

碩士學位論文

물유리계(L.W) 그라우팅에 의한 지반보강시 차수효과에 관한 연구

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

曹 映 雄

2003年 12月

물유리계(L.W) 그라우팅에 의한 지반보강시 차수효과에 관한 연구

指導教授 南 正 萬

曹 暎 雄

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



曹暎雄의 工學 碩士學位 論文을 認准함

심사위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

濟州大學校 大學院

2003年 12月

A Study on the Waterproof Effect for
Ground Reinforcement by Water-glass
Chemical Grouting Method

Young-Woong Cho

(Supervised by Professor Jung-Man Nam)



A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirements for the degree of Master of
Engineering

2003. 12.

This thesis has been examined and approved.

Department of Civil & Ocean Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

목 차	i
Table Contents	iii
Figure Contents	v
Summary	vii
I. 서 론	1
1. 연구배경	1
2. 연구목적	2
II. 주입 이론	4
1. 그라우팅 주입공법의 개요	4
2. 주입공법	5
3. 주입제의 분류와 특성	8
4. 주입형태	14
5. 대표적인 주입공법	16
III. 물유리계(L, W) 그라우팅 시공법 및 부수시험	29
1. 시험 목적	29
2. 물유리계(L, W) 그라우팅	30
3. 부수시험	33
4. 부수시험결과의 고찰	48

IV. 차수효과에 대한 수치해석	55
1. 프로그램 개요	55
2. 적용이론	56
3. 해석영역 및 경계조건	59
4. 현장 적용 예	60
V. 결론	78
VI. 참고문헌	80



Table Contents

Table 2.1	Classification According to Grout Material	10
Table 2.2	Classification According to Hardener	10
Table 2.3	Classification According to the Gel-Time	12
Table 2.4	The Range of Infiltration According to Grout Material	18
Table 2.5	Standard Strength of Organic & Inorganic Matter in SGR Method	21
Table 3.1	Standard Mix Proportion of Seal Material	31
Table 3.2	Classification of a Mixture	32
Table 3.3	Standard Infiltration Ratio According to Injection System	37
Table 3.4	Infiltration Ratio According to Soils	37
Table 3.5	In-filling Ratio According to Soils	38
Table 3.6	Results of Laboratory Test	39
Table 3.7	Infiltration Quantity of Sample According to Porosity	40
Table 3.8	Average Sectional Area of Stand Pipes	43
Table 3.9	Results of In-situ Permeability Test in Field Before & After Construction	54
Table 4.1	D_{30} and Coefficients of Permeability According to Creager	64
Table 4.2	General Value of Coefficient of Permeability	65
Table 4.3	Coefficient of Permeability in Rock & Soils	65
Table 4.4	Condition of Geological Layer According to the Depth(Pyung-dae)	66
Table 4.5	Applied Coefficient of Permeability(Pyung-dae)	67

Table 4.6	Infiltration Quantity of Testing Hole(Pyung-dae)	68
Table 4.7	Seepage Quantity According to the Depth of Grouting(Pyung-dae)	69
Table 4.8	Condition of Geological Layer According to the Depth(Jo-chun)	73
Table 4.9	Applied Coefficient of Permeability(Jo-chun)	73
Table 4.10	Infiltration Quantity of Testing Hole(Jo-chun)	74
Table 4.11	Seepage Quantity According to the Depth of Grouting (Jo-chun)	75



Figure Contents

Fig. 2.1	The Stage of Construction of Manchette Tube	19
Fig. 2.2	Diagram of Construction in JSP Method	25
Fig. 2.3	Arrangement Plan of Construction Machine	27
Fig. 2.4	Diagram of construction in RJP Method	28
Fig. 3.1	Permeability Test Setup	32
Fig. 3.2	Saturation Process in the Variable-head Permeability Test	43
Fig. 3.3	Lugeon Test Setup	46
Fig. 3.4	Results of the Variable-head Permeability Test (Porosity = 0.3)	50
Fig. 3.5	Results of the Variable-head Permeability Test (Porosity = 0.5)	50
Fig. 3.6	Results of the Variable-head Permeability Test (Porosity = 0.7)	51
Fig. 3.7	Results of the Variable-head Permeability Test (Porosity = 0.8)	51
Fig. 4.1	Ground Plan of Pumping Station(Pyng-dae)	61
Fig. 4.2	Sectional Plan of Pumping Station(Pyng-dae)	62
Fig. 4.3	Ground Plan of Pumping Station(Jo-chun)	62
Fig. 4.4	Sectional Plan of Pumping Station(Jo-chun)	63
Fig. 4.5	Result of Seepage Analysis(No Grouting)	70
Fig. 4.6	Result of Seepage Analysis(Depth of Grouting=8m)	70
Fig. 4.7	Result of Seepage Analysis(Depth of Grouting=15m)	71
Fig. 4.8	Result of Seepage Analysis(Depth of Grouting=17m)	71

Fig. 4.9	Result of Seepage Analysis(No Grouting)	76
Fig. 4.10	Result of Seepage Analysis(Depth of Grouting=15m)	76
Fig. 4.11	Result of Seepage Analysis(Depth of Grouting=18m)	77
Fig. 4.12	Result of Seepage Analysis(Depth of Grouting=20m)	77



Summary

This study is on the waterproof effect for ground reinforcement by the water-glass chemical grouting method. To study the waterproof effect, firstly, in-situ permeability tests were performed on the bore-holes at the construction sites in Jo-chun and Pyung-dae, which are two of construction sites for the wastewater treatment plant for Buk-jeju province. Secondly, constant head & variable-head permeability tests were performed on the scoria of Jo-chun construction site in a laboratory. Finally, the results of the permeability tests were compared with the estimated value by the finite element method.

The test results are summarized as follows,

According to the result of laboratory permeability test on the scoria, it is found that the waterproof effect on the scoria is related to porosity. As the value of porosity is decreased, the infiltration quantity is decreased and the waterproof effect is unimproved. On the contrary, as the value of porosity is increased, the infiltration quantity is increased and the waterproof effect is improved. If the infiltration quantity is increased, it is impossible to perform an economical construction. Thus, before the construction, to determine a correct porosity is very important.

Considering a waterproof effect according to the curing period, the waterproof effect is improved for seven days. But the values of a coefficient of permeability converge into a single point after seven days. In order to judge a waterproof effect after applying the water-glass

chemical grouting method, it is takes seven days for curing.

Judging from the result of laboratory permeability tests on the scoria synthetically, it is expected that there is little difficulty in applying the water-glass chemical grouting method to waterproof on the scoria, the reclaimed soil, the sedimentary soil, and the vesicular rock with joint.

Comparing the result of the permeability test after construction with that of the seepage analysis, it is suitable for the construction of the water-glass chemical grouting method to control the gel-time easily when the condition of seepage analysis doesn't consider seepage velocity but consider ground water level.



I. 서론

1. 연구배경

지리적으로 한반도의 최남단에 위치한 제주도는 화산도로서 신생대 제 3기말에서 제 4기초에 걸쳐 수십 차례의 화산활동에 의해 형성된 휴화산으로 제주도의 지질학적 특성은 육지의 지질학적 특성과 많은 차이를 보이고 있다. 사면이 바다로 둘러싸인 섬이라는 지리학적 위치와 총 강우량이 연간 33억 9천만 m^3 (연강우량 1,872mm)이고 증발산량이 총 강우량의 37%인 12억 6천만 m^3 이며 직접 유출량이 총 강우량의 19%인 연간 6억 4천만 m^3 그리고 지하수 함양량이 총 강우량 대비 44%인 연간 14억 9천만 m^3 에 이르는 지하수는 제주도의 저지대 및 고지대에 걸쳐 수십 개의 대수층과 저부수층이 반복적으로 분포한 지층구조를 통하여 상당부분 해안을 따라 용출되고 있으며 조석간만의 영향으로 해안인접지역의 지하수위가 상당히 유동적인 특성을 가지고 있다(농어촌진흥공사, 2000). 따라서 해안인접지역의 건설공사를 수행하기 위한 지반조사나 구조물의 축조를 위한 하부 기초공사시 많은 어려움을 겪고 있다.

현재 제주도는 동·서부 하수종말처리시설 사업이 수행되고 있으며, 국제 자유도시 개발 등을 위해 공항, 항만, 도로 등에서 많은 건설공사가 수행중이거나 수행될 계획으로 있다.

일반적으로 지상구조물을 제외한 거의 모든 구조물에서 시공 시 누수가 발생하는 가장 큰 원인은 지하수 유입에 의하여 발생하고 있다. 이러한 지하수 유입을 근본적으로 차단하기 위하여 그라우팅 공법이 이용되고 있으나, 현장에서는 그라우팅 시공 시 제주도의 특수한 지질학적 특성에 의해 공사수행에 많은 어려움을 겪고 있어 이에 대한 정리가 매우 시급한 실정이라 할 수 있다.

2. 연구목적

최근의 토목구조물은 도시의 과밀·고층화와 지가상승으로 인한 지하공간의 활용 및 활동인구의 생활반경 확대에 의한 교통문제의 해결 그리고 국가의 기간시설 확충 사업 등 토목공사가 대형화되는 경향을 띄고 있다. 이러한 문제의 해결방안의 하나로 지하 굴착심도가 점차 깊어지고 있는 추세이며, 이에 따라 지반 굴착 시 용수(湧水), 히빙(Heaving), 보링(Boring), 실드(Shield)절단부의 붕괴, 실드붕괴에 의한 지표면의 침하, 흩박이 벽에 가해지는 토압의 증대에 대처하기 위하여 토질의 공학적 성질개선이 요구되고 있는 실정이다.

제주도의 지층은 반복된 화산활동에 의해 형성된 섬으로 화산지질의 특성상, 투수성이 큰 지층구조를 하고 있다. 또한 지하수 부존 형태가 해안을 중심으로 이루어져 해안인접지역에서의 지하구조물을 시공하는 경우 지반 굴착 시 지하수 유입이 쉬운 조건이다. 따라서 지반굴착 시 지하수유입을 근본적으로 차단하기 위해, 현재 건설현장에서는 차수 또는 지반개량 목적으로 그라우팅 공법이 널리 이용되고 있다. 그러나 제주도의 지질특성은 육지와 상이하기 때문에 차수를 목적으로 그라우팅을 시공하는 경우, 차수효과에 대한 구체적이고 포괄적인 자료가 미미하다.

또한 굴착지반에 침투한 L.W(불안정 유리 : Labiles Wasser Glass)와 같은 물 유리게 약액은 주입 후 지하수의 흐름에 의한 용해, 유실 그리고 용탈현상에 의하여 그 효과가 시간이 흐를수록 떨어지게 된다. 지반에 주입된 약액은 침투과정에서 토립자 사이의 자유수 및 흡착수와 혼합되어 용해되며, 이러한 용해는 약액의 농도저하와 Gel-time을 지연시켜 고결을 저해하며 지하수의 유통이 있고 침투거리가 길거나 Gel-time이 긴 경우 특히 심하다. 그리고 약액 주입 후 지하수와 접하는 부분에서 불용성 gel화 물질을 제외한 물질은 용탈현상 즉, Syneresis현상이 일어난다. 이처럼 용해와 용탈은 지반의 투수계수를 증가시켜 차수효과와 강도저하로 인한 장기적인 내구성을 저하시킨다.

본 연구는 해안인접지역에서의 물유리계(L, W) 그라우팅에 의한 지반보강 시 차수효과를 규명하는 것을 목적으로 한다. 물유리계(L, W) 그라우팅공법을 이용하여 지하수에 의한 누수에 대한 차수효과를 기대하기 위해서는 지반 보강을 위한 그라우팅 주입공이 불균질한 지반을 대상으로 하기 때문에 설계대로 주입을 하여도 주입효과에 대한 확신을 갖기 어렵다. 그러므로 주입율은 주입량의 척도로서 지반의 차수효과 또는 강도를 증대시키는데 있으며 경우에 따라서는 경제성과 직결되는 것이므로 이론적인 주입율 산정방법이 있으나 실제에 있어서 적절하지 못하므로 경험값의 도입이 절실하다. 이를 위해 현재 물유리계(L, W) 그라우팅공법을 적용하고 있는 현장을 선정하여 그라우팅 시공 전·후의 현장부수시험결과와 현장에서 채취한 시료에 대한 실내 부수시험결과를 비교분석 검토하고, 시공 전 지질 주상도 및 시추된 암석 코어(Core), 현장부수시험결과를 바탕으로 침투해석을 실시하여 물유리계(L, W) 그라우팅공법에 의한 차수효과를 고찰하고자 한다.



II. 주입 이론

1. 그라우팅 주입공법의 개요

그라우팅(Grouting)이란 지반특성을 목적에 부합하게 개량하기 위해 특별한 성질을 갖는 주입재(注入材)를 중력(重力)이나 펌프를 이용해 충전(充填)하거나, 지반 속으로 침투시키는 것으로 정의된다(전병식, 1997). 이러한 그라우팅은 사용되는 주입재료에 따라 시멘트계, 철분질계(鐵粉質系), 아스팔트계, 약액(藥液) 그라우팅 등으로 구분되며 사용목적에 따라 차수(遮水) 또는 강화(強化) 그라우팅 등으로 구별된다. 초기의 주입재료에는 시멘트, 물 그리고 점토 등을 사용한 시멘트계 그라우팅이 이용되었으나, 1919년 약액 그라우팅(Chemical Grouting)이 발명되면서 사용범위가 한층 넓어졌으며 최근에는 비닐중합(Vinyl Polymerization)과 크롬리그닌(Chrome Lignin)의 발견으로 그라우팅 기술은 급진전하였다. 이러한 기술적 발전으로 그라우팅공법은 수압이 강한 누수부위를 순간적으로 지수(止水) 또는 차수 및 지반강화를 목적으로 각종 토질지반의 보강 및 토목 현장에서의 압반이나 터널 굴착, 지하구조물 등 광범위하게 사용되고 있지만 본 연구에서는 토질지반의 차수를 목적으로 그라우팅을 하는 것을 단적으로 말하며, 지반 내에 맨젯튜브(Manchette Tube)를 삽입 설치하여 천공층과 맨젯튜브 사이의 공간을 벤토나이트계 규산소다를 주입하여 일정한 시간이 경과한 후 지반의 고결, 응고시키는 물유리계(L.W) 그라우팅공법을 통하여 지반의 차수 및 지수효과를 높이는 것을 그 목적으로 한다.

2. 주입공법

주입공법은 주입재의 혼합방식, 주입순서, 주입관의 설치방법, 주입재의 Gel-time 등에 의하여 분류된다.

1) 주입재의 혼합방식에 의한 분류

주입재의 Gel-time의 길고 짧음에 따라 1 Shot, 2 Shot, 1.5 Shot의 세 가지 혼합방식이 사용되고 있다. 가장 보편적으로는 1.5 Shot 방식이 많이 쓰이나 지하수 유속이 크지 않을 경우에는 1 Shot 방식을 쓰며 용수 및 누수가 많은 경우에는 2 Shot 방식이 사용된다.

(1) 1 Shot 방식

주입재를 이루는 모든 재료를 동일한 믹서에 혼합한 후, 1개의 펌프와 단관에 의해 지반에 주입하는 방식으로서, 경화시간이 수십 분 정도로 길지 않으면 적용할 수 없기 때문에 통상 시멘트계의 주입재에 이용되고 있으며, 그 밖의 주입재에서도 Gel-time이 20분 이상인 경우에 이용이 가능하다. Stainer-공법, 이중관 Double Packer-공법 및 이중관 복합 주입공법의 일부에서 채택하고 있다.

(2) 2 Shot 방식

주입재의 Gel-time이 극히 짧으면 주제(主劑)인 A액과 경화제(硬化劑)인 B액은 혼합한 후 곧 Gel화하므로 지층에 액체인 상태로 주입할 수 없다. 따라서 A액과 B액을 각각 별도의 믹서에서 혼합제조하고, 분리된 경로를 통해 주입관의 토출관까지 보낸 후 주입관 선단에서 분출시 혼합시키는 방식이다. Gel-time이 수초이내인 급결주입재에 적용하며 이중관 Rod 주입공법과 이중관 복합 주입공법 등은 대부분 이 방식이다.

(3) 1.5 Shot 방식

1 Shot 방식과 2 Shot 방식의 중간형태로 Gel-time이 수십 초에서 수 분 정도인 혼합방식에 적용된다. 2 Shot 방식과 같이 별개의 믹서와 송액계통을 사용하지만 A액과 B액은 주입관 시점에 있는 Y자 형태의 관에서 합류되어 지중에 주입된다. 이 방식을 채택하고 있는 대표적인 공법으로는 물유리계(L, W) 그라우팅공법이 있다.

2) 주입관의 설치방법에 의한 분류

(1) 단관 Rod 주입공법

시기적으로 주입공법 중 가장 오래된 이 방법은 1.5 Shot 방식을 적용하고 있으며 별도의 주입관을 설치하지 않고 Boring Rod를 그대로 주입관으로 이용하는 것으로, 착공작업의 종료와 함께 바로 주입작업으로 이행되기 때문에 작업이 간단하고 경제적이다. 그러나 주입제의 전량이 주입관 선단에서 토출되므로 주입저항이 증가하는 결과 Rod 주변과 지반사이의 공극을 따라 주입제가 지표면으로 유출되며 의도하지 않은 구간에도 주입이 되는 단점이 있다. 따라서 암반의 균열에 대한 주입을 제외하고는 사용되는 예가 적어지고 있다.

(2) Strainer 주입공법

측벽(側壁)에 직경 2~5mm 정도의 구멍이 많이 뚫린 일명 Strainer관이라 불리는 주입관을 이용하여 주입하는 공법으로서 각 구멍을 통하여 주입하는 다유선평면(多流線平面) 주입방식이기 때문에 주입압은 상당히 떨어지지만 균일한 침투가 가능하다. 이 공법은 하강식 스텝주입에 의해 주입제의 지표유출이 억제되며 토층 구성에 따라 스텝의 분할이 가능하고, 주입관의 설치 및 주입작업이 독립되어 있어 작업의 효율성이 높으며 여러 주입공을 동시에 주입할 수 있으므로 인접공과의 상승효과를 기대할 수 있는 장점이 있는 반면 주입관의 가공작업과 설치작업이 필요하며 주입단가가 Rod주입에 비해 높으며, 경제심도가 20m정

도로 주입심도에 한계가 있고 주입관을 원칙적으로 회수하지 않으므로 차후 굴착작업을 할 때 어려움이 있는 단점이 있다.

(3) 이중관 Double Packer 주입공법

프랑스에서 개발된 Soletanche Tube-a-Manchette공법이 그 원형인 이 공법은 일정간격으로 구멍이 뚫려 있고 고무슬리브로 피복된 외관을 지중에 고정된 뒤 Double Packer를 장착한 내관을 외관 소정의 위치에 삽입하고, 관 밖에서 혼합한 1액을 압송하여 주입하는 공법이다. 본 공법은 불균질한 지반을 포함하여 대부분의 토질에 적용 가능하며 각 주입 포인트를 임의의 시기에 수압시험이나 시험주입으로 체크할 수 있어서 시공관리 및 주입효과관정이 용이하다. 또한 지상으로 분출하는 것을 방지하기 위하여 슬리브(Sleeve) 파이프와 Boring 공벽사이를 먼저 그라우트하고 슬리브 파이프 속에 Packer를 실시하는 것에 의해 반복주입이 가능하며 단위 토출량을 작게 하여 비교적 긴 Gel-time을 이용하기 때문에 높은 침투성을 얻을 수 있는 공법이다.



(4) 이중관 Rod 주입공법

이중관 Rod 주입공법은 Gel-time이 수 초 정도로 매우 짧기 때문에 2 Shot 방식이 이용된다. 이중관 로드를 이용하여 A액과 B액을 별도로 압송하며 이중관 로드의 선단에 있는 특수장치에서 합류 또는 혼합시켜 지반 내로 분사시킨다. 2 Shot 방식에 이용한 순결성 물유리 약액을 주입하는 방식은 굴착부의 국부적 용수를 멈추게 하는데 효과가 있다.

(5) 특수 이중관 주입공법

일본 건설성 토목연구소에서 개발된 공법으로, 1개의 주입관으로 순결형 주입과 Gel-time이 긴 침투주입 등 2종류의 주입을 가능하게 한 주입공법이다. 즉, 특수한 이중관을 써서 소정의 깊이까지 보링한 후 우선 순결 배합의 약액을 1차로 주입하여 팩커(Packer)효과를 얻은 후 계속해서 Gel-time이 긴 배합액을 주

입하는 방법으로 필요시 1차 주입과 2차 주입의 공정을 반복함으로써 한정된 범위 내에 균질한 고결이 이루어지도록 한다.

(6) 고압분사주입공법

연약지반의 심층혼합처리공법의 일종으로서 100~300kg/cm²의 초고압 제트에너지를 이용한다. 저압 주입에 의하여 가능한 한 지반의 골격을 파괴하지 않고 그 간극에 주입재를 침투 또는 할렬주입 시키는 일반적인 주입공법과는 달리 적극적으로 지반을 파쇄하여 치환 또는 혼합 충전하는 것으로서 시공원리가 상이하 여 약액 주입공법에 포함시키지 않는 경우도 있다. 시공과정을 대략적으로 살펴 보면 보통의 로터리 보링과 마찬가지로 소정의 깊이까지 천공한 후 고화재를 함유한 고압분사로 로드를 회전시키면서 뿜아 올림으로서 원주상의 개랑토를 조성하는 방법이다.



3. 주입재의 분류와 특성

1) 주입재의 분류

주입재는 광의(廣意)의 약액과 협의(狹意)의 약액으로 구분할 수 있다. 광의의 약액은 현탁액의 비약액계 및 약액계를 말하며 협의의 약액은 현탁액형 및 용액형 양자를 말한다. 비약액계의 가장 대표적인 시멘트는 강도나 경제적인 면에서 가장 일반적이긴 하지만 조립토 이외에는 이용할 수 없으며, 시멘트 자체가 입자로 구성되어 있어 압반의 균열이 협소하거나 연장거리가 먼 경우나 경화되기까지 많은 시간이 요구되어 긴급을 요하는 용수, 누수 등의 지하수처리나 유수(流水)층에서의 주입효과는 기대할 수 없는 단점이 있다. 현탁액형 주입재인 벤토나이트나 아스팔트 등은 주입재에 의한 차수효과는 기대할 수 있으나 강

도증진에는 실효성이 없다. 일반적으로 물유리계 약액 및 고분자계 약액은 점성이 낮고 입자가 없어서 시멘트로는 기대할 수 없는 협소한 균열 깊숙이까지 주입충전 될 수 있으며 시멘트와의 병행하여 이용하면 부족한 강도를 증진시킬 수 있다. 그러나 현재 고분자계 약액은 공해문제로 특수한 목적 외에는 거의 이용되지 않으며 대부분 물유리계 약액이 주종을 이루어 이용되고 있다.

물유리계 약액은 차수효과가 크고 공해의 우려가 적고 경제적인 이점 때문에 어느 약액보다 많이 이용되고 있다. 점성은 다른 주입재에 비해 낮은 2~3cps로 침투성은 양호하나 고결토의 강도가 만족스럽지 못한 결점이 있다. 그러나 제한된 범위내에서 시멘트 또는 마이크로 시멘트(Micro Cement)와의 병용으로 강도를 증진시킬 수 있다. 현재 국내외에서 쓰이고 있는 약액은 공해문제로 현탁액형과 물유리계가 대부분이며 최근에는 우레탄계의 사용빈도가 확대되고 있는 추세이다.

본 연구에서는 일반적으로 이용되고 있는 물유리계를 중심으로 경화제, 주제(主劑), 수소이온농도(pH), Gel-time에 따라 분류하였다. Table 2.1는 재료에 의한 주입재의 일반적인 분류를 나타내었다.

(1) 경화제의 종류에 따른 분류

물유리계 주입재의 분류방법에는 여러 가지가 있으나 첨가되는 경화제의 종류에 따른 분류가 가장 일반적이다. 물유리계 주입재는 물유리 용액을 기본으로 하여 여러 가지 종류의 경화제를 기본으로 하고 있다. 경화제가 현탁액형인지 용액형인지에 따라 지반 내로의 침투성 및 주입 후 지반개량 효과가 다르기 때문에 각각 구분하여 사용되고 있다. 용액형은 경화제가 무기화합물로 이루어진 무기계와 유기화합물을 포함하는 유기계로 구분된다. 현탁액형은 경화제가 시멘트나 벤토나이트로 이루어진 것을 말한다. Table 2.2는 경화제의 종류에 따른 분류를 나타내었다.

Table 2.1 Classification According to Grout Material(천병식,1997)

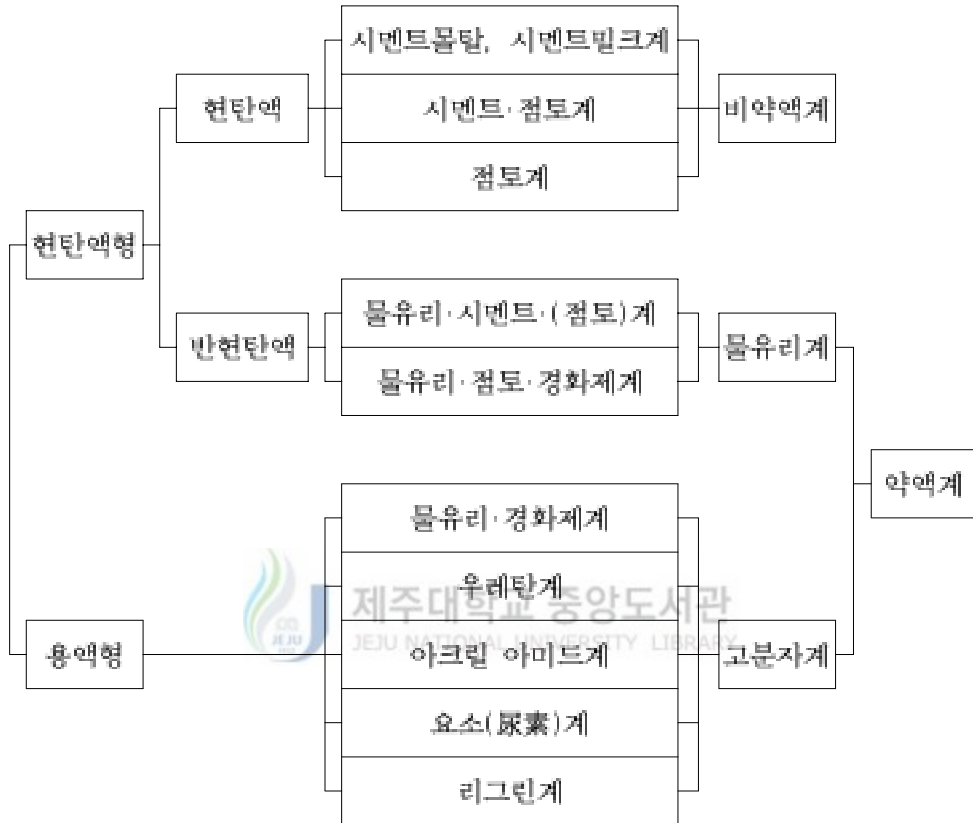
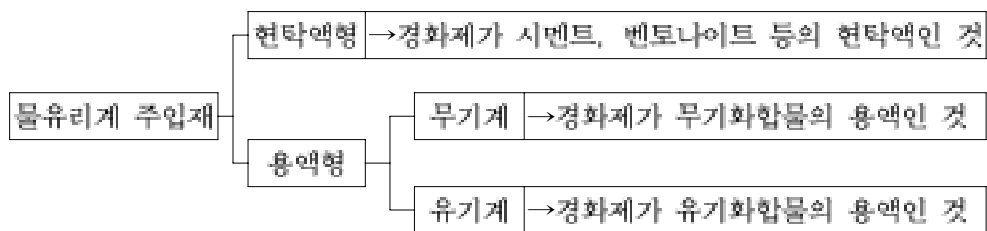


Table 2.2 Classification According to Hardener(천병식,1997)



(2) 주제(主劑)의 종류에 따른 분류

종래부터 이용되고 있는 물유리계 약액의 주제는 물유리 용액을 물로 희석한 소위 알칼리성 주제이다. 그러나 근래에 들어서 묽은 황산에 물유리 용액을 서서히 용해시켜 수소이온농도 pH가 약 1정도인 실리카졸이라고 불리우는 산성주제가 개발되어 사용되고 있다. 알칼리성 주제에는 JIS 3호 물유리 용액이 일반적으로 통용되고 있지만 주입목적에 따라 사용되는 농도는 다르다. 주제와 경화제를 혼합했을 때의 전체중량에 대하여 물유리 용액의 농도가 25%인 것을 표준으로 하나 10% 혹은 35%인 것도 사용되고 있다. 산성주제는 경화제와 반응하여 중성이 되도록 하기 위해 개발된 것이기 때문에 알칼리성 경화제를 이용한다.

(3) 고화물의 수소이온농도(pH)에 따른 분류

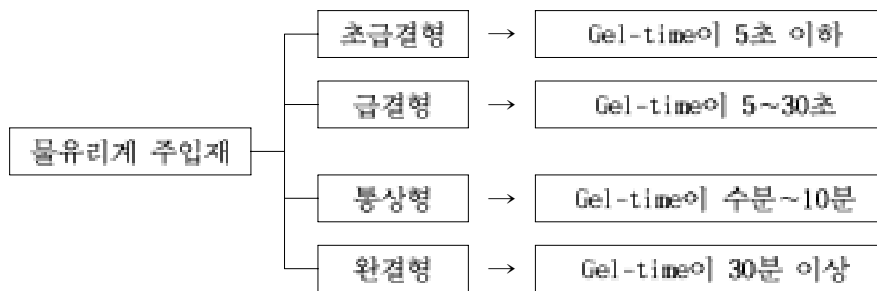
중성의 고화물을 얻는 방법에는 직접법과 간접법이 있다. 직접법은 알칼리성 주제와 산성 경화제를 이용하는 방법으로서 두 성분이 화학적으로 당량(當量)이 될 필요가 있다. 통상적인 조건에서 알칼리성 주제에 산을 가하면 수소이온농도 pH가 10~12정도에서 고결하므로 중성 고화물을 얻을 수 없다. 직접법으로 중성 고화물을 얻기 위해서는 재료 또는 공법상 특별한 배려가 필요하고 이에 따라 많은 기술이 개발되고 있다. 간접법은 산성주제와 알칼리성 경화제를 이용하는 방법으로서 통상적인 Gel-time의 범위로 시공할 수 있다.

(4) Gel-time에 의한 분류

일반적으로 Gel-time이 수분~10분 정도인 주입재가 사용되었으나 환경에 끼치는 영향을 줄이기 위한 공법 개발이 추진되어 Gel-time을 극단적으로 짧게 하여 주입하는 공법과 이와 반대로 대단히 길게 하여 주입하는 공법이 개발되었다. Gel-time이 5초 이하인 것을 초급결형이라고 하고 5~30초인 것을 급결형이라 한다. 이처럼 Gel-time을 짧게 하면 지반에 주입된 직후 경화하므로 미반응인 상태로 유실될 가능성이 적어져 지하수 오염등 환경에 대한 영향을 줄일 수 있다. 또한 Gel-time을 30분 이상 길게 한 완결형에서도 주입 전 주제와 경화제

를 충분히 혼합할 수 있기 때문에 미반응인 채로 유실될 가능성이 적어진다. Table 2.3은 Gel-time의 따른 주입재의 분류를 나타내었다.

Table 2.3 Classification According to the Gel-Time(천병식,1997)



2) 주입재의 특성

(1) 약액의 유동성

모든 유체는 전단력이나 용력이 작용할 때 저항하지 않고 연속적으로 변형하는 물질로서 일정한 공간에 힘이 가해질 때 움직이게 된다. 따라서 약액도 주입 대상지반의 간극 내로 압입되면 일정한 시간이 경과함에 따라 유동을 하게 되며, 이때의 유동거리는 이론적으로 Gel-time, 주입속도, 주입압력, 주입방식 및 지반의 투수계수, 간극율, 지하수의 유동, 단시간 내의 주입액의 점도 변화 및 겔화에 따르는 유동체의 복잡한 침투구조 및 약액의 점도에도 많은 영향을 받게 된다. 약액의 유동에 영향을 주는 점성에 대하여 살펴보면 약액도 일반적으로 유체이므로 용액형의 경우에는 전단응력의 변화에 따라 변형률이 일정한 뉴턴 유체(Newtonian Fluid)와 현탁액의 경우에는 전단응력 변화에 따라 변형률이 일정하지 않은 즉, 변형률이 전단응력에 선형관계를 이루지 못하고 비선형적인 관계를 이루는 비뉴턴 유체(Non-Newtonian Fluid)로 분류할 수 있다. 뉴턴 유체에서는 흐름을 층류(層流)로 가정하고 점성계수는 온도에 따라 변화하므로 일정한 온도에서의 어느 유체의 유동을 일정한 속도로 유지하기 위해서는 속도구배

du/dz 에 정비례하는 전단응력 τ 를 유체에 가한다고 보았다. 그러므로 뉴턴의 점성법칙(Newton's Viscosity Law)에 의한 점도 μ 는 식 2.1과 같다.

$$\mu = \frac{\tau}{du/dz} \quad (2.1)$$

따라서 뉴턴 유체의 경우 유체의 유동성은 점도 μ 로 나타내는데, μ 가 커지면 τ 가 커져 마찰력이 증가되며 그 결과 유동성이 감소되는 반면 μ 가 작아지면 τ 도 감소하여 유동성은 증가하게 된다.

(2) 약액의 침투성

유동성을 가지고 있는 화학약액은 흙의 입자간의 간극이나 토층, 암반의 절리를 따라서 침투를 하게 된다. 약액주입은 약액을 지반에 침입시켜 어느 장소에 까지 가서 경화를 하여야만 목적이 달성되기 때문에 약액의 침투성은 약액의 가장 중요한 특성 중 하나가 된다. 이는 약액의 점도에 의존하는 경향을 나타내고 약액의 초기 점도는 주로 주입재의 농도에 따라서 결정된다. 또한 Gel-time에 따르는 침투고절거리도 약액의 배합조건과 주입압력에 따라서 변화하므로 절화의 안전성이 약액의 침투성에 크게 영향을 미치게 된다.

(가) 시멘트 약액의 침투성

시멘트주입은 시멘트 현탁액을 펌프로 압송하여 지반 내에 침투시키는 것으로 시멘트가 물과 혼합하여 수화반응을 일으켜서 졸(Sol)상태에서 겔(Gel)이 되는데, 이 때 요구되는 시간은 온도에 따라 변화된다.

시멘트는 입자로 된 현탁액이며 점성이 커서 간극이 작은 세립토층에 주입시키는 상당히 어려움이 많으므로 암반의 균열이 협소하거나 주입거리가 멀 경우에는 주입효과를 기대하기 어려우므로 분산제를 첨가하여 침투성을 증가시킨다.

(나) 물유리계 약액의 침투성

물유리계 약액은 무공해성 때문에 일반적으로 널리 이용되나 점도가 비교적 높아서 침투성이 양호하지 못한 단점이 있어 시멘트와 병용하여 이용되고 있다. 주입 초기에는 저분자 용액이지만 시간이 경과함에 따라 규산과의 중합으로 고분자화하여 콜로이드의 거대화가 진행된다. 따라서 콜로이드화 한 규산은 토립자의 여과작용에 의하여 토립자와 토립자간의 점점 부근에서 침적하며 토립자의 간극을 통하여 침투범위를 넓혀가지만 이 간극이 모두 메워지면 주입액을 받아 드리지 못하므로 그 시점에서 사실상 주입이 종료된다. 초기의 점도는 일반적으로 고분자계보다 크고 시간의 경과에 따라 증대한다. 겔화 직전까지 점도가 증대되는 경향 때문에 침투성은 작아진다.

(다) 고분자계 침투성

고분자계 약액은 일반적으로 물과 같은 유동성을 지니고 있기 때문에 주입재 중 가장 침투성이 양호하다. 고분자계 폴리우레탄의 경우 입경이 0.03mm 이상인 실트질 및 모래 지반, 암의 경우 0.01~0.03mm 이상의 미스균열이 있는 지반에 침투 주입이 가능하다. 그러나 우레탄 주입액의 Gel-time이 60초 정도로 짧아 주입길이가 6m 이내로 제한되어, 토사 및 단면이 큰 터널의 보조공법으로서의 적용 시 어렵다는 단점이 있다.

4. 주입형태

약액주입에서 이상적인 주입형태는 침투주입이다. 침투주입이란 간극에 주입재가 침투하여 간극수를 주입재로 치환(置換)하는 것으로서 이 때 흙의 골격이 흐트러지지 않고 유지되며 주입재가 간극에서 고화(固化)하여 토립자를 결합시켜 흙의 점착력이 높아짐과 동시에 불투수화 하는 것이다. 그러나 "주입범위 내

에 전혀 간극이 없어 고루 주입이 되어 미개량 부분이 없도록 할 수 있는가” 라는 문제에 부딪치게 된다. 이는 미개량 부분으로 인한 사고가 발생할 우려가 있기 때문이다. 그러나 현실적으로 미개량 부분이 없는 침투주입이란 매우 어려우며 이러한 미개량 부분을 사전에 발견하는 것도 쉽지 않다. 그럼에도 불구하고, 침투주입이 여전히 이용되는 이유는 다소 미개량 부분이 존재하여도 실용상 개량효과를 갖는 경우가 많기 때문이다.

실제의 현장주입에서는 침투주입상태로 되지 않고 할렬주입의 형태로 주입재가 맥상(脈狀) 또는 관상(管狀)으로 불균일하게 주입된다. 그러나 이러한 경우를 위한 개량이론은 아직까지 정설이 없는 실정이다. 할렬주입은 지반을 주입압으로 할렬하면 소위 'Hydraulic Fracturing 현상' 즉 수압에 의해 지반에 크랙이 발생하는 현상이 생겨 눌러 벌어진 간극 속으로 주입재가 들어가기 때문에 흠에 흐트러짐이 발생하는 것은 자명하다. 그러므로 흠의 흐트러짐을 보완할 필요성이 있으며 따라서, 할렬주입에 의한 맥상부로의 유입방향, 분포상태, 호모겔(Homo-gel)의 강도 등이 선결할 문제로 남아있다. 할렬주입은 주입압이나 겔화 시간에 의해 맥상 호모겔의 분포범위가 크게 달라지므로 합리적인 주입계획 및 설계가 어렵다. 할렬주입이 과도하면 주입재가 설계범위를 크게 벗어나게 되며 이런 경우 개량효과는 기대할 수 없고 오히려 마이너스 효과를 자초하게 된다. 최근에는 할렬주입을 실시한 지반에 침투주입을 가할 수 있는 2단 구조의 새로운 복합주입공법도 실시되고 있으나 침투주입이 어느 정도 가능한 사질지반에 한정되어 이용된다.

Magg의 이론에 의하면, “실용적 주입속도가 할렬하지 않은 상태로 실용적 주입속도로 침투주입이 되기 위해서는 지반의 투수계수, 주입압, 사용 주입재의 Gel-time이 길 경우는 침투주입이 될 조건이 된다”고 밝힌 바 있다. 또한 “주입재의 점성을 낮추면 주입압도 저하하므로 침투주입을 위한 요건이 될 수 있다”라고 하였으나 용액형 물유리계의 점성이 2~4cps인 점을 감안한다면 물의 점성인 1cps로 점성을 저하시키기는 현실적으로 어렵다.

R. H. Karol에 의하면 “No. 200체를 통과한 실트 비율이 20%를 상회하면 주입이

어려우며 30%를 초과하면 주입이 불가능하다”고 하였다. 약액주입의 가능성을 검토하기 위해서는 입도상태 보다는 투수계수를 이용하는 것이 더 실용적이다. R. H. Karol은 투수성에 관하여 다음과 같은 기준을 제시하였는데 “투수계수, $k \leq 10^{-6}$ cm/sec인 경우는 주입이 불가하며 $10^{-5} \leq 10^{-6}$ cm/sec인 경우 점성이 5cps인 주입재료는 주입이 불가하다”라고 하였다. 투수성이 양호한 지반일 경우는 토립자의 간극에 약액을 침투 고결시키기 위해 침투주입을 사용하고 사용하는 약액도 침투성이 좋은 용액형이 좋으나 반대로 투수성이 나쁜 지반에는 침투주입이 어렵기 때문에 호모질 강도가 높은 약액으로 지반전체를 개량하는 맥상주입이 오히려 효과적이므로 점성이 큰 현탁액형이 바람직하다.

5. 대표적인 주입공법



1) 물유리계(L, W) 주입공법

(1) 공법의 개요

물유리 용액과 시멘트 현탁액을 혼합하면 규산 수화물을 생성하여 겔(Gel)화한다. 이러한 현상에 착안한 독일의 Hans Jahde 교수는 1952년 치석된 물유리 용액과 소량의 시멘트를 혼합한 다음 일정시간을 기다려 위에 뜬 물을 취하여 1 Shot 방식으로 주입하는 물유리계 공법인 L, W 공법을 개발하였다. L, W는 “불안정 유리”라는 의미의 독일어인 “Labiles Wasser Glass”의 머리글자를 인용한 주입제의 약칭이다. 따라서 물유리계(L, W) 공법이란 개발된 주입제의 명칭에 따라 명명된 것이며, 물유리(L, W)제를 사용하는 주입공법을 뜻한다. Jahde의 방법은 이론상 합리적이며 침투효과도 양호하나, 시멘트가 침전하는 동안은 주입할 수 없고 Gel time의 조절이 30~60분 정도로 길어 급결형으로 이용할 수 없고 Gel-time의 조절이 어려운 점, 시멘트를 제외하고 위에 뜬 물만을 주입함으로써

재료가 낭비되는 점 등의 결점이 있다. 이와 같은 결점을 보완하여 1961년 일본의 붕구(樋口)는 개량형 LW공법인 ILW공법을 개발하였는데 이 ILW공법이 현재 널리 이용되고 있으며 통상적으로 LW공법으로 불리우고 있다. 이 방법에서는 1.5 Shot 방식에 의해 물유리 용액과 시멘트 현탁액을 주입하므로 Gel-time의 조절이 비교적 용이하고 종래의 물유리계(L, W) 공법과는 달리 재료의 낭비도 적다.

(2) 사용되는 주입재

물유리 용액을 주재(A액)로 하고 시멘트 현탁액(또는 시멘트+벤토나이트)을 경화제(B액)로 하므로 현탁액형 물유리계에 속한다. LW재에 속한 주입재에는 LW-1과 LW-2가 있다. LW-1은 일본기술연구소에서 개발한 것으로서 경화제로는 포틀랜드시멘트를 사용하고 있다. 표준배합은 주입재 1㎡ 당 물유리 350kg, 시멘트 250kg이다. LW-2는 일본철도기술연구소에서 개발한 것으로서 시멘트 입자가 침강되는 것을 막기 위해 벤토나이트를 적정량 첨가한다. 표준배합은 주입재 1㎡ 당 물유리 350kg, 시멘트 250kg, 벤토나이트 25kg이다.

(3) 적용토질

주입재의 적용성을 판단할 수 있는 가장 큰 요소로는 주입재의 침투성이라 할 수 있다. Table 2.4는 L, W재의 침투범위를 입경에 따라 나타내었다. 물유리계(L, W) 공법을 적용할 수 있는 토질은 실트질, 점성토 및 점토질 실트 외 토사 등이 있다. 주입비에 따라 입경 0.9mm이하의 토질에서는 시멘트는 침투할 수 없으나 시멘트 위에 뜬 물 및 시멘트와 반응제의 물유리만은 침투가 가능하다. 0.6mm 이하 세사층에서의 물유리계(L, W) 공법의 시공은 무리라는 것이 일반적이다. 연약한 점성토 및 실트층은 맥상으로 압입되어 침하방지 및 지반개량에 효과가 있다.

Table 2.4 The Range of Infiltration According to Grout Material(日本土木學會, 1972)

토립자의 입경(mm)		2.00		0.25		0.074		0.005	
토 질 명		력	조사	중사	세사	실트	점토		
주입 재의 종류	시멘트 현탁액	■	간극 충전						
	L.W	■	■	■	▨	▨	▨	▨	▨
	용액	■	■	■	■	▨	▨	▨	▨

주) 가. ■ 침투주입이 가능범위

나. ▨ 수지상(樹枝狀)의 침입에서 주변의 침투가능범위

다. ▨ 수지상(樹枝狀)의 호모겔 침투가능범위

(4) 주입방식



그라우팅 공법의 주입방식은 2장 2절 주입공법에서 기술되었다. 물유리계(L.W) 공법은 일반적으로 주입재를 1.5 Shot 방식으로 혼합하여 주입관 설치방식인 단관 Rod, Strainer, 이중관 Double Packer 등 현장조건에 적절한 방식을 선택하여 주입관을 설치, 설치된 주입관을 통하여 주입재를 주입하고 있다. 근래에는 맨젯튜브(Manchette Tube)를 이용하여 시공상의 효과를 얻고 있으므로, 이를 이용한 주입방식을 설명하고자 한다. 맨젯튜브라 함은 이중관 Double Packer 주입공법 중 하나인 솔레탕쉬(Soletanche) 공법에서 사용되는 주입관을 말한다. 따라서 주입공법의 측면에서 보면 L.W재를 사용한 솔레탕쉬 공법이라고 생각할 수도 있으며 주입재의 측면에서 보면 맨젯튜브를 사용한 물유리계(L.W) 공법이라고 할 수도 있다.

(5) 시공순서

첫째, 소정의 깊이까지 직경 10cm 정도로 지반을 천공하고 케이싱을 삽입한다.

둘째, 30~50cm 간격으로 주입공이 뚫려 있고 그 부위에 밸브작용을 하는 고무슬리브(Sleeve)가 부착된 맨젯튜브를 삽입한다.

셋째, 맨젯튜브의 삽입이 완료된 후 맨젯튜브와 케이싱의 사이에 적당한 Seal재를 주입하고 케이싱을 인발한다.

넷째, 상·하에 두 개의 패커(Packer)가 장치된 주입관을 맨젯튜브 속에 넣고 원하는 위치부터 주입한다. 이때 주입재는 맨젯튜브의 주입공을 통해 고무슬리브를 밀고 나와 Seal재를 파괴하며 지반 속으로 침투한다.

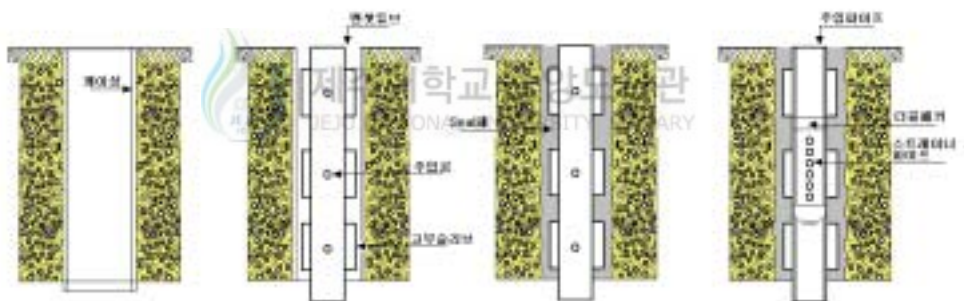


Fig. 2.1 The Stage of Construction of Manchette Tube

2) SGR 공법(Space Grouting Rocket System)

(1) 공법의 개요

SGR 공법은 Space Grouting Rocket System의 약자로서 물유리계 주입재를 사용하는 이중관 복합 주입공법의 일종이다. 이 공법은 대상지반에 대하여 목적범위를 보다 확실하게 개량하기 위하여 Rocket이라 불리는 특수한 선단장치와 3조식(槽式)교반장치를 갖추고 있으며, 대상지반에 형성시킨 Inducement Space라

블리는 유도공간을 통하여 급결성과 완결성의 주입재를 저압에 의해 연속으로 복합주입 한다. 종래의 주입공법은 주입재를 주입노즐(Nozzle)을 통해 직접 지반 속으로 방출하기 때문에 균일하게 침투시키기에는 무리가 있다. 따라서 Strainer와 같이 주입공이 많이 설치된 것을 이용하여 지반과의 접촉면적을 넓게 하는 방법을 취하고 있다. 또한 모래로 구성된 지반에 있어서 입자간의 침투를 도모하기 위해서는 보통 Gel-time이 긴 주입재를 사용하는 것이 바람직 하지만 목적범위 밖으로 유출되는 양이 많게 되며, 이와 반대로 Gel-time을 짧게 하면 백상으로 주입되어 개량되지 않은 부분이 발생한다. 이러한 문제에 대처하기 위해서, 본 공법에서는 공간을 형성시켜 주입재와 지반과의 접촉면적을 극대화하고 개량효과의 형상을 도모하고 있다. 그리고 Strainer관 등을 지층에 남겨 놓지 않으므로 유리한 점이 많다. SGR 공법은 Gel-time에 따라 짧은 것으로부터 중간 정도 그리고 긴 Gel-time까지 각종 그라우트를 조합에 의한 복합주입을 기본으로 한다. 그러므로 SGR 공법은 점성토에 대하여는 원지반을 교란시키지 않으며 사질토에서는 침투이론에 부합하는 주입이 가능하다.



(2) 사용되는 주입재

SGR 공법에서 사용되는 주입재는 물유리 3호를 주재로 하며 무기계 표준 강도형에서부터 유기계 고강도형까지 여러 종류가 있어 대상지반의 토질과 주입목적에 따라 폭 넓은 선택이 가능하다. SGR 공법에서 사용되는 주입재로는 주입대상의 지질 및 개량목적에 따라 다양하다. Table 2.5는 저압복합주입과 무공해성으로 개발된 그라우트를 각종 목적에 맞게 무기표준강도로부터 유기초고강도형에 걸쳐 구분하여 나타내었다. 각각의 그라우트를 임의로 A형에서 H형까지 구분하였는데 각각의 형들을 간략히 살펴보면 D와 H형은 대간극지층이나 암반 균열대에 적합하며 E형은 자립도가 대단히 좋은 지층의 단순 지수용으로 경제적이거나 있으며 F형은 지수 및 지반의 보강효과를 겸용할 필요성이 있을 때 이용되나 복합주입 시 사용약액을 설계 목적에 따라 별도 조합하여야 한다. D형 및 F형 그리고 H형은 설계 시 Groutability를 사전에 검토하여야 한다. A, B, C, G

형인 경우 설계 목적에 부합하는 범위 내에서 경제성을 비교하여 선택하여야 한다.

Table 2.5 Standard Strength of Organic & Inorganic Matter in SGR Method
(전병식, 1997)

주입재	Type	분류	Gel-time	1일 후 일축압축강도	
				Homogel	Sandgel
SGR - 1호	A형	무기계 표준강도처방 (용액형)	Shot	0.5 kg/cm ²	4.0 kg/cm ²
SGR - 2호			Middle		
SGR - 3호	B형	유기계 고강도처방 (용액형)	Shot	1.0 kg/cm ²	6.0 kg/cm ²
SGR - 4호			Middle		
SGR - 5호	C형	유기계 초고강도처방 (용액형)	Shot	2.0 kg/cm ²	10 kg/cm ²
SGR - 6호			Middle		
SGR - 7호	D형	무기계 시멘트강도 (현탁형)	Shot	1.0 kg/cm ²	10 kg/cm ²
SGR - 8호			Middle		
SGR - 9호	E형	무기계 지수강도 (용액형)	Shot	0.4 kg/cm ²	3.6 kg/cm ²
SGR - 10호			Middle		
SGR - 11호	F형	무기계 M/C 강도 (현탁형)	Shot	1.0 kg/cm ²	10 kg/cm ²
SGR - 12호			Middle		
SGR - 13호	G형	무기계 고강도처방 (반용액형)	Shot	1.0 kg/cm ²	6 kg/cm ²
SGR - 14호			Middle		
SGR - 15호	H형	무기계 M/C 강도 (반현탁형)	Shot	1.0 kg/cm ²	30 kg/cm ²
SGR - 16호			Middle		

(3) 공법의 특징

다양한 종류의 주입재에 의해 지반개량을 요하는 모든 토질에 적용가능하며 메커니즘에 의해 형성된 대상 지반층의 원형관 형태의 공간을 그라우트주입의 유도공간으로 사용하는 것이 최대장점이며 시멘트를 사용하는 그라우팅에 비해 압축강도 및 전단저항력은 적으나 주로 차수와 점착력 증진의 목적으로 사용되

며 지반의 교란 없이 주입시키므로 지반 본래의 강도의 상승효과와 저지층에 균일하게 주입되고 특히 토립자의 상호위치가 외압에 의해 용이하게 변동하고 간극수가 많은 점성토층에 양호한 주입효과가 나타난다.

SGR 공법은 특수한 선단장치에 의해 주입관 선단에 공간을 만들고, 이 공간을 통해 저압으로 이중관 복합주입을 하고 Rod를 교환하지 않고 천공과 주입을 한다. 즉, 이중관 Rod의 내관으로 천공수를 보내며 천공한 후, 외관에 압력수를 보내면서 Rod를 한 스텝(Step) 들어올려 로켓(Rocket)을 돌출 시킨다. 또한 실린더 형태의 벽면을 통하여 주입재가 방출되므로 급결형에서 요구되는 압력의 1/3정도 되는 낮은 압력으로도 침투할 수가 있고 3조식 교반장치를 사용하므로 급결성과 완결성 주입재의 연속적인 복합주입이 용이하다. Gel-time은 일반적으로 급결형인 경우 6~10초, 완결형인 경우 60~120초를 표준으로 하며 넓은 면적의 공간을 이용한 저압주입이므로 지반의 교란이 적으며 인접구조물에 미치는 영향도 적다.



(4) 주입순서

이중관 Rod의 내관으로 차공수를 보내며 소정의 깊이까지 천공한다. 천공완료 후에는 외관으로 천공수를 보내면서 Rod를 1스텝(step)만큼 인발하면 특수선단장치가 돌출하며 자연히 실린더 형태의 공간이 형성된다. 이때 1스텝의 길이는 로켓이 돌출 되는 길이와 같게 한다. 내관과 외관을 통해 A액과 B액을 주입한다. 필요에 따라서는 급결성 주입재와 완결성 주입재를 연속으로 주입하는 복합주입을 실시한다. 상기에서 기술한 작업을 반복하여 예정된 부위까지 주입한다.

3) 강관 다단 그라우팅 공법

(1) 공법의 개요

터널굴착 전에 소구경 강관을 적절한 형상으로 배열, 설치하고 그 강관의 내측으로 픽커를 설치하여 그라우트재를 주입함으로써 주입재에 의한 지반의 고결

로 인하여 강관과 지반을 일체로 만들고 강관 및 주변지반의 빔(Beam)작용에 의해 터널에 가해지는 상재하중, 토압 등의 분산효과 및 경감효과를 얻는다. 또한 주입 시 물유리와 시멘트를 주(主)된 주입재로 이용하므로 차수효과 및 보강효과를 동시에 얻을 수 있다.

(2) 공법의 특징

파이프루프 공법 및 일반 그라우팅공법을 일련의 단일 공정으로 시공하는 공법으로서 터널 굴착 전에 지보재를 설치하여 상부의 토압 및 이완영역의 경감효과를 얻을 수 있으며 또한 주입재에 의한 지반의 보강으로 각 강관 사이의 간격이 있다 할지라도 토질, 압반의 전단강도를 증대시켜 지지할 수 있으며 주입을 강관 속에서 수행하므로 시공성, 경제성 측면에서 매우 유리한 공법이다. 도로, 철도횡단의 굴착보조수단, 지상 및 지중구조물 주변 통과시의 보조수단, 대단면 터널 시공시의 보조수단, 터널 갱구부 시공시의 보조수단, 하저, 해저, 단층파쇄, 불지성 지반통과시의 보조수단 등에서 활용되고 있다.



4) JET 공법(Cheical Churning Pile Method)

(1) 공법의 개요

지반개량 공법 중 고압분사공법은 심층지반을 개량하는 기술로 일반적인 압력 주입식 공법보다 훨씬 광범위하게 적용된다. 이러한 공법을 국제적 기술 용어로 Jet-Grouting 공법이라 하는데 최초로 개발한 나라는 일본으로, 1965년경부터 CCP(Cheical Churning Pile) 공법으로 실용화하여 공사현장에 응용되었다. 이 공법은 고압분사수가 분출할 때 그 수압(水壓)으로 지반을 파쇄할 수 있다는 점에 힌트를 얻어, 지반 중에 주입관을 관입한 후 수평방향으로 200kg/cm²의 고압으로 경화재(Cement Paste)를 분사하여 주입관을 회전 및 인발시킴에 따라 직경이 30~50 cm 정도의 원주형 고결체를 형성하는 공법이다.

(2) 공법의 특징

이 공법은 이중로드(Double Rod)선단에 제트노즐(Jet Nozzle)을 장착하여 지반 내에서 노즐이 한바퀴 또는 한바퀴 반을 회전시키면 자동적으로 2.5cm 상승하도록 되어 있다. 이때 노즐로부터 고압의 주입재와 에어 제트(Air Jet)를 수평방향으로 분사하여 지반을 칼로 벤 듯한 형태의 틈을 만들고, 그 곳에 주입재를 채워 넣어 파쇄 된 토사와 주입재의 혼합경화에 의해 원주형의 고결체를 형성하는 공법으로 공법의 특징을 간략하게 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 토층의 구성이나 토질에 의한 영향을 거의 받지 않으며, 필요한 장소에 경화제나 혼화제(팽창제, 지연제 등)를 주입할 수 있다.

둘째, 주입이 곤란한 세립토에도 적용이 가능하나 암반에서는 부적합하다.

셋째, 흙 속에 인공적으로 만든 간극에 경화제를 충전하는 것이기 때문에 초고압에 의한 직접적인 압력피해는 있을 수 있으나 보통의 약액 주입공법과 같이 인근의 건물이나 지하매설물에 영향을 미치는 일이 적다.

넷째, 개량 후의 차수 및 지반강도 증대의 이중효과를 나타낸다.

다섯째, 수직, 경사 어떤 방향으로도 시공이 가능하고 원주 고결체의 배치, 배열의 조합에 의해서 여러 가지의 개량이 가능하다

5) JSP 공법(Jumbo Special Pile Method)

(1) 공법의 개요

최근에 개발된 연약지반개량 공법으로 종전의 JET 공법에 에어제트를 병행함으로써 토층에 경화재 분출류의 절삭 교반능력을 더욱 높여 고결체 직경을 CCP 공법보다 크게 하는 공법을 개발하였는데 이를 JSP(Jumbo Special Pile) 공법이라 한다. 지반굴착 시 고압($200\text{Kg}/\text{cm}^2 \sim 400\text{Kg}/\text{cm}^2$ 이상)의 제트류(JET流)를 이용하여 경화재를 에어제트와 함께 복수 노즐로부터 분사시켜 지반의 토립자와 교반하여 경화재와 혼합 고결체를 형성, 지반 보강과 차수벽 공사, 기초 등에 이용하는 저진동, 저소음 공법이다.

(2) 공법의 특징

JSP 공법은 각종 구조물의 기초 지반개량이나 토압의 경감을 요하는 경우, 진동방지용 지중벽, 암반균열의 보강, 지하 구조물 보호벽 및 Under Pinning(건물 및 교량 기초), 그리고 지반에 치밀한 사력 및 전석층이 있는 경우의 말뚝 기초에서 적용될 수 있는 공법이다.

고압주입으로 지반용기 발생할 우려가 있으며 Slime발생이 비교적 많은 단점이 있다. 이 공법의 장점을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 영구적인 구조물의 기초항으로도 적용가능 하다.

둘째, 어떠한 조건과 어떠한 지반에도 적용가능 하다.

셋째, 개량후의 지반 강도, 투수 계수가 증진된다.

넷째, 저소음·저진동이며 지하 매설물의 손상등의 공해를 배제 할 수 있다.

다섯째, 소형 장치로 협소구간 시공가능하고 부지 면적의 이용률이 높으며 수 개소에 동시 시공으로 공기가 단축된다.

여섯째, 토사층이 깊더라도 개량효과 우수하다.

일곱째, 연약지반의 차수및 지반강화 우수하다.

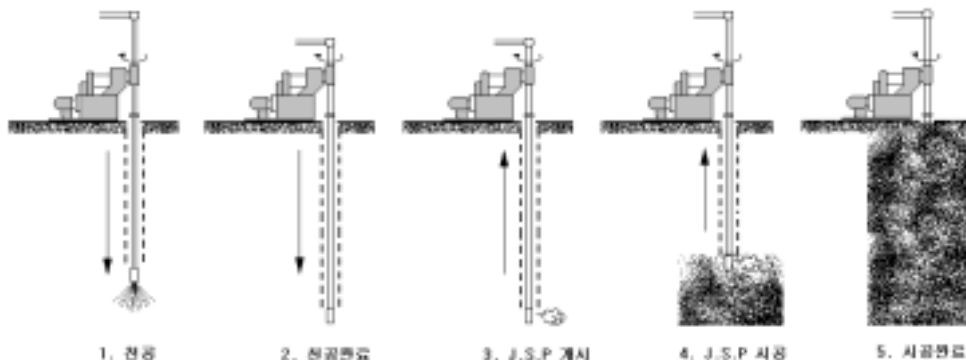


Fig. 2.2 Diagram of Construction in JSP Method(천병식, 1997)

6) RJP 공법(Rodin Jet Pile Method)

(1) 공법의 개요

최근 기계공학의 발전에 따라 400~700kg/cm² 정도의 초고압 펌프가 개발되어 분출 수압이 더욱 커지고 또한 분사시스템의 개량으로 1.2~3.0m 정도의 초대형 직경을 갖는 고결체를 형성할 수 있게 되었다. 이에 따라 기존의 JET 공법도 개량 발전하게 되었는데 이 공법을 일반적으로 Rodin-Jet-Pile의 약어인 RJP 공법이라 하며 일본 N.I. TECHNOLOGY CO., LTD와 이탈리아 RODIO 사의 합작으로 기존의 Jet Grouting 공법의 기본원리에 분사시스템을 추가하여 더욱 개량, 발전시킨 것이라 할 수 있다. 이 공법은 초고압수 분류체와 공기 분류체 및 초고압 경화 분류체와 공기 분류체를 다중관 rod의 선단에 장착된 모니터를 통해 합류시키는 2단계 분할방식분사 시스템으로 압축공기로 에워싼 청수를 초고압(300~600kg/cm²)으로 분사하여 지반을 1차 절삭 및 교반시키고 다시 압축공기로 에워싼 초고압 경화제(Cement Paste)를 초고압으로 분사(100±10 l/분)하여 지반을 2차 절삭 및 교반하면서 Rod를 회전·상승시켜 토질에 따라 직경이 2,000mm ~ 3,000mm 이상의 원주형 고결체를 지층에 만드는 경제적인 새로운 공법이라 할 수 있다.

(2) 공법의 특징

RJP 공법은 초고압 분류체가 갖는 운동에너지를 이용하여 지반의 조직 구성을 파쇄하여, 파리된 흙입자와 경화제를 혼합 교반하여 대구경의 원주형 고결체를 형성하는 공법이다. 이 공법의 구체적인 메커니즘은 Fig. 2.3에서 보는 바와 같이 상단부에서 일차적으로 초고압수와 에어제트류(Air-Jet流)를 분사하여 지층을 절삭함으로써 일정 공간을 느슨하게 한 다음, 하단부에서도 2차적으로 초고압 경화제(Cement Paste)와 에어제트를 분사하여 절삭 범위를 더욱 확대시키는 시스템이다. 공법의 특징을 간략하게 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 상용압력 300~600kgf/cm²으로 100±10 l/min~130±10 l/min의 경화제

를 토출하는 초고압이다.

둘째, 니수(泥水)펌프의 사용에 의해 대단면 개량이 가능하다.

셋째, 다중관 Rod의 회전 및 상승속도를 조정함에 따라 개량단면을 자유로이 선택할 수 있다.

넷째, 고품질이며 경제적이다.

다섯째, 공해가 전혀 없다.

여섯째, 토질 상태에 영향을 받지 않고(압반층 제외)적용이 가능하다.

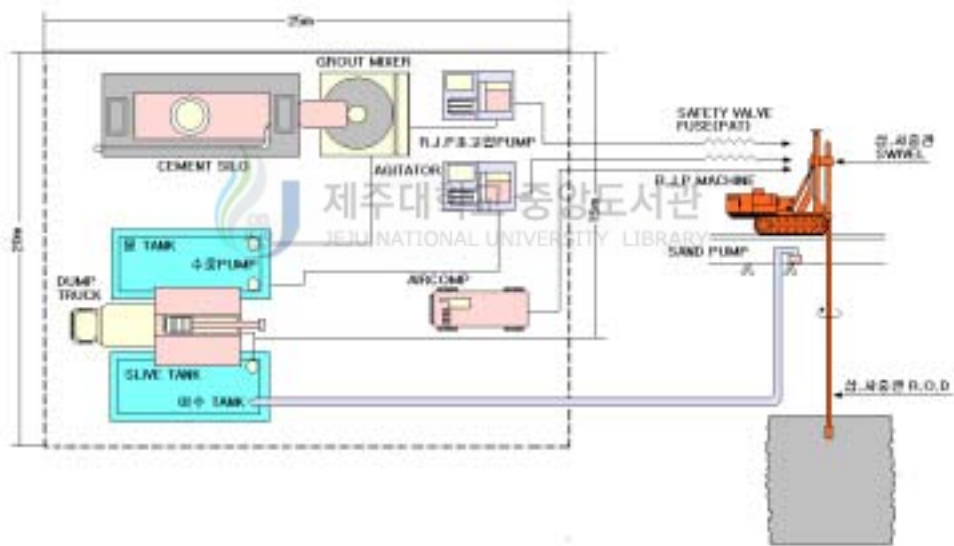


Fig. 2.3 Arrangement Plan of Construction Machine

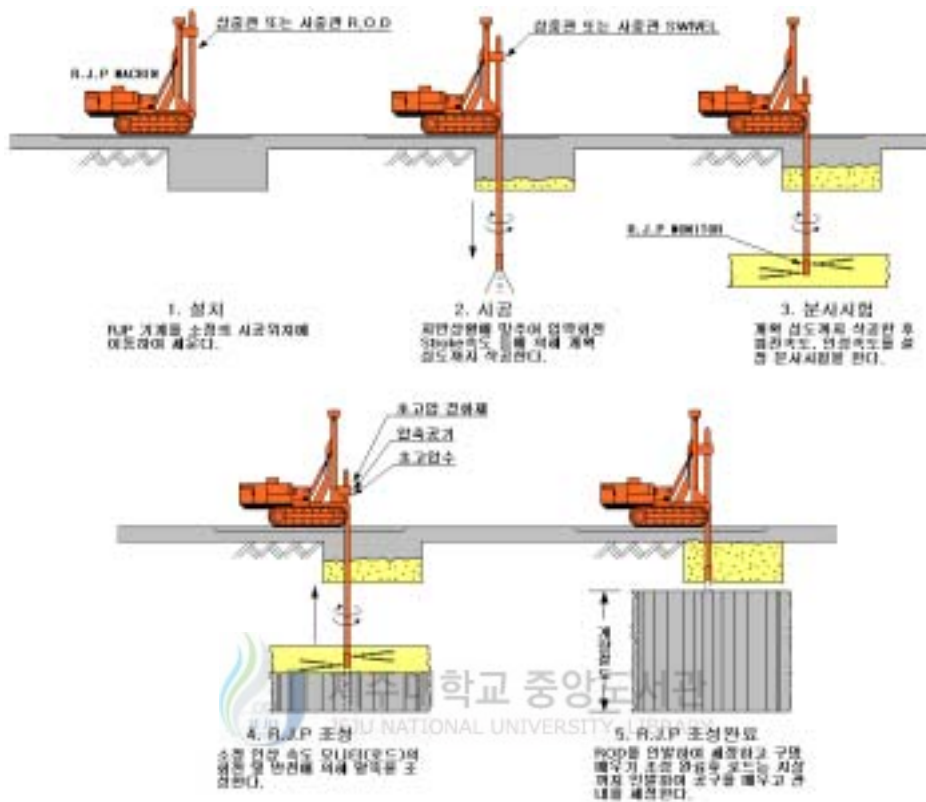


Fig. 2.4 Diagram of construction in RJP Method

Ⅲ. 물유리계(L.W) 그라우팅 시공법 및 투수시험

1. 시험 목적

물유리계(L.W) 그라우팅 공법은 낮은 공사비에 비해 비교적 양호한 차수효과를 기대할 수 있는 경제적 효율성 때문에 육지부의 많은 현장에서 이용되어 온 관계로 기술적 노하우(Know-how)나 현장 중심의 경험 축적이 상당부분 이루어진 데 반하여, 본 연구 대상지역의 물유리계(L.W) 그라우팅 시공 시, 제주도의 일반적인 지형 및 지질 특성이 육지부와 상이하여 지층별 적용 가능한 일반적인 투수계수를 추정 또는 참고할 만한 자료가 미흡하였다. 특히 제주도 방언으로 송이라고 불리는 스킨리아(Scoria)층이 제주도의 동서를 기준 장축으로 넓게 분포되어 있음에도 이에 대한 연구가 부족한 실정이다. 또한 현장에서 물유리계(L.W) 그라우팅 시공 후 차수성 증진에 있어서 취약한 지층이라고 할 수 있는 기공의 함량이 높고 조립질 층으로 분포하는 스킨리아층에 대한 차수효과의 검토가 필요하다. 이를 위해 그라우팅시공 전·후에 현장투수시험을 실시하고, 현장에서 채취한 시료에 대하여 해당현장에서 적용한 배압비에 의해 공시체를 제작한 후 실내투수시험을 실시하여 차수효과를 비교 고찰하고자 한다.

이에 앞서 송이를 정의하자면, 화산분출물 중 다공질이며 암색(검정색·적갈색·황갈색·암회색 등)인 암괴(岩塊)로 암재라 한다. 마그마가 대기 중으로 방출되어 그 속의 휘발성 성분이 빠져나가 많은 기공(氣孔)이 생긴 것으로 부석(浮石)보다 다소 무겁고, 염기성 또는 중성의 마그마에서 유래된 것을 스킨리아(Scoria)라 한다. 이러한 암재를 제주도 방언으로 송이라 한다(소재관, 2002).

2. 물유리계(L.W) 그라우팅

1) 현장시공시 제반사항

주입공의 천공은 1차 충격식으로 천공 후 회전식으로 하였으며 천공완료 후 공내의 슬라임(slime)을 제거하기 위한 천공수는 청수를 사용하였다. 주입펌프는 주입도중에 압력변동이 적은 2연 이상의 피스톤식 또는 플린저식으로서 토출압력이 20kg/cm² 이상, 토출량이 60ℓ/min 이상, 토출관경이 50mm 이상인 것으로 25mm 주입관으로 주입하였다. 그라우트 박서는 회전수 150rpm 이상, 토출관경 50mm 이상인 1조 용량 200ℓ의 2조식 교반장치로 설치하였고 토출구에는 토출량 조절밸브가 부착된 것을 사용하여 B액의 급결과 완결제 배합을 용이하도록 하였다. 주입기는 에어 패커(Air Packer) 및 핸들 패커(Handle Packer)를 사용하여 본 결과 깊은 심도에서도 조작이 용이하고 주입 및 압력관리가 간편한 에어 패커를 사용하였다. 유량계와 압력계는 각각 60ℓ/min와 60kg/cm²의 전자식 유량계와 압력계를 사용하여 압력과 유량을 관리하였고 기계식 압력계도 병행하여 상호편차를 관리하였다.

2) 시공방법

(1) 천공

현장 책임자의 입회 하에 시공사의 설계도면에 표시된 지점에 따라 천공을 실시하였으며 공의 구경은 NX type(75mm)이다. 공의 심도 및 배열은 설계도면과 일치하도록 하였으나 현장여건에 따라 현장 책임자의 지시에 따랐다. 공과 공사 사이의 간격은 1.0m, 2열로 설계되어 있으나 시험시공 후 주입효과(1.0E-05cm/sec 이하)가 미흡할 시에는 현장 책임자와 협의하여 공간격을 조정하기로 하였다.

주입공의 천공은 충격식 및 회전식 유압 시추기를 이용하여 현장여건에 적절

하게 실시하였다. 전공 시 작업효율을 촉진하기 위한 유류나 도료는 사용하지 않았으며 전공완료 후 전공수를 이용하여 슬라임(Slime)을 제거하였다.

(2) 멘젯튜브 삽입 및 Seal재 주입

전공이 완료 후 공내 세척이 끝난 공은 기 제작된 멘젯튜브를 삽입한다. 멘젯튜브의 제작은 42mm 전선관에 50cm 간격으로 4방향으로 주입공을 뚫은 후 고무 슬리브를 부착하고 테이핑 하였다.

멘젯튜브의 삽입이 완료된 후 삽입된 멘젯튜브와 전공한 홀(Hole)사이에 Seal재를 1.0Shot 방식으로 주입하였다. Seal재는 주입재의 지상으로의 역류 및 주입위치 이외의 분산을 방지하고 외부의 토사 및 지하수의 침투를 막을 수 있어야 한다. 그러나 현장 지반의 지질특성 상 압자체의 기공이 발달하고 지하수의 유동이 심해 seal재의 주입효과가 없을 것으로 추정되었다.

Table 3.1 Standard Mix Proportion of Seal Material

혼화제	시멘트	벤토나이트	물
중량	200kg/ m ³	62.5kg/ m ³	910 l / m ³

(3) 주입

현장 지반의 지질여건이 기공이 많고 절리가 발달한 암석으로 구성되어 있어, 주입 시 주입액의 유실이 발생되어 주입효과를 기대하기가 힘들 것으로 예측되었다. 따라서 주입재의 배합은 해수 및 지하수의 유동을 차단하기 위하여 Gel-time을 고려한 세 가지 배합으로 구분하였다. 그러나 본 현장에서는 표준배합과 급결배합 두 가지 배합 중 현장조건에 따라 주입에 변화를 주며 주입을 하였다. 주입율은 지층의 특성을 고려하여 현장에서 설계량인 17%를 기준으로 하여 주입하였다. Table 3.8은 주입재의 세 가지 배합을 나타내었으며 A액과 B액의 혼합비는 1:1을 기준으로 하였다.

일반적으로 주입압력은 지반의 투수계수, 간극율, 공극의 발달상황, 주입재의 점성, 젤타입, 주입관의 형식, 주입시간 등에 따라 상호 관련하여 결정되나 본 현장에서는 주입량은 정량주입을 원칙으로 하되 주입압력은 5~7kg/cm²를 기준으로 정압주입을 병행하여 주입을 관리하였다. 주입압력은 현장에서 측정한 주입관의 자연압 3~5kg/cm²에 5~7kg/cm²를 보정하여 유압계상 7~10kg/cm² 상태에서 관리하였다. 주입속도는 편액기준으로 25 l/min을 기준으로 하였으나 주입재의 유실, 시공속도 및 주입압력 등 현장여건을 반영하여 조정하였다. 주입방식은 에어패커를 이용한 단관 주입방식으로 1step 간격을 0.5~1m를 기준으로 하였다.

Table 3.2 Classification of a Mixture

분류	주입량 (ℓ)	A액(m ³ 당)		B액(m ³ 당)			W/C (%)
		3호 물유리 (ℓ)	물 (ℓ)	시멘트 (kg)	벤토나이트 (kg)	물 (ℓ)	
배합 I	1000	350	150	200	20	430	202
배합 II				350	20	389	111
배합 III				시멘트(kg)	SGR약재(kg)	물(ℓ)	111
	350	25	389				

3. 투수시험

1) 실내 투수시험

(1) 사용된 시료

제주도 내의 송이의 분포를 보면 한라산 화산체의 화산활동이 정지된 후 그 주변의 틈을 이용하여 분출 생성된 360여개의 기생화산과 깊은 관련이 있다. 전반적으로 제주도의 동서를 기준, 장축과 일치하는 방향으로 제주도에서 오름이라 불리는 기생화산이 집중적으로 배열되었고 기생화산을 중심으로 송이층이 널리 분포하고 있으나 송이층이 화산활동 시 화산쇄설물이 낙하하여 퇴적되어 있는 층이라는 점을 감안한다면 해안인접 지층까지 분포할 가능성이 충분하며 실제로 도로 및 각종 토목공사 시 송이층의 출현으로 공사 시 많은 어려움 겪고 있다. 또한 연구대상지역의 물유리계(L, W) 그라우팅 보강 전 지반 조사 시에도 투수성이 높은 송이층이 분포하여 현장투수시험 시 많은 어려움이 있었다. 송이층은 마그마의 분출상황에 따라 그 특성을 달리하나 본 연구에서는 이러한 송이층 중 물유리계(L, W) 그라우팅 보강 시 차수효과를 검토하기 위하여 북제주군 조천읍에 위치한 현장 주변에서 채취한 송이층 시료에 대하여 정수두 및 변수두 투수시험을 실시하였다.

(2) 시험장비

본 연구를 위하여 정수두 및 변수두 투수시험이 가능한 시험기를 자체 제작하여 투수시험을 시행하였다. 정수두 투수시험은 높은 투수계수를 갖는 조립토에 적합한 시험방법으로 자연상태의 송이의 투수계수를 얻기 위한 실험에 이용되었다. 변수두 투수시험은 낮은 투수계수를 갖는 세립토에 적합한 방법으로, 현장 배합비로 배합 및 제작한 시료에 대하여 적용하였다. Fig. 3.1은 변수두 투수시험기(정수두 투수시험겸용)를 대략적으로 나타낸 것이다. 정수두 투수시험장치

는 물을 공급하는 입구를 조정함으로써 실험하는 동안 물의 입구와 출구사이의 수두차를 일정하게 유지하도록 하였다. 변수두 부수시험장치는 크게 판넬(Pannel)부분과 시료원통으로 나눌 수 있다. 판넬부분에는 스탠드 파이프(Stand Pipe)가 부착되어 수위변화를 측정할 수 있으며 파이프라인(Pipe Line)을 통하여 시료원통과 연결하였다. 정수두 및 변수두 부수시험기는 동일한 시료원통을 사용하였으며 상부에 토출관을 만들어 월류되는 수량을 측정할 수 있게 하였고 시료원통 하부에는 표준사를 10cm 넣고 시료원통의 직경과 일치하는 다공(多孔)질 받판을 설치하였다. 공시체 제작 시 다공질 판을 통하여 흡입자나 주입액의 침투를 방지하기 위하여 거름종이를 다공질 판 위에 2겹 이상으로 덮어 실험을 시행하였다. 시료원통 내부에는 실리콘 그리스를 발라 공시체와 원통내부 사이로 물이 유입되는 것을 사전에 방지하였다.

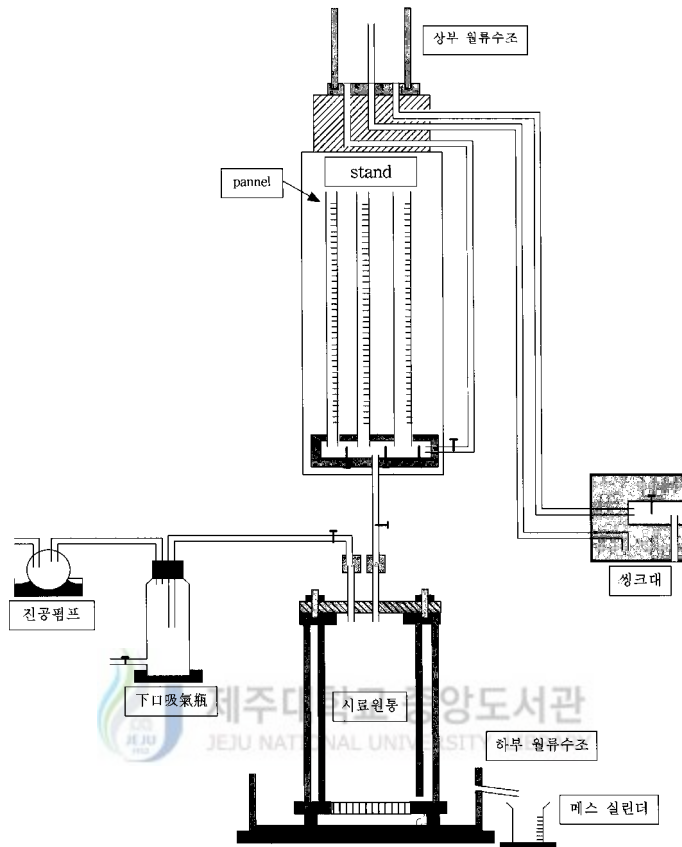


Fig. 3.1 Permeability Test Setup

(3) 주입량 산정

주입량은 개량대상지반의 지반조건, 약액의 성질뿐만 아니라 주입목적이나 개량효과의 신뢰도를 고려해서 결정해야만 한다. 주입량은 약액고결체가 압밀작용을 일으키기 때문에 설계주입범위 내에서의 지반전체에 대하여 주입된 약액량의 비율을 나타내는 것이지, 고결된 약액의 체적을 의미하는 것이 아니다. 일반적으로 주입량을 구하는 기본식은 개량대상지반의 체적(V)에 주입율(λ)을 곱한 다음 식으로 표시되고 있다(日本土質工學會, 1985).

$$Q = V \times \lambda \quad (3.1)$$

$$V = EA \times H \times \frac{(\pi \times d^2)}{4} \quad (3.2)$$

$$\lambda = n \times a \times (1 + b) \quad (3.3)$$

여기서, Q는 개량대상지반에 대한 주입량($m^3 = 1000 \ell$)

V는 개량대상지반의 체적

λ 는 주입율

n은 간극율

a는 충전율(%)

b는 손실율(%)

EA는 주입공수

H는 그라우팅심도

d는 영향원의 직경



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

식 3.1에 의한 주입량의 산정은 입자간의 침투주입을 전제로 한 것이고 맥상 주입의 경우 적용이 곤란하다. 그러나 맥상(脈狀)주입형태의 주입량 산정방식으로는 현재까지 확립된 방법이 없기 때문에 식 3.1을 적용하고 있는 것이 현실이다. 주입량 계산에 관한 참고자료로서 Table 3.3은 주입방식에 의한 표준 주입율을 Table 3.4는 토질에 따른 주입율을 나타내고 있다. 그러나 Table 3.1의 주입율은 대상주입에 대한 예로 다음과 같은 경우에는 주입율을 크게 할 필요가 있다.

- 첫째, 개량범위가 작거나 개량폭이 얇은 경우
- 둘째, 깊은 위치에 주입하는 경우
- 셋째, 기설구조물이 인접한 경우나 지반이 교란된 경우
- 넷째, 완전한 지수효과를 기대하는 경우
- 다섯째, 중요구조물의 방호를 목적으로 하는 경우

Table 3.3 Standard Infiltration Ratio According to Injection System(日本藥液注入協會, 1959)

주입방식 \ 주입율	사질토(%)	점성토(%)
단관로드주입	30~35	20~30
이중관단상주입	40	40
다중관복상주입	40~45	40~45
이중관 더블 팩커주입	40~50	40~50

Table 3.4 Infiltration Ratio According to Soils(日本材料工學會, 土質安定材料委員會編, 1968)

토질	항목	표준관입	간극율(%)	주입율(%)	비고
		N치	(n)	(1+b)	
사질토	느슨	0~10	50	75~90	주목적은 지수목적이므로 지반강화의 경우는 이들 값보다 작게 된다.
	중간	10~30	40~50	65~75	
	조밀	30~50	45	60~70	
	매우조밀	50이상	40	55~63	
점성토	매우연약	0~2	75	35~40	점성토의 경우는 맥상으로 주입되므로 이 값으로 한다
	연약	2~4	65~75	30~35	
	중간	4~8	55~65	25~30	

(가) 간극율

일반적으로 간극은 물과 공기로 채워져 있는 부분을 말한다. 그러나 공기는 미량으로 여기서는 고려하지 않고 간극수에 대해서만 고려한다.

간극수는 자유수와 흡착수로 이루어져 있다. 자유수는 중력수를 말하며 각종 배수공법으로 배제할 수 있는 물이다. 흡착수는 통상적으로 실시하는 배수공법 등을 이용해도 배제하기 어려운 물을 말한다.

주입량의 검토에 있어서 간극율은 주입에 의해서 주입재로 치환이 가능한 자유수가 점유하는 체적을 대상으로 하고 있으며 이것을 유효간극율이라 한다. 간극율은 토질조사에 의해 실시하는 것이 바람직하지만 실측이 곤란한 경우에는 경험적으로 유사한 지반의 시공실적으로부터 결정하는 경우도 있다.

(나) 충전율

충전율은 개량범위 내에서 소정의 주입효과를 얻기 위해 필요한 것이고 간극에 대해서 주입재가 치환하는 비율로써 표시된다. 이 값은 개량대상지반의 토질성상, 주입재의 침투성, 주입효과의 기대도에 의해서도 다르게 되는 것이다.

지반조건에 따른 충전율 및 주입율을 충분히 파악한 뒤 개량효과의 신뢰정도를 고려해야 한다(土質安定材料委員會編, 1991)

Table 3.5 In-filling Ratio According to Soils(盛, 1991)

토질	고려기준		충진율(%)
사질토	주입효과에 대한 기대도	높음	120
		보통	100
		낮음	90
점성토	과거의 공사실적 등으로 30%이상의 값을 확보해야 주입효과 기대		30~50
	부식토층 등 간극이 많은 지반인 경우		100

(다) 손실율

실제의 주입에 있어서 계획된 개량범위 내에서 소정의 주입효과를 얻기 위해서는 개량범위 밖으로 약액이 주입되는 것을 피하고 이 부분을 시공 상의 안전율로서 주입율 속에 고려할 필요가 있다. 이 값은 개량대상물의 중요도, 주입효과에의 기대도 등에 의하여 결정되고 있지만 현재 이 계수에 대한 이론적인 토대는 확립되어 있지 않아 경험적으로 손실율, b 는 0.1정도로 하는 경우가 많다.

(4) 공시체 제작

시료를 채취하는 과정에서 시료는 토립자의 변형 및 재배열 등이 일어나고 고단되기 때문에 현장조건과 동일한 상태하의 공시체를 제작, 실내실험을 실시한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서 공시체의 제작 시 동일한 다짐에너지를 얻기 위하여, 2.5kg 해머를 30.48cm 높이에서 10회씩 떨어뜨려 3층을 다지는 방법을 실시하였다. 공시체 별 주입량은 주입하지 않은 경우와 실제 간극율을 토대로 주입율을 산정한 설계 주입량 그리고 간극율을 0.3, 0.5, 0.8로 가정하여 산정한 설계주입량으로 배합하였다. 주입하지 않은 경우를 제외한 공시체는 각각 3일, 7일, 14일 동안 양생시켰다. 또한 모든 공시체의 시료가 완전하게 포화상태에 이르게 하기 위하여 24시간 수침 시켰다. Table 3.6은 주입량 산정을 위해 요구되는 물성실험 결과를, Table 3.7은 이를 바탕으로 한 공시체 별 주입량을 나타내었다.

Table 3.6 Results of Laboratory Test

시료채취위치	실내 시험명					
	습윤단위중량 ($v, g/cm^3$)	함수비 ($w, \%$)	비중 (G_s)	건조단위중량 ($v_d, g/cm^3$)	간극비 (e)	간극율 (n)
조건	0.85	20.88	2.54	0.703	2.67	0.73

Table 3.7 Infiltration Quantity of Sample According to Porosity

간극율에 따른		A액		B액		
공시체 별 주입량 (㎤)		규산소다 (㎖)	물 (㎖)	시멘트 (g)	벤토나이트 (g)	물 (㎖)
0.8	2077.98	727	312	415.6	41.56	893
0.7	1818.23	636	273	363.6	36.36	782
0.5	1245.37	436	187	250	25	536
0.3	747.22	262	112	150	15	322

(5) 부수시험

송이에 대한 실내 부수시험을 실시하기 위하여 정수두 및 변수두 부수시험을 이용하여 시료의 조건에 따라 적용하였다.

(가) 정수두 부수시험

현장에서 채취한 송이의 기본 물성시험 결과 Table 3.6과 같이 간극비가 2.67 이고 건조단위중량이 0.703g/㎤로 입자자체의 기공이 상당히 많고 가벼운 물리적 성질을 가지고 있어, 높은 부수계수를 갖는 조립토에 적합한 정수두 부수시험을 실시하였다. 송이의 부수계수보다 모래의 부수계수가 낮을 경우, 모래로 인하여 송이의 부수계수가 낮게 나올 가능성이 있으므로 이를 배제하기 위하여, 정수두 부수시험을 실시하기 전 시료원통 안에 직경 1cm~2.5cm 크기의 송이를 10cm 정도 넣은 후, 각공의 직경이 2mm인 다공질 판을 깔고 송이시료를 다져 넣었다.

완전한 포화를 위하여 24시간 수침 시킨 후, 상부 원류구에서 나오는 월류수량이 일정한지 점검하여 포화상태를 판단하였다. 일정한 수위차를 유지하며 원류구로 나오는 월류수를 메스실린더에 집수함과 동시에 시간을 잰다. 이러한 일련의 과정을 3회 이상 측정함으로써 오차범위를 줄인다. 부수계수 k 는 다음과 같이 계산된다.

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t} \quad (3.4)$$

여기서, Q는 집수량

A는 시료의 단면적

t는 집수시간

h는 수위차

L은 시료의 길이

(나) 변수두 투수시험

변수두 투수시험은 낮은 투수계수를 갖는 세립토에 더 적합한 시험방법으로 시료가 입자가 크며 기공이 많은 층이인 경우 부적절한 시험방법이지만, 주입된 약액이 간극 및 절리로 침투하여 고결체가 형성, 그 고결체에 의해 차수효과를 기대하는 물유리계(L, W) 그라우팅의 시공특성 상 약액이 주입된 공시체의 경우 낮은 투수계수를 기대할 수 있으므로 변수두 투수시험방법이 이용되었다.

기본 물성시험의 결과를 바탕으로 식 3.1, 3.2, 3.3을 적용하여 설계배합비를 산정하였다. 그 결과 공시체의 직경 15.5cm, 공시체의 높이 15cm를 기준으로 한 개의 공시체 당 A액과 B액의 전체 설계 주입량은 1818.23㎤이었다. 주입량에 따른 차수성의 증진효과를 판별하기 위하여 각각 간극율을 0.3, 0.5, 0.8로 가정하여 산정한 설계주입량에 따른 공시체를 별도로 준비하여 변수두 투수시험을 시행하였다. 한 개의 공시체당 주입조건에 따른 A액과 B액의 자세한 주입량은 Table 3.5에 나와 있다.

양생기간에 따른 차수효과를 판별하기 위하여 동일한 주입 조건, 즉 동일한 다짐에너지와 주입량을 가한 공시체를 각각 3개를 만들어 3일, 7일, 14일 동안 양생시켰으며 시료의 포화를 위하여 강제 포화법을 이용하였다. 투수계수의 측정은 시료원통 하부에 위치한 유입구와 연결된 스탠드 파이프 상의 수위변화를 측정하여 투수계수를 산정한다. 임의의 시간 t에서 시료를 통해 흐르는 투수계수 k는 식 3.5와 같다.

$$k = \frac{aL}{At} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3.5)$$

여기서, a는 스탠드 파이프의 단면적

A는 시료의 단면적

L은 시료의 길이

t는 투수경과 시간

h₁, h₂는 초기 및 종료 수위

① 강제 포화법

세립토는 수조에 수침시켜 자연 침투식으로 포화시키기에는 오랜 시간이 요구된다. 간극비가 1.5인 시료일지라도 자연 유탕식으로 포화시키기 위해서는 24시간 이상 요구되므로 진공펌프를 이용해서 강제 포화시키는 방법이 유용하다. 포화상태의 판별은 진공펌프를 작동시킨 후 흡기병에 물방울이 떨어지는 것으로 포화상태를 확인 할 수 있다. Fig. 3.2는 본 연구에서 이용한 변수위 투수시험용 공시체의 포화과정을 도식화 한 것이다.

② 스탠드 파이프 단면적 보정

변수위 투수시험을 위해 제작된 관널에는 각각 직경이 다른 3개의 스탠드 파이프가 부착되어 있다. 본 연구에서는 스탠드 파이프의 단면적을 계산하기 위한 방법으로 파이프를 통하여 유출된 유량과 강하된 수위차의 변화를 측정하는 방법이 이용되었다. 즉, 물로 채워진 각각의 파이프의 초기 수위를 측정한 후 밸브를 열면 중력에 의해 수위가 강하되면서 메스실린더에 집수되며 임의의 강하 수위에서 밸브를 닫는다. 이 때의 강하된 수위차와 유량을 측정하면 스탠드파이프의 평균 단면적은 다음의 식에 의하여 구할 수 있다. Table 3.8은 스탠드 파이프의 단면적 보정 결과를 나타낸 것이다.

$$a = \frac{Q}{\Delta h} \quad (3.6)$$

여기서, a 는 스탠트 파이프의 평균 단면적
 Q 는 메스 실린더에 집수한 유량
 Δh 는 강하된 수위차

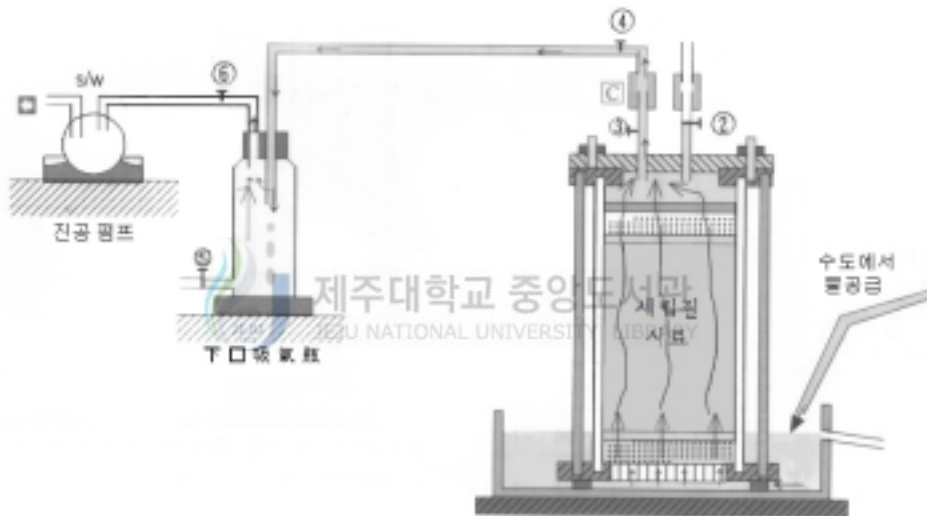


Fig. 3.2 Saturation Process in the Variable-head Permeability Test(지반공학 시험법 및 응용, 1997)

Table 3.8 Average Sectional Area of Stand Pipes

스탠트 파이프 No.	파이프 I	파이프 II	파이프 III
평균 단면적(cm^2)	0.292673	0.262792	0.631549

2) 현장 투수시험

(1) 대상지역

본 연구 대상지역으로 구좌읍 평대리 및 조천읍 조천리 해안인접지역에 위치한 증계펌프장의 일반적인 지형 및 지질의 특성은 신생대 제3기~4기를 걸친 화산활동에 의해 분출된 화산암류이며 다공질 현무암이 주를 이루고 있다. 평대 및 조천 증계펌프장에 대한 시추조사결과 지층의 일반적인 상태는 매립층 혹은 송이층, 절리가 발달한 다공질암층 및 절리가 발달된 보통암층의 순서로 분포되어 있으며, 지하수위의 분포는 GL(-)0.7 ~(-)2.8m 사이에 있었으며 이는 기반 암층의 위치, 해안 인접지역에 따른 지형적인 영향과 조수간만의 차이 등에 영향을 받고 있다.

대상지역의 지반조사를 위하여 비트(Bit)의 지경이 76mm(NX-type)인 회전 수세식(水洗式) 유압식 시추기를 사용하여 증계 펌프장별 관하부 지반에 대한 수직 분포 상태 및 절리 균열의 발달상태 등을 파악하였다. 시추종료 후 코어(Core)를 회수하여 시추 주상도를 작성하였다.

(2) Lugeon Test

원지반의 지층별 투수성을 평가하기 위하여 각 증계 펌프장별 대표 지점에서 현장투수시험방법 중 Lugeon Test 방법을 이용하여 투수계수를 산정하였다. 그라우팅 시공 전후의 차수효과증진을 판단하기 위한 가장 대표적인 방법은 시공 전후 지층별 투수시험을 실시하여 투수계수를 비교 분석하는 방법이 가장 효과적이나, 매립층, 다공질암층 및 절리가 발달한 암반층 일부에서는 투수시험이 불가하였다.

1963년에 Lugeon에 의해서 고안된 이 시험법은 댐 기반의 안정성 유지를 위한 투수계수를 측정하고 이에 따른 그라우팅의 가능성을 검토하기 위하여 사용되었다. 이후 점차 발전을 거듭하면서 심정과 파쇄 매질에서 지하수의 시료채취나

수리시험에 맞도록 보완되었으며 점차 그 응용분야가 확장되게 되었다. 이 시험법은 다공성 매질의 현장 투수계수를 Lugeon이라는 단위로 측정하며 1 Lugeon은 단위길이의 관정을 통하여 10기압의 압력으로 분당 1리터의 물이 주입될 때를 말한다. 예를 들면 규정 압력(10kgf/cm²)으로 구멍길이 1m당, 1분간에 1ℓ의 물이 압입 되면 1Lugeon이 된다(1Lu=1ℓ/min/m/10kgf/cm²). 이는 대략 10E-7 m/sec 와 같다.

이 시험법은 패커(Packer)라는 특수한 시스템이 사용된다. 즉, 시추공 공내의 일정 길이부분을 패커에 의하여 폐색(閉塞)하고, 이 부분에서부터 압력 10kgf/cm²의 물을 암반 사이에 압입하여 그때의 투수량으로 암반의 투수성을 평가하는 방법이다. 보통 이러한 패커 시스템은 단열암반에서 구간별 매질의 특성을 파악하고자 할 때 널리 이용된다. 그러나 이러한 패커 시스템은 일반인들이 사용하기에는 다소 부대 장비들이 복잡하고 기술적인 지식이 있어야 한다는 단점이 있다. 또한 관정의 설치상태가 부실한 경우는 패커가 파손되는 경우가 많아 비용면에서 비경제적이다. 하지만 단열암반의 연구를 위해서는 필수적인 장비라 할 수 있다. 패커를 설치하여 구간별로 격리시킨 후 양수시험을 한다거나 혹은 추적자시험을 함으로써 단열의 분포특성과 용질이동 특성을 연구할 수 있다. 그러나 현장에서 실험자들이 이 패커 시스템을 적용하는데 있어서 문제점이 없지 않다. 가장 큰 문제는 기밀성 유지로 패커에 의해 격리된 구간이 얼마나 기밀성이 유지되느냐는 것이다. 또한 관정 별로 그것에 적당한 크기의 패커를 구비하고 있어야 한다. 또한 규정압력인 10kgf/cm² 이외의 압력에서의 시험치는 편의상 식 3.7을 이용하여 환산하여 적용하지만, 주입압력이 규정압력보다 훨씬 작은 경우에는 그 값의 적용에 있어서 충분한 검토와 주의가 필요하다.

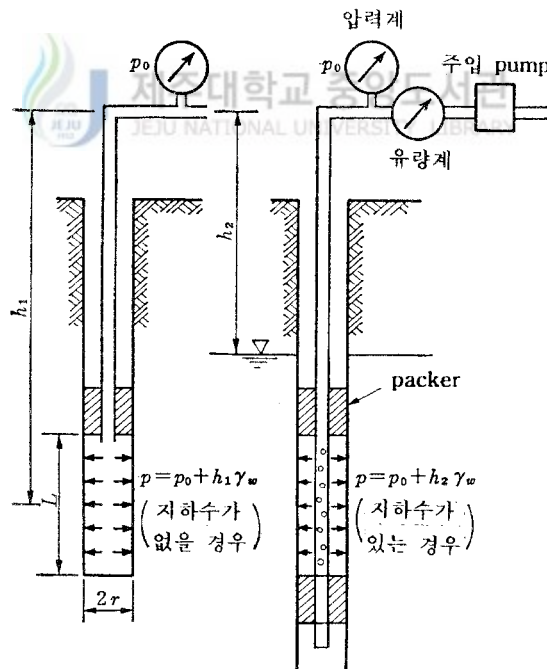
$$L_u = \frac{10}{pl} Q \quad (3.7)$$

여기서, Q는 주입량(ℓ/min),

l 은 시험구간길이(m),

P 는 주입압력(kgf/cm²)

시험방법과 장치는 Fig. 3.3에 도시한 바와 같으며 Single Packer 방식과 Double Packer 방식이 있다. 또한, Single Packer 방식 중, 시추공 굴착에 있어서 1회의 시험구간만을 굴착하여 투수시험을 실시하고, 완료 후 다음 시험구간을 굴착하여 투수시험을 실시하는 소위 시험구간의 차례차례 굴착에 의한 시험을 Stage 방식이라고 한다. 또한, 투수시험의 시험구간(Stage 길이)은 5m로 하는 것이 일반적이지만, 투수성이 높은 부분에서는 Stage 길이를 짧게 하여 암반의 투수성상을 명확히 파악하는 것과 동시에 특히 투수성이 높은 장소를 명확히 파악할 필요가 있다.



(a) single packer 방식 (b) double packer 방식

Fig 3.3 Lugeon Test Setup(천병식, 1998)

(3) 수위 강화법

원 지반의 지층별 투수성을 산정하기 위하여 각 층계 펌프장별 대표지점에서 Lugeon Test를 실시하였으나, Lugeon Test는 투수계수가 낮은 암반지역이나 그라우팅 후, 그라우팅에 대한 품질검사 등에 적합한 시험법으로서 매립층 또는 송이층, 일반 토사지역은 투수계수 측정은 어려웠다. 또한 제주도는 화산활동에 의한 다공질 암반층이 널리 분포하고 있는 관계로 이러한 다공질 암반층에의 투수계수의 측정 역시 어려웠다. 따라서 이러한 지층의 투수성을 산정하기 위하여, 투수시험 중 추가적인 압력을 가하지 않고 단지 수위의 자유강하에 의해 지층별 투수계수를 산정하는 수위강하법을 현장여건에 따라 적용하였다. 수위 강하에 의한 수위 강화법 시험 시, 적용식은 일반적으로 다음의 2가지를 이용하였다. 식 3.8은 천공 후 소정의 시험구간 만큼 케이싱(Casing)을 인발하지 않는 경우에 적용되며, 식 3.9는 이와 반대로 천공 후 소정의 시험구간 만큼 케이싱을 인발하여 투수시험을 시행할 때 적용된다. 본 연구에서는 식 3.9를 적용하였다.

$$K = \frac{r}{4T} \log \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \quad (3.8)$$

$$K = \frac{r^2}{2LT} \ln \left(\frac{L}{r} \right) \ln \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \quad (3.9)$$

여기서, K는 투수계수(m/sec),

T는 수위관측 시간(t1-t2),

H₁은 초기수위에서 지하수위 면까지의 거리(cm),

H₂는 투수시험 종료수위에서 지하수위 면까지의 거리(cm)

r은 공반경(cm)

L은 시험 구간(cm)

4. 투수시험결과의 고찰

1) 실내 투수시험에 의한 투수성

조전에서 채취한 송이에 대한 실내 투수시험은 주입량과 양생기간에 따른 투수계수의 변화를 관찰하기 위하여 자연 상태의 공시체를 제작하여 시험하였고 기본 물성시험을 바탕으로 산출한 실제 간극율을 토대로 간극율이 0.7인 공시체를 제작 시험하였다. 또한 간극율이 0.3, 0.5, 0.8일 때의 주입량을 산정하여 공시체를 제작하였다.

자연 상태의 공시체와 간극율이 0.3인 경우 육안으로도 입자와 입자사이의 공극이 충전 되지 않음이 관찰되어 정수두 투수시험을 시행하였으며, 간극율이 0.5, 0.7, 0.8인 경우 입자와 입자사이의 공극이 충전되어 있음을 확인할 수 있었으나 간극율이 0.8인 경우 시료의 양에 비해 주입량이 과대하게 산정되어 공시체 제작 시 투수시험을 위해 제작된 다공질 판으로 소량의 주입액이 빠지는 현상이 관찰되었다.

Fig. 3.4는 간극율이 0.3인 시료에 대한 정수두 투수시험의 결과를 양생기간에 따른 투수계수의 변화로 나타내었다. 양생기간이 3일 경과한 후의 투수계수가 $9.521E-03\text{cm/sec}$, 7일이 지난 경우는 $8.151E-03\text{cm/sec}$ 그리고 14일이 경과한 후의 투수계수는 $8.087E-03\text{cm/sec}$ 로 자연 상태의 투수계수 $1.203E-02\text{cm/sec}$ 에 비하여 약간의 투수계수의 증진 현상은 관찰할 수 있었으나 이는 단순히 수치적인 변화일 뿐 실제 토목공사 시 차수효과를 기대할 수 있는 수준은 아니라고 판단되며 양생기간이 7일 이후의 투수계수 변화는 거의 미미함을 알 수 있다.

Fig 3.5은 간극율이 0.5인 시료에 대한 변수두 투수시험의 결과를 양생기간에 따른 투수계수의 변화로 나타내었다. 양생기간이 3일 경과한 후의 투수계수가 $4.241E-04\text{cm/sec}$, 7일이 지난 경우는 $2.863E-04\text{cm/sec}$ 그리고 14일이 경과한 후의 투수계수는 $2.758E-04\text{cm/sec}$ 로 자연 상태의 투수계수 $1.203E-02\text{cm/sec}$ 에 비

하여 현저하게 투수계수가 낮아지는 현상을 관찰할 수 있으나, 차수를 목적으로 하는 토목공사에서 그 기대효과는 낮다고 판단된다.

Fig 3.6은 간극율이 0.7인 시료에 대한 변수두 투수시험의 결과를 양생기간에 따른 투수계수의 변화로 나타내었다. 양생기간이 3일 경과한 후의 투수계수가 $6.907E-06\text{cm/sec}$, 7일이 지난 경우는 $4.672E-06\text{cm/sec}$ 그리고 14일이 경과한 후의 투수계수는 $3.203E-06\text{cm/sec}$ 로 자연상태의 투수계수 $1.203E-02\text{cm/sec}$ 와 간극율이 0.3, 0.5인 경우의 투수계수 변화에 비하여 불투수층에 가까울 정도로 현저하게 투수계수가 낮아지는 현상을 관찰할 수 있다. 그러나 양생기간에 따른 투수계수의 증진은 양생 7일의 투수계수가 양생 3일의 투수계수에 비하여 낮아지고는 있으나 양생 7일 경과 후, 7일을 기점으로 수렴하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3.7은 은 간극율이 0.8인 시료에 대한 변수두 투수시험의 결과를 양생기간에 따른 투수계수의 변화로 나타내었다. 양생기간이 3일 경과한 후의 투수계수가 $5.212E-06\text{cm/sec}$, 7일이 지난 경우는 $3.923E-06\text{cm/sec}$ 그리고 14일이 경과한 후의 투수계수는 $3.32E-06\text{cm/sec}$ 로 간극율이 0.7인 경우의 공시체에 대한 투수시험결과에 비하여 약간의 투수계수 증진은 있었으나 주입량의 증가량에 비하여 그 효과는 미미하다고 판단된다.

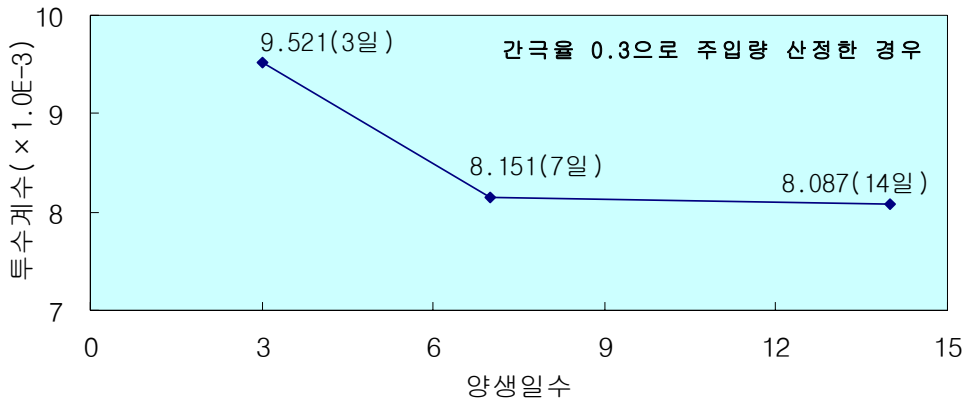


Fig. 3.4 Results of the Variable-head Permeability Test(Porosity = 0.3)

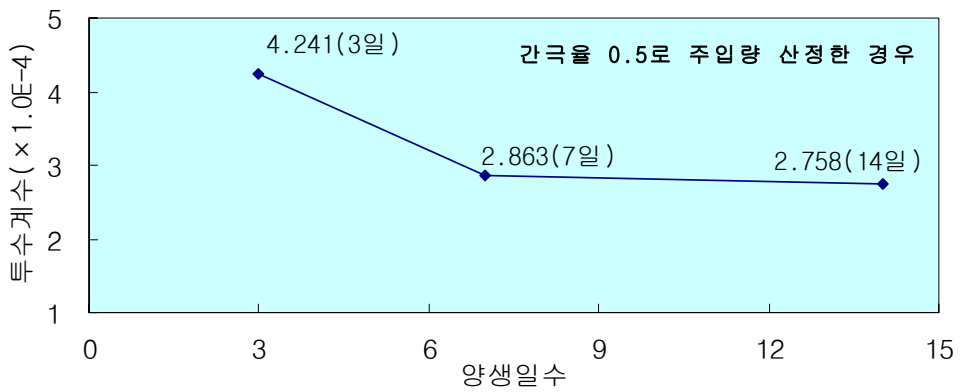


Fig. 3.5 Results of the Variable-head Head Permeability Test(Porosity = 0.5)

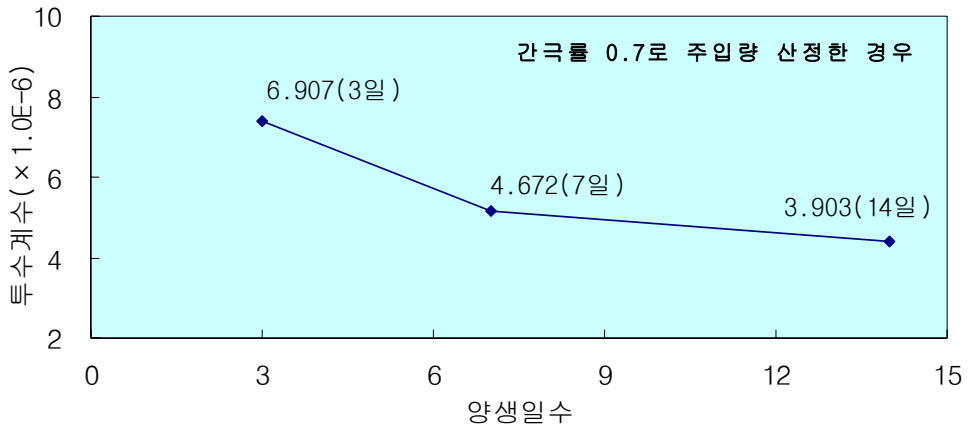


Fig.3.6 Results of the Variable-head Permeability Test(Porosity = 0.7)

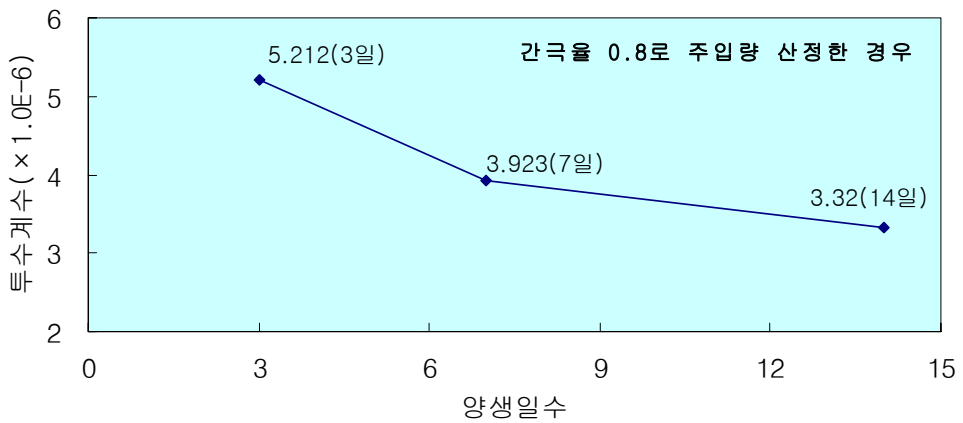


Fig.3.7 Results of the Variable-head Permeability Test(Porosity = 0.8)

2) 현장 투수시험에 의한 투수성

물유리계(L, W) 그라우팅 시공전후의 차수효과를 파악하기 위하여 시공 전후에 현장지반에 대한 투수시험을 실시하였다. 시공 전 현장투수시험은 천공 중에 다공질암이 파쇄 되거나 절리가 발달한 관계로 투수계수 측정에 어려움이 있어 수위강하법을 이용하였다. 현장 투수시험에 의해 산정된 그라우팅 시공 전후의 평대 및 조천 증계펌프장에 대한 투수시험 결과는 Table 3.9에 나타내었다. Table 3.9에서 보는 바와 같이 시공 전후의 각각의 현장에 대한 투수계수 비교에 있어서 시공 전의 평균 투수계수는 평대 $3.218E-02\text{cm/sec}$, 조천 $8.166E-02\text{cm/sec}$ 로 고투수성을 형성하고 있었으나, 물유리계(L, W) 그라우팅 시공 후에는 평대 $1.96E-05\text{cm/sec}$, 조천 $4.338E-06\text{cm/sec}$ 로 비교적 양호한 투수계수를 보이고 있다. 두 현장이 동일하게 해안과 바로 인접한 곳에 위치하였고 평대 증계펌프장의 경우, 조천 증계펌프장 보다 시공 전 투수시험에서 낮은 투수계수를 보였으나 시공 후에는 오히려 조천 증계펌프장의 경우가 $4.338E-06\text{cm/sec}$ 로 평대 증계펌프장보다 시공 후 투수계수가 더욱 증진되었음을 알 수 있다. 이는 주입량을 고려했을 때 조천의 경우 536.676m^3 인 평대보다 약 28% 정도 더 많은 687.488m^3 가 주입된 결과라고 볼 수도 있으나, 시공 전 투수계수가 조천이 더 높고 굴착고가 평대보다 3m 정도가 깊은 점을 감안한다면 단순히 주입량에 의한 영향이라고는 볼 수 없다. 평대의 경우는 해안에 인접하여 위치하였으나 주변에 주택가가 형성되지 않아 일반 굴착기로 터파기를 실시하였으나, 조천의 경우 해안 인접지역에 바로 생활권이 형성되어 있어 민원을 고려 그라우팅 시공 후, 무진동공법을 이용하여 터파기를 실시하였다. 물유리계(L, W) 그라우팅공법이 벤토나이트계 규산소다를 지반에 주입 후 고결체를 형성하여 차수효과를 기대하는 공법이지만 고결체의 강도가 낮아 장기적인 구조체로서의 사용이 불가능한 단점을 고려할 때 일반 굴착기로 터파기 시 진동에 의한 고결체의 파괴 및 압반의 크랙 발생빈도가 무진동 공법을 이용하는 경우보다 빈번하다는 점이 차수효과의 증진작용에 마이너스 요인이 되었다고 판단된다. 따라서 주입의 효과를 투수성

측면에만 국한하여 본다면 물유리계(L, W) 그라우팅 시공 후 차수효과의 증진이 매우 뛰어나지는 않으나 비교적 양호하게 개선되었음을 알 수 있었으며 이는 주입재의 주입으로 인한 일차적인 대공극의 충전과 이차적인 침투 및 할렬주입(Fracture Grouting)의 효과에 의한 것이라고 판단된다.

본 현장 내의 지층 분포상태를 볼 때, 평대 펌프장의 경우 상부 송이층과 기공 및 절리가 발달한 다공질암층이 주 보강대상 지반이며, 조천 증계펌프장의 경우에는 2개의 지점의 시추결과가 상이하었는데 산쪽 시추공에서는 매립층 하부에 송이층이 존재하고 그 하부에 보통암층이 존재하였는데 보통암의 상태는 신선한 상태였으나, 바다쪽 시추공에서는 절리가 발달한 보통암층과 절리가 발달한 다공질암층이 반복적으로 존재하였지만 암반상태가 깊이에 따라 절리가 발달하거나 부분적으로 발달한 암반층 이었다. 이러한 지반에서의 차수효과를 검토하기 위해서는 지상에서 그라우팅 시공 후에 시공구간에 대한 시추조사나 현장투수시험으로 차수효과를 간접적으로 판단할 수는 있었으나 이렇게 할 경우 조사 지점이 국부적으로 편중되어 전체구간에 대한 차수효과 판단에 있어서 문제성이 대두되므로 일정구간을 설계에 맞게 실 시공한 이후에 이들의 효과를 직접 굴착함으로써 유입되는 지하수의 양과 이에 대한 보강효과를 판단하는 것이 현실적으로 가장 적합할 것으로 판단되었다.

Table 3.9 Results of In-situ Permeability Test in Field Before & After Construction

현 장	위 치	시공 전			시공 후		
		시험 심도 (m)	투수계수 (cm/sec)	평균	시험 심도 (m)	투수계수 (cm/sec)	평균
평대 중계 펌프장	바다 쪽	15.2	6.00E-02	3.218E-02	15	2.039E-05	1.96E-05
	산 쪽	15.2	4.363E-03		15	1.880E-05	
조천 중계 펌프장	바다 쪽	18.2	1.125E-01	8.166E-02	18.2	1.398E-06	4.338E-06
	산 쪽	18.2	1.241E-01		18.2	7.288E-06	
		12	8.393E-03				



IV. 차수효과에 대한 수치해석

1. 프로그램 개요

본 장에서는 수치해석을 이용한 현장에서의 유입량 산정을 위하여 정상류(Steady Flow) 및 비정상류(Transient Flow)해석에서 시간적 수위변화와 침부류의 거동에 영향을 미치는 불포화 영역까지도 해석할 수 있는 유한요소해석 프로그램인 Seep/W(Ver4.22)를 이용하였다.

Geo Slope사(社)에서 개발한 Seep/W(Ver4.22)프로그램은 자유수면 포화토(Saturated Soil)와 불포화토(Unsaturated or Partially Saturated Soil)의 특성을 동시에 반영한 해석이 가능하여 자유수면 결정에 유리하며, 시간에 따른 경계조건의 변화가 가능하여 시간에 따른 수위의 변화 및 과잉간극수압의 소산 등의 해석이 가능하고 저수지의 수위강하 후의 과잉간극수압의 소산과정, 강우에 의한 사면 내 간극수압의 변화, 담수구조 하부지반의 지하수위 변화, 지층에서의 배수 및 주입효과, 펌핑(Pumping)에 의한 지하수의 강하, 굴착면으로의 지하수 유출 등에 적용 가능하다.

2. 적용이론

Seep/W(Ver4.22)프로그램 해석을 위한 현장지점은 지반 투수성이 크고 지하수의 유입이 무한하며 시간에 따라 지하수위가 변하지 않는 조건을 고려하여 정상류 해석을 적용하였다.

1) 적용이론

Seep/W(Ver4.22)프로그램에서 적용된 기본적 이론은 Darcy의 법칙이다. 초기 Darcy의 법칙은 포화토에 대하여 유도되었으나, 최근의 연구에서 불포화토에도 Darcy의 법칙이 적용될 수 있다고 제시하였다(Richard, L. A, 1931, Child, E. C, and Collis George, N, 1950). 단지 포화토에서의 물의 흐름과 불포화토에서의 물의 흐름의 유일한 차이점은 불포화토에서의 물의 흐름상태에서 수리전도도(Hydraulic Conductivity)는 더 이상 일정하지 않고 함수비의 변화에 의하여 변하며, 간극수압의 변화에 의해 2차적으로 변한다는 사실이다. 따라서 Seep/W(Ver4.22)프로그램에서 포화 또는 불포화된 흙에서의 물의 흐름은 Darcy의 법칙의 적용을 받는다. Darcy의 법칙은 층류조건 하에서 유효하며 여러 종류 흙들에 적용가능하다(Braja M. Das, 1999). 방정식은 4.1과 같다.

$$q=ki \quad \text{제주대학교 중앙도서관} \quad (4.1)$$


여기서, q =비유출량(Specific Discharge)

k =수리전도도(Hydraulic Conductivity)

i =동수경사(Gradient of Fluid or Potential)

Darcy의 법칙은 일반적으로 4.2식과 같이 표현된다.

$$v=ki \quad (4.2)$$

여기서, v 는 Darcy의 속도(Darcian Velocity)로 일반적으로 유출속도라 하며 k 는 투수계수이다. 흙 속을 흐르는 물의 실제 평균 유속은 유출속도를 흙의 간극률로 나눈 값이다. Seep/W(Ver4.22)프로그램에서는 유출속도만을 프로그램 상에서 해석하고 그 결과를 나타낸다.

2) 지배 방정식

Seep/W(Ver4, 22) 프로그램에서 사용된 지배 방정식은 식 4.3과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (4.3)$$

여기서, H =전수두

$k_{k=x}$ 방향에서의 수리전도도

$k_{k=y}$ 방향에서의 수리전도도

Q =적용 경계 흐름

Θ =Volumetric Water Content

t =시간



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

식 4.3은 시간에 따라 임의의 한 지점인 요소체적(Elemental Volume)에서의 유입량과 유출량의 차가 Volumetric Water Content의 변화와 같다는 것을 보여준다. 또한 식 4.3은 외부의 적용된 흐름을 포함한 x축과 y축의 흐름의 변화율의 합이 시간에 따라 Volumetric Water Content의 변화율과 같다는 것을 나타낸다.

정상류 상태에서 요소체적을 지나는 유입량과 유출량은 항상 같다. 결과적으로 방정식의 우변은 0이 되고 식 4.3은 식 4.4와 같이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (4.4)$$

Volumetric Water Content에서의 변화는 흙의 특성과 응력상태의 변화에 따라 좌우된다. 포화 상태 및 불포화 상태에서의 응력상태는 두개의 변수로 나타낼

수 있다(Fredlind, D.G and Morgenstern, Nr, 1976,1977). 응력상태를 나타내는 두개의 변수는 $(\sigma - u_a)$ 와 $(u_a - u_w)$ 이며, 여기서, σ 는 전응력(total stress), u_a 는 간극공기압(Pore-air pressure), 그리고 u_w 는 간극수압이다.

Seep/W(Ver4.22) 프로그램 상에서의 전응력은 일정하다고 가정한다. 즉, 토량(Soil Mass)에 의한 하중재하>Loading) 또는 하중제거(Unloading)는 없음을 말한다. 두 번째 가정은 간극공기압이 대기압에 일정하다고 가정한다. 이는 $(\sigma - u_a)$ 이 일정하게 존재하며, Volumetric Water Content에서의 변화에 영향을 주지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 Volumetric Water Content에서의 변화는 오직 응력상태변수인 $(u_a - u_w)$ 항의 변화에 따라 변하며, 간극공기압(u_a)이 일정할 때, Volumetric Water Content의 변화는 오직 간극수압의 변화에 대한 함수이다. Volumetric Water Content에서의 변화는 식 4.5에 의하여 간극수압의 변화와 연관된다.

$$\partial O = m_w \partial u_w \quad \text{(4.5)}$$

여기서, m_w = 저류곡선(storage curve)의 경사

전수두(Total Hydraulic Head)는 식 4.6과 같이 정의 된다.

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad \text{(4.6)}$$

여기서, u_w = 간극수압

γ_w = 물의 단위중량

y = 지반고(elevation)

식 4.6을 이항하여 정리하면 식 4.7이 된다.

$$u_w = \gamma_w(H - y) \quad (4.7)$$

식 4.7을 식 4.5에 대입하여 정리하면 식 4.8이 된다.

$$\partial O = m_w \gamma_w \partial(H - y) \quad (4.8)$$

식 4.8을 식 4.3에 대입하여 정리하면 식 4.9가 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial(H - y)}{\partial t} \quad (4.9)$$

지반고가 일정하기 때문에, 시간에 대한 y 의 미분계수는 소거되어 식 4.10과 같은 지배 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4.10)$$

3. 해석영역 및 경계조건

Seep/W(Ver4.22) 프로그램을 이용하여 현장에서의 유입량을 산정하기 위해서는 각 현장에 대하여 동일한 조건의 해석영역 및 경계조건을 설정하는 것이 필요하다.

해석영역은 직교좌표계에서 x 축에 해당하는 지표면(Ground Level)에 수평방향

으로 설계 굴착 폭의 좌·우측에 각각 굴착 폭의 2배에 해당하는 지표면을 설정하였으며, 지표면에 수직방향으로는 지표면 기준으로 설계 굴착고의 4배에 해당하는 지반고(Elevation)를 설정하였다. 그라우팅 시공 전·후의 차수증진효과와 그라우팅 심도별 차수증진효과를 고찰하기 위하여 굴착 폭의 좌·우측에 차수막을 모델링(Modeling) 하였다.

경계조건은 해석영역의 좌우측은 수평이며 하부경계면을 포함한 외부 경계면에서의 침투유량이 0인 불투수층으로 가정하였다. 그라우팅 시공 시 예상되는 침투유량을 산정하기 위하여 지하수의 유동은 수평흐름이 주를 이루고 있어 침투해석 굴착단면 하부에는 Flux Section을 설정하였다. 지하수위는 현장에서 조사된 시추추상도 상의 지하수위를 적용하였다. 시간에 따른 지하수위의 변동은 고려하지 않았다.

4. 현장 적용 예



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

1) 현장 개요

본 연구의 대상현장은 북제주군 지역 광역 하수종말 처리시설 1단계사업 중 굴착 시공시 차수보강을 위하여 물유리계(L, W) 주입공법을 채택한 증계펌프장 건설현장으로 북제주군 지역의 주 오염원인 생활하수, 관장하수 및 농·공 폐수 등을 효과적으로 처리함으로써 북제주군의 지하수 및 해양 오염을 방지하고 도시환경 및 시민보건 위생을 개선하기 위하여 2006년 완공을 목표로 현재 공사가 진행 중이다.

물유리계(L, W) 주입공법을 채택한 증계펌프장 16개소 중, 지반조사 시 송이층이 존재하고 시공 전 현장부수시험 결과가 고부수성을 보여 차수를 위한 보강이 시급한 현장을 선정하였다. 선정된 현장은 평대 및 조천에 위치한 증계펌프장이

며 2개소 모두 해안 인접지역으로 조수간만에 의한 지하수위의 유동이 있는 현장이다. 2개소의 펌프장 형식은 단층구조로 구조물의 규격은 평대 중계펌프장의 경우 15.9×9.6m, 조천 중계펌프장의 경우 13.9×6.5m인 박스형 구조물이다. Fig. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4는 평대 및 조천 중계펌프장의 배치평면도와 단면도이다.

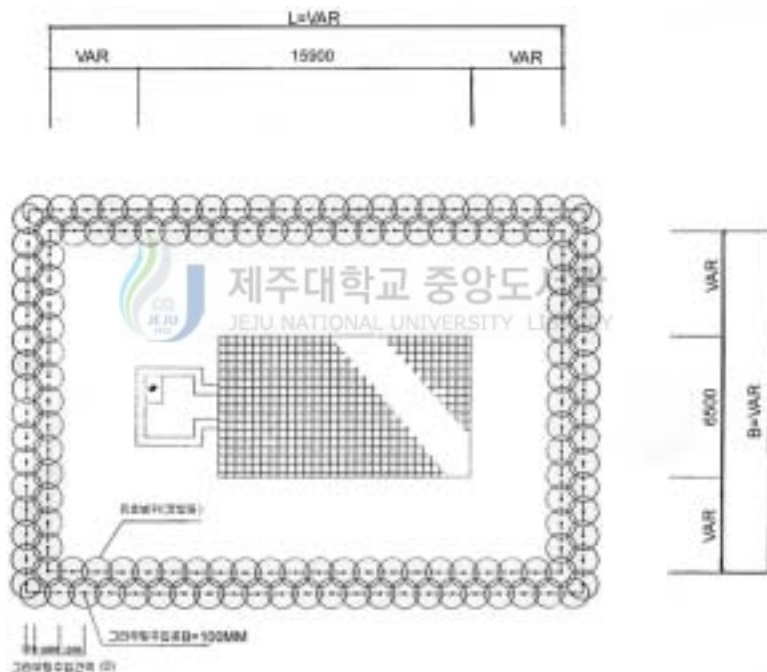


Fig. 4.1 Ground Plan of Pumping Station(Pyng-dae)

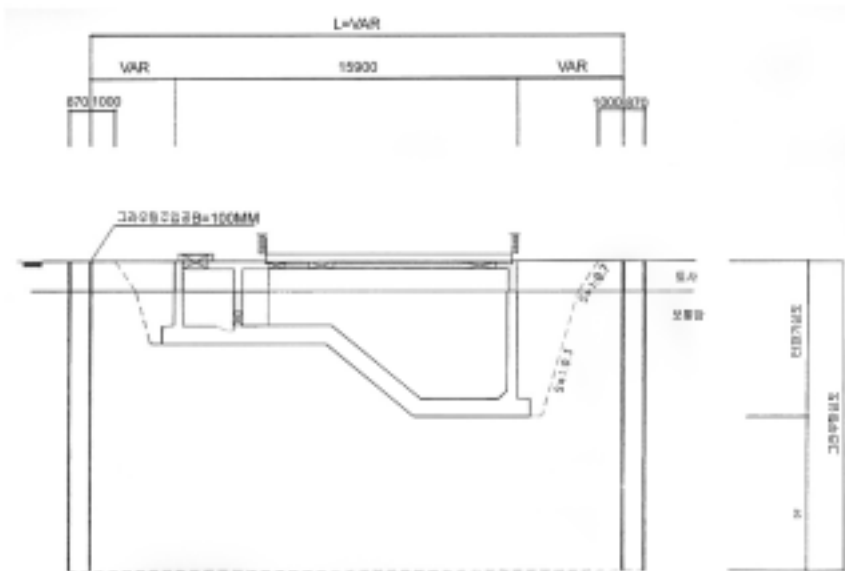


Fig. 4.2 Sectional Plan of Pumping Station(Pyng-dae)

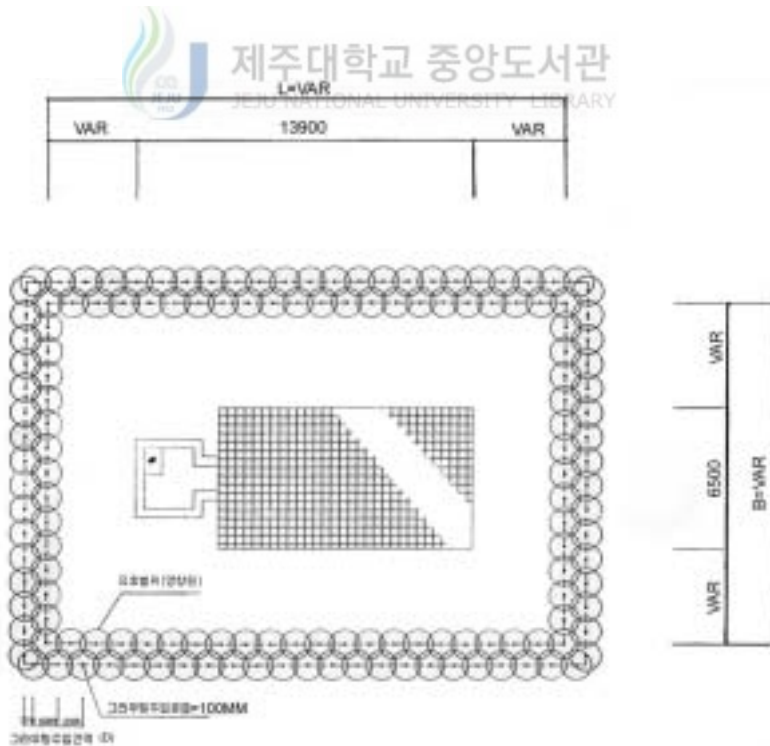


Fig. 4.3 Ground Plan of Pumping Station(Jo-chun)

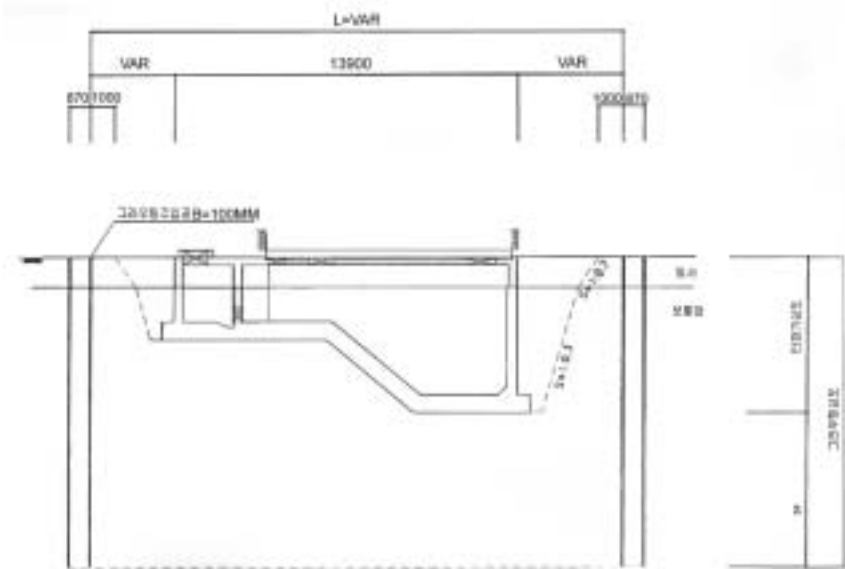


Fig. 4.4 Sectional Plan of Pumping Station(Jo-chun)



2) 제반 사항

수치해석을 이용한 유입량 산정을 위하여 각각의 현장에 대하여 정상류 상태의 2차원 해석을 실시하였다. 그리고 해석영역을 x, y방향 각각에서 격자선을 이용하여 노드(Node)가 4개인 4변형의 메쉬(Mesh)로 분할하였다.

수리전도율(Hydraulic Conductivity Ratio)은 1로써 x, y방향으로 수리전도도가 같다고 가정하였다. 여기서 수리전도율은 x방향의 수리전도도에 대한 y방향의 수리전도도의 비를 말한다.

조석에 따른 지하수위의 변동 요인과 압반선의 불균일함을 배제한 시추주상도상의 지층만을 고려하여 수치 해석결과와 실제 유입량이 다른 양상을 보일 수 있으며, 그라우팅시공 시 완벽한 현장 품질관리를 보증한다는 가정 하에 해석하였다.

시추주상도 상의 각각의 지층을 격자선에 의해 분할된 해석영역에 도시하였고

현장투수시험결과에 따른 지층별 투수계수를 적용하였다. 현장투수시험이 불가능한 지층의 경우, 문헌자료의 투수계수를 참고로 하여 적용하였다. Table 4.1, 4.2, 4.3은 투수계수의 각종 문헌자료이다.

Table 4.1 D_{20} and Coefficients of Permeability According to Creager (구조물 기초설계기준, 1997)

D_{20} (mm)	K (cm/sec)	토질분류	D_{20} (mm)	K (cm/sec)	토질분류
0.005	$3.00 \times 10E-6$	점토	0.18	$6.85 \times 10E-3$	세립 모래
0.001	$1.05 \times 10E-5$	세립 실토	0.20	$8.90 \times 10E-3$	
			0.25	$1.40 \times 10E-2$	
0.02	$4.00 \times 10E-5$	조립 실토	0.30	$2.20 \times 10E-2$	중립 모래
0.03	$8.50 \times 10E-5$		0.35	$3.20 \times 10E-2$	
0.04	$1.75 \times 10E-4$		0.40	$4.50 \times 10E-2$	
0.05	$2.80 \times 10E-4$		0.45	$5.80 \times 10E-2$	
			0.50	$7.50 \times 10E-2$	
0.06	$4.60 \times 10E-4$	매 우 세립 모래	0.60	$1.10 \times 10E-1$	조립 모래
0.07	$6.50 \times 10E-4$		0.70	$1.60 \times 10E-1$	
0.08	$9.00 \times 10E-4$		0.80	$2.15 \times 10E-1$	
0.09	$1.40 \times 10E-3$		0.90	$2.80 \times 10E-1$	
0.10	$1.75 \times 10E-3$		1.00	$3.60 \times 10E-1$	
0.12	$2.60 \times 10E-3$	세립 모래	2.00	1.80	잔자갈
0.14	$3.80 \times 10E-3$				
0.16	$5.10 \times 10E-3$				

Table 4.2 General Value of Coefficient of Permeability(구조물 기초 설계 기준, 1997)

토질	점토	실트	아주 가는 모래	가는 모래	중간 모래	굵은 모래	작은 자갈
입경 D(mm)	0.0~0.01	0.01~0.05	0.05~0.10	0.10~0.25	0.25~0.50	0.50~1.0	1.0~5.0
K (cm/s)	3.00E-06	4.50E-04	3.50E-03	1.50E-02	8.50E-02	3.50E-01	3.0

Table 4.3 Coefficient of Permeability in Rock & Soils(ROY E. HUNT, Geotechnical Engineering Investigation Manual, pp.154)

K(cm/sec)		신선암	간극률(%)	파쇄암	흙
실제 불투수	1.00E-10	간극률이 작은 암괴	0.1~0.5 0.5~5.0		풍화대 아래 균등한 점토
	1.00E-09				
	1.00E-08				
	1.00E-07				
배수 불량	1.00E-06	풍화 된 화강암 전암	5.0~30.0	점토로 충전 된 절리	매우 세립모래 유무기질 실트 모래점토혼합물 방적토 층이진 점토
	1.00E-05				
	1.00E-04				
	1.00E-03				
배수 양호	1.00E-02			절리 된 암반 절리가 열린 암반 파쇄가 심한 암반	
	1.00E-01				
	1.00				
	1.00E01				
	1.00E02				

3) 평대 증계펌프장

(1) 지반 현황

평대 증계펌프장에 대해서는 현장 대표 1개의 지점에 대한 시추조사를 시행하였다. 그 결과를 분석해 보면 지표면에서 하부 9.7m까지는 송이층과 RQD(Rock Quality Designation)가 각각41%와 26%인 절리가 발달한 다공질암층이 분포하고 있었다. 다공질암층 하부에는 RQD가 85%이고 부분적으로 절리가 발달한 보통암층이 약 5.3m의 두께로 존재하고 있으며, 암반층은 1~2m 간격으로 절리가 발달되어 나타났는데 암질의 상태는 아주 신선하게 나타났다. 그 하부에 절리가 발달한 다공질암층이 약 0.5m 층 두께로 분포하였다. Table 4.4는 평대 증계펌프장의 심도별 지층상태를 간략히 나타낸 것이다.

Table 4.4 Condition of Geological Layer According to the Depth(Pyung-dae)

시추 위치	심도(GL-M)	지층두께(M)	지층 상태	비 고
평대 증계 펌프장	0 ~ 2.5	2.5	송이층	
	2.5 ~ 9.7	7.2	다공질암층	절리발달
	9.7 ~ 15	5.3	보통암층	
	15 ~ 15.5	0.5	다공질암층	절리발달

(2) 적용 투수계수

평대 증계펌프장에 대한 수치해석을 위한 적용 투수계수는 송이층과 다공질암층의 경우, 문헌을 참고로 하여 $1.000E-3m/sec$ 를 적용하였다. 절리가 발달한 보통암층의 경우는 평대현장에서 시추된 코아를 바탕으로 조천 증계펌프장의 투수계수 값을 평균한 $8.40E-04m/sec$ 를 사용하였다. 그리고 보통암층에서는 현장 투

수시험결과로부터 4.729E-05m/sec를 적용하였으며 각 지층에 대한 투수계수 값을 정리하면 Table 4.5와 같다.

Table 4.5 Applied Coefficient of Permeability(Pyung-dae)

펌프장명	지층 상태	투수계수(m/sec) 적용값	비 고
평대 중계 펌프장	송이층	1.000E-03	
	다공질암층	1.000E-03	
	보통암층	8.4E-04	절리발달
	보통암층	4.729E-05	

(1) 물유리계(L, W) 그라우팅 시공성과 중앙도서관

평대 중계펌프장의 경우 총 주입공수가 178공으로 그라우팅 총 주입량은 536,676m³ 정도가 소요되었다. 시멘트는 106335.2kg, 규산소다는 186146.7kg, 벤토나이트는 시멘트의 10%정도로 10633.52kg 정도가 소요되었다. Seal재의 배합비는 표준 배합비(Table 3.1참고)를 적용하여 시멘트 20kg과 벤토나이트 6.25kg의 비율로 배합 및 주입하였다. Table 4.6은 평대 중계펌프장 그라우팅 시공 전 178공 중, 설계상의 그라우팅 주입량의 적합여부를 판단하기 위해 시공 전 10개공에 대하여 시험 시공한 시험공의 주입량을 나타내었다.

Table 4.6 Infiltration Quantity of Testing Hole(Pyoung-dae)

정대	단위	공별 주입량									
		1	4	7	44	47	94	97	134	135	136
주입량	m ³	2.832	2.124	2.304	2.734	2.070	2.028	2.008	3.218	1.992	3.702
천공 심도	m	각 공당 15.2m 천공									
시멘트	kg	566.4	424.8	460.8	546.8	414	405.6	401.6	643.6	398.4	740.4
규산 소다	ℓ	991.2	743.4	806.4	956.9	724.5	709.8	702.8	1126.3	697.2	1295.7
벤도 나이프	kg	56.64	42.48	46.08	54.68	41.4	40.56	40.16	64.36	39.84	74.04
Seal재 주입	m ³	각 공당 0.1m ³ 주입									
멘젯류 브설치	m	각 공당 15.2 m 설치									



(2) 차수효과에 대한 수치해석결과

수치해석을 이용한 물유리계(L, W) 그라우팅의 차수효과를 규명하기 위하여 그라우팅을 시공하지 않은 경우와 시공하였을 경우의 수치해석결과를 비교분석하였다. 또한 그라우팅 시공심도별 차수효과를 고려하여 각 현장마다 그라우팅 심도의 변화를 두어 수치해석을 실시하였다.

Seep/W(Ver4. 22) 프로그램에 의한 각각의 경우의 수치해석결과는 Table 4.7과 같다. 수치해석결과 그라우팅을 고려하지 않았을 경우의 유입량은 794 m³/hr를 보이고 있으나, 그라우팅 심도를 8m로 제한한 경우는 침투유량이 464 m³/hr로 42%정도의 유입량 감소를 보이고 있다. 그라우팅 심도를 15m로 제한한 경우는 침투유량이 78 m³/hr로 그라우팅 심도를 8m로 제한한 경우에 비하여 상당한 감소를 보이고 있다. 한편 Grouting 심도를 17m로 한 경우는 침투유량이 77 m³/hr로 작게 나타나고 있으나 심도가 15m로 제한한 경우에 비해 침투유량의 감소가

미미한 것으로 나타나고 있다. Fig. 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 평대 증계펌프장의 수치해석결과를 보여주고 있다.

Table 4.7 Seepage Quantity According to the Depth of Grouting (Pyung-dae)

평대 증계 펌프장			
Grouting 조건	굴착고 환산 <그라우팅심도/굴착고>	Flux Section ($m^3/sec/m$)	침투유량 (m^3/hr)
Grouting하지 않은 경우	-	8.8553E-03	794
Grouting 심도 8m 경우	1.1 H	5.1717E-03	464
Grouting 심도 15m 경우	2.0 H	8.7296E-04	78
Grouting 심도 17m 경우	2.2 H	8.6162E-04	77

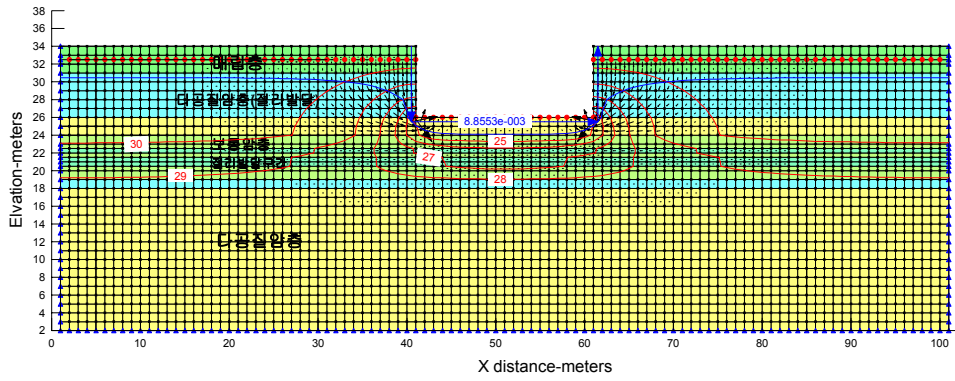


Fig. 4.5 Result of Seepage Analysis(No Grouting)

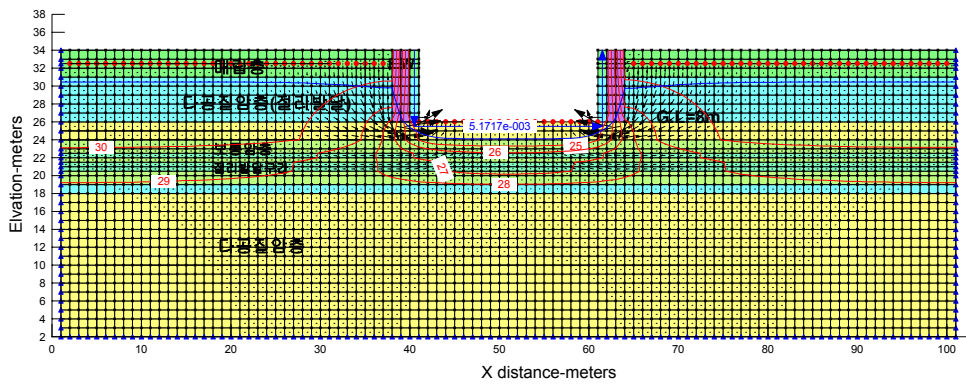


Fig. 4.6 Result of Seepage Analysis(Depth of Grouting=8m)

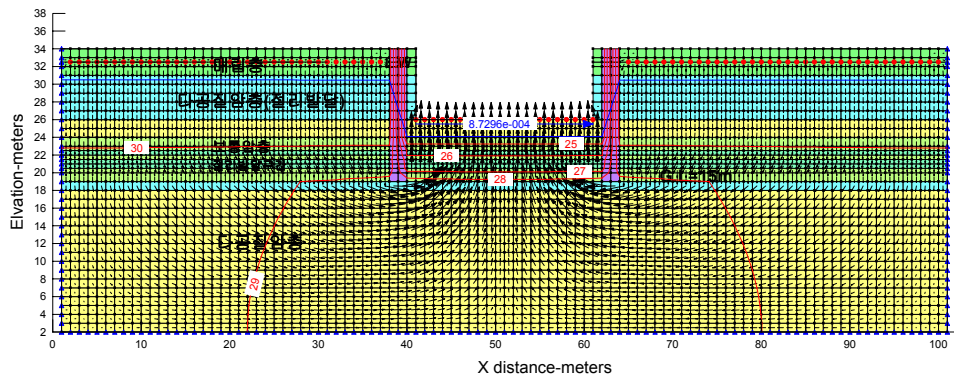


Fig. 4.7 Result of Seepage Analysis (Depth of Grouting=15m)

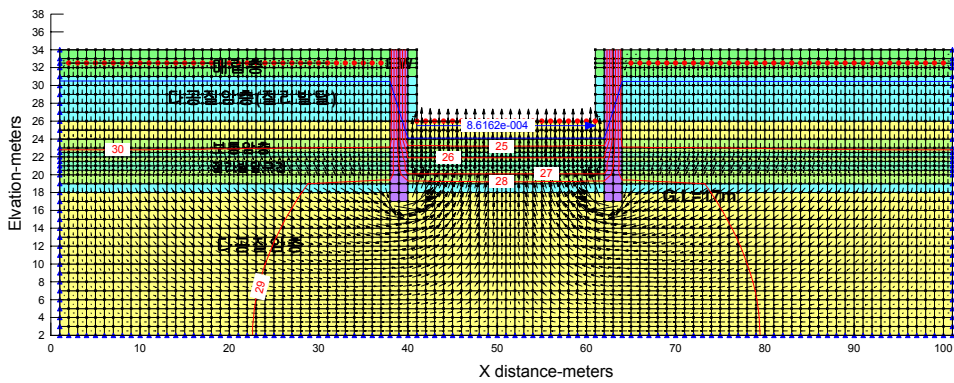


Fig. 4.8 Result of Seepage Analysis (Depth of Grouting=17m)

4) 조천 증기펌프장

(1) 지반 현황

조천 증기 펌프장에 대해서는 산쪽, 바다쪽 2개의 지점에 대한 시추조사를 시행하였다. 그러나 시추결과는 두 개의 지점에서 상당히 상이한 시추결과를 나타내었다. 산쪽의 시추공에서는 송이층 하부에 절리가 발달한 다공질암층이 존재하고 그 다공질암층 하부에는 암반층이 약 1m의 두께로 존재하고 있었으며 그 아래에는 절리가 발달한 다공질암층과 다공질암층이 다시 나타나고 있었으며 그 아래에는 다시 부분적 절리가 발달한 보통암층이 4.5m 두께로 존재하고 있었다. 암반층의 암질의 상태는 아주 신선하게 나타났으며, 그 하부에 절리가 발달한 다공질암층이 약 5.1m 층 두께로 분포하였다. 그리고 바다쪽의 경우는 매립층 하부에 다공질 암이 1.5m 두께로 존재하고 그 하부에는 절리가 발달한 보통암층이 존재하고 있었으며 암층 하부에는 다시 다공질 암이 반복적으로 존재하였다. 암반상태는 깊이에 따라 절리가 발달하거나 부분적으로 발달한 것으로 나타나고 있다. 이들 각각에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(2) 적용 투수계수

조천 증기펌프장에 대한 수치해석을 위해 다공질암층은 현장투수시험부터 $1.433E-03m/sec$ 를 구할 수 있었으며 이 결과를 해석에 적용하였다. 그리고 절리가 발달한 보통암층의 경우도 현장투수시험 결과 $8.873E-05m/sec$ 를 구할 수 있었으며, 부분적으로 절리가 발달한 보통암층에서는 $3.89E-05m/sec$ 의 현장 투수계수 값을 구하여 적용하였다. 각 지층에 대한 투수계수를 정리하면 Table 4.9와 같다.

Table 4.8 Condition of Geological Layer According to the Depth(Jo-chun)

시추 위치		심도(GL-M)	지층두께 (m)	지층 상태	비 고
조 천 중 계 펌프장	지점1 (산쪽)	0 ~ 1.5	1.5	송이층	
		1.5 ~ 6	4.5	다공질압층	절리발달
		6 ~ 7	1	보통압층	
		10 ~ 13.5	3.5		
		13.5 ~ 18.6	5.1	다공질압층	절리발달
	지점2 (바다쪽)	0 ~ 2.0	2.0	매립층	
		2.0 ~ 1.5	1.5	다공질 압	-
		7.5 ~ 9.0	1.5		-
		13.0 ~ 16.0	3.0		절리발달
		3.5 ~ 7.5	4.0		절리발달
9.0 ~ 13.0	4.0	보통압층	절리발달		
16.0 ~ 18.2	2.2		부분적 절리발달		

Table 4.9 Applied Coefficient of Permeability(Jo-chun)

펌프장명	지층 상태	투수계수(m/sec) 적용값	비 고
조천 중계 펌프장 (바다쪽)	매립층	1.000E-03	
	다공질 압	1.433E-03	
	보통압층	8.373E-05	절리발달
	보통압층	3.884E-05	부분적 절리발달

(3) 물유리계(L, W) 그라우팅 시공성과

조천 증계펌프장의 경우 총 주입공수가 177공으로 그라우팅 총 주입량은 687,488㎥ 정도가 소요되었다. 시멘트는 137497.6kg, 규산소다는 240620.3kg, 벤토나이트는 시멘트의 10%정도로 13748.76kg 정도가 소요되었다. Seal재의 배합비는 표준 배합비의 120%를 적용하여 시멘트 24kg과 벤토나이트 7.5kg로 배합 및 주입하였다. Table 4.10은 조천 증계펌프장 그라우팅 시공 전 177공 중, 설계상의 그라우팅 주입량의 적합여부를 판단하기 위해 시공 전 10개공에 대하여 시험 시공한 시험공의 주입량을 나타내었다.

Table 4.10 Infiltration Quantity of Testing Hole(Jo-chun)

조천	단위	공별 주입량									
		1	4	8	44	47	94	97	133	135	136
주입량	㎥	5,202	3,058	4,428	5,008	4,55	2,564	2,256		4,388	4,788
천공 심도	㎞	각 공당 18.2m 천공									
시멘트	kg	1040.4	611.6	885.6	1001.6	910	512.8	451.2	587.2	877.6	957.6
규산 소다	ℓ	1820.7	1070.3	1549.8	1752.8	1592.5	897.4	789.6	1027.6	1535.8	1675.8
벤토 나이트	kg	104.04	61.16	88.56	100.16	91	51.28	45.12	58.72	87.76	95.76
Seal재 주입	㎥	각 공당 0.12㎥ 주입									
맨젯류 브설치	㎞	각 공당 18.2 m 설치									

(4) 차수효과에 대한 수치해석결과

수치해석을 이용한 물유리계(L, W) 그라우팅의 차수효과를 규명하기 위하여 그라우팅을 시공하지 않은 경우와 시공하였을 경우의 수치해석결과를 비교분석하

였다. 또한 그라우팅 시공심도별 차수효과를 고려하여 각 현장마다 그라우팅 심도의 변화를 두어 수치해석을 실시하였다.

Seep/W(Ver4, 22) 프로그램에 의한 각각의 경우의 수치해석결과는 Table 4.11과 같다. 수치해석결과 그라우팅을 고려하지 않았을 경우의 유입량은 $804 \text{ m}^3/\text{hr}$ 를 보이고 있으나, 그라우팅 심도를 15m로 제한한 경우는 침투유량이 $147 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 82%정도의 유입량 감소를 보이고 있다. 그라우팅 심도를 18m로 제한한 경우는 침투유량이 $85 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 그라우팅 심도를 15m로 제한한 경우보다 감소하는 경향을 보이고 있다. 한편 그라우팅 심도를 20m로 제한한 경우는 침투유량이 $84 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 작게 나타나고 있으나 심도가 18m로 제한한 경우에 비해 침투유량의 감소가 미미한 것으로 나타나고 있다. Fig. 4.9, 4.10, 4.11, 4.12는 평대 중계 펌프장의 수치해석결과를 보여주고 있다.



Table 4.11 Seepage Quantity According to the Depth of Grouting (Jo-chun)

조천 중계 펌프장			
Grouting 조건	굴착고 환산 <그라우팅심도/굴착고>	Flux Section ($\text{m}^3/\text{sec}/\text{m}$)	침투유량 (m^3/hr)
Grouting하지 않은 경우	-	8.9699E-03	804
Grouting 심도 15m 경우	1.7 H	1.6388E-03	147
Grouting 심도 18m 경우	2.0 H	9.503E-04	85
Grouting 심도 20m 경우	2.2 H	9.3768E-04	84

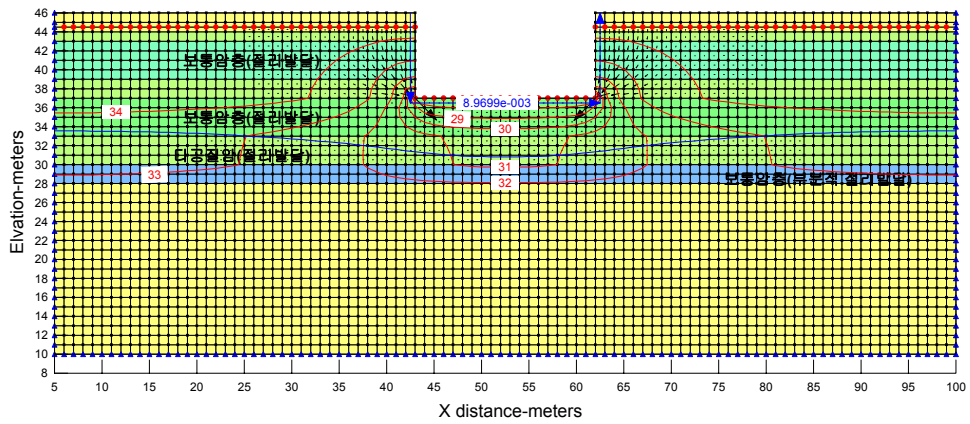


Fig. 4.9 Result of Seepage Analysis(No Grouting)

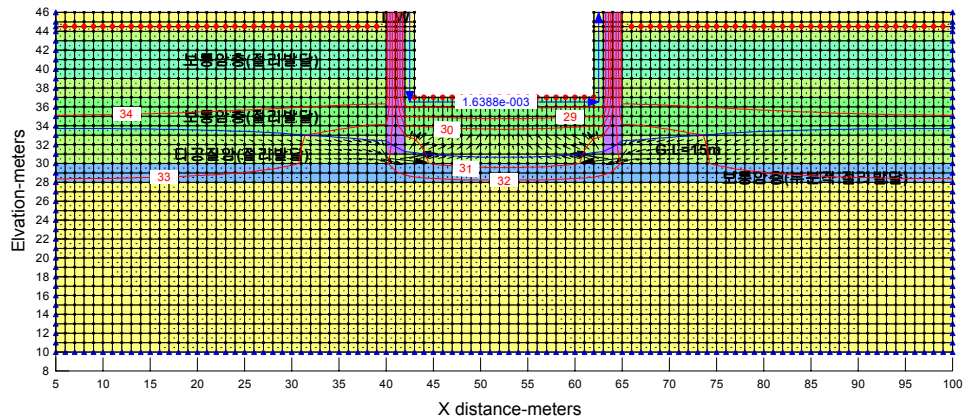


Fig. 4.10 Result of Seepage Analysis(Depth of Grouting=15m)

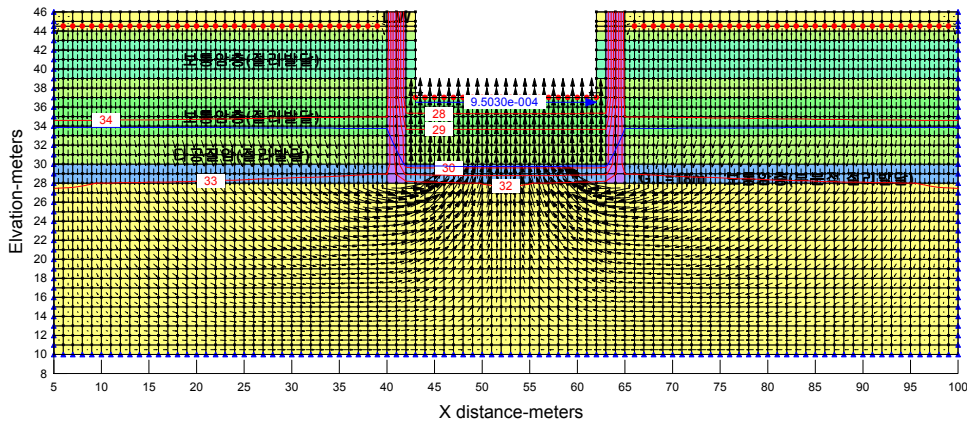


Fig. 4.11 Result of Seepage Analysis(Depth of Grouting=18m)

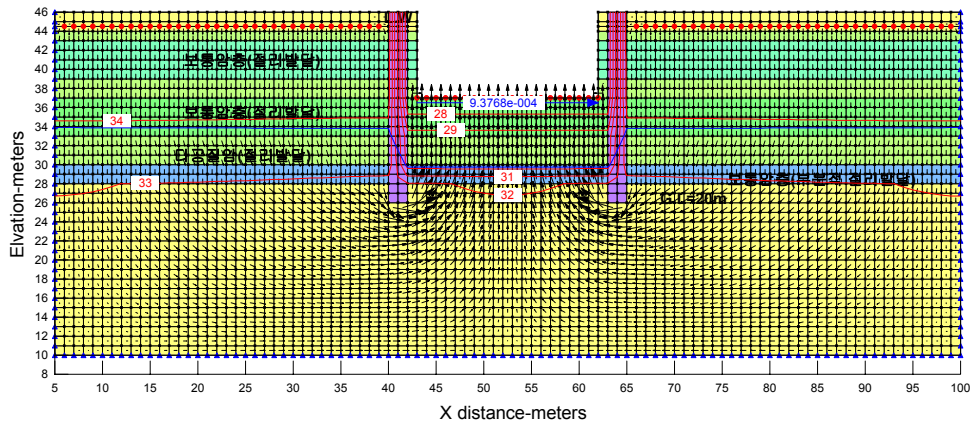


Fig. 4.12 Result of Seepage Analysis(Depth of Grouting=20m)

VI. 결론

조천 및 평대 증계펌프장에 대한 그라우팅 시공 전후의 현장 투수시험 및 해당 현장에서 채취한 송이 시료에 대한 실내 투수시험을 실시하여 투수특성을 고찰하고 유한요소법에 의한 예측치를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 실내 투수시험을 통하여 자연 상태의 송이시료에 대한 투수계수를 산정하고 기본물성실험을 바탕으로 주입량을 산정한 후, 그 주입량에 따라 물유리(L, W)약액을 배합하여 제작한 공시체 및 실제 간극율보다 15%정도 과대 및 15%, 30%과소하게 제작한 공시체에 대한 투수계수를 산정한 결과, 송이층에 대한 차수효과는 송이층의 간극율과 밀접한 관계가 있음을 확인하였다. 실제 간극율보다 낮게 간극율을 산정할수록 주입량이 적어지며 투수시험결과 투수계수는 높아져 차수증진효과를 기대할 수가 없다. 이와 반대로 실제 간극율보다 간극율을 과대하게 산정 한다면 차수증진효과는 증진되나 경제적 시공이 어렵기 때문에 물유리계(L, W) 그라우팅 시공 전, 정확한 간극율 산정이 필요하다.
2. 실내 투수시험을 위한 공시체 제작 시, 양생일수에 따른 투수계수의 변화가 양생 7일 전까지는 증진되나 그 후 14일까지는 양생 7일을 기점으로 점차 수렴함을 알 수 있다. 이는 현장에서 그라우팅 시공 후, 성과투수계수를 산정하기 위하여 최소 7일정도의 양생기간을 두고 현장 투수시험을 실시할 필요가 있다.
3. 산정된 투수계수의 값만을 고려하여 시공 전후 현장 투수시험결과와 실제 간극율에 의한 송이시료에 대한 실내 투수시험 결과를 수치적으로 비교하면

실내투수시험에서 차수증진효과가 다소 크지만 그 효과가 미미하다. 그러나 실내 투수시험이 단일시료에 대한 시험이라는 점과 송이 자체의 높은 투수성을 감안한다면, 송이층에 대한 물유리계(L, W) 그라우팅에 의한 보강시 다른 지층에 비해 상대적으로 차수효과가 높다고 판단된다. 이는 지반에서의 압반선이 불균일하고 지층별로 다른 물성치를 가지고 있다는 점과 물유리계(L, W) 그라우팅은 주입압에 의한 주입방식으로 간극 및 절리면에 그라우트제가 완전히 충전 되었다고 볼 수 없는 반면, 실내시험의 경우 현장 배합비에 따른 물유리 약액과 송이시료를 동시에 섞어 배합하는 방식으로 공시체를 제작하여 송이 입자사이에 물유리 약액이 충분히 충전 된 결과라 볼 수 있다.

4. 송이에 대한 실내 투수시험결과를 바탕으로, 송이층을 포함하는 지층 또는 매립층이나 퇴적층, 절리가 발달한 다공질암층에서의 지반보강이 아닌 차수를 목적으로 현장에서 물유리계(L, W) 그라우팅을 적용하는 경우, 시공에 어려움이 없을 것으로 본다.
5. 시공 후 현장투수시험결과와 수치해석결과를 비교하면 지하수의 유입속도를 고려하지 않고 단지 지하수위만 고려하는 차수대상지반에서 Gel-time 조절이 용이한 물유리계(L, W) 그라우팅 시공이 적합하다.



VII. 참고 문헌

- 김문수, 1987, 물유리계 주입재에 의한 차수 및 지반강도증대효과에 관한 연구, 한양대학교 석사학위논문, pp. 15-32.
- 김용필, 정경환, 송영선, 1997, 지반공학 시험법 및 응용, 도서출판 세진사, pp. 179-206.
- 남정만, 2000, 제주도 지반의 공학적 특성, 한국지반공학회 암반역학위원회 논문집, pp. 171-182.
- 농어촌진흥공사, 2000, 제주도 지하수보전 및 관리계획 보고서, pp. 45-103
- 이병주, 2000, 제주도 화산암지대의 지질구조 및 지질조사 기법, 한국지반공학회 암반역학위원회 논문집, pp. 183-194.
- 윤정수, 1995, 제주도 북사면의 기생화산체에 관한 연구, 제주대학교 해양연구보고 제19권, pp. 25-38.
- 정용성, 1986, 약액주입을 중심으로 한 차수효과증대에 관한 연구, 한양대학교 석사학위논문, pp. 31-36.
- 전병식, 1982, 약액의 침투주입에 의한 토질성상변화, 대한토목학회 논문집, 제 2권 4호, pp. 1-21.
- 전병식, 1997, 건설기술자를 위한 지반주입공법, 원기술, pp. 115-141.
- 전병식, 2002, 지반공학-이론과 실제-, 구미서관, pp. 94-113, 687-706.
- Arvind V. Shroff, Dhananjay L. Shah, 1993, Grouting Technology, A. A. Balkema, pp. 26-47.
- Braja M. Das, 1997, Principles of Geotechnical Engineering, PWS publishing company, pp. 129-145.
- Richard Widmann, 1993, Grouting in Rock and Concrete, A. A. Balkema, pp. 65-123.
- R. H. karol, 1983, Chemical Grouting, Marcel Dekker, INC, N. Y., pp. 12-23

- Robert Bowen, 1981, Grouting in Engineering Practice, John Wiley & Sons, pp. 32-45.
- T. William Lambe・Robert V. Whitman, 1993, Soil Mechanics SI Version, John Wiley & Sons, pp. 439-461, 491-509.
- 森 麟, 千柄植, 1985, 薬液注入における割裂注入圧について, 日本土木学会第40回 年次学術講演会講演概要集, pp.627-628.
- 日本土質工学会, 1985, 薬液注入工法の調査・設計から施工まで, 日本土質工学会, pp. 71.
- 吉田 迪雄, 1969, 注入工法の合理化, 施工技術, Vol. 2, No. 10, pp. 24-28.
- 坪井 直道外, 1971, 薬液注入工法の設計, 土木施工, Vol. 12, No. 2, pp. 133-137.
- 坪井 直道, 1978, 薬液注入工法の実際, 半島出版社, pp. 148-149, 187.
- 日本材料学会 土質安定材料委員会, 1974, 薬液注入工法指針と解説, 半島出版社, pp. 42-43.
- 紫崎 光弘 外2人, 1979, 薬液注入工法の設計と施工, 山海堂, pp. 84-85.
- 紫崎 光弘 外, 1985, 最新薬液注入工法の設計と施工, 山海堂, pp. 70-80.
- 島田 俊介, 佐藤 武, 多久 実, 1989, 最先端技術の薬液注入工法, 理工図書.
- 日本土木学会, 1972, ダム基礎岩盤グラチングの施工指針.