 재료 배합과 적용한 시험은 Table 4.18과 같다. 배합과정에 사용되는 물은 공통적으로 배합시 조건을 고려 슬럼프 값이 7.5~12.5가 되는 범위 내에서 사용하였다.

**Table 4.18 Total Mix Proportion Matrix**

Item	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type V
Sludge	●	●	●	●	●
Fly-ash		●	●		
Cement	●	●	●	●	
Admixture	●				
Soil 1					●
Soil 2			●		
Sand				●	
Tests	압축/투수/동결융해/ 건조수축/중량변화	압축/투수	압축/투수	압축/투수	투수

## 2.2 압축강도시험

### 2.2.1 시험편 성형

압축강도 시험을 위한 공시체 제작은 Fig 4.33와 같이  $\phi 5 \times 10\text{cm}$ 인 삼연형 시린더 몰드(Three Gang Mortar Cylinder Mold)로 현무암 석분슬러지와 혼합시료의 압축강도용 공시체를 이용하여 제작 하였다.

혼합시료는 몰탈 혼합기를 이용하여 혼합한 다음 몰드에 넣어 고무망치로 두드리면서 다진 다음 성형이 끝나면 몰드에 넣은 상태에서 24시간 이상 습윤 양생한다. 몰드를 해체 하고 시험체를 몰드에서 빼낸 후 공기에서 양생하거나 수중양생을 위하여 항온 양생수조의 깨끗한 물에 담그어 놓는다. 양생수조의 온도는  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 유지하였다.



Fig. 4.33 Three Gang Mortar Cylinder Mold

(1) Type I (석분슬러지+시멘트+혼화제)

석분슬러지와 혼합한 시멘트는 첨가 재료로서 경화 또는 안정시키는 작용을 하고, 수경성 및 내수성이 있으며, 일반적으로 강도 증진 효과가 크고, 투수성은 벤토나이트 만큼 우수하지 못하지만 경화된 후에는 투수계수가 낮아진다. 석분슬러지를 공학적으로 활용하기 위해서는 이러한 시멘트의 장점을 활용 배합 비율의 적정성 연구가 필요하였으며, 사용된 혼화제는 작업시 workability 개선하는 효과가 크므로 적정비율을 사용 배합 Type을 결정하였다. 석분슬러지와 시멘트, 혼화제를 배합한 시험편의 압축강도를 시험하기 위하여 현무암 석분슬러지와 시멘트 배합비는 0:1, 1:1, 4:1, 5:1, 6:1, 9:1로 하였으며 혼화제의 첨가량은 시멘트 중량의 1%로 하였으며, 각 배합비에 대한 슬럼프 실험을 통하여 W/(BS+C)(BS: 석분, C: 시멘트)비는 37.5%로 정하였다. 이때 슬럼프의 값은 7.5~12.5가 되는 범위내에서 조정하였다.

**Table 4.19 Mix Proportion Ratio of Type I**

Item	Sludge(%)	Cement(%)	혼화제(%)	Water(%)
Type I -1	0	100	1	슬럼프값이 7.5~12.5가 되는 범위내 사용
Type I -2	50	50	0.5	
Type I -3	80	20	0.2	
Type I -4	83	17	0.17	
Type I -5	87	13	0.13	
Type I -6	90	10	0.1	

(2) Type II (석분슬러지+시멘트+Fly-ash)

미분탄을 연소하는 보일러의 연도 가스로부터 집진기로 채취한 회분(석탄재)인 Fly-ash는 레미콘 혼화재, 경량골재, 건축재료, 토목재료, 비료재료 등으로 이용 활성화 되고 있으며, 보통포틀랜드 시멘트만으로 만족시킬 수 없는 성질을 개선 내지는 향상시킬 수 있는 장점을 유효 적절하게 활용하고 석분슬러지와 같이 산업폐기물을 재활용하는 재료로서 연구하기 위하여 배합 Type을 결정하여 시험하였다. Fly-ash와 석분슬러지, 현장토사, 시멘트를 Table 4.20와 같이 배합하여 시험하였다. W/(BS+C+Fa)(BS:석분, C: 시멘트 Fa: 플라이애쉬)비는 37.5%로 정하

였다. 이때 슬럼프의 값은 7.5~12.5가 되는 범위내에서 조정하였다.

**Table 4.20 Mix Proportion Ratio of Type II**

Item	Sludge(%)	Cement(%)	Fly-ash(%)	Water(%)
Type II-1	50	50	0	슬럼프값이 7.5~12.5가 되는 범위내 사용
Type II-2	48	32	20	
Type II-3	42	18	40	
Type II-4	32	8	60	
Type II-5	18	2	80	

(3) Type III (석분슬러지+시멘트+Fly-ash+현장토사2)

위 II의 조건에 추가하여 사용된 토사재료는 공학적 성질이 비교적 양호하며 현장에서 가장 많이 분포되어 있고 구입이 용이한 재료로 입도분포가 석분슬러지와 시멘트, Fly-ash는 실트 또는 점토질 이므로 배합에 적정성을 확보하면서 재료구입에 따른 경제적인 면을 검토하기 위하여 토사를 추가하여 배합 Type을 결정 시험하였다. Type별 배합비는 Table 4.21과 같다.

**Table 4.21 Mix Proportion Ratio of Type III**

Item	Sludge(%)	Cement(%)	Fly-ash(%)	Soil 2(%)	Water(%)
Type III-1	50	10	40	0	슬럼프값이 7.5~12.5가 되는 범위내 사용
Type III-2	40	8	32	20	
Type III-3	36	6	18	40	
Type III-4	28	4	8	60	
Type III-5	16	2	2	80	

(4) Type IV (석분슬러지+시멘트+모래)

콘크리트 배합시 잔골재로 이용되는 모래는 공학적 성질이 비교적 양호하며 비교적 구입이 용이한 재료로 입도분포가 양호하여 석분슬러지와 시멘트는 실트 또는 점토질 이므로 배합에 적정성을 확보하면서 재료 자체의 강도가 양호하여, 혼합체의 강도 증진 및 투수성을 낮게하는 데 효과적이라는 판단이 있어 모래를 추가 배합 Type을 결정하여 시험하였다. Type별 배합비는 Table 4.22와 같이 배합하여 시험하였다.

**Table 4.22 Mix Proportion Ratio of Type IV**

Item	Sludge(%)	Cement(%)	Sand(%)	Water(%)
TypeIV-1	50	50	0	슬럼프값이 7.5~12.5가 되는 범위내 사용
TypeIV-2	48	32	20	
TypeIV-3	42	18	40	
TypeIV-4	32	8	60	
TypeIV-5	18	2	80	

## 2.2.2 시험장치

압축강도 시험은 배합 Type별 수중과 공기중에 양생을 한 후 배합 Type별 시험체의 재령 7일, 14일, 28일별로 압축강도를 측정한다. Fig. 4.34는 시험에 사용된 몰탈용 압축강도 시험기이다.



Fig. 4.34 Digital Portable Compression Tester

## 2.3 투수시험

### 2.3.1 시험편 성형

투수시험을 위한 중공 원통(hollow cylinder)형 시험편의 성형 방법은 각 Type 별 배합을 결정한 후 모르타 혼합기를 사용하여 혼합시료를 혼합 HD-215(Φ 10×20cm)몰드를 사용하여 시험체 중심에 중공막대기를 넣고 성형한다. 몰드에 넣은 상태에서 20~24시간이상 습윤 양생한 후, 항온 양생수조의 깨끗한 물에 담그어 23±2°C의 온도에서 수중 양생을 실시하였다.

#### (1) Type I (석분슬러지+시멘트+혼화제)

투수시험을 위한 Type I의 배합은 압축강도 시험을 위해 배합한 Type I과 동일하다.

**Table 4.23 Mix Proportion Ratio of Type I**

Item	Sludge(%)	Cement(%)	혼화제(%)	Water(%)
Type I -1	0	100	1	슬럼프값이 7.5~12.5가 되는 범위내 사용
Type I -2	50	50	0.5	
Type I -3	80	20	0.2	
Type I -4	83	17	0.17	
Type I -5	87	13	0.13	
Type I -6	90	10	0.1	

#### (2) Type II (석분슬러지+시멘트+Fly-ash)

투수시험을 위한 Type II의 배합은 압축강도 시험을 위해 배합한 Type II와 동일하다.

**Table 4.24 Mix Proportion Ratio of Type II**

Item	Sludge(%)	Cement(%)	Fly-ash(%)	Water(%)
Type II-1	50	50	0	슬럼프값이 7.5~12.5가 되는 범위내에서 사용
Type II-2	48	32	20	
Type II-3	42	18	40	
Type II-4	32	8	60	
Type II-5	18	2	80	

(3) Type III (석분슬러지+시멘트+Fly-ash+현장토사2)

투수시험을 위한 Type III의 배합은 압축강도 시험을 위해 배합한 Type III와 동일하다.

**Table 4.25 Mix Proportion Ratio of Type III**

Item	Sludge(%)	Cement(%)	Fly-ash(%)	Soil 2(%)	Water(%)
Type III-1	50	10	40	0	슬럼프값이 7.5~12.5가 되는 범위내에서 사용
Type III-2	40	8	32	20	
Type III-3	36	6	18	40	
Type III-4	28	4	8	60	
Type III-5	16	2	2	80	

(4) Type IV(석분슬러지+시멘트+모래)

투수시험을 위한 Type IV의 배합은 압축강도 시험을 위해 배합한 Type IV와 동일하다.

**Table 4.26 Mix Proportion Ratio of Type IV**

Item	Sludge(%)	Cement(%)	Sand(%)	Water(%)
TypeIV-1	50	50	0	슬럼프값이 7.5~12.5가 되는 범위 내에서 사용
TypeIV-2	48	32	20	
TypeIV-3	42	18	40	
TypeIV-4	32	8	60	
TypeIV-5	18	2	80	

(5) Type V (석분슬러지+현장토사1)

석분슬러지와 현장토사 1를 혼합하여 석분슬러지 함량이 0%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 하여 다짐시험을 수행, 최적함수비와 최대건조밀도에 의하여 투수시험 시험체를 성형하여 사용하였다. 현장 들밀도 시험결과에 의하여 상대밀도 91.0%와 89.5%로 재 성형하여 투수시험 시험체를 성형하였다. 시험체 성형에 따른 석분슬러지와 현장토사의 배합비율은 Table 4.27과 같으며, Fig. 4.35는 다짐시험결과에 의하여 소정의 밀도로 투수시험 시료를 별도로 주문제작한 투수시험용기에 성형하는 장면이다. Fig. 4.36은 성형 후 시료를 포화를 시키는 장면이다.

**Table 4.27 Mix Proportion Ratio of Type V**

Item	Specimen	
	Sludge	Soil
Type V -1	0%	100%
Type V -2	10%	90%
Type V -3	20%	80%
Type V -4	40%	60%
Type V -5	60%	40%
Type V -6	80%	20%
Type V -7	100%	0%



**Fig. 4.35 Remolded sample**



**Fig. 4.36 Samples saturation**

### 2.3.2 시험장치

석분슬러지와 Fly-ash, 시멘트, 혼화제, 모래, 현장토사와 배합한 혼합시료의 투수계수를 측정하기 위한 투수시험 장치는 두가지로 시행하였다.

(1) Type I, II, III, IV 경우

가. 시험방법

석분슬러지와 여러가지 시료와 배합한 시험체의 투수시험은 아래와 같이 시행하였다. 성형 후 양생된 시료를 Fig. 4.37에서 제시된 것처럼 투수용기 내부에 있는 몰드 ②위에 올려놓고 ①처럼 공시체와 몰드접촉부위의 간극을 실리콘으로 봉한다. 다음 캡(③)으로 공시체를 고정시킨다.

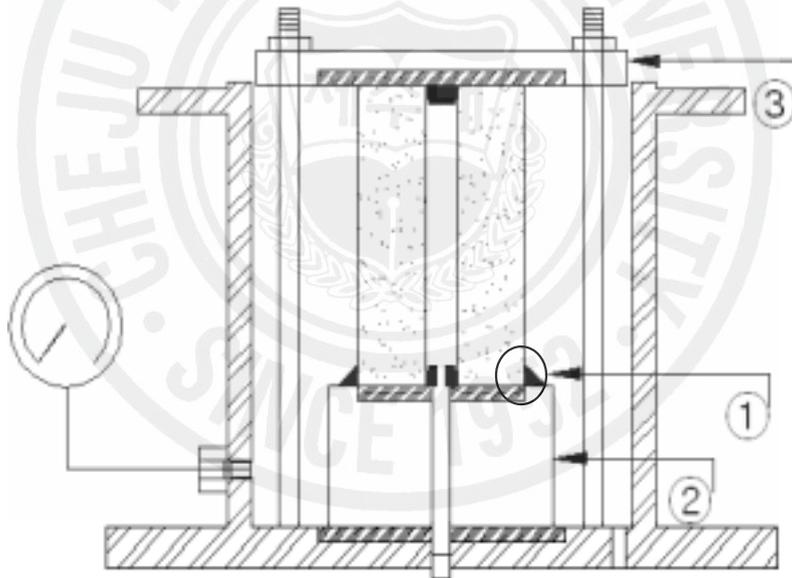


Fig. 4.37 Schematic diagram of Permeability test container

이렇게 고정시키고 투수시험 용기 덮개로 고정 시킨 후 시험 용기 내 물을 채운 후 1시간 정도 시험시 가해지는 수압보다 큰 수압으로 유지한다. 이것은 시험편의 패킹여부를 확인하고 패킹 과정 중 시험편의 건조문제를 해결하여 다시 포화 상태로 만드는 역할을 한다. 이러한 작업을 거친 후 Fig. 4.38과 같이 실험 준비를 완료 한다.

실험 준비가 끝나면 1시간 정도 포화 시킨 후 시험을 시작한다. 액화 질소 가스 통과 압축수조의 밸브와 레귤레이터를 통하여 수압을 조절한다. 이때 가스통, 압축수조, 시험용기의 레귤레이터는 같은 수압을 나타낸다. 소정의 수압에 도달 하면 다시 한번 투수시험 용기의 수압을 확인하고 메스실린더와 저울을 이용하여 일정한 시간동안의 유량을 측정한다. 식 3.12에 의하여 투수계수를 구한다.

나. 시험장치

석분슬러지와 여러 혼합시료의 투수시험을 위한 외압식 콘크리트 투수시험기는 Fig. 4.38과 같다. 시험기는 가압펌프, 투수시험용기, 측정부분 3개 주요 부위로 나눌 수 있다. Fig. 4.39는 투수시험기의 모식도를 나타낸다.

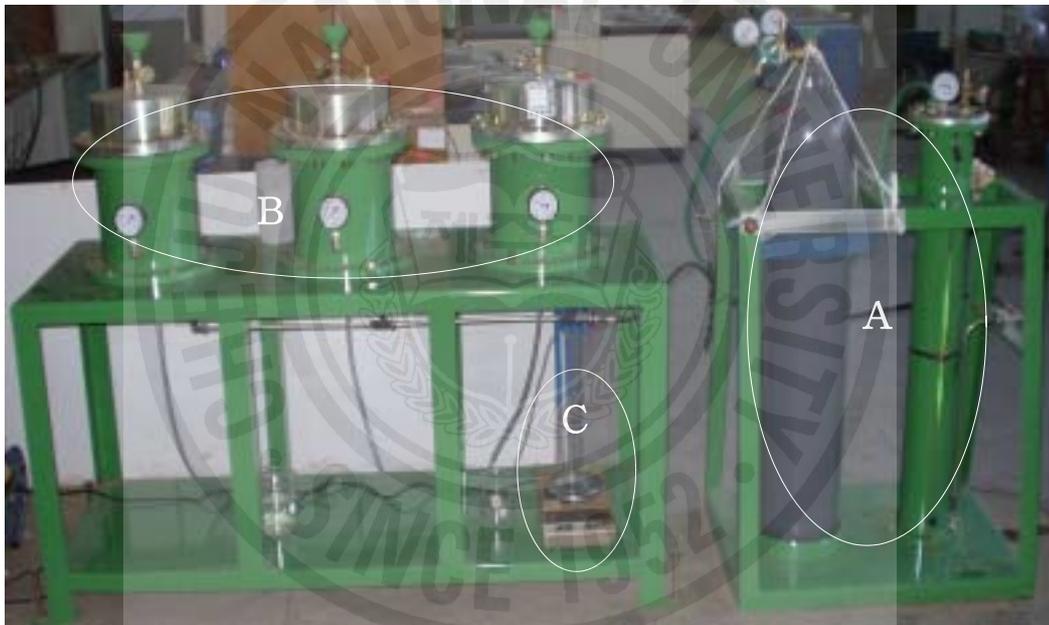


Fig. 4.38 Permeability Test Apparatus of concrete

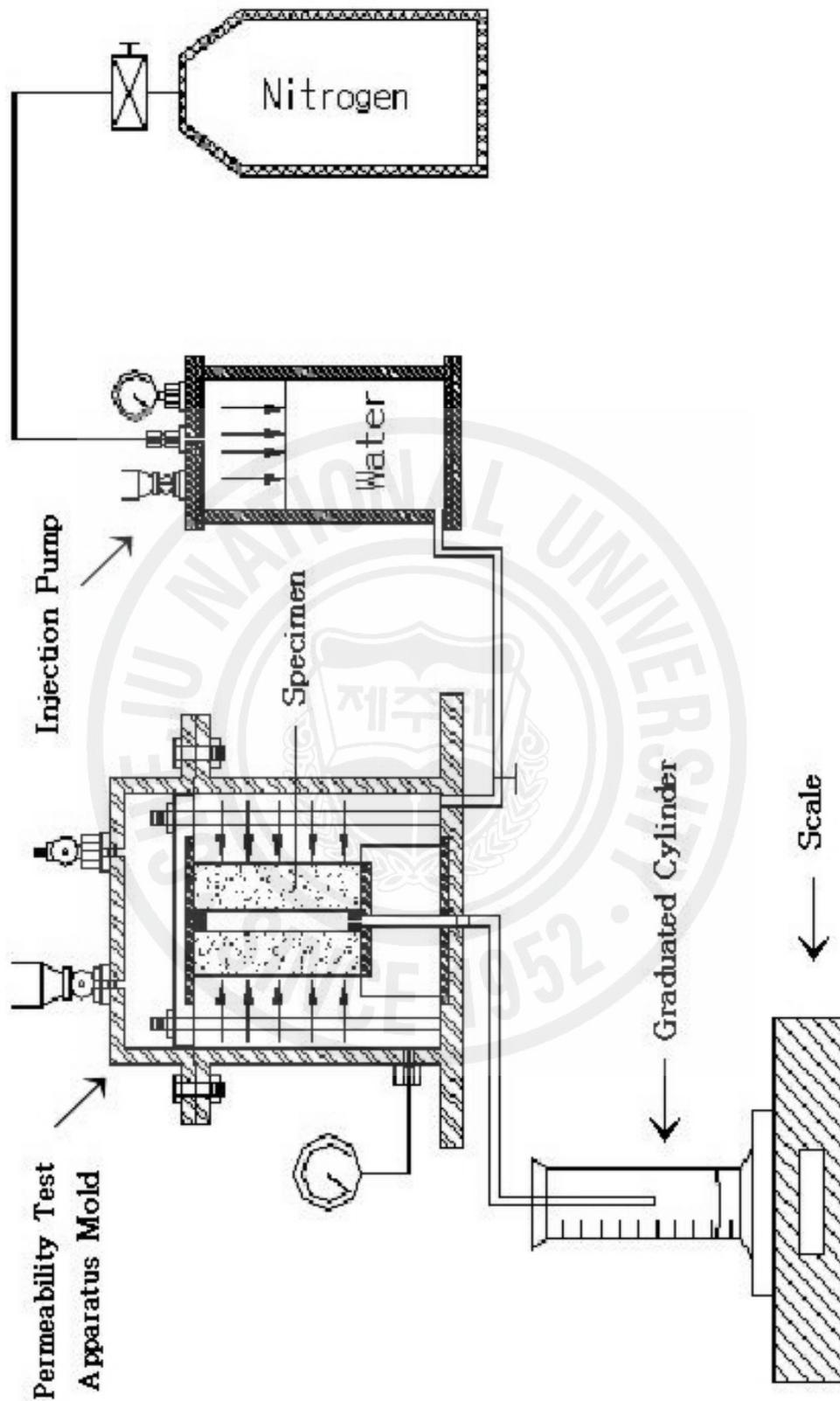


Fig. 4.39 Schematic diagram of Permeability test setup

위 그림에 제시된 마와 같이 가압펌프는 축압 수조와 액화질소 가스통으로 이루어져 일정한 수압을 가해주는 역할을 한다. 질소 가스는 레귤레이터와 밸브를 통하여 일정한 압력으로 축압수조 상단에 주입 되고 이 압력을 이용하여 축압수조에 있는 물을 일정한 수압으로 밀어 준다. 수압을 시험편으로 그대로 전달시키기 위한 연결부분은 가해지는 수압을 충분히 견딜 수 있는 파이프로 연결 되었다.

투수용기 내부의 하부에는 있는 Fig. 4.40과 Fig. 4.41과 같이 공시체 받침 몰드와 상부에는 Fig. 4.42와 Fig. 4.43과 같이 공시체를 고정할 수 있는 접촉면에 고무판으로 되어 있는 캡이 볼트로 고정 되어져 있다. 투수용기 상부에는 용기덮개 (Fig. 4.44)가 수압을 충분히 견뎌 내도록 Fig. 4.45와 같이 볼트에 의하여 단단히 조여져 있다. 접촉면에는 용기가 충분히 밀봉 되도록 O-ring을 사용하여 물의 유출을 막을 수 있다.



Fig. 4.40 Support Mold



Fig. 4.41 Setting feature



Fig. 4.42 Fixing Cap



Fig. 4.43 Setting feature



Fig. 4.44 Container Lid



Fig. 4.45 Setting feature

유량을 측정하기 위하여 Fig. 4.46와 같이 시험편 하단에 비이커 혹은 메스실린더를 놓아 시험편을 통과하여 나오는 유출수를 모아 최소 눈금이 0.5ml인 메스실린더와 정밀도가 0.01g인 전자저울을 동시에 사용하여 유량을 측정하였다.



Fig. 4.46 Measurement Equipment

(2) Type V의 경우

가. 시험방법

석분슬러지와 현장토사 1 및 혼화제의 배합시료의 투수시험은 다음과 같은 방법으로 시행하였다. 준비한 시료를 충분히 포화 시킨 후 배수구가 달린 덮개로 덮어 물이 새어 나오지 않도록 O-ring끼워 넣어 볼트로 고정 시킨다. 다음 변수 위 투수시험방법으로 투수계수를 측정한다.

나. 시험장치

석분슬러지와 현장토사 1 및 혼화제 배합시료의 투수시험은 별도로 주문제작한 투수시험용기를 사용하였다. Fig. 4.47에서 나타낸 바와 같이 A다짐 몰드와 같은 규격으로 제작한 시험기로서 소정의 밀도 및 함수비로 투수시험용 시료를 직접 다짐으로서 시험체를 성형하여 시험할 수 있도록 설계하였다. Fig. 4.48은 투수시험기의 모식도를 나타낸다.



Fig. 4.47 Falling head permeability tester

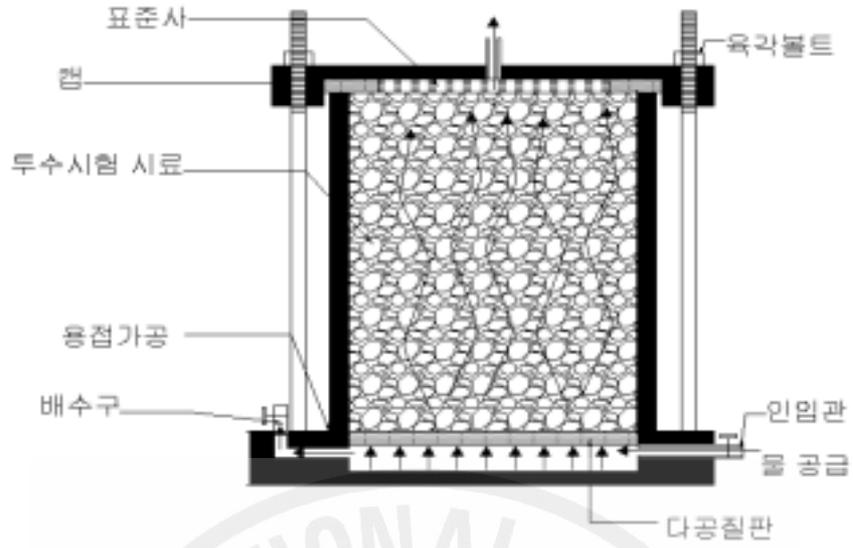


Fig. 4.48 Schematic diagram of falling head Permeability test setup



Fig. 4.49 Making Specimen for Testing-1



Fig. 4.50 Making Specimen for Testing-2



Fig. 4.51 Making Specimen for Testing-3

## 2.4 동결융해시험

### 2.4.1 시험방법

석분슬러지와 시멘트, 혼화제를 배합한 시료의 급속 동결 융해에 의한 영향을 분석하기 위하여 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험 방법(KS F 2456)중 수중 급속 동결 융해 시험 방법을 통하여 분석하였다.

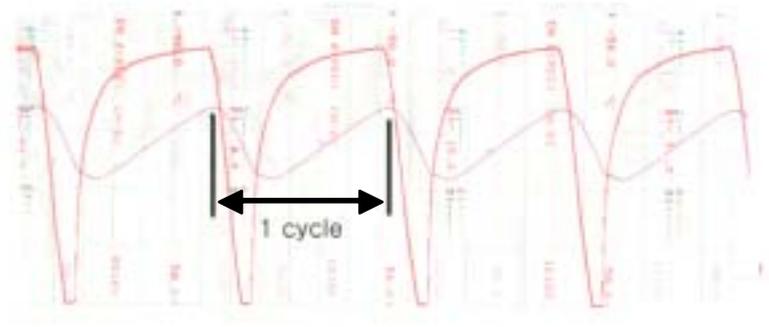
### 2.4.2 시험장치

Fig. 4.52는 동결융해 시험 장치이다. 동결 융해 1Cycle은 공시체 중심부의 온도를 원칙으로 하여 4℃에서 -18℃로 떨어지고, 다음에는-18℃에서 4℃로 상승된다.

Fig. 4.53은 공시체의 온도 변화이다. 그림에서와 같이 동결융해 시험장치내에 공시체의 온도에 따라 변하게 되는데 시간은 약 3시간~4시간 정도이고 두 개의 선으로 나타내어져 있는데 온도 변화가 큰 선은 시험 장치내의 온도를 나타내는 것이고 다른 한 선은 공시체 중심부의 온도변화를 나타낸 것이다.



Fig. 4.52 Freezing and thawing apparatus



**Fig. 4.53 Temperature change of specimen**

200Cycle에 가까워질수록 공시체의 온도변화 시간이 증가한다. 수중 급속 동결 용해시험 방법으로 동결용해를 하는 동안 언제나 약 3mm 정도의 물로 완전히 둘러싸여 있어야 한다. 또한 열교환 매개체의 용도가 용기의 바닥을 통하여 공시체 아래쪽 전면에 전달되어 공시체의 하부 상태가 다른 부분과 동일한 조건이 되도록 용기 바닥에서 공시체를 지지해야한다. 이 경우 용기 바닥에 10mm 철선으로 만든 평면형 나선 철선을 둔다. 사이클 중 동결 상태의 초기에 용해수 내에 공시체를 넣고 동결 용해 시험을 시작 한다.

Fig. 4.54는 동결용해장치 내부의 모습으로 A는 공시체의 온도를 재는 곳이고 B는 현재 동결용해 장치내부 온도를 재는 곳이다. C와 D는 동결용해 장치의 동결시키기 위해 찬 공기가 나오는 곳과 용해를 위해 온도를 높여주는 장치이다. 동결 용해 사이클이 50사이클에 용해 상태에서 장치로부터 공시체를 꺼내어 용기를 씻어 내고 깨끗한 물을 첨가한다. 동결용해는 30일 200cycle로 하여 동결용해 전후의 일축압축강도 및 투수계수, 중량감소비, 포졸란 반응을 관찰하였다.



**Fig. 4.54 The inside of freezing and thawing apparatus**

## 2.5 건조수축균열 및 중량변화 시험

석분슬러지와 혼합된 배합 성형체의 건조수축에 의한 균열과 중량변화 시험을 위한 시험편의 성형방법은 모르타 혼합기를 사용하여 혼합시료를 혼합한 다음 76×101×412mm, 10×10×40cm의 사각형 몰드를 사용하여 시험체를 성형하였다. Fig. 4.55는 수축균열, 길이변화 및 중량변화시험에 사용된 몰드이다.



Fig. 4.55 Prism mould for this study

### 2.5.1 건조수축균열시험

콘크리트의 건조수축균열시험 방법은 공시체의 주변온도를  $20\pm 1^{\circ}\text{C}$  습도를  $80\pm 5\%$ 로 유지하였으나 온도와 습도를 맞추어 보존한 결과 건조 균열의 경우 3개월이 지나도 아무런 변화가 일어나지 않아 시험의 온도( $10^{\circ}\text{C}$ ) 및 습도( $40\pm 5\%$ )를 정하여 측정하였다. 건조수축에 의한 균열시험과 길이변화시험의 관계를 알아보기 위하여 온도와 습도를 같게 정하여 시험 중의 공시체의 보존을 하였다.

### (1) 균열 시험

콘크리트의 건조수축균열 시험방법(KS F 2595)을 이용하여 균열시험을 실행하였다. 공시체의 제작 및 양생 중의 온도는  $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 로 한다. 공시체는 거푸집 탈형까지 습윤 상태에서 양생하여야 한다. 공시체의 몰드 탈형은 재령 7일로 한다.

공시체는 거푸집을 탈형한 후 곧 건조를 개시한다. 공시체의 균열 측정은 탈형 직후에 하고 이후 공시체에 균열이 발생할 때까지 원칙적으로 1일에 1회 측정한다. 균열 발생 시의 확인은 균열 발생 형태는 적용 범위에서와 같이 일반 콘크리트의 경우 타설면으로 부터 저면에 이르는 관통 균열이 확인되었기 때문에 균열 발생 시기를 “육안으로 균열을 확인 할 수 있는 시점”이라고 한다.

Fig. 4.56은 균열 측정을 하기위하여 그림과 같이 5개중 3개를 평균으로 하여 측정하였다.



Fig. 4.56 Specimen for crack test

### (2) 길이변화시험

모르타르 및 콘크리트의 길이 변화 시험 방법(KS F 2424)중 공시체의 중심축의 길이 변화를 측정하는 방법으로 다이얼, 게이지를 부착한 측정기를 이용하는 방법을 이용 하였다.

성형 후 몰드와 함께  $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 의 실내에서 습윤상태를 유지하고 성형 24시간 후에 탈형한다. 몰드를 탈형한후 Fig. 4.58에서와 같이 시험체를 향한 양생 수조의

물에 수침시켜 양생시킨다. 공시체를  $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 의 수중에서 양생하고, 재령이 7일 되었을때 측정 시점을 기준으로 한다.

측정기는 다이얼 게이지를 사용하며 0.001mm 까지 측정 할 수 있는 것을 사용한다. 길이 측정용 틀은 공시체를 측정할 때와 같은(연직 또는 연직에 대해 일정한 경사가 되는) 상태로 장치한다.

Fig. 4.57은 길이변화 시험 장치이다.



Fig. 4.57 Length change test equipment

## 2.5.2 중량 측정

중량 측정은 각 고화체에 대하여 배합비 별 7일, 14일, 28일 재령의 수중양생 후 동결융해 전과 동결융해 후 100, 200Cycle에 대하여 각각 측정한다.

Fig. 4.58은 공시체를 수중 양생하는 모습이다.



Fig. 4.58 Water curing of specimen

## 2.6 흡착시험

석분슬러지가 각종 산업 폐수 중에 함유되어 있는 중금속을 제거하기 위한 흡착제로서 활용여부를 알아보고자 회분식 흡착실험을 통해 석분의 흡착능력을 연구하였다.

실험에 사용되어진 석분슬러지는 실험하기 전  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 에서 5시간 건조시켜 수분을 제거한 후 사용하였다. 흡착량과 pH에 따른 흡착능력을 알아보기 위하여 시료는 0.5, 1, 2, 4g을 사용하였으며 pH는 2, 4, 6, 8의 범위에서 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 중금속은  $\text{pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$ 이며, pH의 조절은 0.01N NaOH, 0.1N NaOH, 0.01N  $\text{HNO}_3$ , 0.1N  $\text{HNO}_3$ 을 사용하였다. 중금속의 농도는 각각 2ppm을 조제하여 사용하였다.

### 2.6.1 실험방법

흡착 실험방법은 100ml 삼각플라스크에 2ppm의 중금속 용액 50ml을 넣고, 무게를 잰 시료를 넣은 후 교반기로 10분간 교반(200rpm) 후 pH를 측정하고 0.01N NaOH, 0.1N NaOH, 0.01N  $\text{HNO}_3$ , 0.1N  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ 를 이용하여 pH를 조절하였다. 다시 교반기를 이용하여 30분 교반 후 거름종이(Filter paper NO. 5B)을 이용하여 걸러내 AAS로 측정 잔류 농도를 측정하였다.

## V. 실험 결과

### 1. 강도시험

#### 1.1 압축강도 Type I (석분슬러지+시멘트+혼화재)

석분슬러지와 시멘트 혼화재의 배합비별 공시체를 제작 후 수중양생과 공기양생 시험체에 대하여 양생일수 7일, 14일, 28일의 압축강도를 측정하였다. Table 5.1은 수중양생공시체의 압축강도시험 결과를 나타내고 Table 5.2는 공기양생 공시체의 압축강도시험 결과를 나타냈다.

시멘트의 함량의 증가에 따라 수중양생과 공기양생의 시험체의 압축강도는 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 각 배합비 별 수중양생의 시험체인 경우 양생일수의 경과에 비례하여 압축강도도 증가하였다. 공기양생의 시험체인 경우 시멘트의 함량에 따라 일부 공시체에서 강도가 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 5.1과 Fig. 5.2는 수중 양생시험체와 공기 양생시험체의 압축강도와 시멘트 함유율 사이의 관계를 나타내었다. 공기양생과 수중양생 두 경우 모두 시멘트 함량이 증가할수록 압축강도도 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 시멘트에 다량 존재하는 CaO의 가수분해 반응에 의해 생성된  $Ca(OH)_2$ 가 석분에 포함되어 있는 규소(Si)와 알루미늄(Al)과 반응하여 tobermorite( $CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ ) 수화침전물을 형성하여 경화되기 때문으로 판단된다. 시멘트의 함량이 혼합시료 시험체 압축강도에 증진에 상당한 영향을 줄 것으로 사료된다.

Fig. 5.3에서 보는 바와 같이 수중양생의 경우 양생일수의 경과에 따라 압축강도는 지속적으로 증가되는 것으로 나타나고 있다. Fig. 5.4에서 보는 바와 같이 공기양생 과정에서 이와 반대로 같은 배합비에서 압축강도는 시간이 경과함에 따라 강도가 감소하였다.

공기 양생의 경우 시멘트 함량이 20% 미만인 공시체에서 양생 시간이 길어짐에 따라 강도가 낮아지고 양생과정에서 부분적 공시체에서 균열이 발생하였으며 공시체가 건조해짐에 따라 표면에 분말이 발생하였으며 시험체내부에 균열이 관

찰 되었다. 이는 공시체가 공기 중에 노출 되어 수분의 증발함에 따라 수화반응이 억제 되었기 때문으로 사료된다.

**Table 5.1 Compressive strength of water curing specimen Type I**

Specimen			Curing time		
			7 days (kgf/cm <sup>2</sup> )	14 days (kgf/cm <sup>2</sup> )	28 days (kgf/cm <sup>2</sup> )
Type	Sludge	Cement			
I -1	0%	100%	222.18	321.91	370.80
I -2	50%	50%	166.97	227.77	243.41
I -3	80%	20%	66.99	94.46	140.32
I -4	83%	17%	50.57	83.96	106.93
I -5	87%	13%	51.86	73.69	103.14
I -6	90%	10%	51.73	57.77	83.15

**Table 5.2 Compressive strength of air curing specimen Type I**

Specimen			Curing time		
			7 days (kgf/cm <sup>2</sup> )	14 days (kgf/cm <sup>2</sup> )	28 days (kgf/cm <sup>2</sup> )
Type	Sludge	Cement			
I -1	0%	100%	191.54	186.30	227.23
I -2	50%	50%	114.75	143.16	173.65
I -3	80%	20%	64.57	61.63	53.01
I -4	83%	17%	57.26	55.92	49.80
I -5	87%	13%	55.23	51.36	38.25
I -6	90%	10%	25.68	14.63	14.23

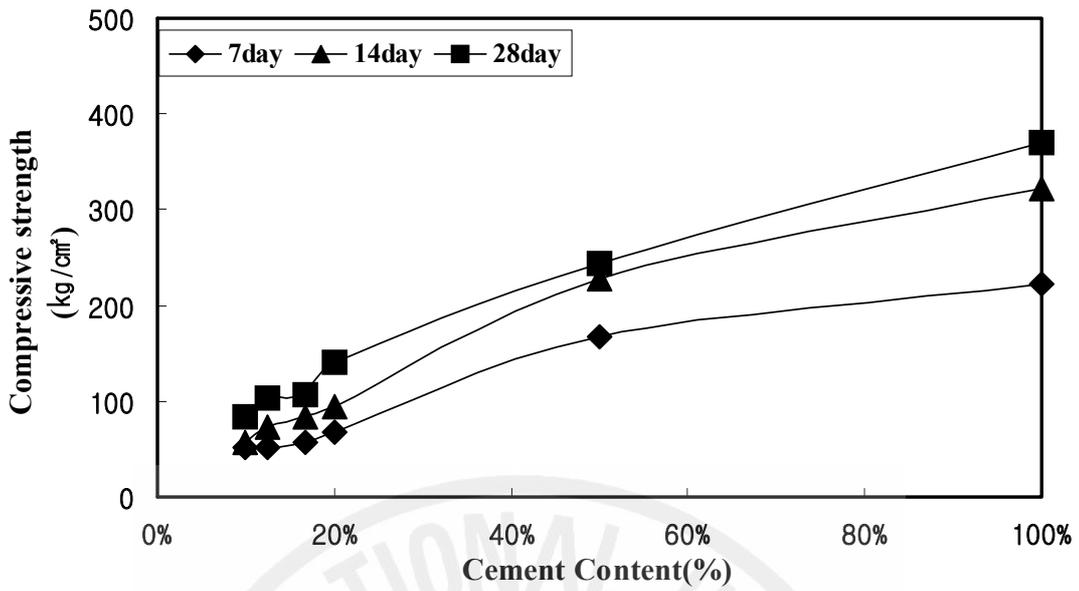


Fig. 5.1 Relationship between compressive strength and Cement Content (water curing specimen)

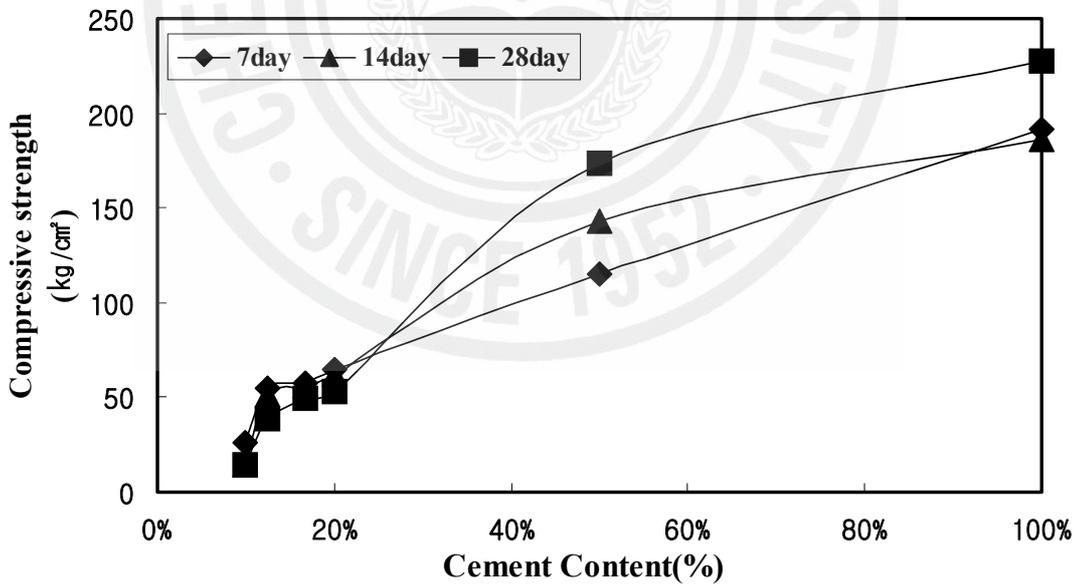


Fig. 5.2 Relationship between compressive strength and Cement Content (air curing specimen)

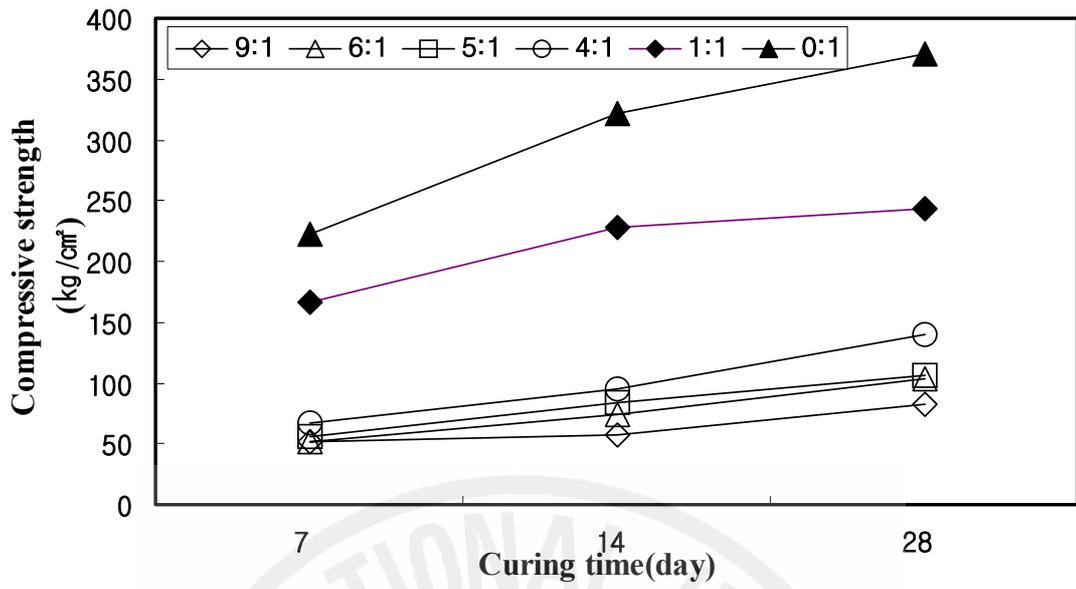


Fig. 5.3 Relationship between compressive strength and Curing time (water curing specimen)

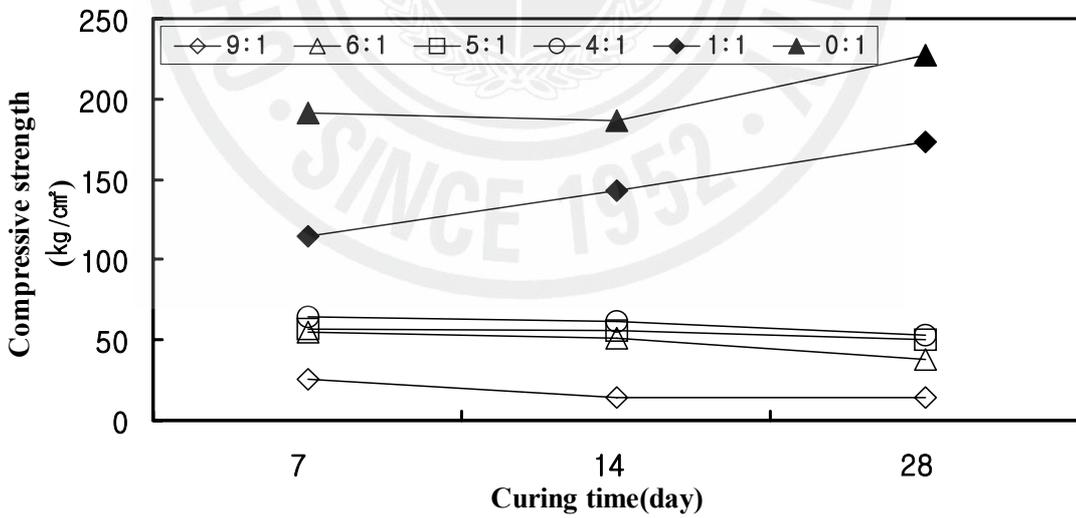


Fig. 5.4 Relationship between compressive strength and Curing time (air curing specimen)

## 1.2 압축강도 Type II (석분슬러지+시멘트+Fly-ash)

석분슬러지와 시멘트, Fly-ash를 배합비별 공시체를 제작 후 수중양생과 공기양생 시험체에 대하여 양생일수 7일, 14일, 28일의 압축강도를 측정하였다. Table. 5.3은 수중양생공시체의 압축강도시험 결과를 나타내고 Table. 5.4는 공기양생 공시체의 압축강도시험 결과를 나타냈다.

시멘트의 함량의 증가에 따라 수중양생과 공기양생의 시험체의 압축강도는 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 각 배합비 별 수중양생과 공기양생의 시험체인 경우 양생일수의 경과에 비례하여 압축강도도 증가하였다. 그러나, Fly-ash의 배합량이 많아 질 수록 압축강도는 감소하였으며, TypeII-5에서 보는 바와 같이 수중 양생과정에서 시험몰드가 파괴되는 경우가 있었는데 석분슬러지의 비율이 32% 미만, fly-ash의 비율이 60%초과, 시멘트의 비율이 8%미만인 경우에는 양생중 파괴될 것으로 검토되었다.

Fig. 5.5와 5.6은 배합시료의 재령일과 압축강도와의 관계를 나타낸 것이며, Fig. 5.7과 5.8은 압축강도 시험 후 배합시료의 입상을 장방출주사 전자현미경을 통해 관찰한 결과이다.

Table 5.3 Compressive strength of water curing specimen Type II

Specimen				Curing time (day)		
				7 days (kgf/cm <sup>2</sup> )	14 days (kgf/cm <sup>2</sup> )	28 days (kgf/cm <sup>2</sup> )
Type	Sludge	Cement	Fly-ash			
II-1	50%	50%	0%	218.4	236.2	265.9
II-2	48%	32%	20%	139.2	162.9	190.4
II-3	42%	18%	40%	43.5	63	73.6
II-4	32%	8%	60%	13.2	21	23.4
II-5	18%	2%	80%	양생중 파괴	양생중 파괴	양생중 파괴

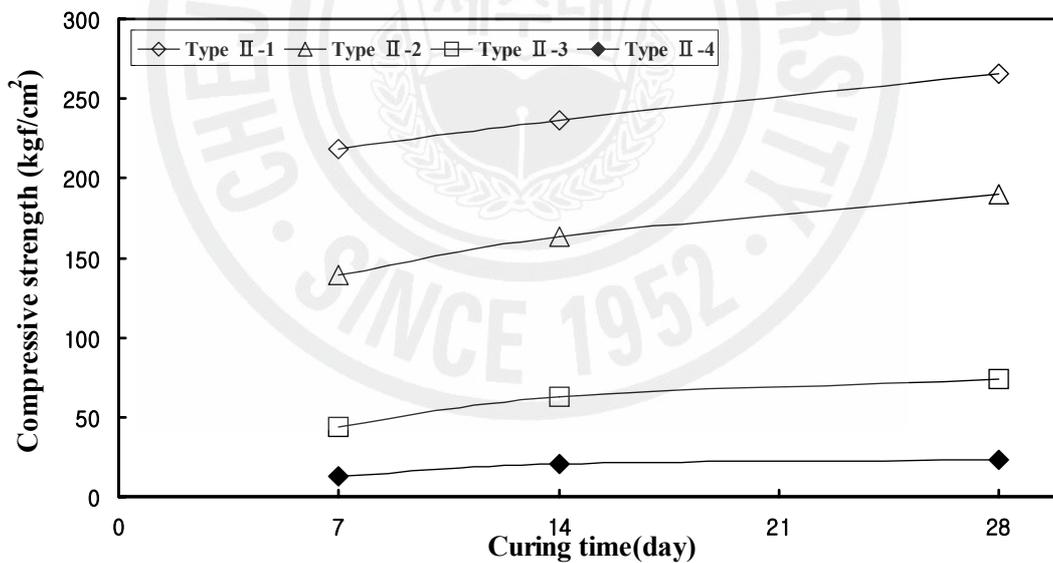


Fig. 5.5 Relationship between compressive strength and Curing time (water curing specimen)

Table 5.4 Compressive strength of air curing specimen Type II

Specimen Type	Curing time (day)			7 days (kgf/cm <sup>2</sup> )	14 days (kgf/cm <sup>2</sup> )	28 days (kgf/cm <sup>2</sup> )
	Sludg	Cement	Fly-ash			
II-1	50%	50%	0%	195.8	224.2	247.2
II-2	48%	32%	20%	119.2	152.3	180.7
II-3	42%	18%	40%	42.0	65.2	73.6
II-4	32%	8%	60%	18.3	21.3	29.1
II-5	18%	2%	80%	3.1	3.5	4.7

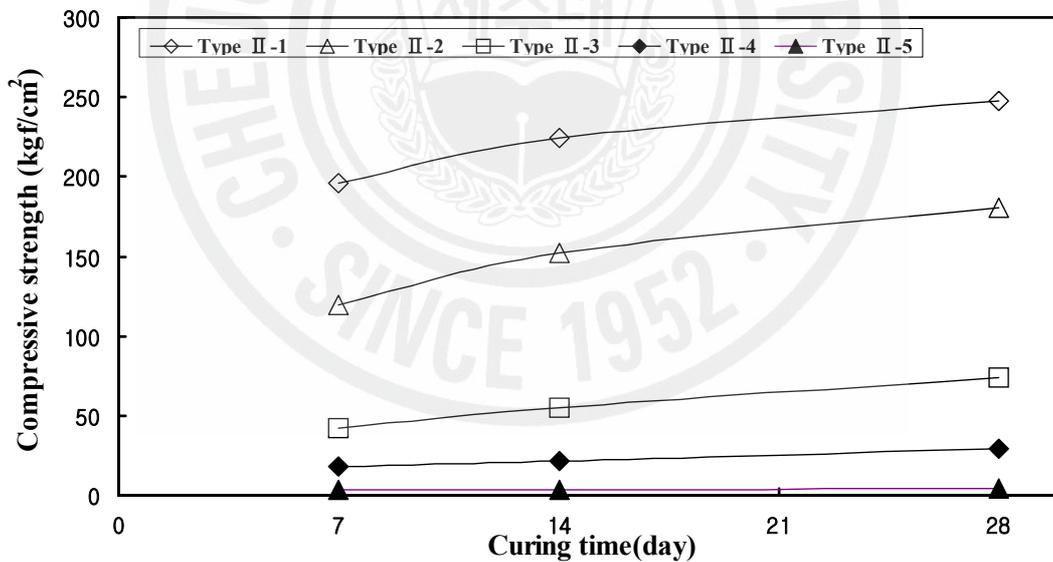


Fig. 5.6 Relationship between compressive strength and Curing time (air curing specimen)

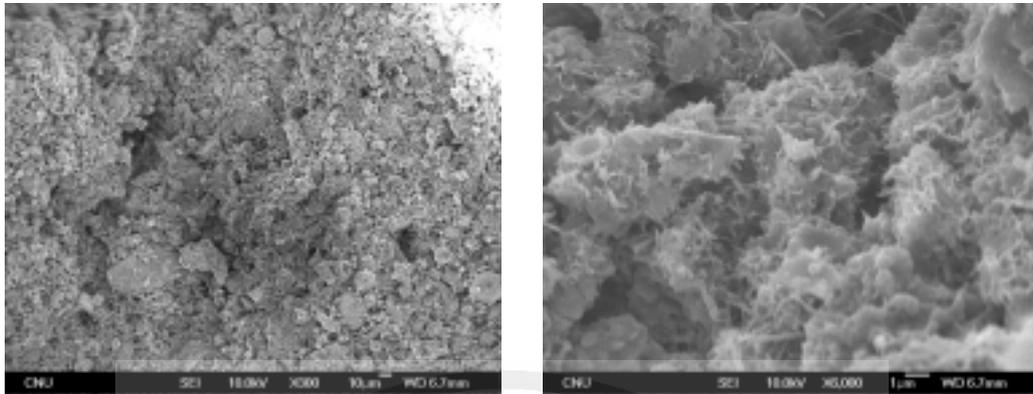


Fig. 5.7 The shape/surface in Type II-1 by scanning electron micrograph(300:6,000)

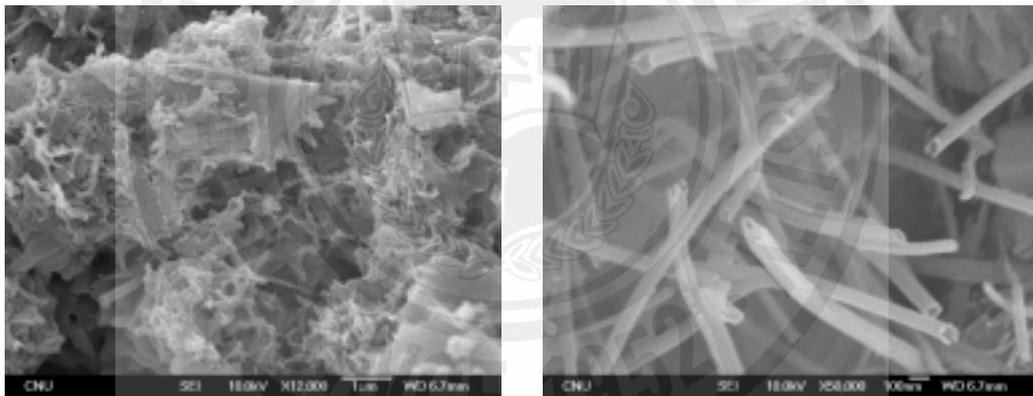


Fig. 5.8 The shape/surface in Type II-1 by scanning electron micrograph(12,000:50,000)

### 1.3 압축강도 Type III (석분슬러지+시멘트+Fly-ash+현장토사2)

석분슬러지와 시멘트, Fly-ash, 현장토사를 배합비별 공시체를 제작 후 수중양생과 공기양생 시험체에 대하여 양생일수 7일, 14일, 28일의 압축강도를 측정하였다. Table. 5.5는 수중양생공시체의 압축강도시험 결과를 나타내고 Table. 5.6은 공기양생 공시체의 압축강도시험 결과를 나타냈다.

시멘트의 함량의 증가에 따라 수중양생과 공기양생의 시험체의 압축강도는 모두 증가하는 경향은 있으나, 본 시험인 경우 압축강도는 현장토사 재료가 매우 영향이 있음을 알 수 있었다. 현장토사의 비율이 20%이상 이 되면서 수중양생의 경우는 시험편 형성이 안되었으며, 공기양생인 경우 압축강도 결과가 매우 낮게 나왔다.

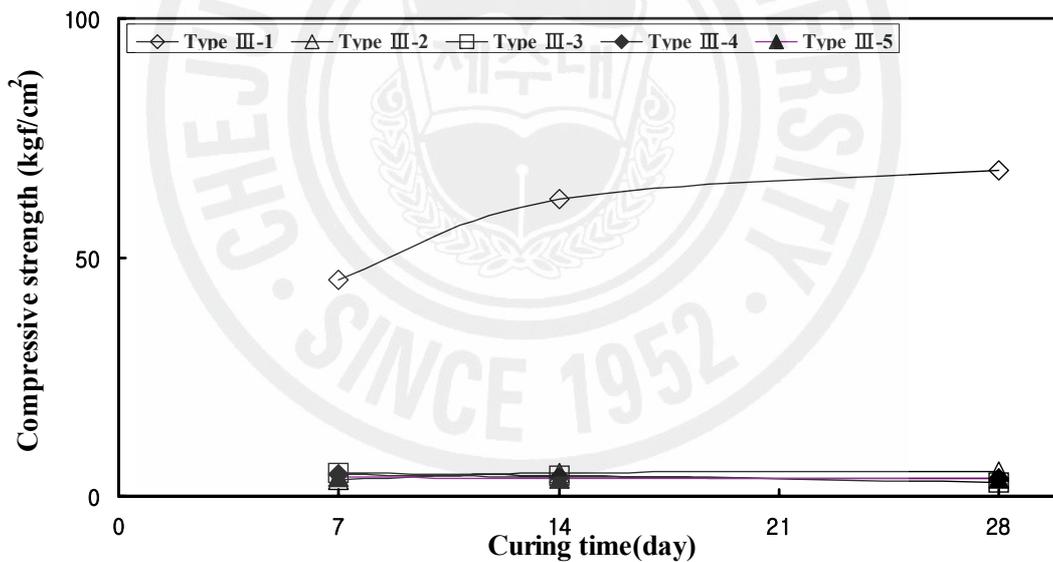
Fig. 5.9는 배합시료의 채령일과 압축강도와와의 관계를 나타낸 것이며, Fig. 5.10과 5.11은 압축강도 시험 후 배합시료의 입상을 장방출주사 전자현미경을 통해 관찰한 결과이다.

**Table 5.5 Compressive strength of water curing specimen Type III**

Specimen					Curing time (day)		
					7 days (kgf/cm <sup>2</sup> )	14 days (kgf/cm <sup>2</sup> )	28 days (kgf/cm <sup>2</sup> )
Type	Sludge	Cement	Fly-ash	Soil 2			
III-1	50%	10%	40%	0%	45.1	43.8	42.0
III-2	40%	8%	32%	20%	양생중 파괴	양생중 파괴	3.3
III-3	36%	6%	18%	40%	양생중 파괴	양생중 파괴	3.3
III-4	28%	4%	8%	60%	양생중 파괴	양생중 파괴	양생중 파괴
III-5	16%	2%	2%	80%	양생중 파괴	양생중 파괴	양생중 파괴

**Table 5.6 Compressive strength of air curing specimen Type III**

Specimen					Curing time (day)		
					7 days (kgf/cm <sup>2</sup> )	14 days (kgf/cm <sup>2</sup> )	28 days (kgf/cm <sup>2</sup> )
Type	Sludge	Cement	Fly-ash	Soil 2			
III-1	50%	10%	40%	0%	45.2	62.3	68.2
III-2	40%	8%	32%	20%	3.3	4.8	5.2
III-3	36%	6%	18%	40%	4.9	4.2	2.8
III-4	28%	4%	8%	60%	4.5	3.9	3.6
III-5	16%	2%	2%	80%	4.0	3.8	3.6



**Fig. 5.9 Relationship between compressive strength and Curing time (air curing specimen)**

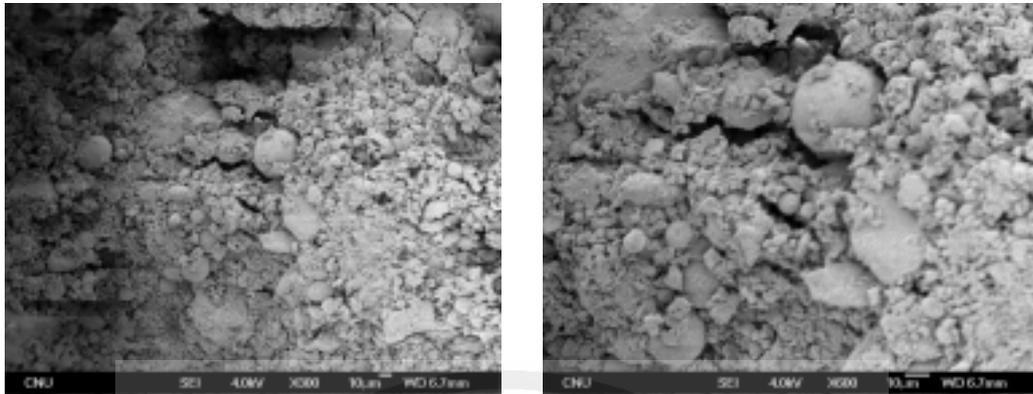


Fig. 5.10 The shape/surface in Type III-1 by scanning electron micrograph(300:600)

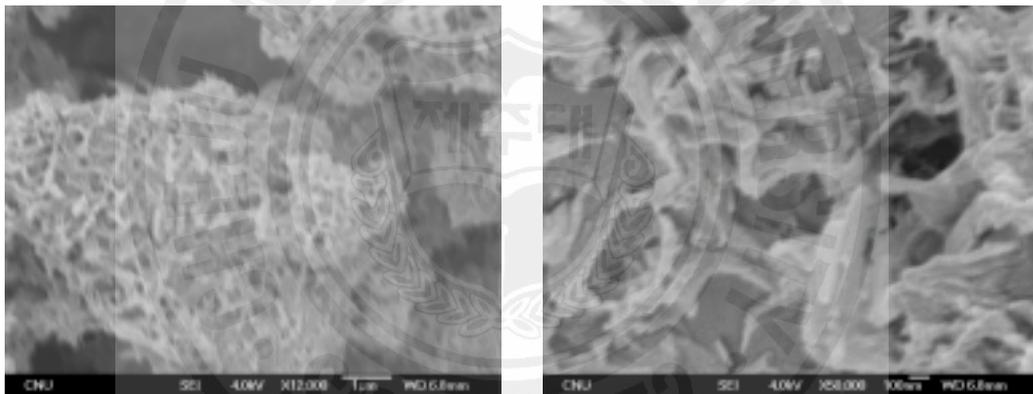


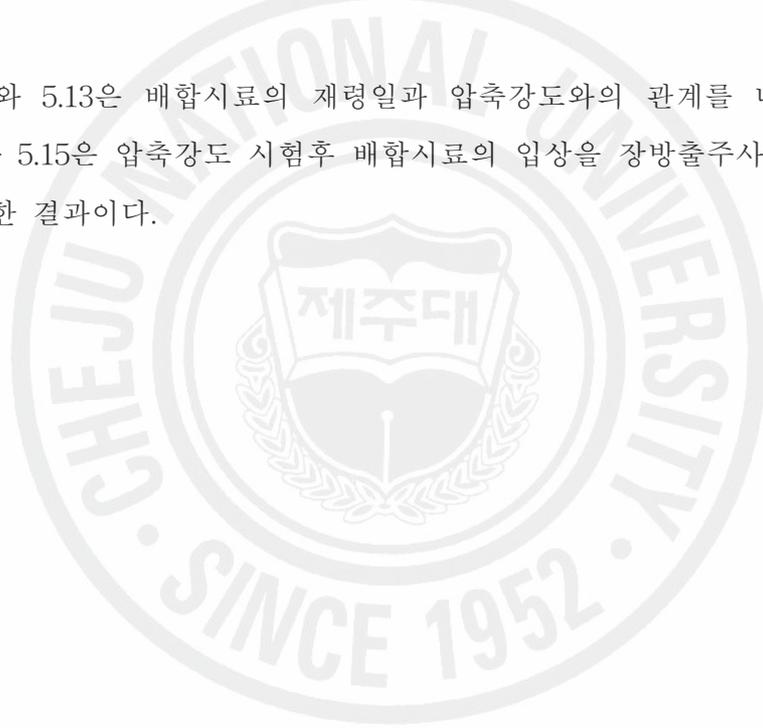
Fig. 5.11 The shape/surface in Type III-1 by scanning electron micrograph(12,000:50,000)

#### 1.4 압축강도 Type IV (석분슬러지+모래+시멘트)

석분슬러지와 모래, 시멘트를 배합비별 공시체를 제작 후 수중양생과 공기양생 시험체에 대하여 양생일수 7일, 14일, 28일의 압축강도를 측정하였다. Table. 5.7은 수중양생 공시체의 압축강도시험 결과를 나타내고 Table. 5.8은 공기양생 공시체의 압축강도시험 결과를 나타냈다.

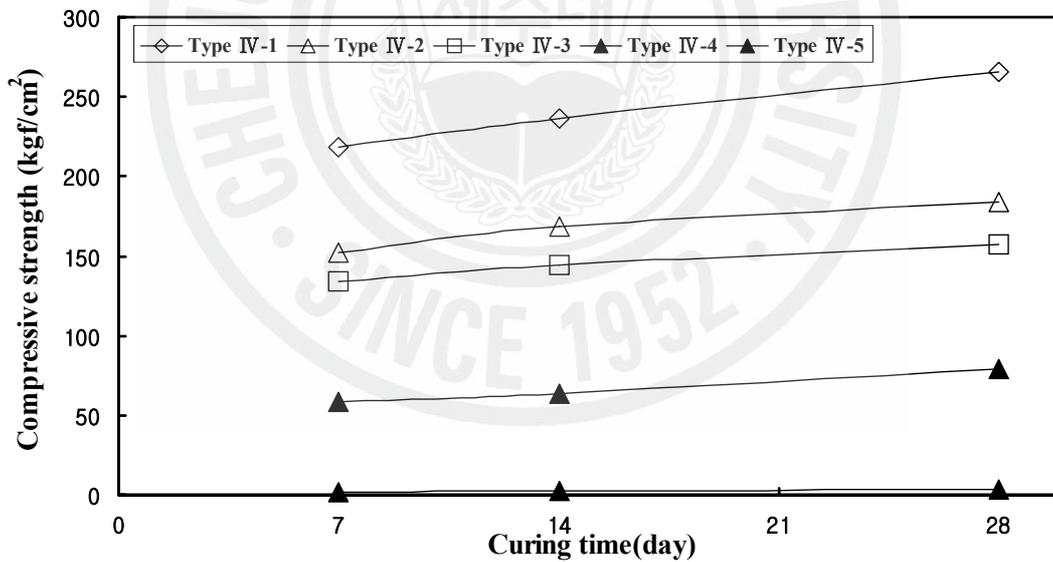
마찬가지로 시멘트의 함량의 증가에 따라 수중양생과 공기양생의 시험체의 압축강도는 모두 증가하는 경향은 있으나, 본 시험인 경우 압축강도는 Type II의 경우와 비교해 보면 Fly-ash보다는 모래가 강도 발현에는 효과적인 것으로 검토되었다.

Fig. 5.12와 5.13은 배합시료의 채령일과 압축강도와의 관계를 나타낸 것이며, Fig. 5.14과 5.15은 압축강도 시험후 배합시료의 입상을 장방출주사 전자현미경을 통해 관찰한 결과이다.



**Table 5.7 Compressive strength of water curing specimen Type IV**

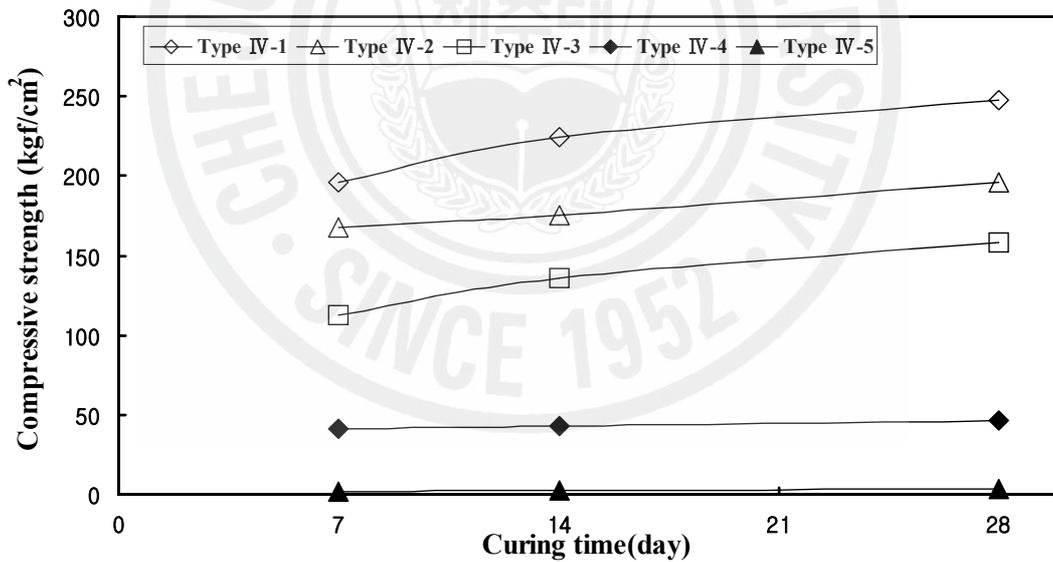
Specimen Type	Curing time (day)			7 days (kgf/cm <sup>2</sup> )	14 days (kgf/cm <sup>2</sup> )	28 days (kgf/cm <sup>2</sup> )
	Sludge	Cement	Sand			
IV-1	50%	50%	0%	218.4	236.2	265.9
IV-2	48%	32%	20%	152.1	168.2	184.3
IV-3	42%	18%	40%	134.0	144.5	157.3
IV-4	32%	8%	60%	58.2	63.3	78.9
IV-5	18%	2%	80%	1.9	2.5	3.8



**Fig. 5.12 Relationship between compressive strength and Curing time (water curing specimen)**

**Table 5.8 Compressive strength of air curing specimen Type IV**

Specimen Type	Curing time (day)			7 days (kgf/cm <sup>2</sup> )	14 days (kgf/cm <sup>2</sup> )	28 days (kgf/cm <sup>2</sup> )
	Sludge	Cement	Sand			
IV-1	50%	50%	0%	195.8	224.2	247.2
IV-2	48%	32%	20%	167.4	175.4	196.2
IV-3	42%	18%	40%	112.5	136.2	158.3
IV-4	32%	8%	60%	41.3	43.3	46.0
IV-5	18%	2%	80%	1.8	2.6	3.4



**Fig. 5.13 Relationship between compressive strength and Curing time (air curing specimen)**

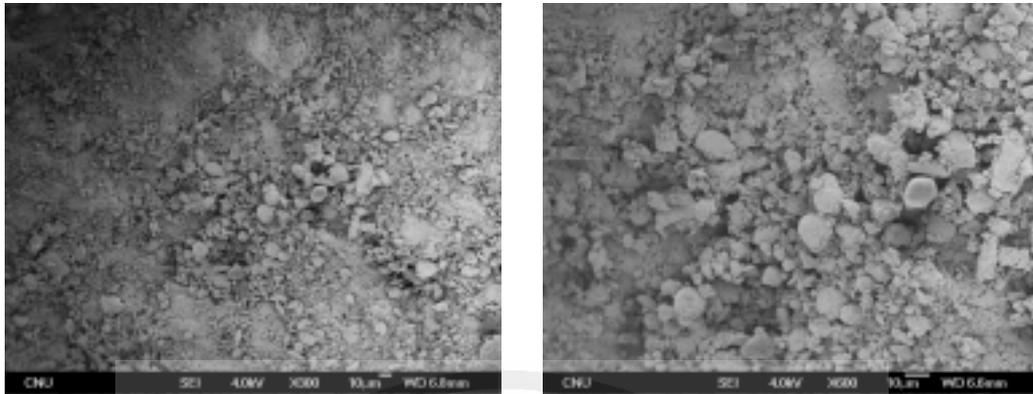


Fig. 5.14 The shape/surface in Type IV-1 by scanning electron micrograph(300:600)

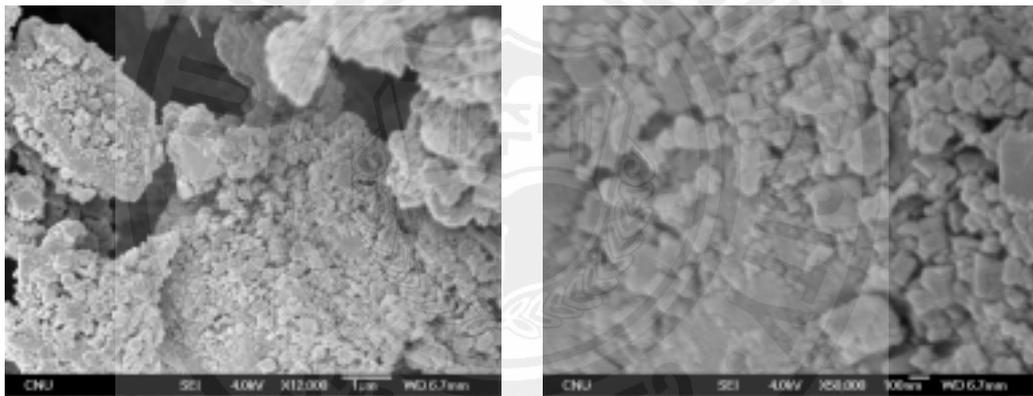


Fig. 5.15 The shape/surface in Type IV-1 by scanning electron micrograph(12,000:50,000)

## 1.5 인장강도

석분슬러지와 혼합체의 인장강도를 측정하기 위하여 초기 수중과 공기중 양생 7일 후의 인장강도를 측정하여 압축강도와 비교한 결과 다음과 같다. Type II인 경우 석분슬러지와 시멘트, Fly-ash 혼합체의 수중에서 7일 동안 양생한 후 비교한 결과 인장강도는 압축강도의 9.5%~12.4% 정도이고, 공기중에서 7일동안 양생한 후 비교한 결과 인장강도는 압축강도의 8%~11.4% 정도이다.

**Table 5.9 Tensile strength of curing specimen Type II ( 7days)**

Mix Proportion Ratio				Tensile strength $\sigma_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )		Compressive strength $\sigma_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )		$\sigma_t / \sigma_c$	
Type	Sludge	Cement	Fly-ash	cured in water	cured in air	cured in water	cured in air	cured in water	cured in air
II-1	50%	50%	0%	26.4	22.4	218.4	195.8	12.1%	11.4%
II-2	48%	32%	20%	13.2	11.7	139.2	119.2	9.5%	9.8%
II-3	42%	18%	40%	5.4	4.1	43.5	42.0	12.4%	9.8%

Type IV인 경우 석분슬러지와 시멘트, 모래 혼합체의 수중에서 7일 동안 양생한 후 비교한 결과 인장강도는 압축강도의 8.2%~14.1% 정도이고, 공기중에서 7일동안 양생한 후 비교한 결과 인장강도는 압축강도의 6.9%~11.4% 정도이다.

Table 5.10 Tensile strength of curing specimen Type IV( 7days)

Mix Proportion Ratio				Tensile strength $\sigma_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )		Compressive strength $\sigma_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )		$\sigma_t / \sigma_c$	
Type	Sludge	Cement	Sand	cured in water	cured in air	cured in water	cured in air	cured in water	cured in air
IV-1	50%	50%	0%	26.4	22.4	218.4	195.8	12.1%	11.4%
IV-2	48%	32%	20%	21.4	15.6	152.1	167.4	14.1%	9.3%
IV-3	42%	18%	40%	11.0	7.8	134.0	112.5	8.2%	6.9%

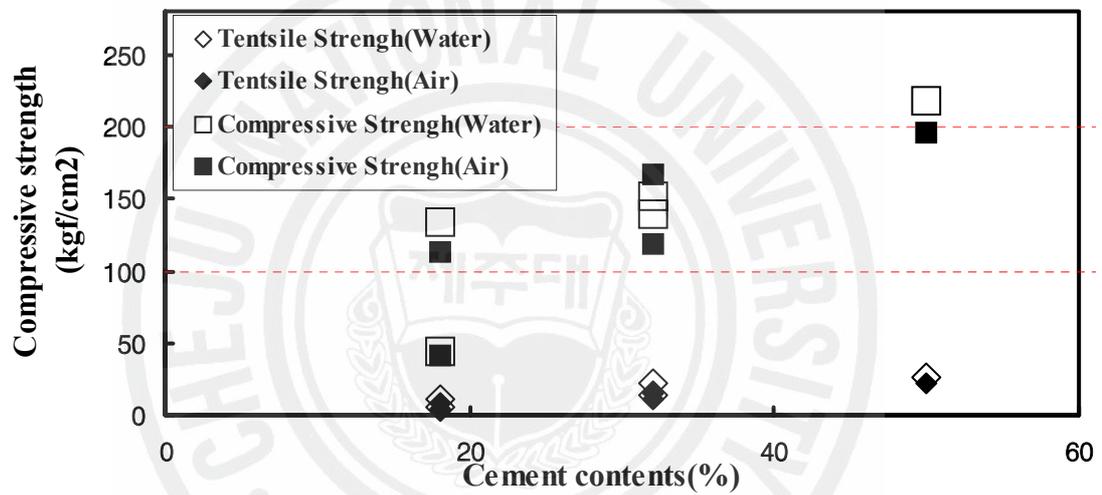


Fig. 5.16 Relationship between compressive and tensile strength and Cement contents

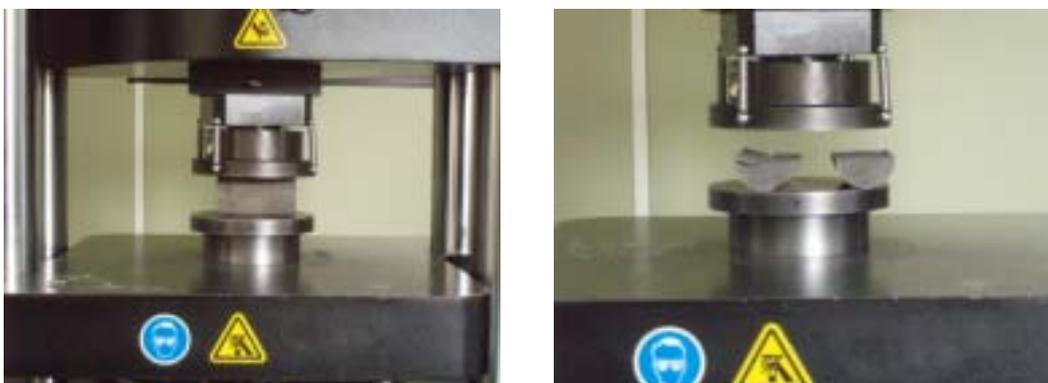


Fig. 5.17 The photo of the Tensile Strength Test

## 1.6 비교분석

시멘트 비율에 따른 석분슬러지, Fly-ash, 토사, 모래 등의 혼합체의 수중양생의 재령별 압축강도를 비교한 결과 다음의 표와 같다. 표에서 보는 바와 같이 28일 양생을 기준으로 보면 시멘트 비율이 50%경우는 석분슬러지와 시멘트의 비율만 적용된 것으로 250kgf/cm<sup>2</sup> 정도의 압축강도가 발생되었으며, 시멘트의 비율이 적어질수록 모래, Fly-ash, 석분슬러지 순으로 압축강도가 큼을 알 수 있었다.

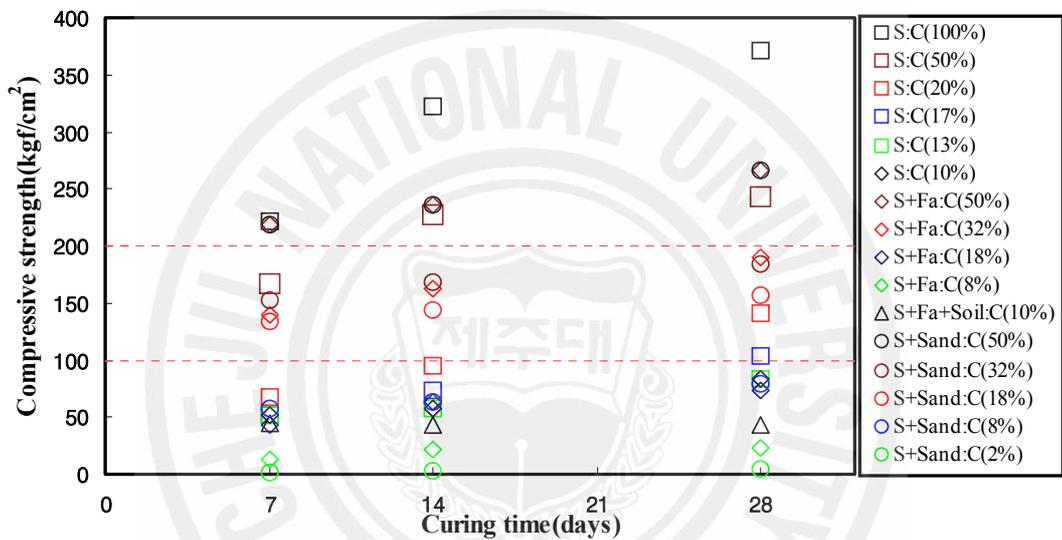


Fig. 5.18 Relationship between compressive strength and Curing time

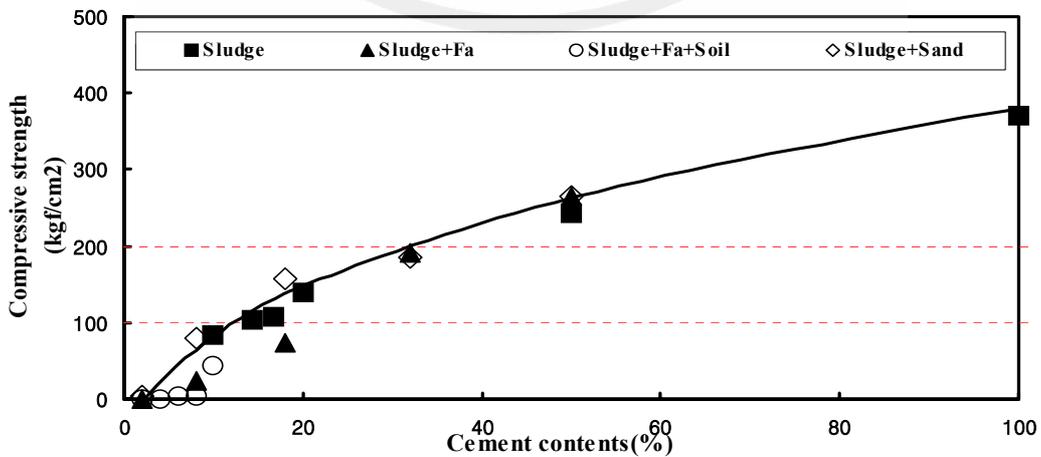


Fig. 5.19 Relationship between compressive strength and Cement contents

또한 석분슬러지 함유량에 따른 혼합체의 압축강도를 비교한 결과 석분슬러지가 50% 비율 전후에서 압축강도가 크게 분포함을 알 수 있다.

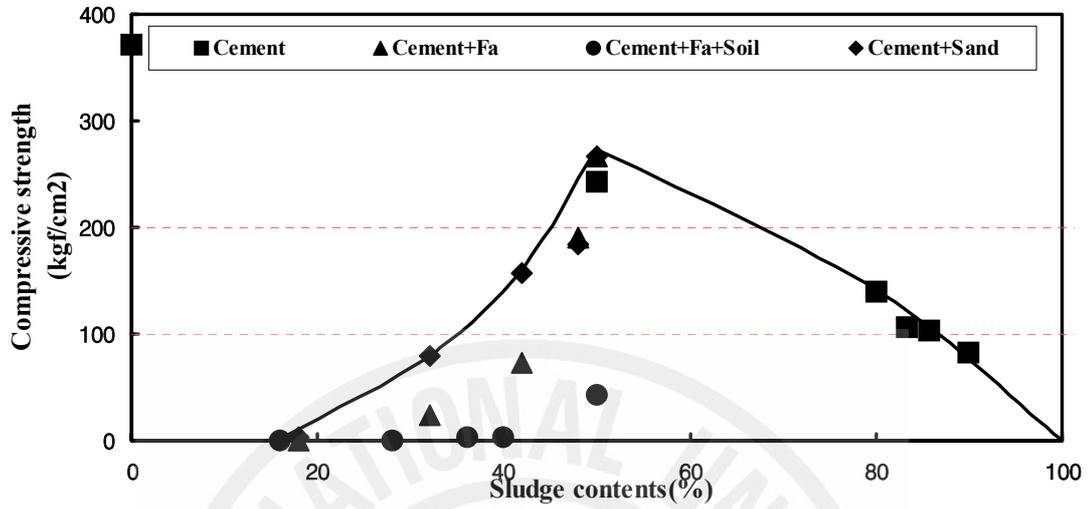
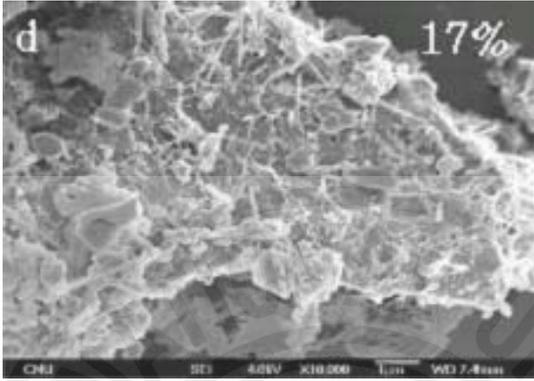
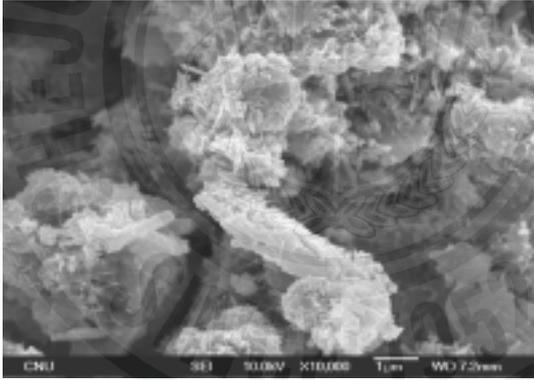
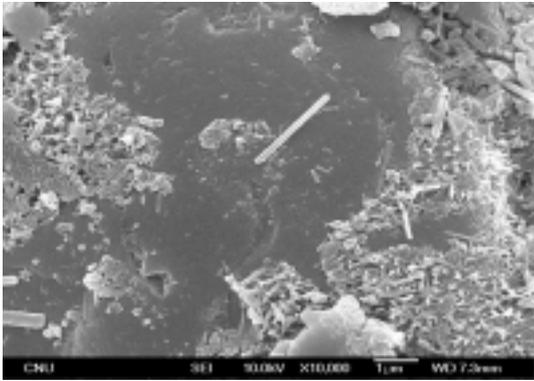


Fig. 5.20 Relationship between compressive strength and Sludge contents

**Table 5.11 Classified of Compressive strength**

Compressive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Type	Mix Proportion Ratio(%)					
		Sludge	Cement	Fly-ash	Soil 1	Soil 2	Sand
20이하	III-2	40	8	32		20	
	III-3	36	6	18		40	
	IV-5	18	2				80
20~100	I-6	90	10				
	II-3	42	18	40			
	II-4	32	8	60			
	III-1	50	10	40			
	IV-4	32	8	60			
101~200	I-3	80	20				
	I-4	83	17				
	I-5	87	13				
	II-2	48	32	20			
	IV-2	48	32				20
	IV-3	42	18				40
201이상	I-1	0	100				
	I-2	50	50				
	II-1	50	50				
	IV-1	50	50				

Table 5.12 The shape/surface in Cement contents by scanning electron micrograph(10,000)

구 분	SEM	비 고
Type I -4		<p>석분(83%)과 시멘트(17%) 비율로 배합된 시료의 7일 수중양생 후 강도(50.57kgf/cm<sup>2</sup>)상태의 SEM 촬영도</p>
Type II -3		<p>석분(42%)와 Fly-ash(40%) 시멘트 (18%) 비율로 배합된 시료의 7일 수중양생 후 강도(43.5kgf/cm<sup>2</sup>)상태의 SEM 촬영도</p>
Type IV -3		<p>석분(42%)와 모래(40%) 시멘트(18%) 비율로 배합된 시료의 7일 수중양생 후 강도(134kgf/cm<sup>2</sup>) 상태의 SEM 촬영도</p>

## 2. 투수시험

### 2.1 Type I (석분슬러지+시멘트+혼화제)

현무암 석분에 대하여 다짐시험 결과에 의하여 투수시험공시체를 성형하여 투수시험을 한 결과 다짐 석분의 투수계수는  $4.670E-06\text{cm/sec}$ 로 나타났다. Type I 혼합비 투수시험결과는 Table 5.13에 나타내었다. 각각의 배합비에 따른 투수계수는 시멘트 함유율이 증가 할수록 즉 석분슬러지의 함량이 감소될수록 양생일수가 증가할수록 감소되는 것으로 나타났다.

Type I의 경우 폐기물 관리법상 투수기준  $1 \times 10^{-7}\text{cm/sec}$ 이하를 만족하는 배합비는 시멘트의 함량이 17%부터 28일 양생 시험체에서 만족하는 것으로 나타났다. 시멘트 함량이 13%와 10%는 기준을 만족하지 않으나 기준치에 접근하는 것으로 나타난다.

시멘트 함량이 17%이상인 경우 28일 양생 시험체만 투수기준을 만족하고 7일과 14일 양생 시험체는 만족하지 않고 시멘트 함량이 20%인 경우 14일 양생과 28일 양생 시험체만 투수기준을 만족하고 7일 양생 시험체는 투수기준을 만족하지 않는 것으로 나타났다.

시멘트 함량이 17%시험체로부터 시멘트의 함유율에 관계없이 28일 양생 시험체의 투수계수가 폐기물관리법의 매립지 품질기준을 만족하는 것으로 나타나 석분슬러지와 시멘트, 혼화제를 혼합한 시료는 차수재로 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

차수재에 있어서 가장 중요한 것은 차수특성이다. Fig. 5.21에서 보는 바 같이 투수계수는 첨가된 시멘트 함량의 증가에 따라 점차적으로 감소하였다. 모든 배합비의 공시체는 양생시간의 경과에 따라 투수계수가 지속적으로 감소하였다.(Fig. 5.22참조)

이는 현무암 석분과 시멘트가 작용하여 형성된 칼슘실리케이트 침전물이 혼합시료의 공극을 메우게 되어 이루어지는 현상에 기인 한 것으로 판단된다. 시간의 경과에 따라 투수계수가 감소하는 것은 수중 양생하는 동안 시간의 경과에 따라 포졸란 반응이 진행되는 것으로 사료된다.

공시체 제작과정에서 몰드의 해체 및 천공과정에서 시험체에 대한 진동으로 시

시험체에 미세한 균열이 갈수 있다. 이로 인하여 투수계수 측정에 일정한 오차가 있을 것으로 사료된다.

Fig. 5.21은 투수계수와 시멘트 함유율 사이의 관계를 나타내었다. 그림에서 나타낸 것처럼 시멘트의 함량이 증가 할수록 투수계수는 감소하는 경향을 나타내었으며 시멘트의 함량이 50%이하인 경우 투수계수 변동 폭이 매우 큰 것으로 나타났다. 시멘트 함량이 50%를 넘으면 투수계수는 작은 변화폭으로 감소하는 경향을 나타내고 있다.

양생 시간의 경과에 따라 각각의 배합비 별 7일부터 14일 양생기간의 시험체 투수계수는 급속히 감소하는 것으로 나타나고 있지만 그 이후부터는 시간이 경과할수록 투수계수의 감소가 매우 둔화되고 있다 (Fig. 5.22).

**Table 5.13 Coefficient of permeability of specimen Type I**

Specimen			Curing time		
			7 days (cm/sec)	14 days (cm/sec)	28 days (cm/sec)
Type	Sludge	Cement			
I -1	0%	100%	1.638E-08	1.180E-08	7.323E-09
I -2	50%	50%	5.294E-08	2.225E-08	1.110E-08
I -3	80%	20%	4.328E-06	9.481E-08	8.942E-08
I -4	83%	17%	6.271E-06	1.738E-07	9.836E-08
I -5	87%	13%	8.693E-06	2.438E-07	1.925E-07
I -6	90%	10%	1.493E-05	9.342E-07	8.38E-07
I -7	100%	0%	4.670E-06		

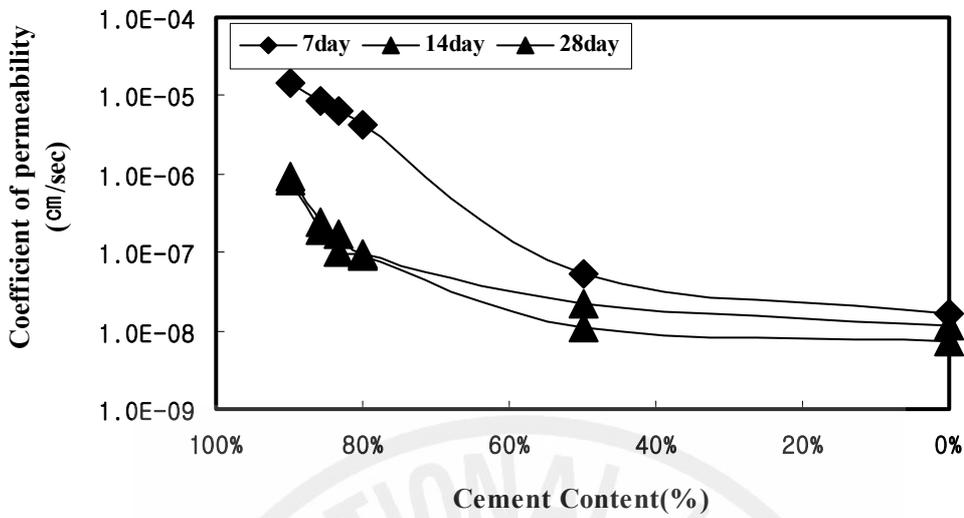


Fig. 5.21 Relationship between coefficient of permeability and Cement Content

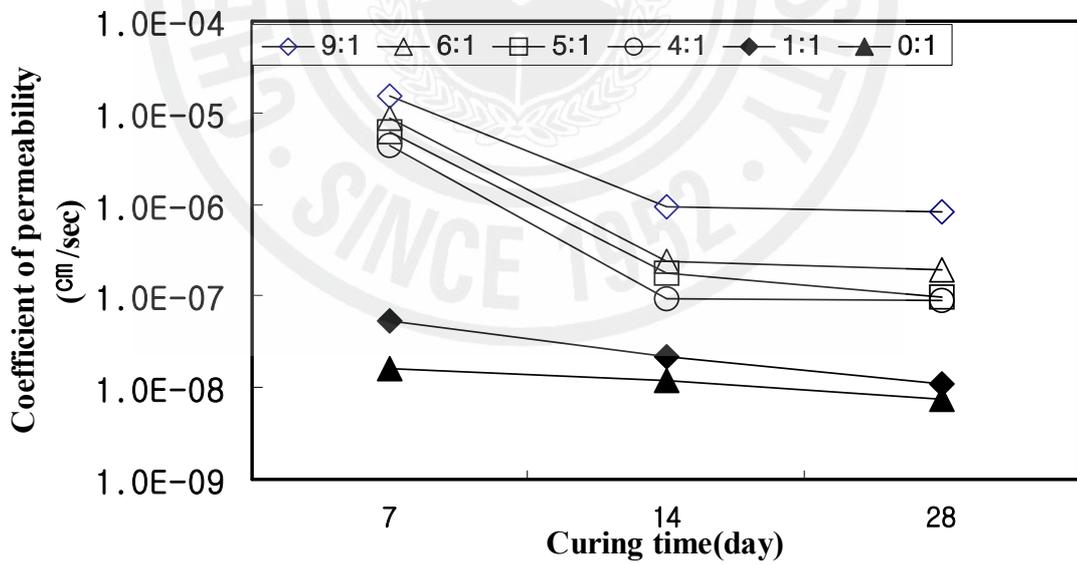


Fig. 5.22 Relationship between coefficient of permeability and Curing time

## 2.2 Type II (석분슬러지+Fly-ash+시멘트)

Type II의 경우 투수시험결과는 Table. 5.14에 나타내었다. 각각의 배합비에 따른 투수계수는 시멘트 함유율이 증가 할수록, 석분슬러지와 Fly-ash의 함량이 감소될수록, 양생일수가 증가할수록 감소되는 것으로 나타났다.

Type II의 경우 폐기물 관리법상 투수기준  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하를 만족하는 배합비는 시멘트의 함량이 50%이상 배합되었을 만족하는 것으로 나타났다. 석분슬러지가 50% 미만과 Fly-ash가 첨가되는 경우에는 폐기물 관리법상의 투수기준을 만족하지 않는 것으로 나타났다.

Fly-ash가 배합되는 경우 폐기물 관리법에 적용되는 기준 외에 일반적인 차수 재료로서 40%이하 사용시에는 가능한 것으로 검토되었다.

**Table 5.14 Coefficient of permeability of specimen Type II**

Curing time (day)				7 days	14 days	28 days
				(cm/sec)	(cm/sec)	(cm/sec)
Specimen						
Type	Sludge	Cement	Fly-ash			
II-1	50%	50%	0%	9.84E-09	1.17E-08	1.36E-08
II-2	48%	32%	20%	3.01E-06	1.95E-06	8.94E-07
II-3	42%	18%	40%	6.45E-05	3.88E-05	1.31E-05
II-4	32%	8%	60%	1.99E-04	1.35E-04	7.04E-05
II-5	18%	2%	80%	7.88E-04	5.05E-04	2.21E-04

### 2.3 Type III (석분슬러지+시멘트+Fly-ash+현장토사2)

Type III의 경우 투수시험결과는 Table 5.15에 나타내었다. Table 5.15에서 보는 바와 같이 현장에서 유용되는 토사가 배합되는 경우에는 폐기물 관리법상 투수 기준  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하를 만족하는 경우는 없었다.

현장 유용토사가 배합됨으로서 시험을 위한 시료의 양생중에 파괴되거나 시험 중에 가해지는 압력에 의해 실험 중 파괴되는 경우가 발생하였다. 이는 현장유용 토사는 배합체의 경화작용에는 효과가 없는 것으로 검토되었다.

**Table 5.15 Coefficient of permeability of specimen Type III**

Specimen					Curing time		
					7 days (cm/sec)	14 days (cm/sec)	28 days (cm/sec)
Type	Sludge	Cement	Fly ash	Soil 2			
III-1	50%	10%	40%	0%	1.95E-04	1.06E-04	1.78E-05
III-2	40%	8%	32%	20%	3.35E-05	실험중 파괴	실험중 파괴
III-3	36%	6%	18%	40%	양생중 파괴	양생중 파괴	양생중 파괴
III-4	28%	4%	8%	60%	양생중 파괴	양생중 파괴	양생중 파괴
III-5	16%	2%	2%	80%	양생중 파괴	양생중 파괴	양생중 파괴

#### 2.4 Type IV(석분슬러지+시멘트+모래)

Type IV의 경우 투수시험결과는 Table. 5.16에 나타내었다. 각각의 배합비에 따른 투수계수는 석분슬러지와 시멘트 함유율이 증가 할수록 모래의 함량이 감소 될수록 낮아졌으며, 양생일수와는 거의 무관하였다.

Type IV의 경우 폐기물 관리법상 투수기준  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하를 만족하는 배합비는 우선 시멘트 함량이 18%이상인 경우가 만족하였으며, 이때 사용되는 석분슬러지는 42%이상, 모래는 40%이하가 배합되었을 때 만족하는 것으로 나타났다.

시멘트의 함량이 18% 이하인 경우에는 석분슬러지는 배합량이 적어지고 모래는 배합량이 많아져도 폐기물 관리법상의 투수기준은 만족하지 않더라도 일반적인 차수재료로서 사용 가능한 것으로 검토되었다.

**Table 5.16 Coefficient of permeability of specimen Type IV**

Specimen				Curing time		
				7 days (cm/sec)	28 days (cm/sec)	28 days (cm/sec)
Type	Sludge	Cement	Sand			
IV-1	50%	50%	0%	9.84E-09	1.17E-08	1.36E-08
IV-2	48%	32%	20%	2.52E-08	3.82E-08	5.11E-08
IV-3	42%	18%	40%	8.39E-08	9.18E-08	9.96E-08
IV-4	32%	8%	60%	6.05E-06	7.31E-06	8.56E-06
IV-5	18%	2%	80%	실험중 파괴	실험중 파괴	실험중 파괴

## 2.5 Type V (석분슬러지+현장토사1)

Table 5.13은 석분슬러지와 현장토사 1-1 시료의 No.4체 통과 시료 및 혼합제의 배합설계에서의 혼합시료의 A다짐시험 결과를 나타내었다. Table 5.17은 현장토사 1-2 시료의 No.4체 통과 시료 및 혼합제의 배합설계에서의 혼합시료의 A다짐시험 결과를 나타내었다.

혼화제는 현무암 석분슬러지를 1%로 고정하여 투수시험 시험체를 배합설계 다짐 시험결과에 의하여 성형하여 실행하였다. 다짐시험 결과 석분슬러지의 함량이 많아질수록 최대건조밀도가 상승하는 경향을 나타내고 최적함수비는 작아지는 경향을 나타내고 있다. 이것은 혼합시료의 석분슬러지 함량 증가에 인한 것으로 사료된다.

Table 5.18와 Table 5.20은 다짐 시험결과에 의하여 배합비 별 성형한 1-1, 1-2 현장토사로 혼합한 시료의 투수계수와 시험 후 간극비를 나타내고 있다.

**Table 5.17 Compaction test result of Powdered basalt and soil sample 1-1**

Specimen			Maximum wet unit weight(g/cm <sup>3</sup> ) No.4	Maximum dry unit weight(g/cm <sup>3</sup> ) No.4	optimum moisture content(%) No.4
Type	Sludge	Soil			
V-1-1	0%	100%	1.969	1.487	24.50
V-1-2	10%	90%	2.060	1.525	26.00
V-1-3	20%	80%	2.031	1.542	24.10
V-1-4	40%	60%	2.037	1.593	21.80
V-1-5	60%	40%	2.046	1.615	21.10
V-1-6	80%	20%	2.039	1.642	19.50
V-1-7	100%	0%	2.001	1.66	21.8

**Table 5.18 Coefficient of permeability of Powdered basalt and soil Specimen 1-1**

Specimen			No.4 K (cm/sec)	void ratio e
Type	Sludge	Soil		
V-1-1	0%	100%	1.56E-05	0.748
V-1-2	10%	90%	2.35E-06	0.726
V-1-3	20%	80%	1.51E-06	0.725
V-1-4	40%	60%	9.89E-07	0.729
V-1-5	60%	40%	1.62E-06	0.741
V-1-6	80%	20%	1.98E-06	0.765
V-1-7	100%	0%	4.67E-06	0.747

**Table 5.19 Compaction test result of Powdered basalt and soil sample 1-2**

Specimen			Maximum wet unit weight(g/cm <sup>3</sup> ) No.4	Maximum dry unit weight(g/cm <sup>3</sup> ) No.4	optimum moisture content(%) No.4
Type	Sludge	Soil			
V-2-1	0%	100%	1.874	1.49	25.8
V-2-2	10%	90%	1.943	1.53	27.0
V-2-3	20%	80%	1.938	1.55	25.0
V-2-4	40%	60%	1.957	1.59	23.5
V-2-5	60%	40%	1.952	1.60	22.0
V-2-6	80%	20%	1.999	1.65	21.2
V-2-7	100%	0%	2.001	1.66	21.8

Table 5.20 Coefficient of permeability of Powdered basalt and soil Specimen 1-2

Specimen			No.4 K (cm/sec)	void ratio e
Type	Sludge	Soil		
V-2-1	0%	100%	1.010E-05	0.836
V-2-2	10%	90%	2.132E-06	0.845
V-2-3	20%	80%	1.087E-06	0.825
V-2-4	40%	60%	2.345E-07	0.779
V-2-5	60%	40%	1.861E-07	0.788
V-2-6	80%	20%	2.058E-06	0.875
V-2-7	100%	0%	4.670E-06	0.747

Fig. 5.23과 Fig. 5.24는 각 배합비에 따른 투수계수를 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 투수계수는 석분슬러지의 함량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이다가 석분슬러지의 함량이 60%정도로 증가하면 투수계수가 최소치를 나타내고 있다.

그러나 석분슬러지 함량이 그 이상으로 증가하면 투수계수가 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 Table 5.19, Table 5.21에 나타낸 바와 같이 각 배합비에 따른 간극비가 감소할수록 투수계수도 이에 비례하여 감소하는 것으로 해석할 수 있다.

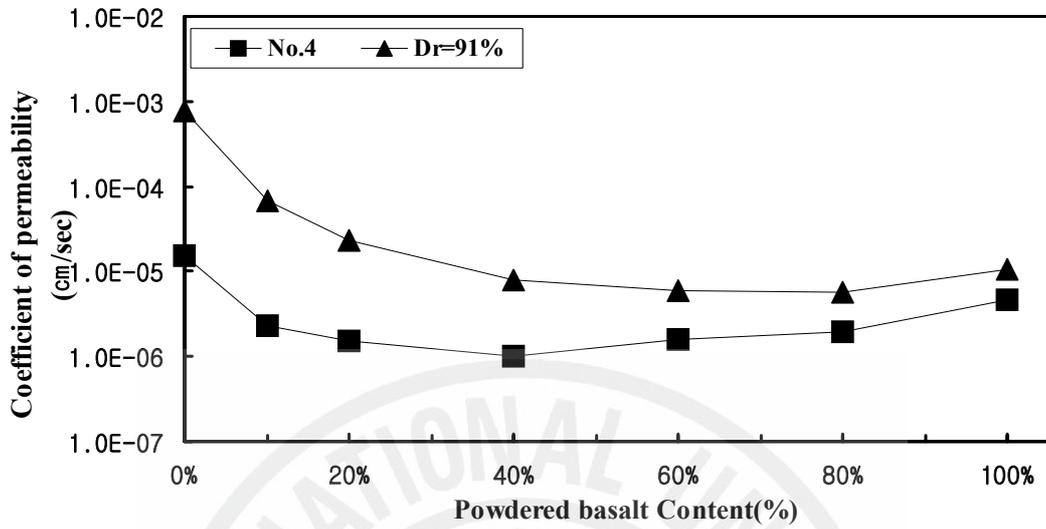


Fig. 5.23 Relationship between coefficient of permeability and Powdered basalt Content of Soil 1-1

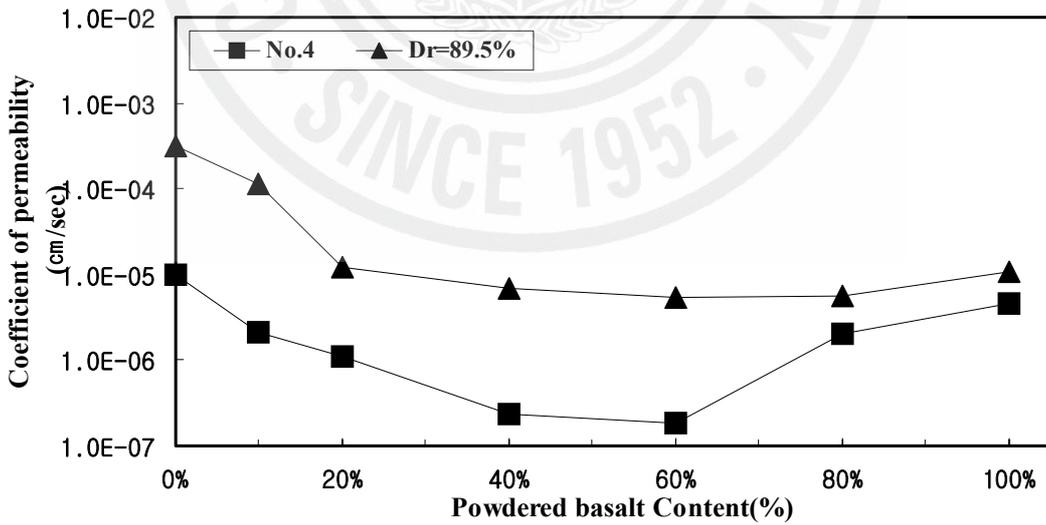


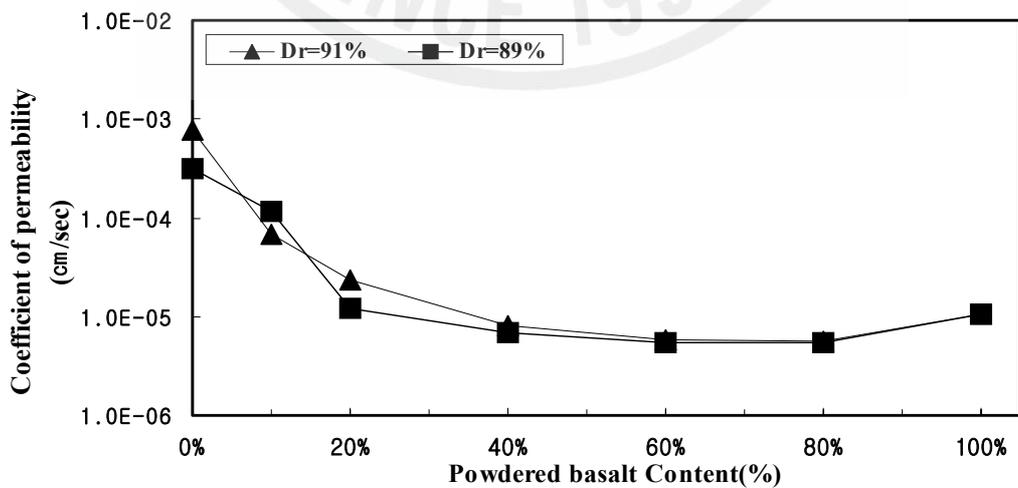
Fig. 5.24 Relationship between coefficient of permeability and Powdered basalt Content of Soil 1-2

Table 5.21은 현장 들밀도 결과에 의하여 1-1는 상대밀도 91%, 1-2는 상대밀도 89%에 의하여 시험체를 성형하여 투수시험을 한 결과이다.

투수계수는 간극비에 정비례하여 Fig. 5.25에서 나타낸 바와 같이 석분슬러지의 함량이 증가함에 따라 투수계수는 간극비에 비례하여 감소하다 증가하는 경향을 보이고 있다.

**Table 5.21 Coefficient of permeability of Powdered basalt and soil Specimen**

Specimen			relative density Dr 91% (1-1)		relative density Dr 89% (1-2)	
Type	Sludge	Soil	K(cm/sec)	void ratio e	K(cm/sec)	void ratio e
V-1	0%	100%	7.840E-04	0.868	3.140E-04	1.353
V-2	10%	90%	6.755E-05	0.795	1.162E-04	0.777
V-3	20%	80%	2.321E-05	0.788	1.212E-05	0.756
V-4	40%	60%	8.013E-06	0.785	6.842E-06	0.741
V-5	60%	40%	5.850E-06	0.767	5.439E-06	0.731
V-6	80%	20%	5.705E-06	0.835	5.520E-06	0.757
V-7	100%	0%	1.072E-05	0.845	1.072E-05	0.845



**Fig. 5.25 Relationship between coefficient of permeability and Powdered basalt Content (field density)**

## 2.6 비교분석

시멘트 비율에 따른 석분슬러지, Fly-ash, 토사, 모래 등의 혼합체의 수중양생의 재령별 투수계수를 비교한 결과 다음의 표와 같다. 표에서 보는 바와 같이 28일 양생을 기준으로 보면 시멘트 비율이 50%경우 투수계수가 가장 낮게 나타났으며, 모래, 석분슬러지, Fly-ash순으로 투수계수가 낮게 나타남을 알 수 있었다.

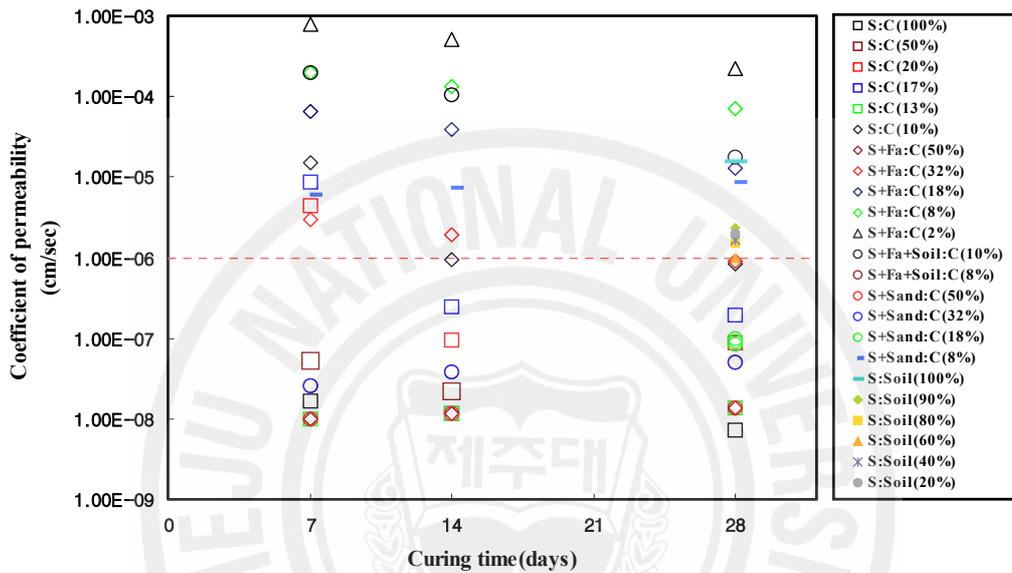


Fig. 5.26 Relationship between Coefficient of permeability and Curing time

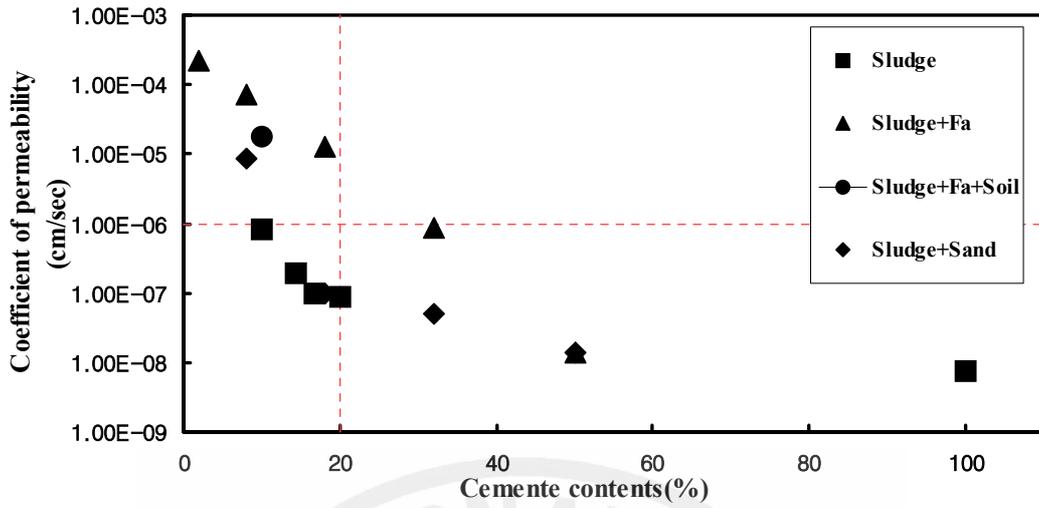


Fig. 5.27 Relationship between Coefficient of permeability and Cement contents

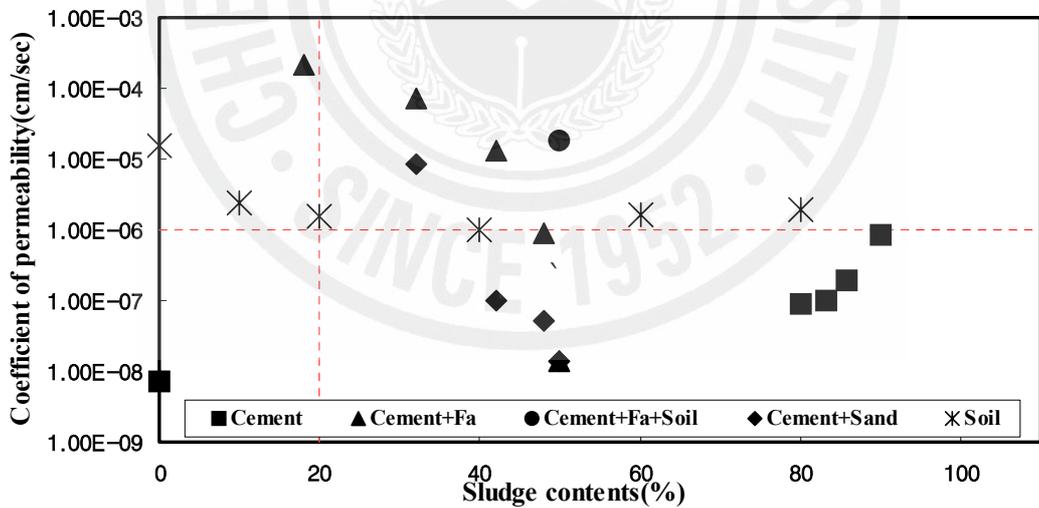


Fig. 5.28 Relationship between Coefficient of permeability and Sludge contents

**Table 5.22 Classified of Coefficient of permeability**

Coefficient of Permeability (cm/sec)	Type	Mix Proportion Ratio(%)					
		Sludge	Cement	Fly-ash	Soil 1	Soil 2	Sand
$1 \times 10^{-6}$ 이하	I-1	0	100				
	I-2	50	50				
	I-3	80	20				
	I-4	83	17				
	II-1	50	50				
	IV-1	50	50				
	IV-2	48	32				20
	IV-3	42	18				40
$1 \times 10^{-5}$ ~ $1 \times 10^{-6}$	I-5	87	13				
	I-6	90	10				
	II-2	48	32	20			
	V-4-1	40			60		
$1 \times 10^{-4}$ ~ $1 \times 10^{-5}$	IV-4	32	8				60
	V-2-1	10			90		
	V-3-1	20			80		
	V-5-1	60			40		
	V-6-1	80			20		
$1 \times 10^{-4}$ 이상	II-3	42	18	40			
	II-4	32	8	60			
	II-5	18	2	80			
	III-3	36	6	18		40	
	V-1-1				100		

### 3. 동결융해

#### 3.1 압축강도시험

각 배합비별 압축강도를 조사하기 위하여 공시체를 제작 후 수중양생 공시체에 대하여 양생일수 7일, 14일, 28일의 동결융해 후 압축강도를 측정하였다. Table 5.23은 동결융해 후 압축강도 시험 결과 값이다.

**Table 5.23 Freezing and thawing after Compressive strength**

Specimen	Curing time (day)	7	14	28
		(kgf/cm <sup>2</sup> )	(kgf/cm <sup>2</sup> )	(kgf/cm <sup>2</sup> )
0% (0:1)		273.5	341.7	450.3
50% (1:1)		160.9	232.2	344.9
66% (2:1)		86.2	115.8	199.3
80% (4:1)		68.4	84.3	136.7
83% (5:1)		48.6	53.0	95.9

※ Cement Content (Powdered basalt : Cement)

시멘트의 함량이 많을수록 압축강도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 7일 양생한 것이 273~48kgf/cm<sup>2</sup>, 14일이 341~53kgf/cm<sup>2</sup>, 28일이 450~95kgf/cm<sup>2</sup> 정도로 나타나고 있다. Fig. 5.29과 Fig. 5.30는 현무암 석분슬러지와 시멘트, 혼화제의 배합비와 양생일에 따른 강도를 나타내고 있다.

Fig. 5.31~Fig. 5.33에서 볼 때, 동결융해 전·후의 양생일별 강도비교를 보면 시멘트 함량이 많을수록 동결융해에 영향이 적은 것을 볼 수 있다. 시멘트만 있을 경우 21%~23%정도 강도가 증가한다. 그러나 현무암 석분슬러지의 함유량이 많을수록 강도는 점차 줄어드는 것을 볼 수 있다. 현무암 석분슬러지의 함유량이 83%인 경우 강도는 -13~-31%정도 강도가 감소하였다.

Fig. 5.34~Fig. 5.37에서 시멘트 함유에 따른 일별로 나타낸 그림으로 동결융해 전 28일(수중양생) 동결융해후 37일(7일 수중양생과 동결융해 30일 200Cycle)에서 동결융해동안 습윤양생은 되나 동결융해전 28일 수중양생보다 일축압축강도는 작아지는 것을 볼 수 있고 석분슬러지의 함유량이 많을수록 동결융해에 대한 저항력이 떨어지는 것으로 나타나 있다.

이와 같이 시멘트 함량이 많을수록 동결융해 과정 중에도 강도가 증가함을 알 수 있으며 이는 수화반응 과정에서 발생하는  $Ca(OH)_2$ 가 동결융해 기간 동안 현무암 석분슬러지내에 존재하는 가용성  $SiO_2$  및  $Al_2O_3$ 와 수화반응을 일으켜 CSH 계열의 수화물이나 Ettringite와 같은 수화반응 생성물을 형성하기 때문이다.

즉 시멘트량이 현무암 석분슬러지에 비해 상대적으로 적은 경우에는 가용성  $Ca(OH)_2$ 가 부족하기 때문에 포졸란 반응(토양내의 Alumino Silicate 물질이 시멘트나 기타물질이  $Ca(OH)_2$ 와 작용하여 경화되는 반응)이 활발하지 못하여 장기적 강도의 증가가 어려운 것으로 검토되었다.

압축강도와 공극률 관계에서 보면 강도와 공극률 사이에는 반비례 관계가 있다. 이것으로 볼 때 석분슬러지의 함유량이 많을수록 동결융해 과정에서 온도가 하강하면 공시체 내에 있는 공극속의 물이 동결하게 되고 이것은 공시체를 팽창하게 만들며, 이후 융해를 하고 또다시 동결 되면 팽창이 더욱 증가하게 된다.

동결융해 현상이 반복됨에 따라 마치 콘크리트의 피로 파괴와 비슷하게 팽창현상이 더욱 증가 하게 되기 때문에 동결융해 현상이 진행되면서 강도가 감소한 것으로 검토되었다.

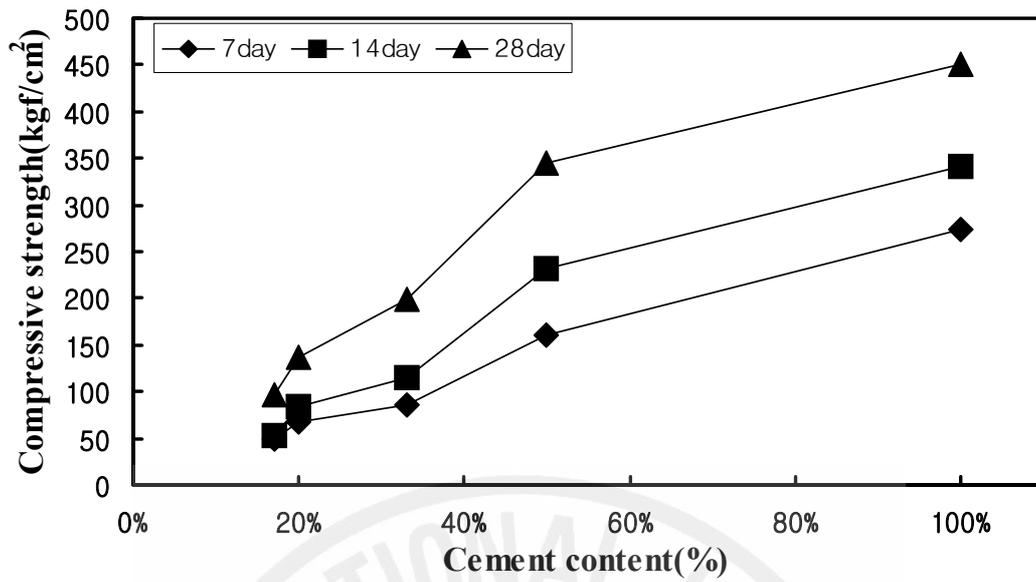


Fig. 5.29 The relation between compressive strength and Cement Content

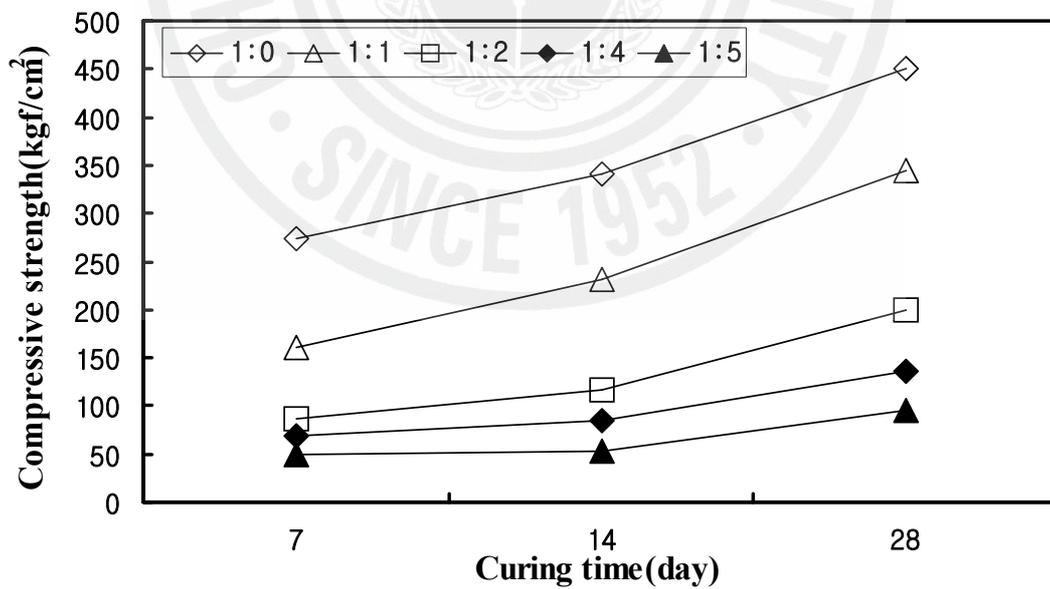


Fig. 5.30 The relation between compressive strength and Curing time

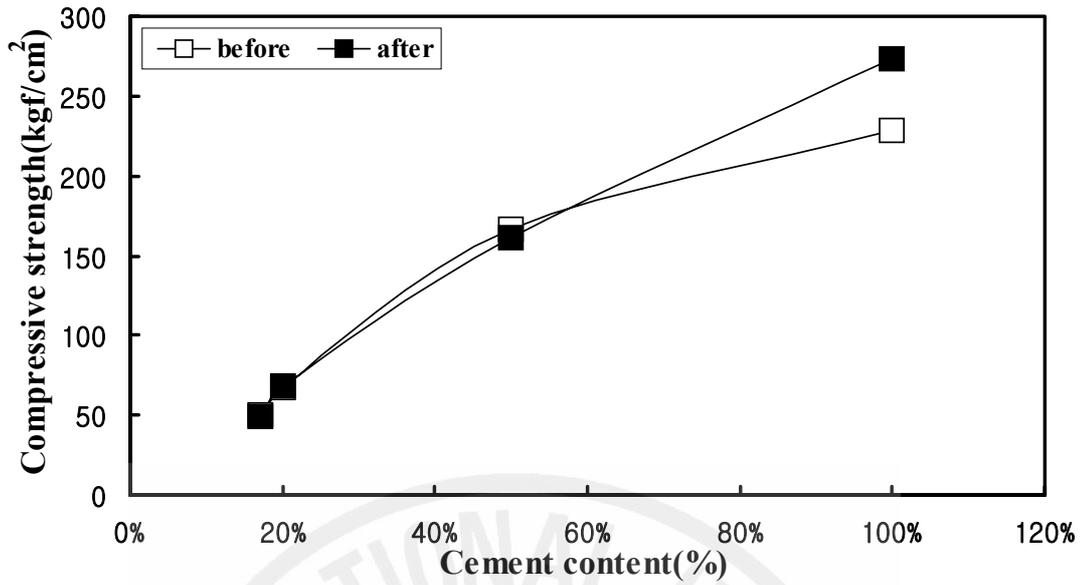


Fig. 5.31 Comparison of before and after strength in freezing and thawing( 7day curing)

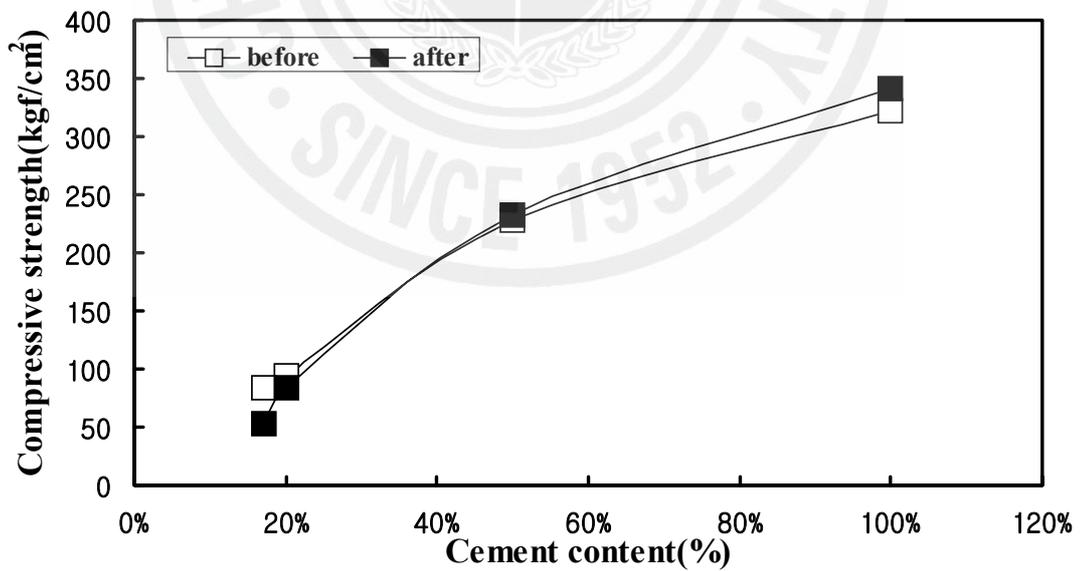


Fig. 5.32 Comparison of before and after strength in freezing and thawing(14day curing)

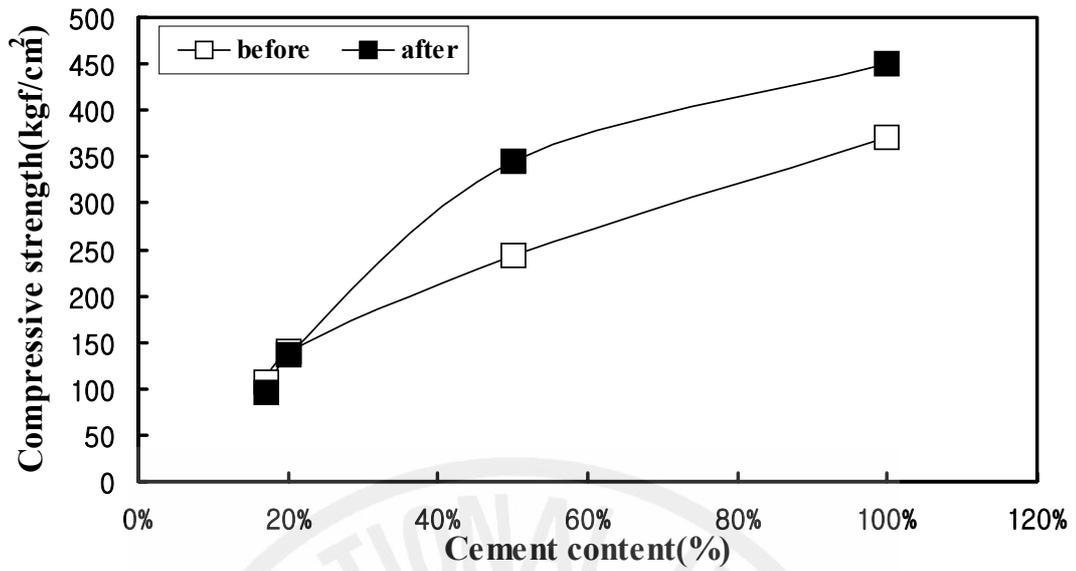


Fig. 5.33 Comparison of before and after strength in freezing and thawing( 28day curing)

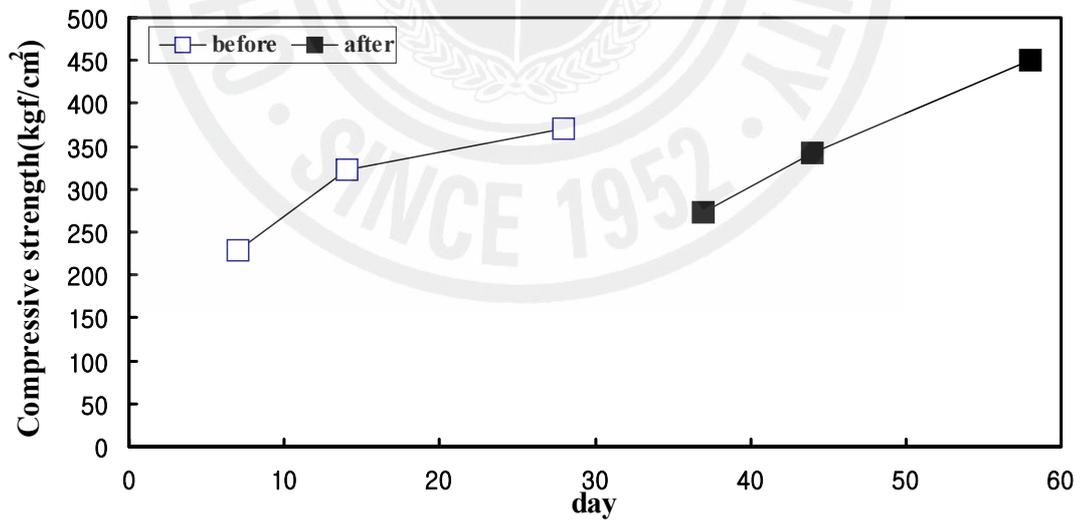


Fig. 5.34 strength Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 100% Content

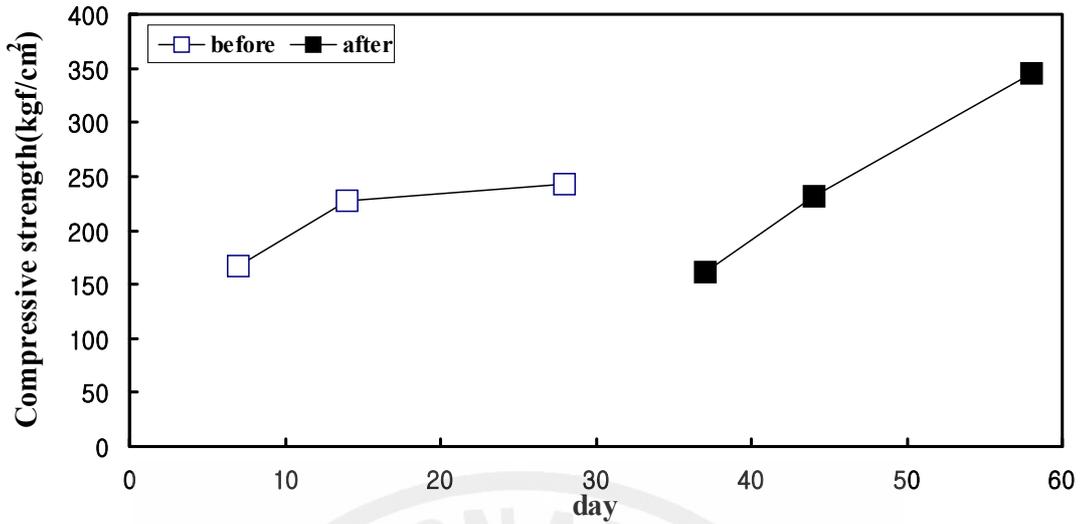


Fig. 5.35 strength Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 50% Content

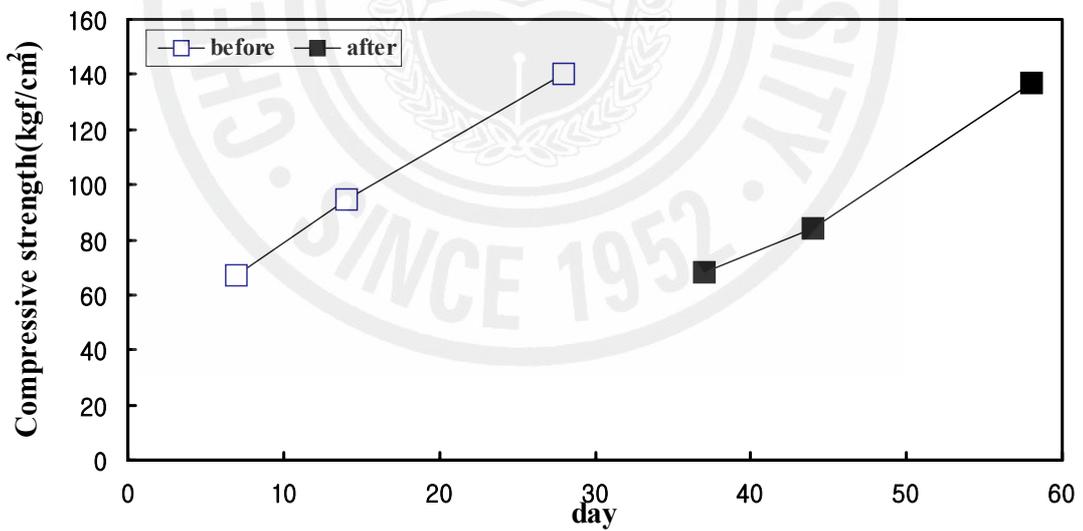


Fig. 5.36 strength Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 20% Content

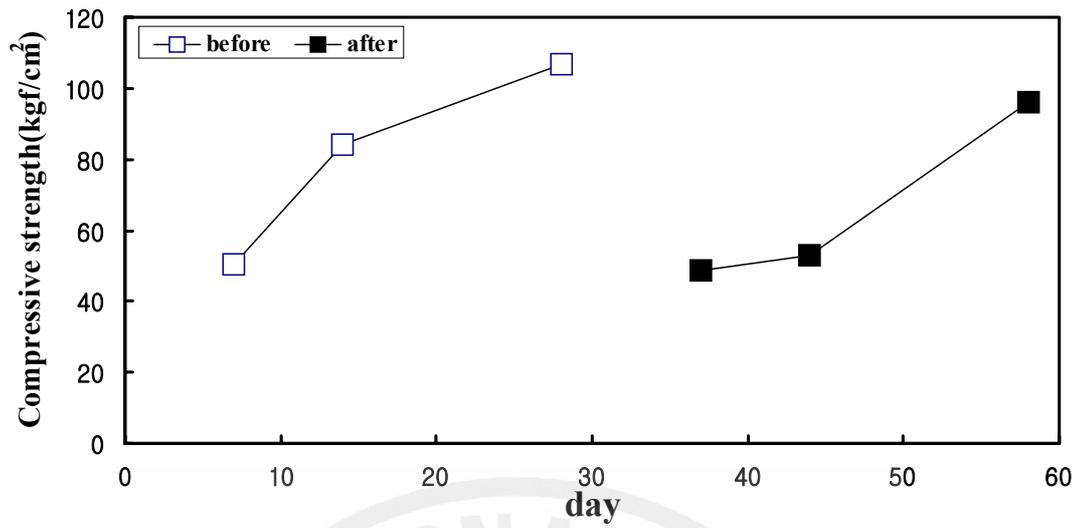
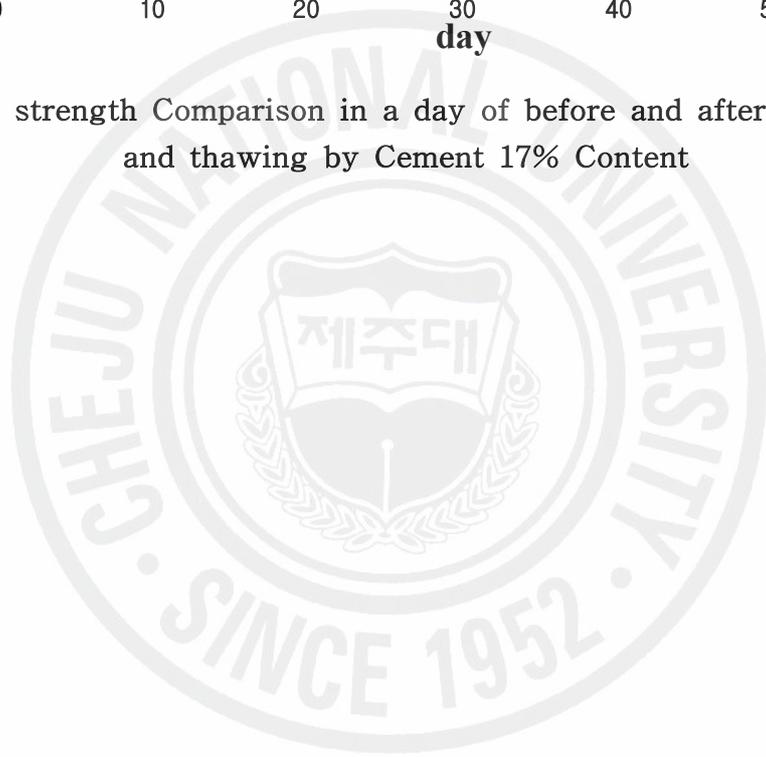


Fig. 5.37 strength Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 17% Content



### 3.2 투수시험

석분슬러지와 시멘트, 혼화제의 동결융해 후 투수시험결과는 Table 5.24에 나타나 있다. 시멘트량이 많을수록 투수계수 값은 낮은 것으로 나와 있다. Fig 5.38에서 동결융해 후 양생기간에 상관없이 일정하게 투수계수 값이 나오는 것을 볼 수 있다. Fig 5.39에 현무암 석분슬러지와 시멘트 혼합체의 투수계수는 석분슬러지의 함량이 많을수록 투수계수 값은 높아지는 것을 볼 수 있다.

**Table 5.24 Coefficient of permeability of specimen after Freezing and thawing**

Curing time (day)	7 days	14 days	28 days
	cm/sec	cm/sec	cm/sec
0% (0:1)	1.239E-08	1.105E-08	9.844E-09
50% (1:1)	8.942E-08	5.552E-08	4.944E-08
66% (2:1)	3.442E-07	9.409E-08	6.562E-08
80% (4:1)	3.908E-06	8.323E-07	6.705E-07
83% (5:1)	1.430E-05	8.957E-06	8.667E-06

※ Cement Content (Powdered basalt : Cement)

Fig. 5.40~Fig. 5.42에서 볼 때 시멘트만으로 만든 공시체의 경우 동결융해 후의 투수계수는 변함이 적다. 석분슬러지 함유량이 많아질수록 투수계수는 많이 높아지는 것을 볼 수 있다. 폐기물관리법상 투수기준은  $1 \times 10^{-7}$ 이하를 만족하는 배합비는 석분슬러지의 함유량이 80%이하인 경우 만족 하는 것으로 나타나 있다. 80%인 경우에도 7일 양생 공시체는 만족하지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 5.43~Fig. 5.46에서 시멘트 함유에 따른 일별로 나타낸 그림으로 동결융해 전 28일(수중양생) 동결융해 후 37일(7일 수중양생과 동결융해 30일 200Cycle)에서 동결융해 동안 습윤양생은 되나 동결융해 전 28일 수중양생보다 투수는 높아지는 것을 볼 수 있고 석분슬러지의 함유량이 많을수록 동결융해에 대한 저항력

이 떨어지는 것으로 나타나 있다.

이와 같이 동결융해 현상에 의해서 투수계수의 감소가 보이지 않고 증가하거나 동결융해 전과 비슷하게 나타나는 이유는 일반적으로 Cementing 성분을 가진 물질들이 수화반응에 의해 형성하는 Tobermorite 젤이나  $C_3A$  클링커가 석고와 반응하여 형성하는 Ettingite나 Monosulgate 등의 수화물들이 공시체 내부의 공극을 채우므로 해서 수분이 차지하던 공극을 감소시켜 공시체 자체의 팽창 또는 수분에 의한 팽창력에 저항력이 증가하는 것으로 검토되었다.

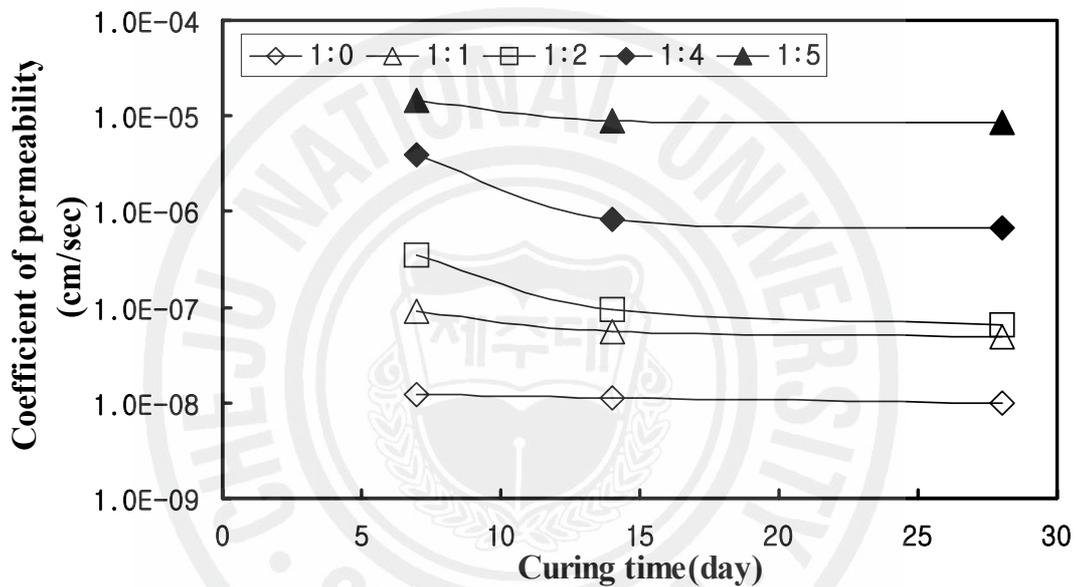


Fig 5.38 Relation of permeability coefficient and Curing time

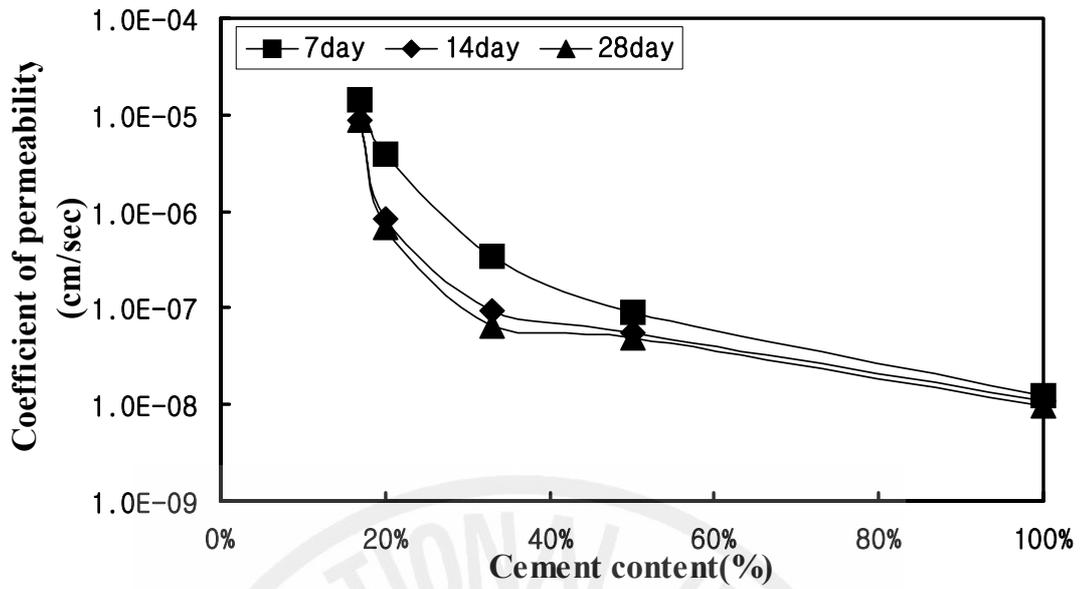


Fig. 5.39 Relation of permeability coefficient and Cement Content

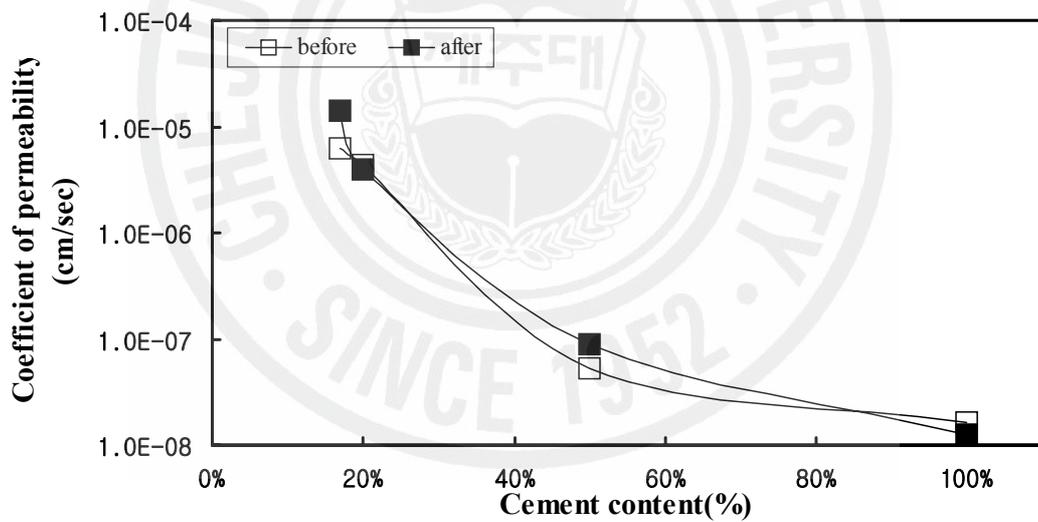


Fig. 5.40 Comparison of before and after permeability in freezing and thawing( 7day curing)

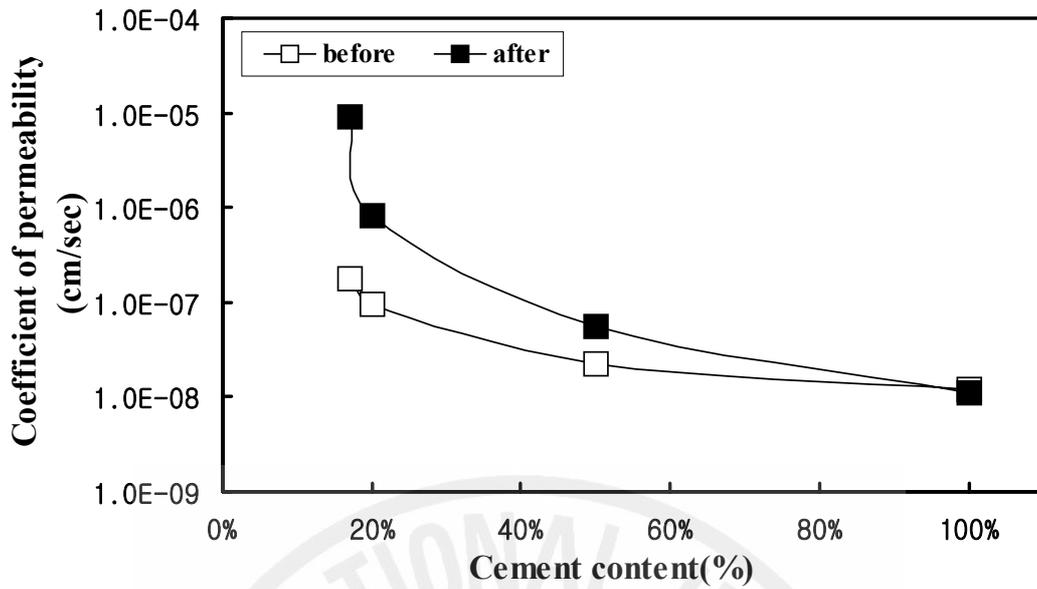


Fig. 5.41 Comparison of before and after permeability in freezing and thawing(14day curing)

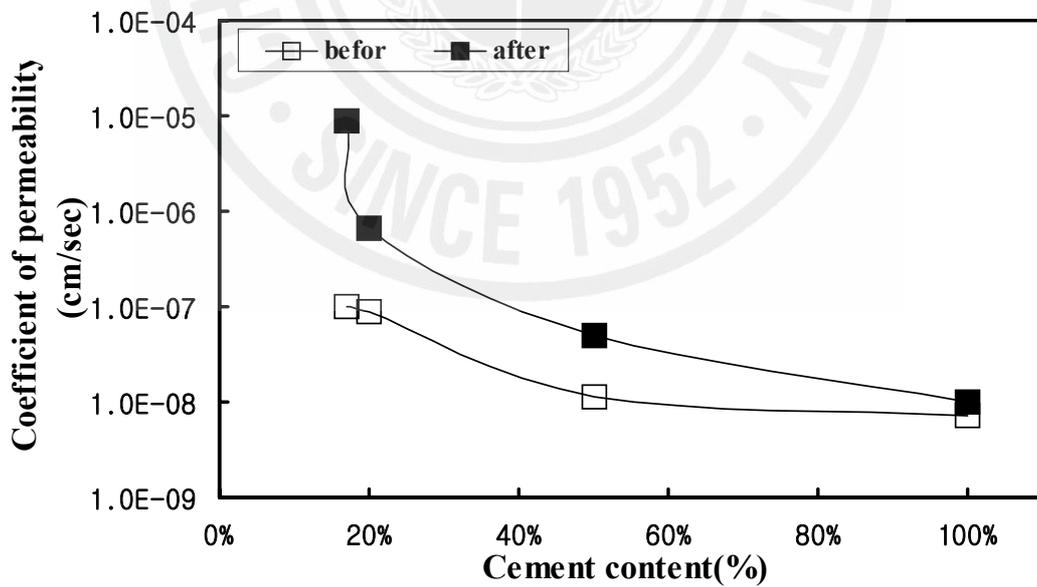


Fig. 5.42 Comparison of before and after permeability in freezing and thawing(28day curing)

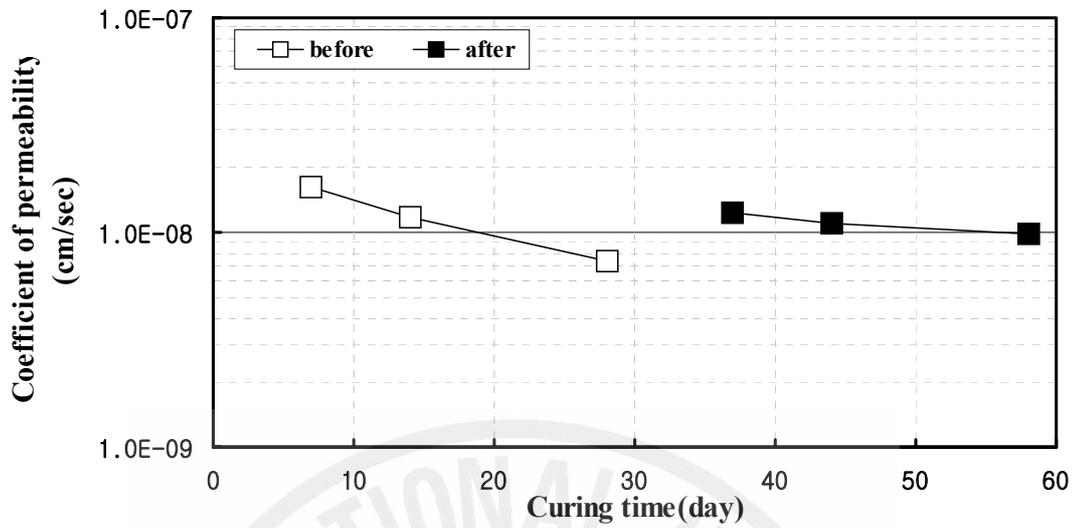


Fig. 5.43 Permeability Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 100% Content

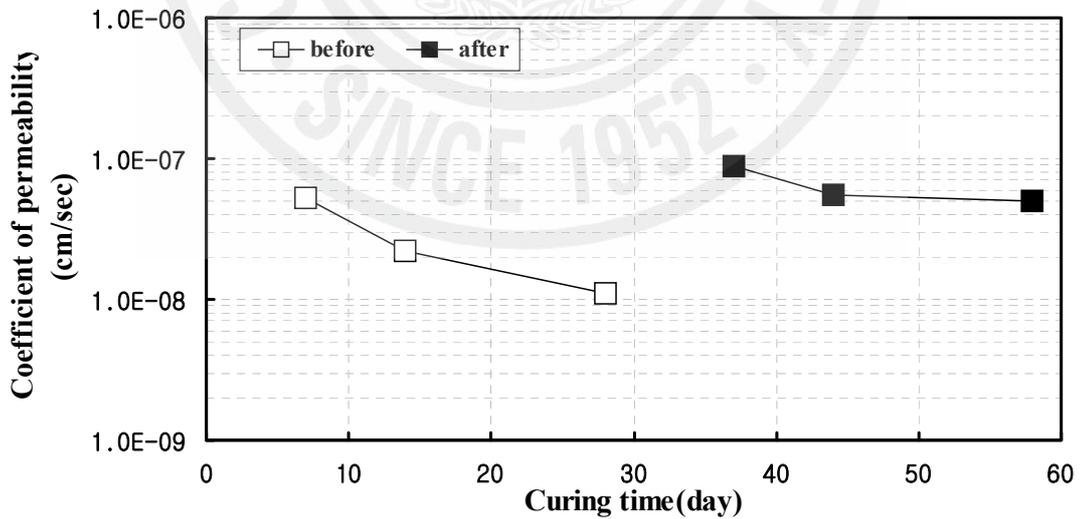


Fig. 5.44 Permeability Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 50% Content

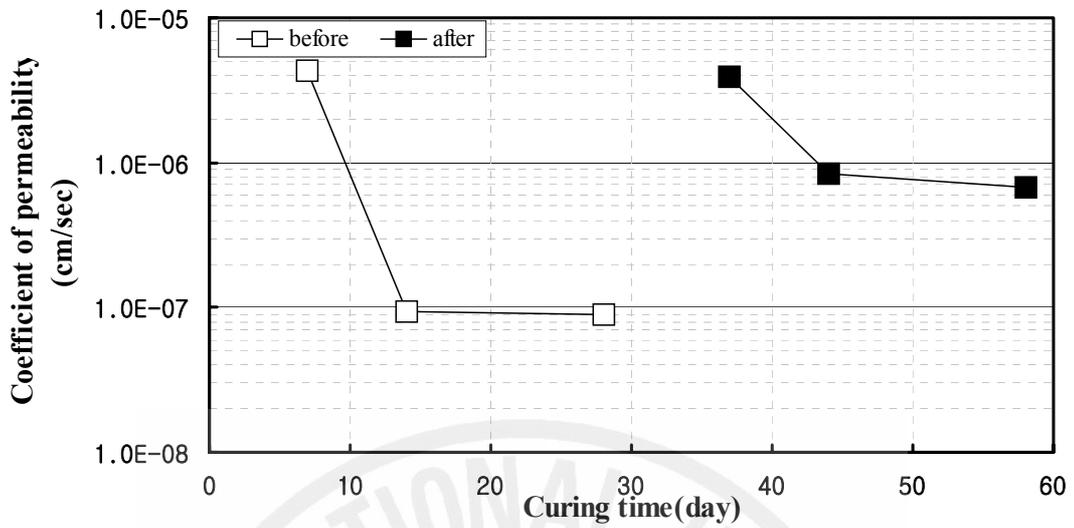


Fig. 5.45 Permeability Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 20% Content

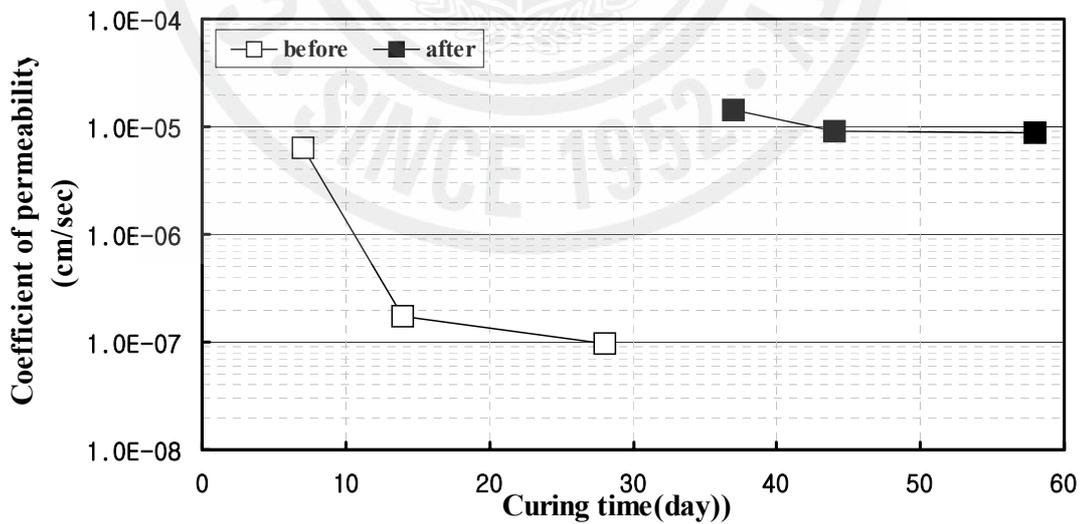


Fig. 5.46 Permeability Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 17% Content

### 3.3 중량변화

Table 5.25은 양생일별 수중양생 후의 공시체의 중량을 나타낸 것이다. 석분슬러지의 혼합량이 많을수록 공시체의 중량은 작아지는 것을 볼 수가 있다. 또한 재령일이 길어질수록 공시체의 중량이 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것을 공시체 내에 수분 함유량이 증가한 것으로 판단이 된다.

동결융해 중 양생일별 무게 감소율을 Fig. 5.47~Fig. 5.49에 나타나 있다. 7일 양생한 것과 14일, 28일 양생한 것의 중량 감소는 비슷하게 나타나고 있다. 시멘트의 경우 경화가 빠르게 일어나면서 공극에 수분함량이 적어 동결융해 중 수분의 증발 발생량이 적은 것으로 판단된다.

석분슬러지의 함유량이 높아지면서 공시체 안의 공극이 넓어 그 안의 수분양이 많은 것으로 판단된다. 석분슬러지의 함유량이 많을수록 경화가 늦어지는 것으로 판단된다.

**Table 5.25 Freezing and thawing before weight of Specimen**

Curing time (day)	7 days	14 days	28 days
	kgf	kgf	kgf
0% (0:1)	6,438	6,504	6,634
50% (1:1)	6,355	6,470	6,492
66% (2:1)	6,325	6,410	6,442
80% (4:1)	6,205	6,271	6,305
83% (5:1)	6,199	6,233	6,291

※ Cement Content (Powdered basalt : Cement)

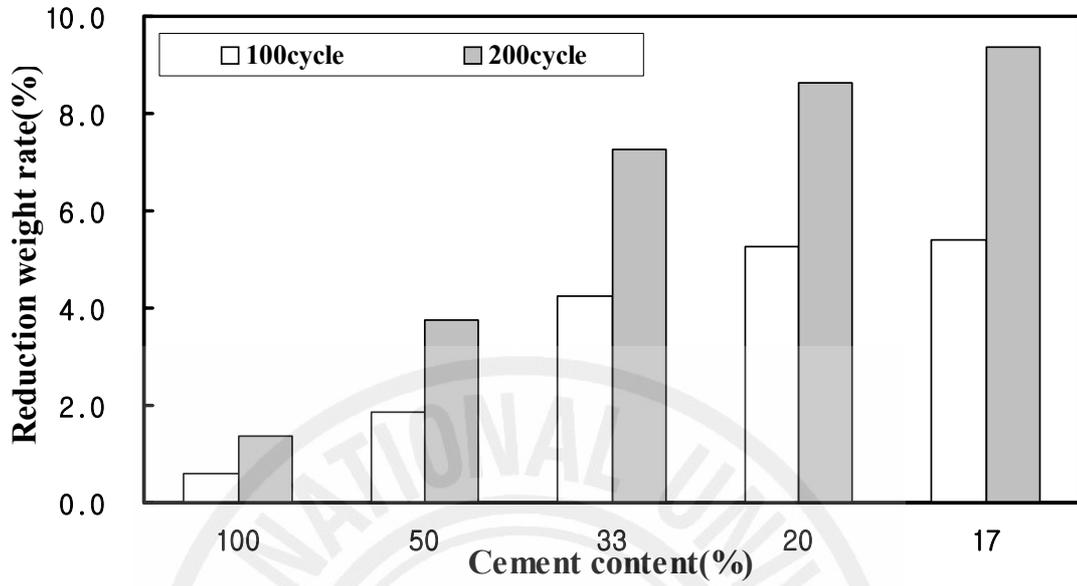


Fig. 5.47 Loss in weight rate (7day curing)

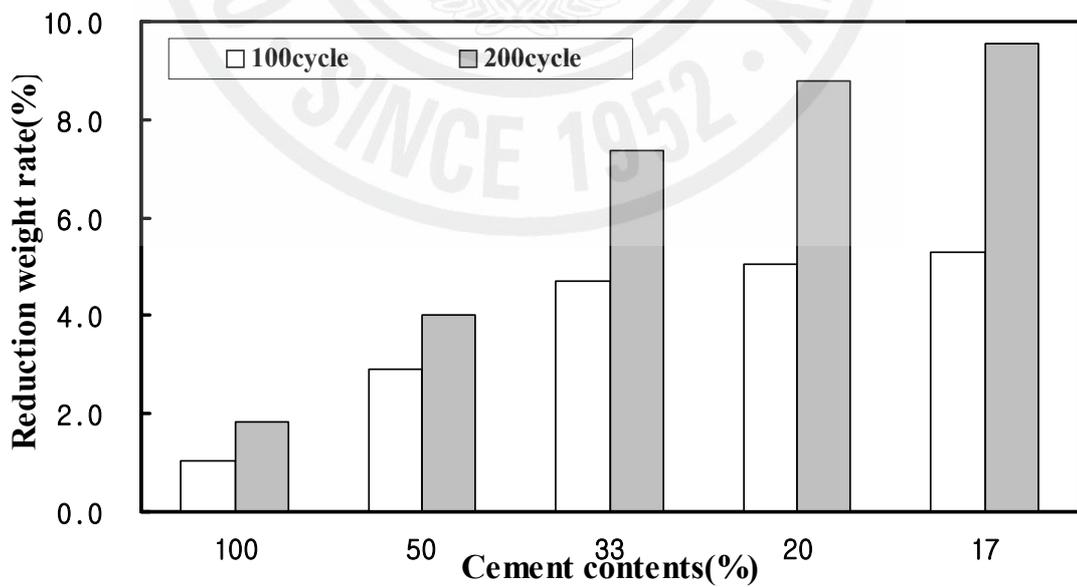


Fig. 5.48 Loss in weight rate (14day curing)

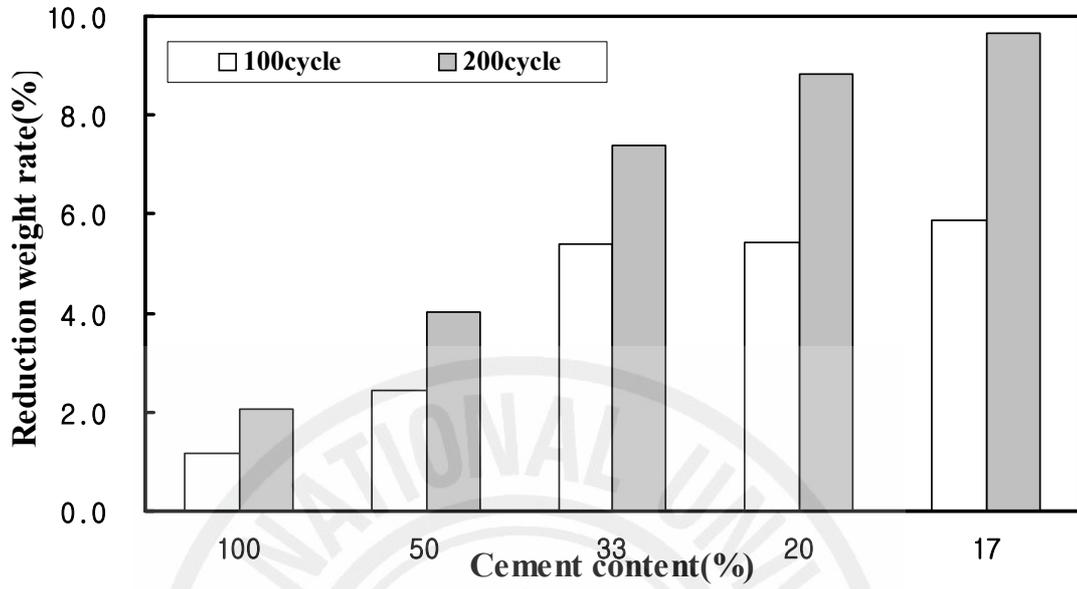


Fig. 5.49 Loss in weight rate (28day curing)

### 3.4 포졸란 반응 관찰

현무암 석분슬러지와 시멘트, 혼화제의 동결융해 후 포졸란 반응을 관찰하기 위해 혼합공시체를 성형하여 14일 양생한 후 동결융해 200Cycle을 한 후 각 배합 비별 입상을 장방출주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope)을 통해 관찰하였다. Fig. 5.50~Fig. 5.55는 시멘트 함량의 변화에 따른 입자의 형상을 나타낸 것이다.

그림에서 나타난 바와 같이 시멘트의 함량이 증가할수록 입자의 결합이 좋은 것을 볼 수 있으며, 석분슬러지 함량이 증가할수록 입자와 입자사이의 간격이 넓어지고 결합력이 떨어지는 것을 볼 수 있다.

동결융해 전 Fig. 5.50와 동결융해 후 입자의 형상을 비교해 볼 때 시멘트 함유량이 많을수록 더욱 견고해져 있는 것을 볼 수 있다.

포졸란 반응이 활발히 이루어지면 포졸란 반응 중 생성되는 Calcium Silica 및 Calcium Aluminate가 입자간의 결합을 더욱 견고하게 하고, 시험체 내의 공극을 메워주기 때문에 투수계수는 감소하고 압축강도는 증가하는 것으로 검토되어 진다.

시멘트함량의 증가에 따라 혼합시료의 변화가 선명히 나타나는 것은 시멘트가 수화반응 일으킬 때 생성되는  $Ca(OH)_2$  양의 제한을 받는 것으로 사료된다.

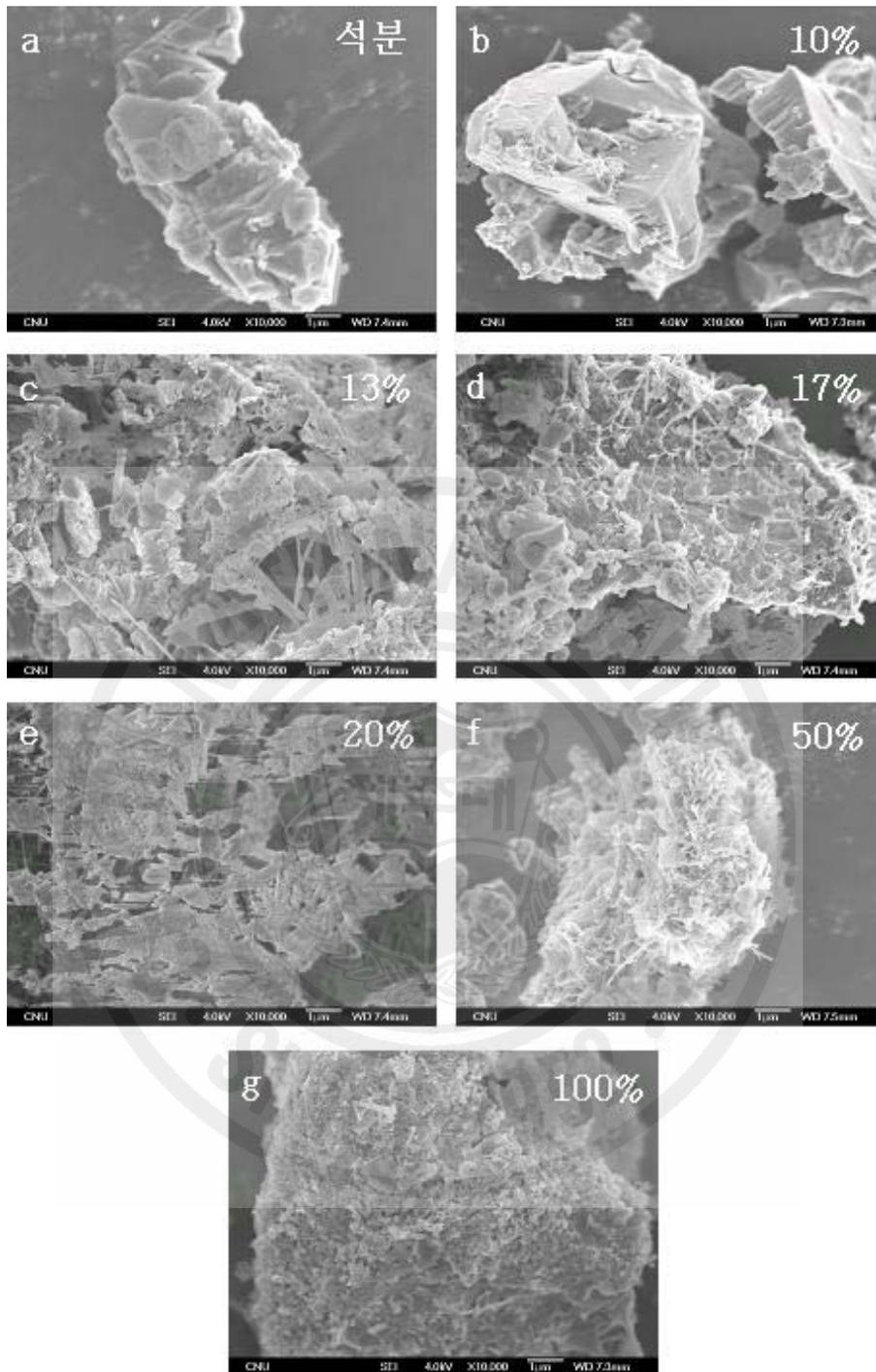


Fig. 5.50 The shape/surface in Cement 100% Content by scanning electron micrograph(1,000:10,000)

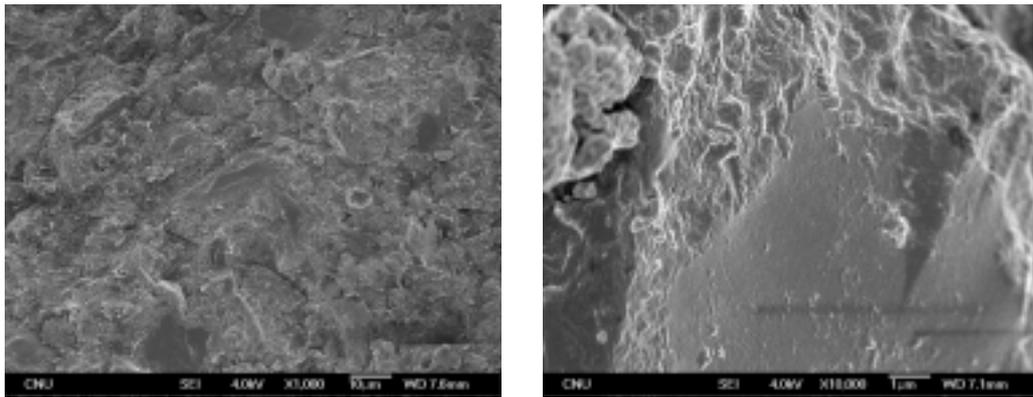


Fig. 5.51 The shape/surface in Cement 100% Content by scanning electron micrograph(1,000:10,000)

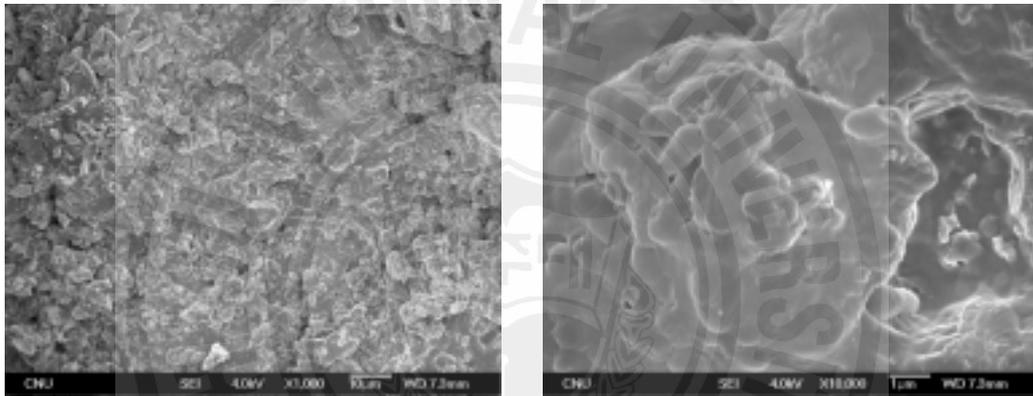


Fig. 5.52 The shape/surface in Cement 50% Content by scanning electron micrograph(1,000:10,000)

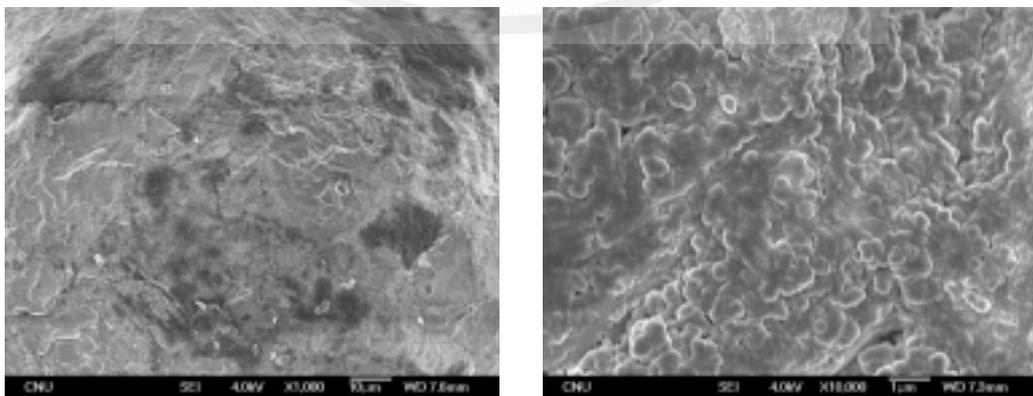
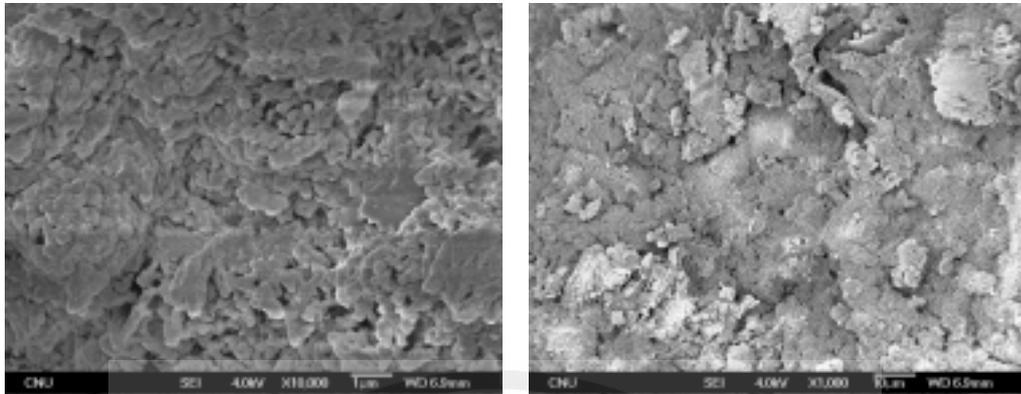
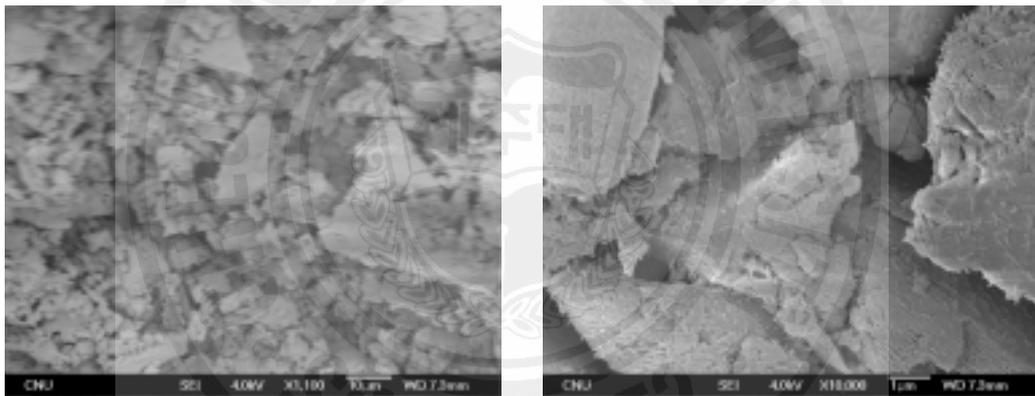


Fig. 5.53 The shape/surface in Cement 33% Content by scanning electron micrograph(1,000:10,000)



**Fig. 5.54** The shape/surface in Cement 20% Content by scanning electron micrograph(1,000:10,000)



**Fig. 5.55** The shape/surface in Cement 17% Content by scanning electron micrograph(1,000:10,000)

#### 4. 건조수축에 의한 균열 및 길이변화시험

##### 4.1 균열 시험

Fig. 5.56은 건조수축에 의한 균열을 나타낸 것이다. 시멘트의 함유량이 많을수록 균열의 수가 많아지는 것을 나타내고 있다. 시멘트의 함유량이 많을수록 많은 수화열이 발생하여 초기 강도는 좋아지나 수화열로 인한 콘크리트에 균열이 발생하게 된다. 7~18일 사이에 균열이 많이 발생하는 것을 나타내고 있다.

Fig. 5.57에서는 각 배합비별 공시체의 균열의 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 균열을 빨간색 선으로 나타내었는데, 왼쪽 그림에서 균열이 많은 것이 시멘트와 혼화제의 공시체이고 균열의 수가 적을수록 석분슬러지의 함유량이 많은 것이다.

오른쪽 그림은 시멘트와 혼화제의 공시체 균열을 나타낸 것인데, 그림에서 보는 것과 같이 전체적으로 균열이 많이 생기나 먼저 표면의 끝부분에 균열이 먼저 생기게 되고 그다음으로 중간에서 균열이 발생하여 수직 균열이 발생한다.

현무암 석분슬러지의 함유량이 높을수록 공극에 수분이 있어 경화가 늦어지는 반면 수화열을 낮춰주는 역할을 하여 현무암 석분슬러지의 함유량이 높을수록 균열의 수가 적게 나타나는 것으로 판단된다.

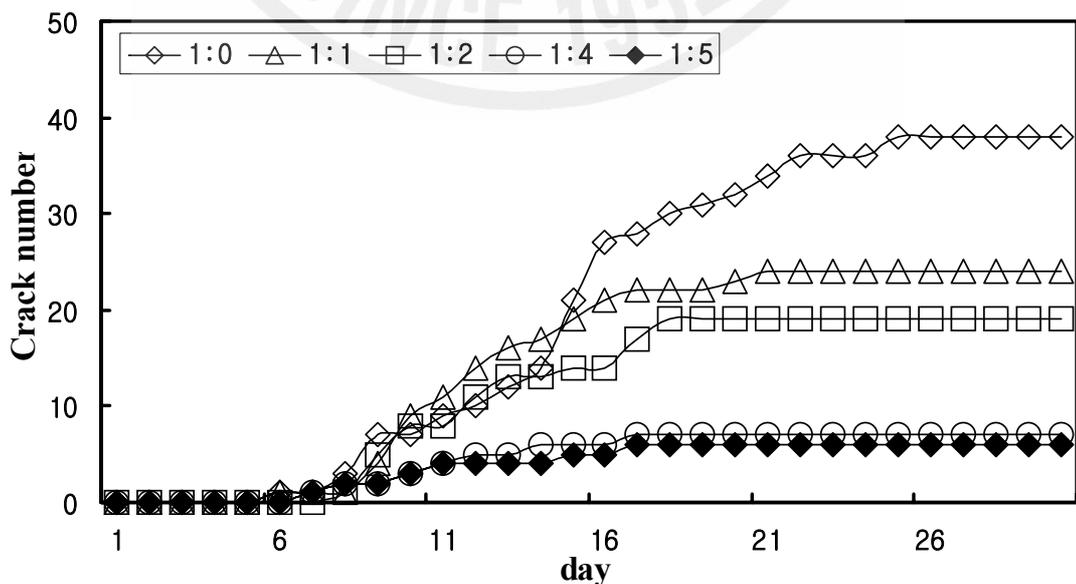
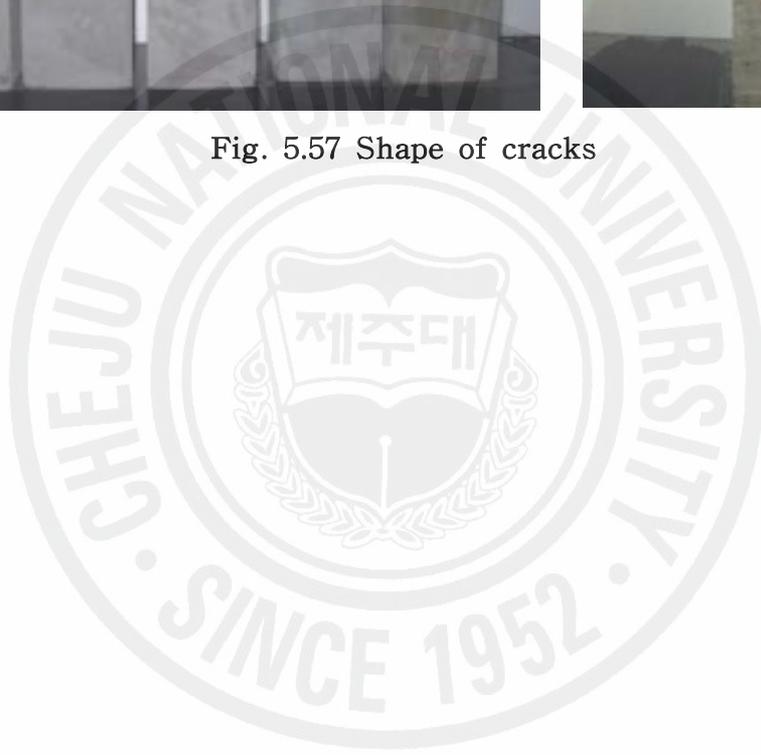


Fig. 5.56 Crack number in a day



Fig. 5.57 Shape of cracks



## 4.2 길이변화시험

Fig. 5.58은 습윤양생 후 건조에 노출됐을 경우 각주형 공시체의 길이 변화를 나타낸 것이다. 초기 12일 까지가 수축 속도가 급속히 일어나며 수축은 서서히 감소하는 것으로 나타나있다. 이는 습윤상태에 있다가 노출됐을 경우 표면에서 수분이 증발되어 수축한 것으로 판단된다.

시멘트의 함량이 적을수록 수축이 증가하는 것을 볼 수 있으나 시멘트양이 17~20%인 경우에는 비슷한 수축을 보여주고 있다. 시멘트 양이 많을수록 수화반응 속도가 빨라 초기에 수화물이 형성되어 조직이 치밀해졌기 때문으로 판단된다.

Fig. 5.58에서와 같이 석분슬러지의 함유량이 많을수록 공극안의 흡수한 수분의 양이 많아서 수분이 증발하면서 수축이 시멘트보다 수축양이 큰 것으로 판단된다. 이것으로 보아 석분슬러지의 함유량이 많을수록 경화가 늦어지는 것으로 볼 수 가 있다.

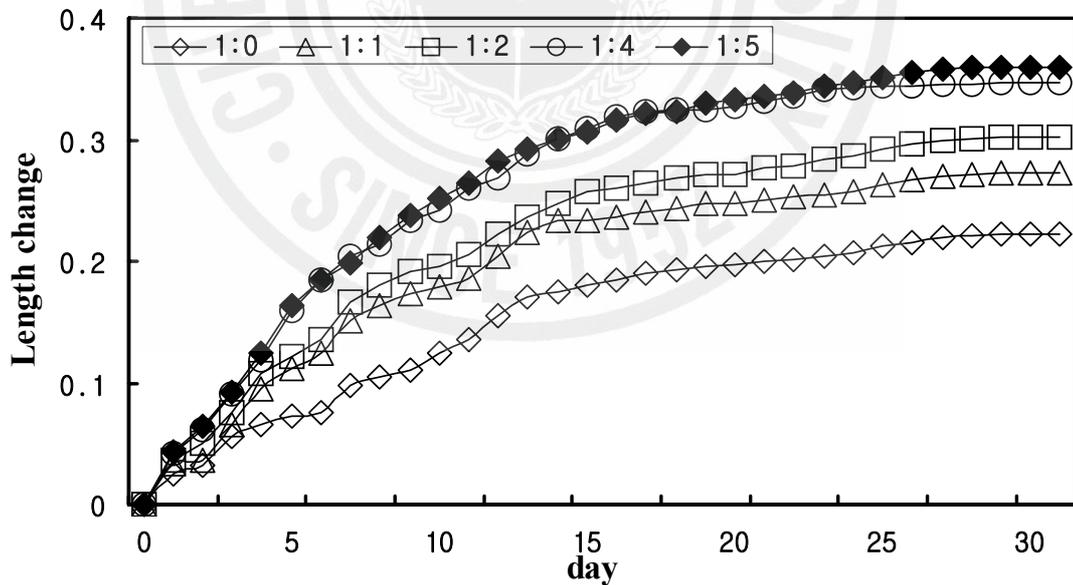


Fig. 5.58 Length change in a day

## 5. 흡착시험

석분슬러지가 각종 산업 폐수 중에 함유되어 있는 중금속을 제거하기 위한 흡착제로서 활용여부를 알아보려고 회분식 흡착실험을 통해 석분의 흡착능력을 연구한 결과 다음과 같다.

### 5.1 실제시료량(함수율 0.08%)

실험에 사용되어진 석분슬러지는 실험하기 전  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 에서 5시간 건조시켜 수분을 제거한 후 사용하였으며, 흡착량과 pH에 따른 흡착능력을 알아보기 위하여 시료는 0.5, 1, 2, 4g을 사용하였으며 pH는 2, 4, 6, 8의 범위에서 실험을 수행하였으며, 이때의 실제의 시료량은 Table 5.26과 같다.

**Table 5.26 The Sample Amount for pH**

Sample (g) pH	Pb <sup>2+</sup>				Cd <sup>2+</sup>				Cr <sup>6+</sup>			
	0.5	1	2	4	0.5	1	2	4	0.5	1	2	4
2	0.4997	1.0019	2.0033	4.0035	0.4987	1.0005	2.0039	3.9990	0.5075	1.0000	2.0036	4.0070
4	0.5011	1.0017	2.005	4.002	0.4996	1.0031	2.0011	4.0044	0.5006	1.0027	2.0020	4.0002
6	0.5033	1.001	1.9985	3.9998	0.5077	0.9996	1.9990	4.0008	0.4976	1.0023	1.9992	4.0022
8	0.5023	1.0066	2.0044	4.0017	0.5011	1.0036	1.9996	3.9993	0.5023	1.0022	2.0005	4.0004

### 5.2 시료 주입 후 pH값(10분 교반 후 측정)

시료주입 후 pH값을 측정하기 위하여 100ml 삼각플라스크에 2ppm의 중금속 용액 50ml을 넣고, 무게를 잰 시료를 넣은 후 교반기로 10분간 교반(200rpm) 후 pH를 측정하고 0.01N NaOH, 0.1N NaOH, 0.01N HNO<sub>3</sub>, 0.1N HNO<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>를 이용하여 pH를 조절한 결과 Table 5.27과 같다.

**Table 5.27 The pH Variation after Pouring Sample**

Sample (g) pH	Pb <sup>2+</sup> (원액 pH = 3.59)				Cd <sup>2+</sup> (원액 pH = 3.57)				Cr <sup>6+</sup> (원액 pH = 5.02)			
	0.5	1	2	4	0.5	1	2	4	0.5	1	2	4
2	4.68	6.04	6.70	7.51	4.95	5.97	6.82	7.21	6.59	6.94	7.33	8.17
4	4.78	6.09	6.80	7.31	4.93	6.01	6.78	7.40	6.56	7.06	7.57	8.22
6	4.84	6.07	6.82	7.50	4.91	6.04	6.80	7.48	6.76	7.04	7.65	8.40
8	5.10	5.90	6.87	7.50	4.94	6.01	6.82	7.46	6.67	7.06	7.65	8.26

5.3 AAS 측정농도(mg/l)-잔류농도

교반기를 이용하여 30분 교반 후 거름종이(Filter paper NO. 5B)을 이용하여 걸러내 AAS로 측정 잔류 농도를 측정한 결과 Table 5.28과 같다.

**Table 5.28 Remaining pH Density**

Sample (g) pH	Pb <sup>2+</sup>				Cd <sup>2+</sup>				Cr <sup>6+</sup>			
	0.5	1	2	4	0.5	1	2	4	0.5	1	2	4
2	1.9973	1.8727	1.5525	1.3271	2.2380	2.1949	2.1490	2.1162	3.0878	3.0587	2.8937	2.6395
4	0.4938	0.2121	0.1795	0.2239	1.8394	1.6805	1.4735	1.7394	3.2811	3.0172	2.8734	2.8637
6	0.2328	0.2061	0.0994	0.1557	1.2115	0.3848	0	0	2.7278	3.0172	2.9766	3.1099
8	0.1617	0.1884	0.2032	0.2388	0	0	0	0	2.9643	2.7190	2.3457	2.1189

5.4 pH별 제거효율

석분슬러지의 흡착능력에 대하여 pH별 제거효율을 실험한 결과 Table 5.29와 같다.

Table 5.29 Elimination Utility Factor

Sample (g) pH	Pb <sup>2+</sup>				Cd <sup>2+</sup>				Cr <sup>6+</sup>			
	0.5	1	2	4	0.5	1	2	4	0.5	1	2	4
2	0.135	6.365	22.375	33.645	0	0	0	0	0	0	0	0
4	75.310	89.395	91.025	88.805	8.030	15.975	26.325	13.030	0	0	0	0
6	88.360	89.695	95.030	92.215	39.425	80.760	100	100	0	0	0	0
8	91.915	90.580	89.840	88.060	100	100	100	100	0	0	0	0

### 5.5 결과 분석

석분슬러지를 재활용 측면에서 흡착제로서의 가능성을 살펴보기 위하여 중금속별, pH별, 시료량별로 실험을 행한 결과 전체적인 제거효율은  $Pb^{2+} > Cd^{2+} > Cr^{6+}$ 이며 pH가 증가함에 따라 대체적으로 제거효율은 증가하는 것으로 나타났다.

이것은 pH 상승에 의한 수산화물로의 침전으로 생각이 되어진다. 중금속별 제거효율을 살펴보면  $Pb^{2+}$ 의 경우에는 pH 6에서 시료량이 2g 일때 95%의 제거효율을 나타내었으며,  $Cd^{2+}$ 은 pH 6, 시료량 2g 이상부터 100%의 제거효율을 보였다.

크롬의 경우는 pH 감소에 의해 농도가 오히려 증가하는 경향을 보이고 있어 크롬에 대해서는 추가적으로 자연 상태의 물에서 용출이 되는지를 확인해 볼 필요가 있다고 검토되었다.

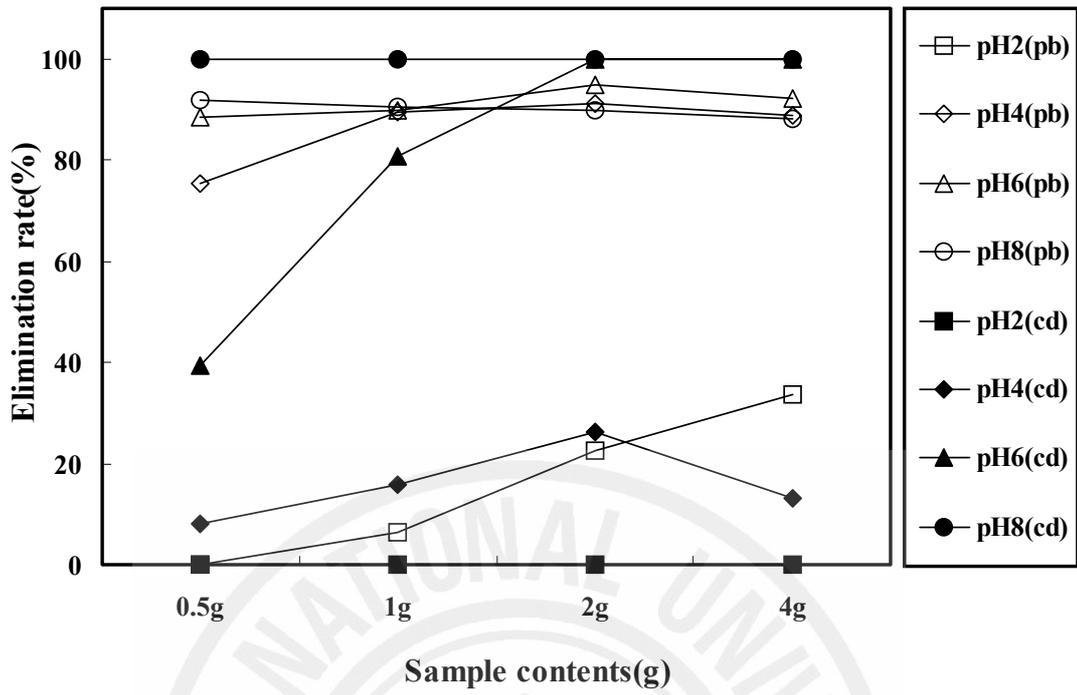


Fig 5.59 Elimination Utility Factor

## VI. 활용방안

건설현장에서 석분슬러지를 차수재료로 활용한 새로운 공법을 개발하기 위하여 실내모형시험을 실시하였다. 실내모형시험은 농업용으로 시설된 저수지나 연못 바닥이 장기적인 사용으로 지반 균열이 발생하여 저류 중이던 물이 바닥 누수 원인으로 저수 기능을 상실한 시설에 차수층을 만들어줌 으로서 저수기능을 확대할 수 있는 방안을 강구한 시험이다.

### 1. 실내모형시험

#### 1.1 시험방법

실내 모형시험을 위한 지반조건은 제주시 한경면에 위치한 Y저수지 지질주상도를 참고(2001, 제주도지질주상도자료집)로 하였으며 모래와 자갈층을 일정 높이로 맞추고 바닥조건과 동일하게 물이 잘빠지는 지반 조건을 만들었다. 이 때 투수계수를  $2.0E-2\text{cm}/\text{sec}$  정도로 맞추었다. 그리고, 사용된 재료인 모래와 자갈의 물성치는 IV장에 1.5와 1.6과 같다.

저수지가 농업용으로 사용중인 것을 가정하여 부득이 내부 수중상태에서 시공을 해야 되는 여건에 맞게 시험을 하는 경우와 내부의 물을 모두 양수하여 바닥이 드러난 건조 상태에서 시공을 하는 경우 두 가지 상태를 가정하여 실내 모형 시험을 실시하였다.

수중상태에서 배합된 시료를 상부에서 자유낙하 시켜 일정시간 침강 후의 투수계수를 측정하여 시료가 있었을 때와 없었을 때의 투수시험을 비교 분석하였으며, 시료가 최종 침강될 때까지의 침강속도를 구하였다.

건조상태의 경우는 배합시료를 상부에 타설 한 후 7일 양생 후 투수시험을 비교 분석하였으며, 이때 실시한 투수시험은 정수두 시험을 시행하였다.

## 1.2 배 합

### 1.2.1 투수시험 Type III 적용

저수시설 차수 실내모형시험을 위한 석분슬러지와 Fly-ash, 시멘트, 현장토사를 배합한 표는 Table 6.1과 같다.

**Table 6.1 Mix Proportion Ratio of Type III**

Item	Sludge(%)	fly-ash(%)	Cement(%)	Soil (%)	Water (%)
TypeIII-1	50	40	10	0	배합시 최적의 조건을 고려 슬럼프값이 7.5~12.5가 될수 있도록 결정
TypeIII-2	40	32	8	20	
TypeIII-3	36	18	6	40	
TypeIII-4	28	8	4	60	
TypeIII-5	16	2	2	80	

### 1.2.2 투수시험용 Type IV 적용

저수시설 차수 실내모형시험을 위한 석분슬러지와 모래, 시멘트를 배합한 표는 Table 6.2와 같다.

**Table 6.2 Mix Proportion Ratio of Type IV**

Item	Sludge(%)	Cement(%)	Sand(%)	Water(%)
TypeIV-1	50	50	0	배합시 최적의 조건을 고려 슬럼프값이 7.5~12.5가 될수 있도록 결정
TypeIV-2	48	32	20	
TypeIV-3	42	18	40	
TypeIV-4	32	8	60	
TypeIV-5	18	2	80	

### 1.3 모형 모식도

시험에 사용된 실내 모형 투수시험기는 Fig. 6.1과 같다.

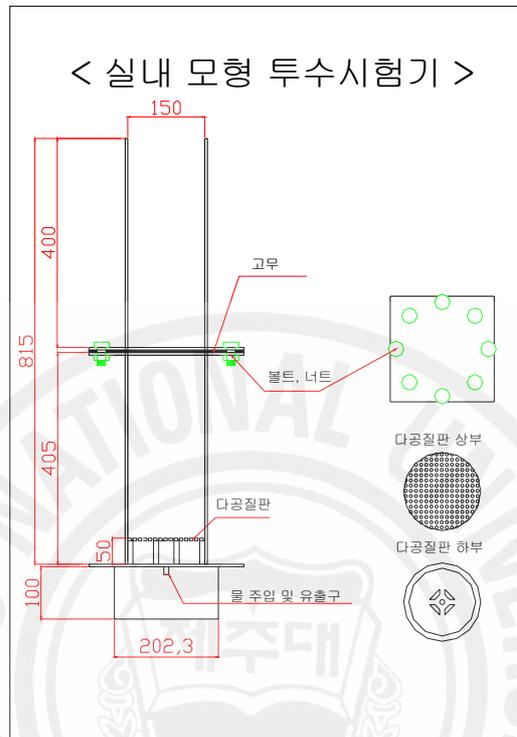
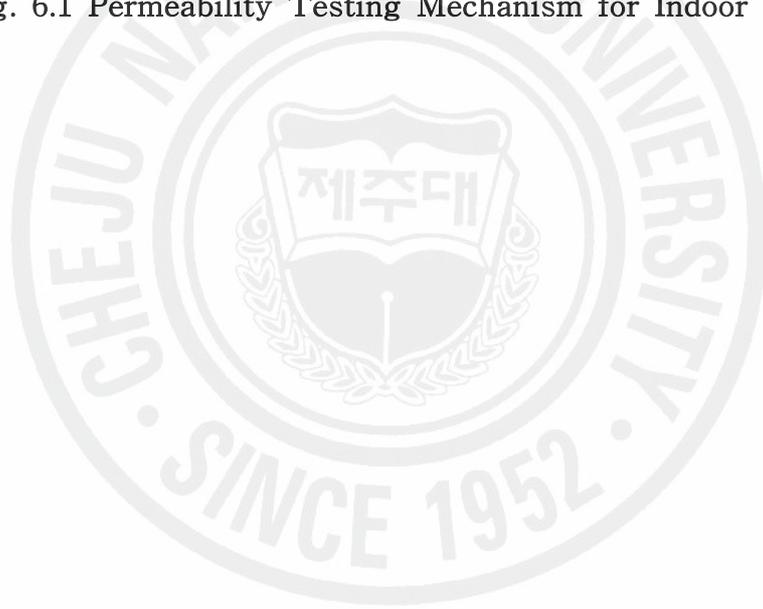




Fig. 6.1 Permeability Testing Mechanism for Indoor Model



## 1.4 시험 결과

### 1.4.1 수중 상태

수중상태에서 Type III이 배합된 시료를 자유낙하 시켜 침강 시킨 후 투수시험 결과는 Table 6.3과 같다. Type III-1에서 보는 바와 같이 석분슬러지 50%, fly-ash 40% 시멘트 10% 배합시 투수성이 가장 낮았으며, 또한 현장토사 사용이 증가할 수록 투수성은 낮은 경향이 있다.

TypeIV의 경우에도 석분슬러지와 시멘트의 배합비율이 많을 수록 투수성이 낮았으며, 수중상태에서 자유낙하 시켜 침강 후 생성된 차수층은 투수성이 낮아, 현장에서 시공을 위한 차수공법으로 적용이 가능할 것으로 검토되었다.

#### 가. Type III 결과

**Table 6.3 The Water-stop Liner Application of Permeability Test Result Type III**

Item	Prior to the input of combined sample (Gravel+Sand)	After the input of combined sample (Gravel+Sand+Sample)	Note
Type III-1	2.06E-02	1.70E-06	
Type III-2	1.15E-02	1.86E-05	
Type III-3	1.52E-02	1.06E-05	
Type III-4	1.77E-02	4.30E-06	
Type III-5	2.00E-02	2.56E-06	

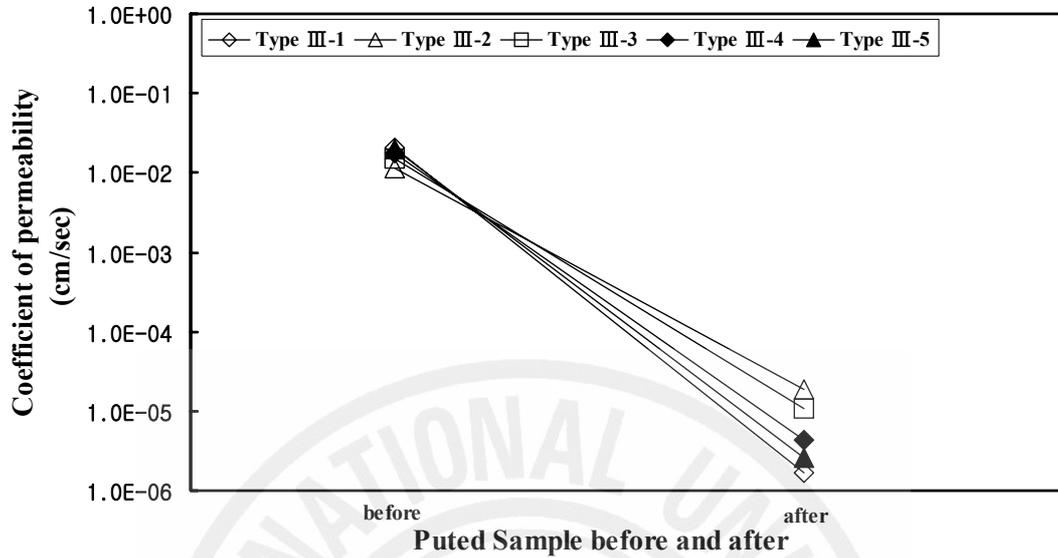
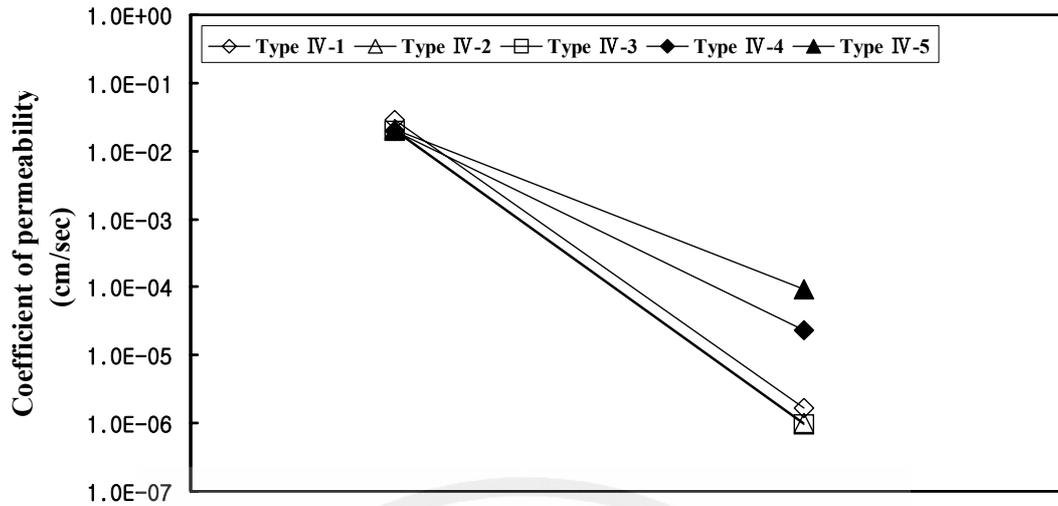


Fig. 6.2 The Water-stop Liner Application of Permeability Test Result (Type III)

나. Type IV 결과

Table 6.4 The Water-stop Liner Application of Permeability Test Result Type IV

Item	Prior to the input of combined sample (Gravel+Sand)	After the input of combined sample (Gravel+Sand+Sample)	Note
TypeIV-1	2.90E-02	1.64E-06	
TypeIV-2	2.10E-02	1.02E-06	
TypeIV-3	2.00E-02	9.47E-07	
TypeIV-4	1.98E-02	2.29E-05	
TypeIV-5	2.09E-02	9.39E-05	



Puted Sample before and after

Fig. 6.3 The Water-stop Liner Application of Permeability Test Result (Type IV)

#### 1.4.2 건조 상태

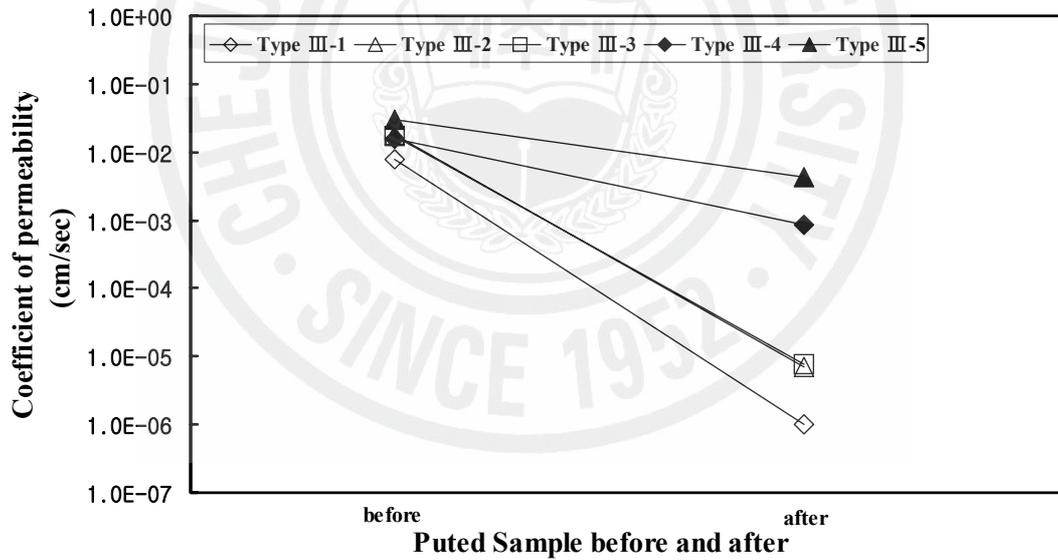
건조상태에서 Type III이 배합된 시료를 타설하여 일정시간 양생 후 투수시험 결과는 Table 6.5와 같다. Type III-1에서 보는 바와 같이 석분슬러지 50%, fly-ash 40% 시멘트 10% 배합시 투수성이 가장 낮았으며, 또한 현장토사 사용이 증가할 수록 투수성은 높아지는 경향이 있다. 수중상태와 비교하여 물이 있는 경우는 현장토사가 공극을 메우는 역할을 하는 반면 건조상태는 그러치 못한 것으로 검토되었다.

TypeIV의 경우에도 석분슬러지와 시멘트의 배합비율이 많을 수록 투수성이 낮았으며, 현장에서 시공을 위한 차수공법으로 적용이 가능할 것으로 검토되었다.

가. Type III 배합

**Table 6.5 The Water-stop Liner Application of Permeability Test Result Type III**

Item	Prior to the input of combined sample (Gravel+Sand)	After the input of combined sample (Gravel+Sand+Sample)	Note
Type III-1	7.74E-03	1.03E-06	
Type III-2	1.79E-02	6.96E-06	
Type III-3	1.72E-02	7.75E-06	
Type III-4	1.59E-02	8.66E-04	
Type III-5	3.05E-02	4.33E-03	

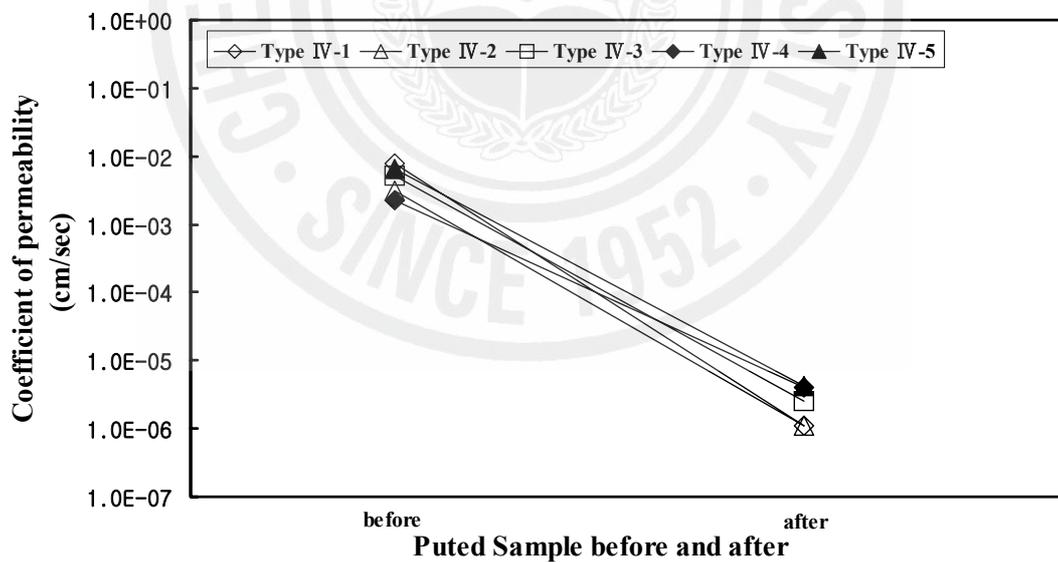


**Fig 6.4 The Water-stop Liner Application of Permeability Test Result (Type III)**

나. Type IV 배합

**Table 6.6 The Water-stop Liner Application of Permeability Test Result Type IV**

Item	Prior to the input of combined sample (Gravel+Sand)	After the input of combined sample (Gravel+Sand+Sample)	Note
Type IV-1	7.83E-03	1.12E-06	
Type IV-2	3.06E-03	1.08E-06	
Type IV-3	5.09E-03	2.54E-06	
Type IV-4	2.30E-03	3.99E-06	
Type IV-5	6.55E-03	4.29E-06	



**Fig. 6.5 The Water-stop Liner Application of Permeability Test Result (Type IV)**

### 1.4.3 침강속도 측정

수중상태에서 배합된 재료의 침강속도를 측정하기 위하여 Type III-1, IV-1 의 재료에 대하여 세립토의 비중계에 의한 입도시험(KS F 2302-92 일부분)방법을 응용하여 측정한 결과 침강속도는  $v = 0.0007 \sim 0.0023 \text{cm/s}$ 이며, 완전침강이 될 때까지 소요되는 시간을 육안 관찰 결과 배합재료를 살포한 후 약 90분 정도이 시간이 소요되는 것으로 측정되었다



## 2. 현장 시험

앞의 실내모형시험에 대하여 규명되기 이전에 제주시에 한경면에 위치한 Y저수지가 이와 비슷한 공법으로 시공된 정보가 있어 시공된 저수지 바닥에 대하여 현장투수시험을 실시하였다.

저수지는 차수효과를 위해 제방 측면과, 저수지 내부 바닥에 주로 시공이 이루어 졌다. 제방 측면은 석분슬러지와 시멘트가 배합된 완전 고결상태로 있었으며, 저수지 내부와 달리 사람이나 소 등 가축 이동을 위하여 일정 강도 발현을 위하여 시멘트의 함유량을 다소 크게 하여 시공된 것으로 판단되었다.

저수지의 내측 부분에는 제방 측면과는 달리 고결된 상태로 이루어지지 않고 물이 항상 접해있어서 그런지 수분이 많이 함유된 점토의 특징을 보였으며, 제방 측면의 시공된 것과는 달리 월등히 석분슬러지 함유량이 많아 보였다. 이는 수중 상태 타설 과정에서 재료분리가 있었거나 기존의 저수지의 바닥 토양과 같이 수생식물이 생육 될 수 있도록 석분슬러지의 함유량을 많이 하여 시공한 것으로 사료된다. Fig. 6.6은 제방의 측면과 저수지 내측 부분을 나타낸 그림이다.



Fig. 6.6 The Application of Permeability Test Site View

## 2.1 시험 방법

현장 투수시험을 위해서 저수지의 내측부분에 비해 시멘트 함유량이 다소 많은 것으로 검토된 제방의 측면의 1개 지점과, 석분슬러지의 함유량이 다소 많은 저수지의 내측부분 1개 지점에 대해 아래의 Fig. 6.7과 같이 현장투수시험 장치를 사용하여 투수시험을 시행하였다.

현장투수시험 과정에서 시험기와 시공된 지면 사이의 물의 누수를 막기 위해 실리콘을 이용하여 시험기 저면을 충분히 밀착시켰으며, 지면과 접촉면에서의 누수를 방지한 다음 투명 아크릴 몰드와 수위측정을 위한 투명파이프를 이용, 다음 날 시험기를 조립하여 투수시험은 실시하였다.



Fig. 6.7 Permeability Testing Mechanism on the Site

## 2.2 시험 결과

차수효과를 얻고자 석분슬러지를 이용하여 시공된 지역의 2개의 지점의 투수시험결과는 Table 6.7과 같다. 투수시험 결과 제방의 측면은 저수지의 내측부분보다 투수계수가 낮은 것으로 나타났으며, 앞에서의 실내시험 결과에서 보는 바와 같이 시멘트의 함유량이 증가 할수록 투수계수가 낮아지는 현장과 비슷한 경향을 보이고 있다.

실외에서 행해지는 현장투수시험은 시험과정에서 기온과 바람 등의 외부환경의 영향을 받았으며, 특히 저수지 내측부분에서 시행된 시험인 경우 지면과 밀착하여 시험을 실시하였으나 된 반죽상태의 조건으로 인해 실리콘과 지면 접촉면 사이에 약간의 누수가 있을 것으로 판단되며, 실제적으로 투수계수가 측정된 값보다도 좀더 낮을 것으로 판단되어 진다.

**Table. 6.7 The Field of Permeability Test Result**

Point	Side of causeway (Dry)	Inside the reservoir (underwater)
Coefficient of permeability(cm/sec)	1.09E-07	1.42E-05

또한 아래의 Fig. 6.8에서 보는 바와 같이 저수지 내측부분 중 석분슬러지의 표면에서는 생물이 육성되는 것이 확인 되었다.



**Fig. 6.8 Growing a marsh plant on the Site**

### 3. 그 외 활용방안 제안

석분슬러지를 재활용하기 위하여 건설현장에서 활용할 수 있는 방안에 대하여 검토한 결과 다음과 같다.

#### 3.1 시추 폐공처리 불투성재료 대체 활용

시추 조사 후 시추공을 그대로 방치하게 될 경우 환경오염 및 지하수 오염 등의 문제가 발생되므로 시추 조사 후 시추공 폐공처리를 수행하여 지하수 오염원을 차단한다.

폐공처리는 폐공 내로 유입되는 지표 오염원 차단, 오염원의 수직적 이동 통로 제거, 오염유발시설(케이싱 등)제거 등의 지하수 오염방지 효과를 얻을 수 있으며, 폐공처리방법은 지하수법시행령 24조에 명시된 기준을 적용하고, 폐공처리기준을 참고하여 조치하는데, 불투수성 재료를 지표부 양질의 토사로 매꾸기 전에 시멘트와 벤토나이트를 배합하여 사용하는 데 시멘트를 대신하여 석분슬러지를 배합하여 사용함으로써 석분슬러지를 재활용 할 수 있을 것 같다. Table 6.8은 폐공처리 절차도 이다.

**Table 6.8 The Flow of the Plugging Hole Treatment**

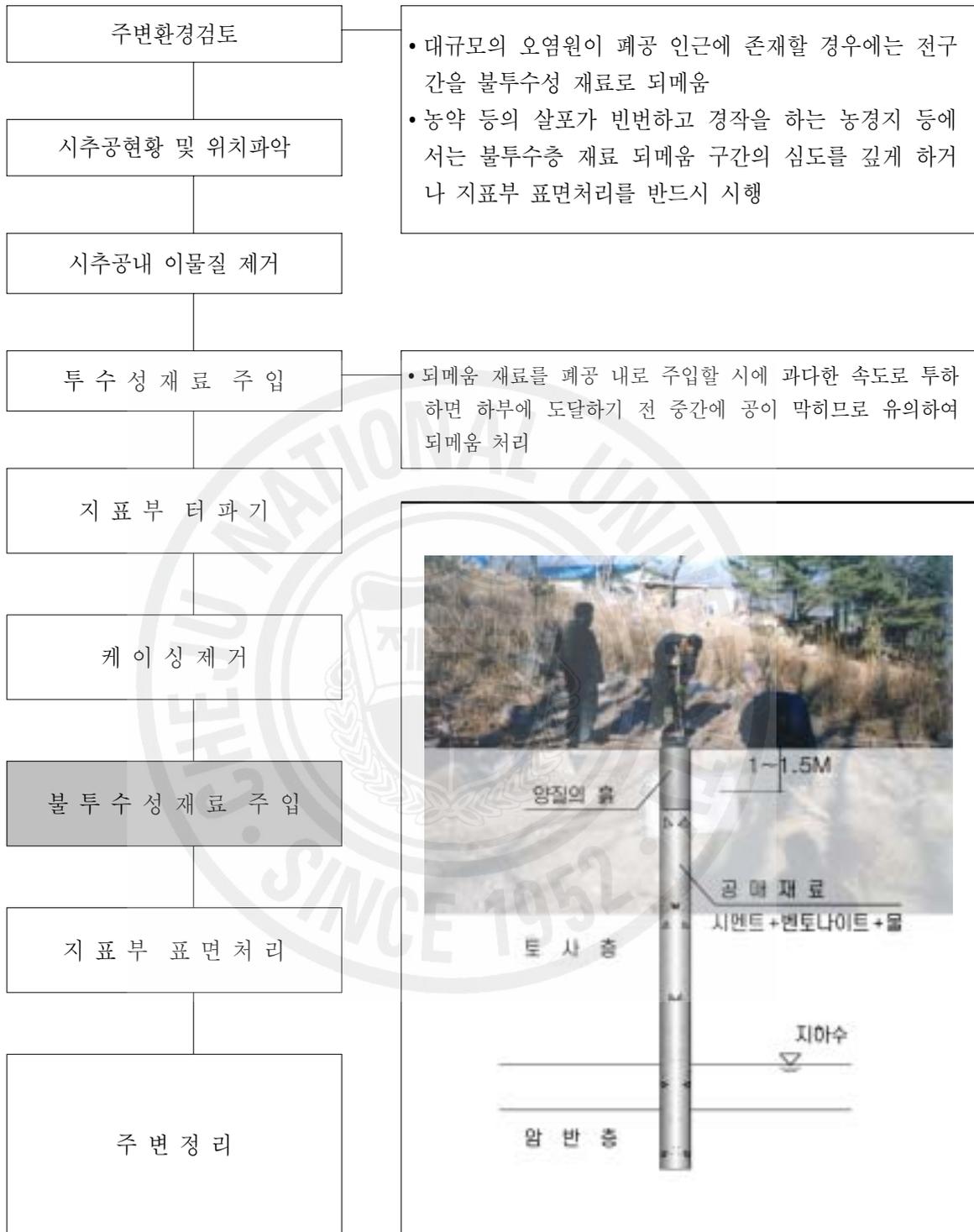
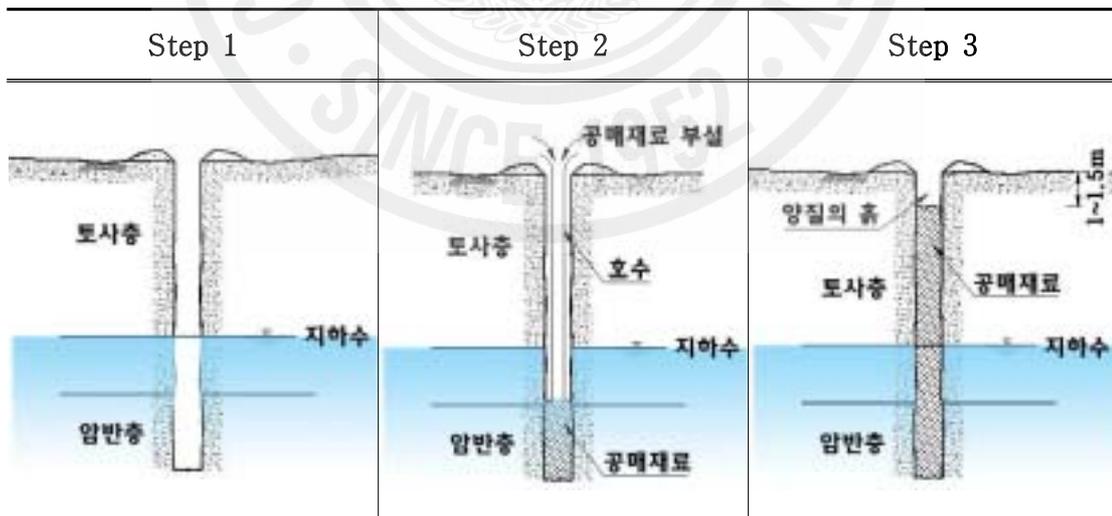


Table 6.9 The Plugging Hole Treatment Method

Step 1	Step 2	Step 3
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공매재료의 양 결정</li> <li>- 시추공의 직경, 깊이 및 지하수위 파악</li> <li>• 시추공내 정리</li> <li>- Casing 및 검측 PVC Pipe 제거</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공매재료의 충전(하부구간)</li> <li>- 투수성 재료(모래)를 공저로부터 지하수위 5m 하부지점까지 주입</li> <li>• 공매재료의 충전(상부구간)</li> <li>- 불투수성재료(시멘트+물)를 지하수위 5m 하부지점부터 상부 일정구간 까지 주입</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 상부구간 마무리</li> <li>- 불투수성 재료(시멘트+물)를 지표면하 1.0m까지 충전</li> <li>- 상부구간은 영농작업과 식생을 고려하여 양질의 흙으로되메움</li> </ul>

Table 6.10 The Plugging Hole Treatment Diagram



### 3.2 지하수 개발시 정호시설 그라우팅 재료 활용

일반적으로 지하수 개발시 흙의 붕괴를 방지하기 위한 케이싱과 주변공간 사이에 그라우팅으로 안정화를 시키는데 이때 그라우팅시 사용되는 물유리계 대부분은 시멘트가 주류로 강알칼리성을 띠고 있어 인체에 유해한 성분의 함유로 장기적으로 지하수의 청정성에 영향이 미칠 것으로 검토됨에 이에 채움그라우팅 재료 사용시 석분슬러지를 적절하게 배합하여 사용함으로써 재료의 재활용과 지하수의 청정성을 관리하는데 도움이 될 것으로 검토 되어진다.

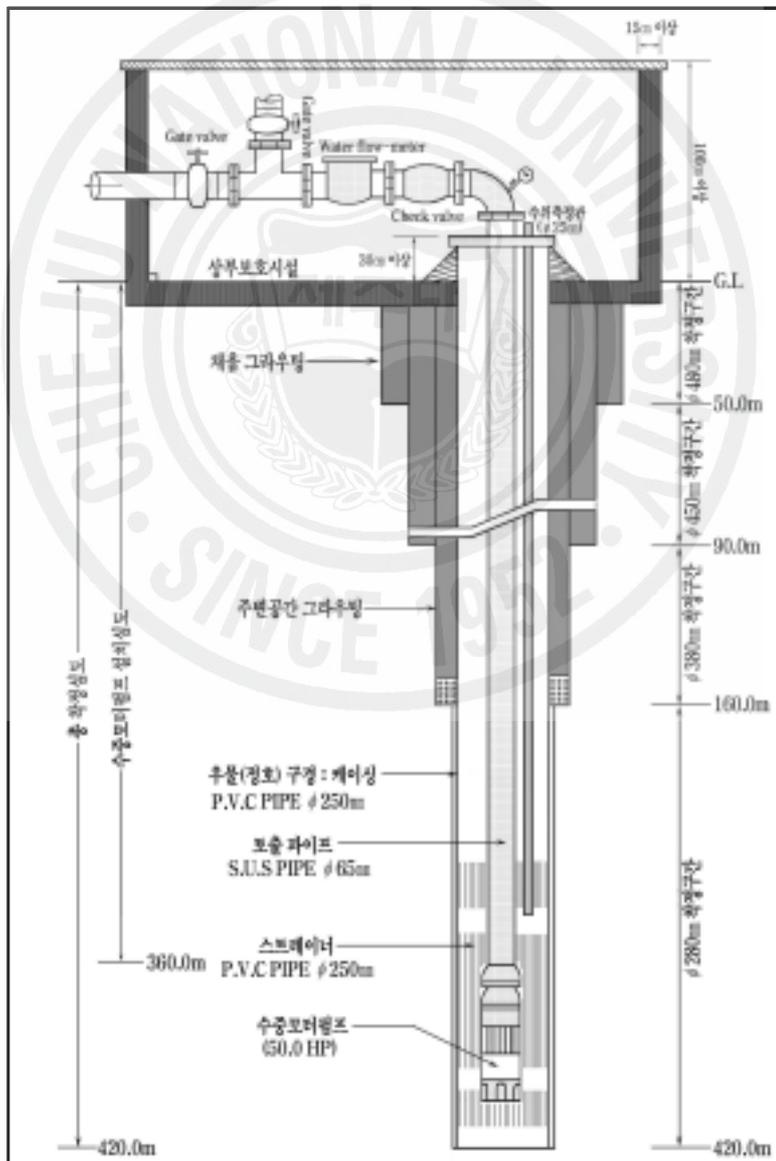


Fig. 6.9 The Cross Section of the Underground Water Pumping Facility

### 3.3 소규모 연못 시공

최근 웰빙이 강조하는 시대에 개인용 주택에 설치되는 소규모 연못에 대하여 기존의 콘크리트 재료보다 석분슬러지를 활용함으로써 재료의 재활용과 친환경적인 재료로 판단되어진다. 아래의 그림은 석분슬러지를 활용하여 개인용 주택에 설치된 연못 시험 시공 사진이다.



Fig. 6.10 The Pond Construction Process using Powered Basalt Sludge (The Pond Site, Mixing-1)



Fig. 6.11 The Pond Construction Process using Powered Basalt Sludge (Mixing-2, Mixing-3)



Fig. 6.12 The Pond Construction Process using Powered Basalt Sludge (Finishing, Slump Testing)



Fig. 6.13 The Pond Construction Process using Powered Basalt Sludge (After Construction)

## VII. 결 론

본 연구에서는 석재가공 과정에서 발생하는 제주도 현무암 석분슬러지를 자원화 하기 위해 주변에서 쉽게 구할 수 재료인 현장토사, 경화재(시멘트), 혼화제, Fly-ash, 모래와 혼합하여 강도시험, 투수시험, 동결융해, 건조수축, 균열시험, 흡착시험 등 공학적 특성을 분석하였다. 석분슬러지를 차수재료 활용하기 위하여 실내모형시험을 실시하였으며, 현장에서 활용할 수 있는 방안에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 석분슬러지는 토질분류기준인 통일분류법에 의하면 ML과 CL에 유사한 것으로 나타났다. 석분슬러지와 여러가지 시료를 혼합한 시험체의 강도시험결과 다음과 같은 결론이 도출되었다.

(1) 석분슬러지, 시멘트, 혼화제와 석분슬러지, 시멘트, Fly-ash와 석분슬러지, 시멘트, 모래와 혼합된 시료는 공통적으로 석분슬러지 함량이 많을수록 압축강도는 감소하고, 양생일이 증가할 수록 일부 경우를 제외하고 압축강도는 증가하였으며, 석분슬러지량이 18%이하, 시멘트 2%이하, Fly-ash와 모래를 80% 이상 사용하는 경우를 제외하고는 차수재료로서 강도기준을 만족하였다.

(2) 석분슬러지, Fly-ash, 시멘트와 현장토사가 배합되는 경우 토사 비율이 20%이상 이 되면 수중양생시 시험편은 성형이 안되었으며, 일정강도 이상 발현이 어려워 차수재료로서 활용할 수는 없는 것으로 검토되었다.

(3) 석분슬러지, 시멘트, Fly-ash와 모래가 혼합된 시료는 양생조건에 따라 다소 차이가 있지만 인장강도는 압축강도의 9~14%로 검토되었다.

2. 석분슬러지를 다짐한 후 투수계수는  $4.67E-06\text{cm/sec}$ 로 나타났으며, 석분슬러지와 여러가지 시료를 혼합한 시험체의 투수시험 결과 다음과 같은 결론이 도출되었다.

(1) 석분슬러지, 시멘트, 혼화제와 석분슬러지, 시멘트, Fly-ash와 석분슬러지, 시멘트, 모래와 혼합된 시료의 투수계수는 공통적으로 시멘트 함량과 양생일이 증가 할수록 석분슬러지 함유량이 감소할수록 낮아졌으며, 석분슬러지 함

유량이 50% 이하가 되면 투수계수의 변화는 매우 작았다. 그리고 석분함량이 83%이하, 시멘트함량이 17%이상 비율로 배합하는 시험체에서는 투수계수가  $1.00E-07\text{cm/sec}$ 이하로 차수재료로서 투수기준을 만족하였다.

(2) 석분슬러지 50%미만과 Fly-ash가 첨가되는 경우에는 폐기물관리법상의 투수기준은 만족하지 못하였으며, 석분슬러지, Fly-ash, 시멘트, 현장토사 혼합 시험체인 경우 차수재료로서 투수기준을 만족하는 경우는 없었으며, 현장토사가 배합됨으로서 시험을 위한 시료 형성이 어려웠다.

(3) 석분슬러지, 시멘트, 모래의 혼합 시험체인 경우 석분슬러지 42%이상, 시멘트 18%이상, 모래 40% 미만의 비율로 배합하는 경우에 차수재료로서 투수기준을 만족하였다.

(4) 석분슬러지와 현장토사의 혼합 시험체인 경우 석분슬러지와 현장토사 비율이 4:6일 경우 차수재료로서 투수기준에 근접하였다.

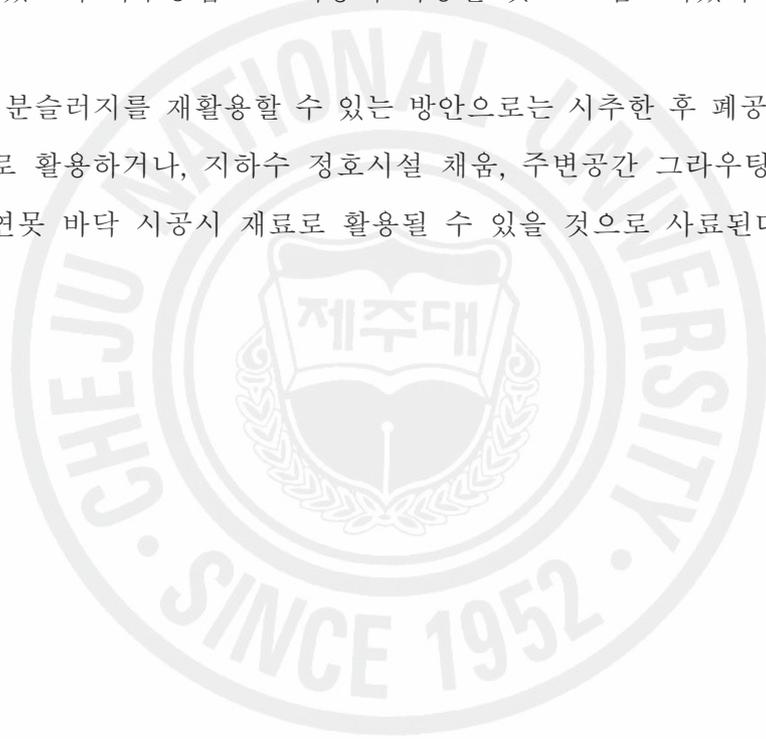
3. 석분슬러지를 시멘트와 혼화제를 혼합한 시험체는 동결융해 후 석분슬러지의 함유량이 증가 할수록 압축강도는 낮아지고 투수계수는 높아지나 석분슬러지 양이 80%이하인 경우에는 차수재료로서 적용할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 투수계수는 시멘트의 함량이 많을수록 동결융해 전과 후의 값이 변화가 적은 반면 석분슬러지의 함유량이 많을수록 투수계수 값은 높아지는 것을 알 수가 있었다. 석분슬러지의 함유량이 많을수록 동결융해 중 경화과정에서 자체 및 수분으로 인한 팽창력에 의한 공극의 증가로 인하여 투수계수 값이 높아지는 것으로 사료된다.

4. 중량변화시험에서 석분슬러지의 함유량이 많을수록 9%이상의 중량이 감소하는 것을 볼 수가 있었으며, 포졸란 반응을 관찰한 결과 시멘트의 함유량이 많을수록 결합이 좋고 공극이 크기가 크지 않으며, 석분슬러지가 함유량이 많을수록 공극의 크기가 커지는 것을 알 수 있다. 건조수축에 의한 균열 및 길이 변화시험에서 석분슬러지의 함유량이 많을수록 균열의 수가 적고, 수축량이 높은 것으로 나타났다.

5. 석분슬러지의 정화능력을 알아보기 위하여 흡착시험은 중금속별, pH별, 시료량 별로 시험한 결과 전체적인 제거효율은  $\text{pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Cr}$ 이며 pH가 증가함에 따

라 대체적으로 제거효율은 증가하는 것으로 나타났다.

6. 석분슬러지를 이용한 차수재료로 활용 공법을 개발하기 위하여 실내시험을 실시한 결과 배합된 시료를 수중상태의 상부에서 자유낙하 시켜 일정시간 침강 후와 건조상태의 일정시간 양생 후 투수시험한 결과 공통적으로 석분슬러지 50%, 시멘트 10%, fly-ash 40%의 비율로 배합시 투수성이 가장 낮았으며, 현장 토사 사용이 증가할 수록 투수성은 높아지는 경향이 있었다. 석분슬러지, 시멘트, 모래를 배합한 경우에도 석분슬러지와 시멘트의 배합비율이 많을수록 투수성이 낮았으며 차수공법으로 적용이 가능할 것으로 검토되었다
7. 그 외 석분슬러지를 재활용할 수 있는 방안으로는 시추한 후 폐공처리시 불투수성 재료로 활용하거나, 지하수 정호시설 채움, 주변공간 그라우팅 재료로 활용, 소규모 연못 바닥 시공시 재료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.



## VIII. 참고 문헌

- 공성호, 2005, 무기성 고화재를 이용한 석분슬러지의 재활용 연구, 한양대학교 석사학위논문, pp.16-47
- 권오준, 2004, 마스크크리트의 온도 균열 제어를 위한 실험적 연구, 경기대학교 석사학위논문, pp44-76
- 김광일, 2005, 현무암 석분슬러지를 이용한 차수재의 적합성에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문
- 김수문, 염희남, 임남웅, 2000, 벤토나이트와 시멘트가 매립장차수층의 투수성과 압축강도에 미치는 영향(I), 대한환경공학회지 제22권 제3호, pp.495-504
- 김승범, 2006, 현무암 석분슬러지의 차수재 활용에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문
- 김영수, 허노영, 서인식, 최정호, 2000, 대구지역 퇴적암 쇄석골재를 사용한 콘크리트 공시체의 일축압축강도와 동결융해특성에 관한 실험적 연구, 대한토목학회논문집, 제20권, 7호, pp.325-328
- 김정인, 1999, 역학적 하중이 암석의 투수계수 변화에 미치는 영향, 서울대학교 석사학위논문, pp.4-6
- 김용필, 1997, 지반공학시험법 및 응용, 세진사
- 김치권, 김병규, 손정수, 1996, 석분 슬러지 재활용방안 연구(II), 한국자원연구소 연구보고서
- 김치권, 김병규, 손정수, 1996, 석분 슬러지 재활용방안 연구(III), 한국자원연구소 연구보고서
- 김치권, 김병규, 손정수, 손용운, 1997, 석분슬러지 재활용 방안 연구, 한국자원연구소 연구보고서
- 나중득, 2002, 콘크리트 공학, 일광사
- 나진성, 현재혁, 조재범, 김진춘, 이호용, 2002, MCG 고화재가 첨가된 화강풍화토의 동결융해 과정에 따른 강도 및 투수계수 변화, 한국폐기물학회지, 제19권, 3호
- 남정만, 윤중만, 김기영, 김광일, 2005, 현무암 석분슬러지를 이용한 차수재의 적합성에 관한 연구, 한국폐기물학회지, 제22권 5호, pp.464-471

- 노갑수, 문광순, 최광호, 1996, Fly ash 미연탄소분의 제거 방법, 석탄회 활용 국제 워크샵, 한국전력공사, pp.63-84
- 노동부, 1987, 유해물질의 허용 농도 노동부 고시, 제86-46호
- 노회정, 2001, 고화토를 이용한 폐기물 매립지 차수층의 중금속 고정능력에 관한 연구, 서울시립대학교 석사학위논문
- 마상준, 2004, 석분토를 혼화재료로서 재활용하는데 있어서 소성조건에 따른 포졸란성 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제23권, 2호, pp.351-354
- 문석기, 1998, Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite-Sand 44th Canadian Geotechnical Conference 2, No.1, pp63-74
- 민경원, 진호일, 최성범, 박진범, 2002, 현무암 석분 활용에 대한 연구, 석재연논문집, 제7권, pp.217-224
- 박범준, 권성택, 1993, 제주도 화산암의 지화학적 진화: 제주북부지역의 하산층서에 따른 화산암류의 암석기재 및 암석화학적특징, 지질학회지, 29권, pp.39-60
- 박제선, 윤경구, 이주형, 김태환, 정원경, 2000, 시멘트 콘크리트의 건조수축균열 특성, 석재연논문집, 제5권, pp.89-101
- 박호식, 현재혁, 조재범, 서경아, 황윤섭, 2003, 동결융해 현상이 매립지 차수층의 강도 및 차수특성에 미치는 영향, 한국폐기물학회 추계학술연구회발표논문집, pp.577-580
- 백신원, 2001, 석분의 효과적인 이용에 관한 연구, 산업안전학회지, 제16권, 1호, pp.65-72
- 서민우, 2002, 토목섬유 점토차수재(GCL)와 지오멤브레인(GM)의 접촉 전단강도 평가, 한국지반공학회논문집 18, No.4, pp.137-146
- 성찬용, 류능환, 윤준노, 김영익, 임상혁, 2003, 석분과 황토를 사용한 건자재 제품 개발연구, 석재연 논문집, 제8권, pp.141-151
- 손정수, 김병규, 김치원, 1995, 폐석 및 석분슬러지를 활용한 인조석 판재의 제조, 자원리싸이클링학회지, Vol. 4, No.1, pp.4-11
- 신방섭외 4인, 1992, 도석의 고품위화 정제 기술에 관한 연구-고구배 자선기에 의한 정제에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 29, No.3, pp.1484-192

- 신은철, 1998, 폐석회의 점토차수재로서의 활용에 관한 연구, 한국지반공학회 14, No.4, pp.29-37
- 안건상, 이현구, 임현철, 1995, 제주도에서 산출되는 화강암에 대한 연구, 자원환경지질, 28권, pp.513-518
- 양성철, 안남식, 최동욱, 강승민, 2004, 형상비 및 골재의 종류에 따른 콘크리트 시편의 건조수축특성 연구, 한국도로학회 논문집, 제6권, 4호, pp.109-121
- 이상권, 김윤복, 1992, 석재산업의 재해 및 공해 방지를 위한 기초 연구, 한국자원공학회지, Vol. 29, No.5, pp.57-64
- 이상훈, 박철원, 최설철, 이웅상, 1997, 폐석분 슬러지로부터 규장 성분의 분리 및 도자기 소재 원료의 응용 연구, 한국자원공학회지, 제34권, pp.463-470
- 이성오, 국남표, 임영빈, 신방섭, 1995, 화강암 석재 가공 슬러지의 재활용, 한국리싸이클링학회지, Vol. 4, pp.12-129
- 이성호, 박태욱, 조영주, 기문봉, 이덕생, 1995, 폐기물 침출수중 난분해성 물질의 전해처리에 관한 연구, 한국폐기물학회지 12, No.5, pp.578-587
- 이성호, 이대근, 2000, 도시 쓰레기 조각재의 용출특성에 관한 연구, 한국폐기물학회지 17, No.6, pp.741-748
- 이수철, 1997, 혼합 콘크리트의 강도특성에 관한 연구, 경원전문대학논문집, 제19권, 1호, pp.45-55
- 이용수, 정하익, 1997, 오염지역 차폐용 슬러지 재료와 침출수의 반응 특성, 한국지반공학회지 1, No.2, pp.916
- 이종민, 2000, 폐기물매립장에서 다짐에너지와 팽윤도에 의한 벤토나이트혼합토의 투수계수 특성에 관한 연구, 서울시립대학교 석사학위논문
- 이재영, 정문경, 고재만, 1999, 연직 차수벽을 이용한 폐기물 매립지 침출수 오염 제어 사례연구, 한국토양환경학회지 4, No.2, pp.163-174
- 이학구, 1997, 석재 가공업체 현황과 향후 전망, 강원대학교 부설석재복합신소재 연구센터 석재 자원의 가공 및 분쇄에 관한 세미나, pp.9-16
- 이한승, 2003, 콘크리트 혼화재로서 고로슬래그 미분말의 사용방안, 대한건축학회 국제세미나 논문집, pp.55-80
- 전재원, 2002, 폐석분 슬러지를 이용한 토지개량제, 산광레미콘
- 정정권, 폐석분의 위해성 조사 및 재이용 방안, 전북지역환경기술개발센터 연구보고서

- 정종암, 2002, 폐석분을 이용한 폐기물 매립지 차수재층 기능 평가에 관한 연구,  
서울시립대학교 석사학위논문
- 조성택, 2002, 동결융해, 건조수축 작용을 받은 매립지 차수층의 물리적 특성 변화,  
충남대학교 석사학위 논문
- 조재범, 현재혁, 조성택, 최경훈, 2002, 매립지 차수재로서의 준설햄토 활용에 관한  
연구, 대한환경공학회지, 제24권, 5호, pp.380
- 조재범, 현재혁, 황윤섭, 2004, 건조수축시 수분공급이 차수층에 미치는 영향,  
한국폐기물학회지, 제21권, 2호, pp.127-134
- 조재범, 현재혁, 황윤섭, 2004, 현장토내의 유기물질이 고화 차수층에 미치는 영향(II),  
균열보완을 중심으로, 한국폐기물학회지, 제21권, 5호, pp.870-871
- 조재형, 2003, 石粉슬러지를 이용한 埋立場 遮水材의 特性에 關한 研究.  
한양대학교 석사학위논문, pp.19-52
- 진호일, 2000, 석분 슬러지를 이용한 중금속 흡착제 개발에 관한 연구, 석채연논문집,  
제5권, pp.195-201.
- 진호일, 민경원, 한상목, 신대용, 1999, 석산 및 석가공업체로부터 발생하는  
석폐기물의 물리적 화학적 특성, 한국자원공학회, 제36권, 4호, pp.290-298
- 한국건설산업연구원, 1998, 폐기물매립시설의 설계·시공 기술에 관한 연구  
한국자원연구소, 한국산업자원부, 200, 석분 슬러지 활용기술 개발에 관한 연구:  
최종보고서, pp.3-32
- 한국산업규격, KS F2308, KS F2303, KS F2304, KS F2309, KS F2302, KS  
F2312, KS F2343
- 한국석채산업총람, 2005, 한국석채신문사
- 한국지반공학회, 1994, 폐기물매립시설 세부설치기준, pp.274-298
- 현전기, 윤현수, 박덕원, 이병대, 이춘오, 김경수, 1995, 석채 자원 실태 조사 연구,  
한국자원연구소 연구보고서
- Alther, G. R., 1987, "The Qualifications of Bentonite as a Soil Sealant",  
Engrg. Geol. 23, No.2, pp.177-191
- Barlaz, M. A., R. K. am, and D. M. Schaefer, 1990, "Methane Production from  
Municipal Refuse : A Review of Enhancement Techiques and  
Mixrobal Dynamics", CRC Techniques and Critical Rev. in Envir.  
Control 19, No.6, pp.557-584

- Chan, W-T, 1994, First International Congress on Environmental Geotechnics, pp161-166
- Chapuis, R. P., "Design Construction Performance and Repair of the Soil-bentonite Liners of Two Lagoons", Canadian Geotechnical Journal 29, No.1, pp.638-649
- D'Appolonia, D. J., 1979, "Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoffs, Journal of the Geotechnical Engineering Division", ASCE. 106, No.4, pp.399-417
- Edil, T. B., 1992, "Characteristics of a Bentonite Slurry as a Sealant", Geotechnical Testing Journal 15, No.1, pp.313
- Fratoloch, E., and M. Manssero., 1996, "Predicting Hydraulic conductivity of cement-bentonite Slurries", Proc. of the Second International Congress Environment Geotechnics, Japan. 1, No.2, pp.503-508
- Garlanger, J. E., 1987, "Quality Control Testing for a Sand-bentonite Liner", Geotechnical Practice for Waste Disposal, Geotechnical Special Publication 4, No.13, pp.488-499
- Haraguchi, K., 1931, Geology of Jeju Island, Geological Survey of Korea, 10-1, pp.1-34
- Horzog, A. 1964, "The structure of clay-cement, colloquium on mechanical soil stabilization." Div. of Soil Mechanics, CSIRO, Melbourne, April
- Ingles, O. G and Metcalf, JB., 1972, Soil Stabilization, Butterworths. Sydney, pp.119-120
- Kenneth. J. et al., 1995, "Zeolite encapsulated metal complexes." J. Inclusion Phenom. Mol. Recognit. Chem., 21. pp.159-184
- Lee, J. S., 1989, Petrology and tectonic setting of the Cretaceous to Cenozoics Volcanics of South Korea: geodynamics implications on the East-Eurasian margin. Thesis of Doctor Degree, Univ. DOR-LEANS.
- Lee, M. W., 1982, Petrology and geochemistry of Jeju volcanic island, Korea., Sci. Rep. Tohoju Univ., Series 3, 15, pp.177-256
- Mark Cadwallader and Eric Dixon, 1998, Liner materials for waste containment, Pollution Engineering, pp.70-73

- Olson, R. E., and L. E. Daniel., "Measurement of Hydraulic Conductivity of Fine Grained Soils', Permeability and Groundwater Contaminant Trasport, ASTMSTP 746. ASTM, Philadelphia, pp.18-64
- Othman, M. A., and C H. Benson., 1993, "Effect of Freeze-thaw on the Hydraulic Conductivity and Morpholog of Compacted Clay" Can. Geotech. 30, No.2, pp.236-246
- Rhew, R. D., and M. A. Barlarz., 1995, "Effect of Lime-Stabilized Sludge as Landfill Cover on Refuse Decomposition", ASCE, J. of Environmental Engineering 121, No.7, pp.406-449
- Roslyn, T. S., and C. D. Shackelford., 1998, "Permeatin of Sand-Processed Clay Mitures with Calcium Chloride Solutions", Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Eng. March, pp231-240
- Shackelford, C. D., 1994, "Waste-Soil Interactions tha Alter Hydraulic Conductivity", Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil, ASTM STP 1142, D. E. Daniel and S. J. Trautwein, eds. ASTM, West Conshohochen, pp.111-168
- Shaw-Bing Wen, Hok-Shun Liu, 1991, "On the recycling of water, recovery and utilization of scrap powders of dimension stone cutting industry", proceedings of the EARTH 91, pp.11-15
- Wong, L. C., and M. D. Haug., 1991, "Cyclical Closed-system Freeze-thaw Permeability Testing of Soil Liner and Cover Materials" Can. Geotech. J. 2, No., pp.784-793

## 감사의 글

연구실 네모난 창문 너머로 편안하게 보이는 한라산 !

그 자락에 자리한 대학 캠퍼스, 그리고 이곳에서 생활한 지난 5년의 시간들.....

그 시간은 나 자신과의 싸움이었습니다. 끝이 없을 것 같았던 학위과정. 순간순간 그만 두고 싶을 때가 많았지만, 최후의 나의 모습을 생각하며 달리다 보니 이처럼 마지막 감사의 글을 쓸 수 있게 됐습니다. 이제 긴 여정의 종착역에서 다시 한번 “나는 할 수 있다” 라는 웅골찬 각오를 다지며, 이 순간이 있을 수 있도록 도와 주신 분들께 감사의 글을 올립니다.

박사과정 동안 학문에 대한 많은 지도, 사회인으로서 인생의 가르침과 사랑을 주신 남정만 지도교수님께 먼저 머리 숙여 감사드립니다. 기술사 취득한 후 학위 입문을 권유하셨고, 어려울 때 마다 저의 나침반이 되어 주시는 제주도지방개발공사 김석용 이사님, 또한 보다 나은 논문이 되도록 질책해 주시고 격려해 주신 박상렬 교수님, 이병걸 교수님, 그리고 멀리 서울, 부산, 제주를 오가시며 세심하게 지도 해주신 중앙대학교 홍원표 교수님, 한국해양대학교 김태형 교수님께도 감사드립니다.

학위과정 동안 가르침과 격려로 배움의 길을 이끌어 주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 지금은 미국 교환교수로 가 계신 김상진 교수님, 이용두 교수님, 제주산업정보대학 강수웅 교수님, 탐라대학교 정광옥 교수님, 안산공업대학 윤중만 교수님, 중앙대학교 여규권 박사님, 이재호 박사님, 류성필 박사님, 김정훈 단장님, 김인석계장님, 김희선 소장님, 고찬현 사장님께도 감사드립니다.

실험하느라 고생한 김도형, 마지막까지 옆에서 도와준 조성환 그리고 연구실 후배들 허용, 조영웅, 소재관, 강충훈, 강보규, 김승범, 김광일, 김준호, 김승현, 이정환, 박형건 고맙습니다.

무엇보다도 직장생활과 더불어 공부할 수 있도록 배려와 격려를 주신 JDC 김경택 이사장님, 정구철 (전)감사님, 김철희 부이사장님, 이시영, 김현중 실장님, James Levesque, 박철희, 이동선, 임춘봉, 부원균 처장님, 이성호, 주상진, 강승무, 문영호, 권인택 팀장님께 감사드리고 문승선, 진여훈, 강충효, 유경홍, 구대호, 서보현, 김대영, 정현사, 손은주 외 직원들 고맙습니다.

삼성건설 이성재 차장님, 김기범 외 삼성그룹 입사동기들, 김희곤, 남원ENG 김성두 단장님, 유신 이인기 단장님, 이성찬 부장님, 진산 김봉상 사장님, 고영실 과장, 우성ENG 김호원 사장님, 아라개발 고승택 차장님, 동양시멘트 한상옥 공장장님, 조성철님, 중소기업청에 근무하는 사촌형 이남훈, 이해익 전무님, 조용빈 외 한양대 석사동기들, 친구 김형섭과 이번 사법시험에 합격한 정순철, 대한민국 ROTC 상륙회 선후배님께도 감사드립니다.

멀리 제주까지 시집보낸 딸이 보고 싶어 하시다 지난 여름에 하늘나라로 가신 장인 어른께 살아생전에 이 기쁨 드리지 못한 죄송함이 앞서고 더불어 홀로 되신 장모님을 잘 모시는 사위가 되겠다고 약속드립니다. 늘 웃음으로 사위를 맞이하시는 장모님, 회사 일에 바쁘게 보내는 처남 정현호, 처남댁 조미성, 조카 정지원 고맙습니다.

살아계셨다면 누구보다도 제일 기뻐하실 아버님! 막내가 또 하나의 산을 넘었습니다. 학위 마치길 고대하시면서 본인 건강보다 아들 건강이 우선이신 어머니님 “건강하게 오래 사셔야 합니다.” 큰누나 김문희, 형님 김석영, 형수 좌보현, 작은누나 김선희, 매형 박명만 고맙습니다. 그리고 사랑하는 조카 향아, 종석, 현아, 종호, 지성, 건강하고 훌륭하게 자라길 바란다.

마지막으로 결혼 후 제주에서 줄곧 남편 뒷바라지와 가정살림 꾸리느라 고생한 사랑하는 아내 정인아 “너무 고맙고 사랑해 !” 그리고 우리집 든든한 기둥 내 아들 도훈이, 애교만점의 딸 서현이.. “아빠가 공부한다고 그 동안 함께 놀아주지 못해서 미안하다. 이제부터는 실컷 놀아줄게”.

이렇게 감사드려야 할 분들을 한 분 한 분 되새겨 보니 저 혼자만의 힘이 아닌 정말 많은 분의 도움이 있었기에 오늘 이 순간이 있는 것 같습니다. 다시 한 번 오늘 이 순간이 있을 수 있도록 도와주신 모든 분들께 감사드리며, 좀 더 겸손하고 항상 공부하는 기술자로서의 모습을 보여 드릴 것을 약속드립니다.

2006. 12

정들었던 지반 연구실에서 김 기 영