



저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



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](#)

2013年 8月  
석사학위논문

모형실험을 통한 포화사석층  
그라우팅의 차수효과

조선대학교대학원

토목공학과

정신규

모형실험을 통한 포화사석층  
그라우팅의 차수효과

Effects of Grouting on the Saturated Riprap Layer by  
Model Test

2013년 8월 23일

조선대학교 대학원

토목공학과

정신규

# 모형실험을 통한 포화사석층 그라우팅의 차수효과

지도교수 김 대 현

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2013년 4월

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

정 신 규

# 정신규의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 운 중 (인)

위 원 조선대학교 교수 박 상 준 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 대 현 (인)

2013년 5월

조선대학교 대학원

# 목 차

## ABSTRACT

제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구배경 및 목적 .....	1
1.2 국내·외 연구 동향 .....	2
1.3 연구방법 .....	5
제 2 장 그라우팅 종류 및 특징 그리고 물의 흐름 .....	7
2.1 그라우트재와 그라우팅공법 .....	7
2.1.1 그라우트재의 분류 .....	7
2.1.2 그라우트재의 종류 .....	8
2.2 그라우팅 설계 .....	14
2.2.1 그라우팅공법의 선정 .....	14
2.2.2 그라우팅 계획 .....	16
2.3 물의 흐름 .....	34
2.3.1 흙속의 물의 흐름 .....	34
2.3.2 사석층의 물의 흐름 .....	38
제 3 장 실내실험 방법 및 결과 .....	43
3.1 현장 상황 및 현장조건 .....	43
3.2 시료 및 시험기 .....	43
3.2.1 시료의 배합비 및 주입조건 .....	46
3.1.2 시험 절차 .....	47
3.3 주입둘레 측정 .....	50
3.3.1 그라우트재 주입 둘레 측정개요 .....	50

3.3.2 주입시간에 따른 들레 측정결과 .....	53
3.3.3 유속유무에 따른 들레 측정결과 .....	58
3.3.4 기존 주입재와 개발 주입재 비교결과 .....	61
3.3.5 그라우트재의 팽창률 분석 .....	63
3.4 그라우트재의 강도평가 .....	66
3.4.1 일축압축강도 평가결과 .....	67
3.5 수중불분리 평가 .....	73
3.5.1 수중불분리 평가결과 .....	73
3.6 그라우트재의 통수능 평가 .....	74
3.6.1 통수능 평가 결과 .....	75
 제 4 장 결 론 .....	 77

## 참고문헌

# 표 목 차

표 2.1 차수 및 지반보강을 위한 그라우팅의 종류 .....	9
표 2.2 그라우팅 공법별 분류 .....	13
표 2.3 그라우팅로드 구성에 의한 그라우팅공법의 종류 .....	15
표 2.4 목적별 그라우트의 분류 .....	23
표 2.5 그라우트의 $G_{85}$ , $G_{95}$ 의 값 .....	24
표 2.6 토질에 의한 그라우트의 충전율-그라우팅률의 참고치 .....	28
표 2.7 토질조건에 따른 물성치 .....	30
표 2.8 토질별 그라우팅 간격 .....	34
표 3.1 시험에 사용된 주입재료의 배합비(OPC+기타, OPC+석회+모래 모르타르) ..	46
표 3.2 실험조건 .....	47
표 3.3 일반형 재료에 대한 들레 측정길이 .....	51
표 3.4 속경형 재료에 대한 들레 측정길이 .....	52
표 3.5 측정시간에 따른 그라우트재의 팽창률 .....	64
표 3.6 일축압축강도 시험 결과 .....	68
표 3.8 비중 측정량 .....	74



# 그 립 목 차

그림 2.1 커튼 그라우팅 .....	10
그림 2.2 라이닝 뒷면의 여굴부 백필 그라우팅방법 .....	11
그림 2.3 링 커튼 그라우팅 계획도 .....	12
그림 2.4 토립자 공극에서의 약액의 침투와 규산겔에 의한 토립자 고결의 모형도 ...	17
그림 2.5 물유리약액의 겔화 과정 .....	18
그림 2.6 물유리의 겔화 과정 .....	19
그림 2.7 펌프압송방식 .....	25
그림 2.8 로드의 설치형태 .....	31
그림 2.9 그라우트공의 배치 .....	33
그림 2.10 흙속의 물의 흐름 개략도 .....	35
그림 2.11 자연 흙 속 유속과 동수경사 관계 .....	36
그림 2.12 사석층의 물의 흐름 .....	38
그림 3.1 현장상황 모식도 .....	43
그림 3.2 시험에 사용된 사석 .....	44
그림 3.3 그라우팅 및 주입장치 모식도 .....	45
그림 3.4 그라우팅 시험기 .....	45
그림 3.5 그라우팅 장치 조립 .....	47
그림 3.6 사석 충전 .....	48
그림 3.7 사석 포화 .....	49
그림 3.8 그라우트재 주입양상 .....	49
그림 3.9 유속 주입 .....	49
그림 3.10 주입장치 및 주입 .....	49
그림 3.11 2m 원통형 아크릴의 간격마다 주입재의 둘레 측정방법 .....	50
그림 3.12 일반형저점도 유속0, 주입10의 주입양상 .....	53
그림 3.13 일반형저점도 유속10, 주입10의 주입양상 .....	53
그림 3.14 일반형저점도 유속0, 주입20의 주입양상 .....	54
그림 3.15 일반형저점도 유속10, 주입20의 주입양상 .....	54
그림 3.16 일반형고점도 유속0, 주입10의 주입양상 .....	54

그림 3.17 일반형고점도 유속10, 주입10의 주입양상 .....	54
그림 3.18 일반형고점도 유속0, 주입20의 주입양상 .....	55
그림 3.19 일반형고점도 유속10, 주입20의 주입양상 .....	55
그림 3.20 모르타르의 주입양상 .....	56
그림 3.21 시멘트 페이스트의 주입양상 .....	56
그림 3.22 속경형저점도 유속0 주입10의 주입양상 .....	56
그림 3.23 속경형저점도 유속10 주입10의 주입양상 .....	56
그림 3.24 속경형저점도 유속0 주입20의 주입양상 .....	57
그림 3.25 속경형저점도 유속10 주입20의 주입양상 .....	57
그림 3.26 속경형고점도 유속0 주입10의 주입양상 .....	57
그림 3.27 속경형고점도 유속10 주입10의 주입양상 .....	57
그림 3.28 속경형고점도 유속0 주입20의 주입양상 .....	58
그림 3.29 속경형고점도 유속10 주입20의 주입양상 .....	58
그림 3.30 일반형저점도-주입속도10 흐름양상 .....	59
그림 3.31 일반형저점도-주입속도20 흐름양상 .....	59
그림 3.32 일반형고점도-주입속도10 흐름양상 .....	59
그림 3.33 일반형저점도-주입속도20 흐름양상 .....	59
그림 3.34 속경형저점도-주입속도10 흐름양상 .....	60
그림 3.35 속경형저점도-주입속도20 흐름양상 .....	60
그림 3.36 속경형고점도-주입속도10 흐름양상 .....	61
그림 3.37 속경형고점도-주입속도20 흐름양상 .....	61
그림 3.38 기존주입재와 일반형개발재의 비교(주입10) .....	62
그림 3.39 기존주입재와 일반형개발재의 비교(3h) .....	62
그림 3.40 기존주입재와 일반형개발재의 비교(주입20) .....	62
그림 3.41 기존주입재와 일반형개발재의 비교(3h) .....	62
그림 3.42 기존주입재와 속경형개발재의 비교(주입10) .....	63
그림 3.43 기존주입재와 속경형개발재의 비교(3h) .....	63
그림 3.44 기존주입재와 속경형개발재의 비교(주입20) .....	63
그림 3.45 기존주입재와 속경형개발재의 비교(3h) .....	63
그림 3.46 일반형 그라우트재의 주입량 .....	65
그림 3.47 속경형 그라우트재의 주입량 .....	65

그림 3.48 그라우트재의 팽창률 .....	66
그림 3.49 일축압축시험기 .....	67
그림 3.50 일축압축강도 Test .....	67
그림 3.51(a) 일반형저점도 일축압축강도 측정결과 및 파괴양상 .....	69
그림 3.51(b) 일반형저점도 일축압축강도 측정결과 및 파괴양상 .....	69
그림 3.52(a) 일반형고점도 일축압축강도 측정결과 및 파괴양상 .....	70
그림 3.52(b) 일반형고점도 일축압축강도 측정결과 및 파괴양상 .....	70
그림 3.53(a) 속경형저점도 일축압축강도 측정결과 및 파괴양상 .....	71
그림 3.53(b) 속경형저점도 일축압축강도 측정결과 및 파괴양상 .....	71
그림 3.54(a) 속경형고점도 일축압축강도 측정결과 및 파괴양상 .....	72
그림 3.54(b) 속경형고점도 일축압축강도 측정결과 및 파괴양상 .....	72
그림 3.55 재료 분리현상 .....	73
그림 3.56 통수능시험 전경 .....	75

# ABSTRACT

## **Effects of Grouting on the Saturated Riprap Layer by Model Test**

**Jung, Singyu**

**Advisor : Prof. Kim, Daehyeon**

**Department of Civil Engineering**

**Graduate School of Chosun University**

In the case of the ground having underground water, the grouting method is normally used. The grout material includes mortar that is combined with one or more among cement suspension, clay, sand, gravels or bentonite, or the chemical fluid of cement. However, these grout materials are hard to permeate, can be swept away because they take long time to harden. For these reasons, it requires another renovation again within 5 or 10 years due to the eluviation of grout materials. Therefore, it is necessary to develop grout materials which are more suitable for the void of ground and having underground water.

Grouting is generally used for the impermeable body of breakwater or reinforcing it, but unavoidably the mixture of boulders or the oddly shaped stones disrupts drilling works. Grouting is not done as effectively as we expect. New grouting methods and materials are being developed and attempted, but the grouting to saturated riprap layer in particular is not effectively done. Especially, when using the grout fluid, the grout materials are hard to fill the void and sometimes the weak durability happens by the eluviation of the grout fluid. Also, when injecting the cement suspension, it could be diluted by the velocity of a moving fluid, and if the velocity is too fast, the filling would not be able to perform well.

In this study, four grout materials were developed to evaluate the effectiveness of

grouting to saturated riprap layer with flow of underground water . The developed materials are divided into quick-setting and general-type which are also composed of the high and low viscosity. A number of grouting experiments were performed in a model chamber with 0.4m in diameter and 2.0m in length. To reproduce the field conditions of saturated riprap layer, the grouting experiments were done with 0cm/sec and 10cm/sec of the flow velocity and 10L/min and 20L/min of the injection velocity. Based on the grouting experiments, the quick setting type was found to be most effective for grouting to the saturated riprap layer.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경 및 목적

최근 약액을 이용한 그라우팅공법이 지반을 개량할 목적으로 주로 이용되고 있으며, 이러한 그라우트재로 시멘트 현탁액, 시멘트에 한 가지 혹은 그 이상을 혼합한 반응액과 모르타르 등이 사용되고 있는 실정이다. 그러나 대부분의 그라우트재의 경우 침투의 한계성, 고결시간이 길어짐에 따른 그라우트재의 유실, 시공 상의 불편함과 자재공급의 어려움, 그리고 재료의 용탈로 인한 내구성 저하 등의 단점이 발생하여, 그라우팅 시공 후 5년 내지 10년 이내에 지반을 재보수해야 하는 경우가 발생하게 된다.

방조제 및 제방, 댐에 형성된 제체의 경우 일반적으로 흙을 사용하여 축조된 구조물이기 때문에 물의 침투, 소류, 세굴 등에 약하고 위와 같은 요소들에 의한 붕괴빈도가 높은 편이다. 또한, 끊임없는 외력 등에 의해 제체의 사석 및 성토재의 유동, 이탈 등에 의해 제체가 붕괴되는 현상이 종종 발생하곤 한다. 이에 제체를 보강하기 위해 그라우팅으로 설계와 시공을 하고 있으나, 축조 시 불가피하게 다량으로 혼재되어 있는 호박돌, 괴석 등이 천공작업에 큰 장애를 주어 그라우팅 효과가 기대한 만큼 이루어지지 않는 경우가 자주 발생하고 있다. 또한, 현재 그라우팅공법이 많이 개발되어 사용되고 있으나 수중 사석층의 그라우트 시공 시 그라우팅 효과의 신뢰도가 낮은 편이며, 특히 약액을 사용하는 경우 그라우트재의 충전효과가 낮고 약액재의 용탈현상으로 인하여 내구성이 떨어지는 경우가 발생하고 있으며, 시멘트 현탁액을 주입할 경우, 유속에 의해 시멘트 현탁액이 희석되는 문제점과 빠른 유속에 의한 충전 성능이 저하되는 문제점을 야기 시킨다.

이에 본 연구에서는 약액제 및 시멘트 현탁액을 시공하였을 경우 발생하는 용탈현상, 수중 셋김을 저하시키기 위해서 팽창제 및 수중 불분리제, 유동화제를 혼합하여 유속 흐름에서의 그라우팅 차수효과를 규명하고자 한다.

## 1.2 국내·외 연구 동향

그라우팅을 시공하는 경우 제체 내 사석층 속은 지하수로 인한 유속에 의해 충전 성능이 떨어지는 문제점을 가지고 있으며, 이러한 문제점을 해결하기 위한 국내·외의 연구는 미미한 실정이며, 이를 보완할 수 있는 공법이 제시되지 못하고 있다. 지하수 유속의 세기에 따른 그라우팅 공법은 대부분 저수지나 방조제와 같은 제체에서 축조된 후 저수된 물의 유로를 따라 유실 또는 공극이 점점 커져 제체 누수가 발생하는 문제점이 발생되고 있다. 이러한 보수·보강하는 방법으로 그라우팅 공법이 사용되고 있는 연구가 대부분이다. 국내 그라우팅 재료의 경우 연약지반 보강이나 건물기초 보강 등의 공법과 관련된 재료는 많이 연구되어 왔으나, 사석층 및 자갈층에 대한 그라우팅 재료와 관련된 연구는 이보다 미미한 실정이며, 각 분야에서 연구된 선행연구를 아래와 같이 요약해 볼 수 있다.

### 가. 국내 그라우트재 관련 분야

우리나라에서는 1976년경부터 화학약액에 의한 주입공법과 관련된 연구가 시작되었으며, 1978~1980년에 한양대에서 문교부와 건설부의 후원을 받아 현장과 실내에서 약액주입에 관한 폭넓은 실험연구를 한 바 있다(천병식 등).

김진춘(1999)은 지반개량용 초미립자시멘트의 주입특성에 관한 연구를 통해 시멘트 그라우트재 입경에 따른 주입 특성 및 독성 실험을 통하여 시공성과 경제성을 분석하였으며 사질토 모형토조를 이용한 침투성 및 침투한계의 평가에서  $5\text{kg}/\text{cm}^2$  이하의 저압에서 모래층에 침투가 가능했고, 초미립자의 경우 투수계수  $a \times 10^{-4}\text{cm}/\text{sec}$  정도의 실트질 모래층까지 침투가 되는 것을 확인하였다.

장의웅 등(2001)은 시멘트에 점토나 모래, 벤토나이트를 한 가지 혹은 그 이상을 섞어 그라우트재로 많이 사용하는데, 점토는 공급이 어렵고 모래는 유동성이 저하되며, 벤토나이트를 6% 이상 첨가하면 고결이 느려져 내구성에 문제가 된다고 하였다.

유현구 등(2008)은 침투 그라우팅 기법의 최적 배합 설계에 관한 실험적 연구에서 시료에 따른 그라우트재의 주입특성을 파악하고자 하였으며, 화강풍화토와 그 외 골재와 강자갈의 함유량을 조절하여 임의로 조성한 ‘흙+자갈’ 시료를 이용하여 실내 시험을 실시하였고, 방조제에 사용하기 위하여 수화속도를 조절한 시멘트(Cement Grout Materials which Controls Thickening Time, CTT)와 실트재를 일정 비율로 교반하여

연구하였다.

맹승섭(2009)은 제체에 충전하는 그라우팅 재료의 단점을 개선하여 수화속도를 조절 한 시멘트 그라우트재를 이용하여 침투성 실험을 실시하였다. 구체적으로 새만금방조 제에서 채취한 모래, 임의로 조성한 토사와 자갈 섞인 토사 시료 등 공시체를 조성하 고, 공시체에 그라우트재를 주입하는 침투성 실험을 수행하였다. 그 결과, 사석과 토사 로 축조된 방조제와 유사한 공시체의 경우, 평균분말도가  $4000 \pm 200 \text{ cm}^2/\text{g}$  정도인 UGC 4000 그라우트재를 사용했을 때, 시험 전 공시체의 투수계수가  $1.63 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{sec}$  에서 시험 후  $1.07 \times 10^{-4} \sim 3.62 \times 10^{-5} \text{ cm}/\text{sec}$ 로 감소하였다. 또한, 하천제방이나 모래로 축조된 새만금방조제 등의 제체와 유사한 공시체의 경우, 평균분말도  $7000 \pm 500 \text{ cm}^2/\text{g}$ 인 UGC 7000 그라우트재를 사용했을 때, 주입 시험 전 투수계수가  $1.25 \sim 3.15 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{sec}$ 에서 시험 후  $2.44 \times 10^{-4} \sim 2.85 \times 10^{-6} \text{ cm}/\text{sec}$ 로 투수계수가 감소하였 다.

김혜양(2011)은 물유리계 약액주입공법이 시간의 경과에 따라 지하수에 의해 알칼리 용탈이 진행되어 내구성이 약해지는 문제점을 발견하고 이에 대안으로 개발된 알칼리 성 실리카졸 약액주입공법에 대해 강도시험, 내화학적 시험, 환경 영향성 시험을 수행 하였다. 그 결과, 물유리계 약액 대비 알칼리성 실리카졸의 강도가 5배가 높게 평가되 었고 내구성 시험결과 3주차 길이 변화율이 물유리계 주입재의 7배, 중금속 등 용탈률 이 1.5 ~ 4배 적게 검출되었으며 시방서 기준인  $10^{-5} \text{ cm}/\text{sec}$  보다 낮은 투수계수를 갖는다고 하였다.

## 나. 국내 사석층, 댐, 제체 관련 분야

이행우(2005)는 바닥사석층이 있는 방조제는 Darcy 흐름법칙의 지배를 받는 흙 성토 층과 Non-Darcy 흐름특성을 보이는 사석층으로 구성되어있고 바닥사석층의 규모 및 통수성에 따른 제체 침투특성에 미치는 영향을 분석한 결과, 바닥사석층의 길이 또는 두께가 증가하거나 통수성이 커지면 전반적으로 침투문제는 불리하게 나타났다고 하였 다.

## 다. 국외 그라우팅 관련

국외 문헌조사 결과 1800년 초부터 약액주입공법이 기초지반 보강공법으로 적용되기 시작했으며 보다 효율적인 보강효과를 발휘할 수 있는 재료 및 시공법에 관련된 연구



는 현재까지도 계속되고 있다.

HansJade(1952)는 물유리약액과 시멘트슬러리를 혼합시킨 액을 일정시간 방치시킨 후 상등액을 지반에 주입하는 1.0Shot식 용액형 LW공법(Labiles Wasser Glass)을 제안하였다.

Laura G. Girard 등(2006)은 2005년 Colorado State University(CSU)의 NCHRP Project 24-07(2), 과제에서 원형모형실험을 수행하여 교각 하부에 느슨한 사석층은 손상을 입지만 사석층에 부분 그라우팅을 하였을 경우 몇 시간이 경과 후에도 손상을 입지 않는다고 하였고 다리나 교량의 안정성 개선을 위해 교대, 교각 하부 사석에 부분 그라우팅을 하여 침식을 예방하고 부분적인 그라우팅에 남아있는 공극에 대해서는 수초 등의 서식지가 되어 미관 또한 염두에 둔 친환경적인 공법이라고 하였다.

Yang Ping 등(2008)은 그라우팅 효과와 그라우팅 요소의 관계에 대해서 연구하기 위해 3가지 요소(7가지변수), 모래질 자갈에서 무방향성, 작은 모형실험을 완료하였다. 이것은 정해진 설계방법에 따라 설계되었다. 그리고 회귀는 시험데이터의 분석에 적용되었다. 두 모형실험 결과는 그라우트의 확산반경이 26 ~ 51cm로 변했을 때 그라우트된 모래질 자갈의 압축강도는 2.13 ~ 12.3MPa로 변한다고 나타내었다. 확산반경(R)과 물-시멘트(m), 투수계수(k), 그라우팅 압력(p), 그라우팅 시간(t)의 관계는  $R = 19.953m^{0.121}k^{0.429}p^{0.412}t^{0.437}$ 이며, 압축강도(P)와 간극률(n), 물-시멘트비, 그라우팅압력, 그라우팅 시간의 관계는  $P = 0.984n^{0.517}m^{-1488}p^{0.118}t^{0.031}$ 라고 분석하였다. 연구결과 모래질 자갈의 간극률, 투수계수, 그라우팅 압력, 그라우팅 시간, 물-시멘트비는 그라우팅 효과에 영향을 미치는 주 요소이다. 그라우팅 압력은 그라우팅 확산반경에 영향을 미치는 주 요소이고, 물-시멘트비는 그라우트된 모래질 자갈의 압축강도에 영향을 미치는 주 요소라고 발표하였다.

국내에서는 시멘트, 약액계, 혼탁액계 등 지반을 보강하기 위해 그라우트제를 개발, 발전시켜왔고 이런 그라우트제를 댐, 제방, 방조제 등 포화된 하부지반에 사용할 때 수중에 씻겨 재료의 제 역할을 하지 못하는 문제와 수중 용탈 시 유해물질이 지하수, 해수 등에 첨가되어 환경적으로 큰 문제가 되고 있다.

김진춘(1999), 유현구(2008), 맹승섭(2009)은 그라우트제의 침투성, 배합비에 대해 연구하였고, 김혜양(2011)은 물유리약액의 단점을 보완한 알칼리성 실리카졸 약액에 대한 연구를 하였으며 이행우(2005)는 사석층 내 유속의 흐름에 대한 연구를 실시하였다. 그

라우트재의 연구는 활발히 진행되고 있으나, 대부분 지반의 작은 공극의 침투성에 관한 연구에 국한되어 있다. 국외 연구 역시, 그라우트 요소에 따른 그라우팅 효과 (YANG Ping, 2008), 교대, 교각하부 침식을 예방하는 사석층 부분 그라우팅 연구 (Luara G. Girard, 2006)와 같이 그라우팅의 기본적인 연구만이 주를 이루고 있다.

따라서 유속이 흐르고 공극이 큰 사석층에서 그라우트재의 수중 불분리성에 관한 연구, 수중 용탈 방지에 관한 연구, 사석을 이루어진 댐, 제방, 방조제 등의 구조물 하부 지반의 침하를 방지하기 위한 그라우팅 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

### 1.3 연구방법

본 연구에서는 직경 0.4 m, 길이 2 m의 모형토조를 이용하여 포화된 사석층에 그라우트재를 충전시켜 차수벽이 형성되는지를 살펴보고 형성된 차수벽이 어느 정도 효과를 내는지 확인하고자 주입속도, 유속, 개발재의 종류에 따라 모형실험을 실시하였다. 모형토조는 그라우트재의 확산경로, 확산범위, 팽창효과 등을 육안으로 확인하기 위해 아크릴로 제작을 하였으며 주입속도는 현장에서 일반적으로 사용하는 10 L/min과 그 2배 속도인 20 L/min으로 적용시켰다. 그리고 유속조건은 현장의 유속조건과 동일하게 1 cm/sec로 조절하여 진행하려 했으나 조건을 맞추기 어려워 현장조건보다 약 10배 정도 빠른 10 cm/sec의 유속과 유속이 없는 조건 2가지로 나누어 실험을 진행하였다.

본 연구에서 사용된 개발재는 총 4 가지로 모형실험을 진행시켜 개발재의 확산범위 및 팽창성을 측정하여 유속이 존재하는 사석층에 차수벽을 형성시키는데 가장 적합한 개발재를 선택하고 차수효과를 규명하는데 목적이 있다. 또한 개발재의 특성을 파악하기 위해 다음과 같은 실내 실험을 실시하였다.

#### (1) 4 가지 개발재의 일축압축강도시험

- 개발재의 강도특성을 규명하기 위해 모형실험에 사용한 재료와 동일한 배합으로 시료를 성형하여 재령 7일의 압축강도 실험을 실시하였다.

#### (2) 수중 재료분리평가를 위한 비중시험

- 수중에서의 재료분리 현상과, 유속에 의한 씻김 저항성에 대한 평가로 그라우트재를 주입하는 선단부와 선단부 반대편 끝단부의 재료를 약 5시간 후 채취하여

비중 실험을 실시하였다.

(3) 통수능 시험 - 정수위 투수시험

- 그라우트재의 차수평가를 위해 수위차에 의한 압력없이 일정 수위를 유지시키고 투수된 물의 양을 1시간, 4시간, 12시간, 24시간, 48시간 별로 측정하고 정수위 투수계수로 산정한다.

## 제 2 장 그라우팅 종류 및 특징 그리고 물의 흐름

그라우트재의 종류는 시멘트, 모르타르, 약액 등으로 종류가 다양하고 차수, 지반보강 등으로 사용 목적에 따라 구분된다. 또한 그라우팅 공법으로는 목적, 대상, 주입재, 공법에 따라 매우 다양하게 분류되기 때문에 포화된 사석층에 그라우팅을 하기 위해서는 그라우트재의 특성을 정확히 알고 사용 방법에 따라 여러 가지로 분류된 그라우팅 공법에 대해 파악하여야 목적에 맞는 그라우팅을 할 수 있다. 이 장은 그라우트재, 그라우팅공법의 종류를 알고 공법을 선정하는데 있어 현장에 적합하고 사석층 내 물의 흐름에 대해 파악하여 합리적인 공법을 찾는 데 목적이 있다.

### 2.1 그라우트재와 그라우팅공법

그라우팅(Grouting)이란 기초지반에 발달되어 있는 균열, 절리, 공동, 공극 등의 틈새를 그라우트재로 채워 수밀성과 지반의 강도를 증진시키기 위해, 천공기(drill)로 구멍을 뚫은 후 주입펌프로 그라우트재(grout)가 더 이상 들어가지 않을 때까지 틈새에 집어넣어서 고결되게 하는 일련의 과정을 말하며 그라우트재는 지반의 토립자 공극이나 암반의 절리 등에 침투할 수 있도록 입자크기가 작아야 한다. 또한 블리딩 현상이 적고 유동성도 좋아야 하며, 고강도가 발현되고 수밀성과 내구성이 좋아야 한다. 그 외에도 흙이나 지하수를 오염시키지 않아야 하며 경제성이 있어야 한다.

#### 2.1.1 그라우트재의 분류

국내 현장에서 사용되고 있는 그라우트재는 현탁액형(suspension type)의 비약액계와 용액형(solution type)의 약액계로 구분할 수 있다. 크게 알칼리계와 비알칼리계 현탁액형과 용액형으로 분류되며, 경우에 따라서는 항구성 약액인 특수 실리카계, 기·액반응계로 분류되기도 한다.

현탁액형 재료에는 점토, 모래, 벤토나이트, 시멘트 등이 있으며, 물유리계, 크롬니그닌계, 아크릴아미드계, 아크릴레이트계, 요소계, 우레탄계 등의 화학물질이 용액형이다. 또한 시멘트, 점토, 벤토나이트, 모래 및 이들의 각종 혼합으로 만들어진 그라우트재는 조립질그라우트재(coarse grout)로, 각종 화학물질로 만들어진 것은 세립의 화학 그라

우트재(fine chemical grout)로 분류하기도 한다.

비약액계에서는 시멘트, 약액계에서는 물유리(water glass)계의 규산소다가 가장 대표적인 그라우트재로 사용되고 있다. 시멘트를 기초로 하는 현탁액과 약액은 침투성, 주입 가능성, 유동특성, 강도, 내구성, 고유의 투수성이 서로 다르다.

현탁액은 침투성이 입자의 크기 모양에 따라 제한적이며 유동특성은 병협흐름이고 틱소트로피(thixotropy)가 있으며 침하와 여과로 인한 입자의 분리로 안정성이 다소 부족하다. 용액형 재료 중 약액은 침투성이 물과 비슷하며 유동특성은 뉴턴흐름이며 시간에 따라 변한다. 이의 안정성은 이수(syneresis, 겔이 내부의 액체를 방출하여 체적이 감소하는 현상)현상으로 그라우트재의 수축이 일어나며, 용탈현상으로 인하여 내구성이 매우 떨어지는 것으로 알려져 있다(장의웅 등 2001).

### 2.1.2 그라우팅의 종류(쌍용양회, 2008)

암반 위에 축조하는 구조물의 규모가 커지고, 지하에도 구조물 설치의 필요성이 증대함에 따라 지반에 작용하는 응력과 이에 대응할 수 있는 지지력 간에 균형을 이루지 못하는 경우가 많아졌다. 따라서 자연 상태의 암반이나 지반을 좀 더 양호한 지지력을 갖도록 개량할 필요성이 대두되었으며, 이에 부응하는 여러 종류의 지반보강방법이 개발되었다.

지반보강방법에는 연약한 지반을 보강하여 주로 지지력을 증대시키는 보강공법과 주로 지수를 목적으로 하는 차수공법, 그리고 이 두 가지를 혼합하여 지반보강과 차수를 동시에 행하는 차수·보강공법이 있다.

지반보강을 주 목적으로 하는 공법에는 쏫크리트(shotcrete), 연약지반개량공법, 락볼트(rock bolt), 치환공법, 전기충격공법, 다짐말뚝공법, 진동물다짐공법, Well-point 공법, Sand-drain 공법, Pre-loading 공법, 동결공법 등이 있다.

그라우팅 공법은 차수를 주 목적으로 하는 공법이나 지반에 그라우팅을 실시할 경우 차수와 함께 지반보강도 이루어지므로 차수와 보강이 동시에 이루어지게 된다. 그라우팅 공법에는 댐, 방조제, 하천, 양·배수장 등의 기초지반을 보강하기 위한 그라우팅이 있고, 터널, 공동대, 광산 등에서의 공간 채움이나 여굴 채움 및 암반보강을 위한 그라우팅도 있다. 또한 도로주변의 암석 등 지반표면에 그라우트를 뿜어 붙이는 쏫크리트(shotcrete)도 그라우팅의 범주에 포함된다. 그리고 건축물, 교각 등의 갈라진 틈새를 접합시켜주는 것, 지하수공 주변을 오염물질로부터 차수시키는 것도 그라우팅 범주에

속한다.

그라우팅은 표 2.1에 나타난 바와 같이 목적에 따라 커튼 그라우팅, 컨솔리데이션 그라우팅, 블랭킷 그라우팅, 백필 그라우팅, 숏크리트 그라우팅으로, 대상에 따라서는 암반 그라우팅, 지반 그라우팅, 터널 그라우팅, 접촉 그라우팅으로 분류할 수 있으며, 주입재에 따라 시멘트 그라우팅, 약액 그라우팅, 모르타르 그라우팅, 특수 그라우팅 등으로, 공법에 따라서는 치환공법, 주입공법, 교반혼합공법, 그라우트파일공법으로 구분할 수 있다.

**표 2.1 차수 및 지반보강을 위한 그라우팅의 종류**

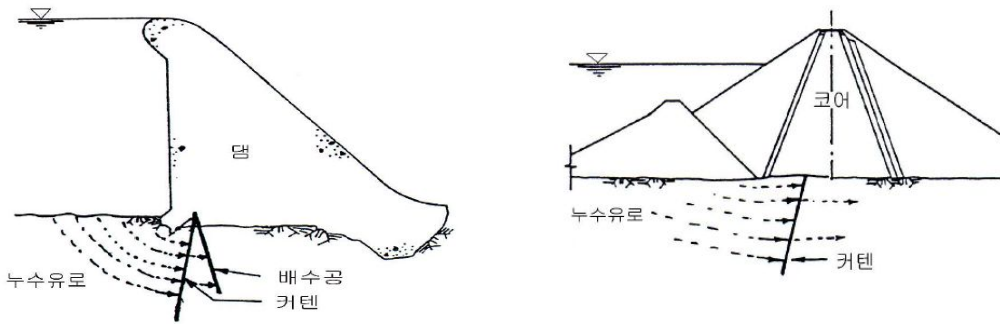
항 목	그라우팅의 종류
목 적	커튼 그라우팅, 컨솔리데이션 그라우팅, 블랭킷 그라우팅, 백필 그라우팅, 숏크리트 그라우팅
대 상	암반 그라우팅, 지반 그라우팅, 터널 그라우팅, 접촉 그라우팅
주 입 재	시멘트 그라우팅, 약액 그라우팅, 모르타르 그라우팅, 특수 그라우팅
공 법	치환공법, 주입공법, 교반혼합공법, 그라우트파일공법

### 가. 목적에 따른 분류

#### (1) 커튼 그라우팅

커튼 그라우팅(curtain grouting)은 지수주입이라고도 하는데(천병식, 1998) 댐이나 구조물 기초에서 누수되는 물을 차단하거나 배수시설이 경제적으로 조절할 수 있는 범위까지 누수량을 줄이기 위한 것으로 그림 2.1과 같이 댐축을 따라서 하기도 하고 누수유로 방향에 직각으로 시행하기도 한다.

커튼 그라우팅으로 기초지반 중을 흐르는 과도한 유속이나 그로 인한 침식작용을 방지하고 지반의 열화(劣化)를 억제하며 댐 본체와 abutment(주, 댐 본체에 접촉하는 기초지반)에 대한 양압력을 경감시킨다. 커튼 그라우팅은 기초처리의 주된 공종으로서 모든 기초처리 계획에 거의 다 포함된다고 해도 과언이 아니다.



(a) 콘크리트 댐 (b) 필 댐  
 그림 2.1 커튼 그라우팅(쌍용양회, 2008)

(2) 컨솔리데이션 그라우팅

파쇄 또는 균열 암반의 변형성 개량과 암반의 지지력 증가를 주 목적으로 하는 것을 컨솔리데이션 그라우팅(consolidation grouting) 혹은 암반강화 그라우팅이라고 한다. 본 그라우팅은 암반의 지지력을 증대시키고자 실시하지만, 때로는 암질은 양호하거나 암괴사이의 틈새가 크게 벌어진 경우에 이들 틈새를 주입재로 충전하여 메움으로써 암굴착량과 콘크리트 타설량을 줄이기 위해서도 시공하기도 한다.

(3) 블랭킷 그라우팅

블랭킷 그라우팅(blanket grouting)은 차수주입이라고도 하며(천병식, 1998), 기초표층부의 침투수를 억제시키고 커튼 그라우팅과 컨솔리데이션 그라우팅의 효과를 증대시킬 목적으로 계획한다. 즉 풍화되거나 약간 풍화된 암석, 심하게 파쇄된 암석 또는 수평의 층상 암석을 따라 새는 물을 막고자 할 경우에 커튼 그라우팅만으로는 지수·보강 효과를 거둘 수 없으므로 블랭킷 그라우팅을 시공하게 되며, 커튼 그라우팅공에 연결하여 시공한다.

(4) 백필 그라우팅

백필 그라우팅(back fill grouting)은 그림 2.2와 같이 터널 굴착 시 과굴착에 의해 발생하는 여굴 부분을 채워주는 것을 주 목적으로 시행하는 것으로서 터널 그라우팅의 가장 주요한 공종 중 하나이며 뒤채움 그라우팅이라고도 한다. 본 그라우팅은 암반의 보강과 터널 내로의 지하수 침출을 차단하기 위하여 시행하며 일반적으로 모래를 섞은 모르타르를 사용한다.

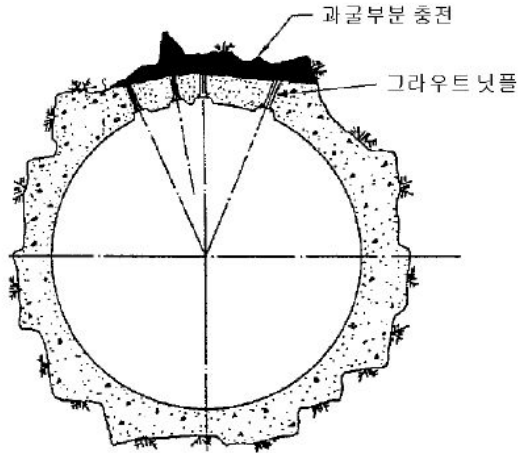


그림 2.2 라이닝 뒷면의 여굴부 백필 그라우팅 방법

#### (5) 쏘크리트 그라우팅

쏘크리트그라우팅(shotcrete grouting)은 뿜어 붙이기라고도 하며, 모르타르 또는 콘크리트(concrete)를 압축공기를 이용하여 고속·고압으로 암석 등 지반표면에 뿜어 붙이는 공법이다. 이 공법에는 재료의 치수에 따라 쏘크리트와 거나이트(gunite)로 구분되며, 뿜어 붙이는 방법에는 건식법, 습식법 및 그 중간의 공법이 있다.

- ① shotcrete(sprayed concrete); 입도 19mm 이하의 세골재와 시멘트, 물 등의 혼합물을 뿜어 붙임
- ② gunite(sprayed mortar); 입도 5mm 이하의 세골재와 시멘트, 물 등의 혼합물을 뿜어 붙임.

### 나. 대상에 따른 분류

#### (1) 암반 그라우팅

암반 그라우팅은 주로 댐의 기초 암반에 실시하는 그라우팅을 말한다.

#### (2) 지반 그라우팅

지반 그라우팅은 물의 유동을 줄이거나 억제하고자 할 때와 토사층의 지지력을 증대시켜 구조물의 침하를 방지하기 위해 실시한다.

#### (3) 터널 그라우팅



터널 그라우팅은 터널 라이닝의 여굴부 뒤채움, 굴착공동이나 공동대의 채움과 그 주변의 보강을 위하여 실시한다.

① 백필 그라우팅; 목적 분류 참조

② 링 커튼 그라우팅: 링 커튼 그라우팅(ring curtain grouting)은 댐 터파기면 하부에 취수터널이 횡단할 때 그 사이를 따라 누수되는 것을 방지하기 위해 터널내부에서 그림 2.3과 같이 방사상으로 천공, 주입하여 상부 댐체 커튼 물막이벽과 연결되게 물막이벽을 형성시키고자 실시하는 방법이다.

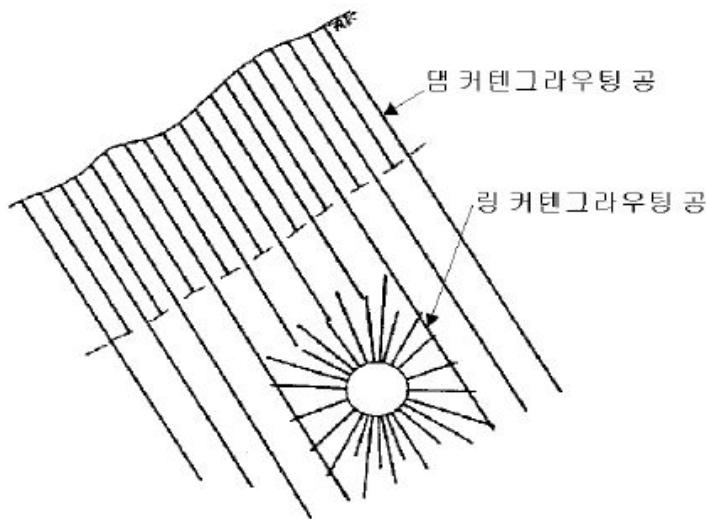


그림 2.3 링 커튼 그라우팅 계획도

③ 공동충진 그라우팅

탄광의 심부 채탄 시 주위의 석회암 공동대나 상부의 채탄 갱도로부터 유입되는 다량의 출수를 막거나 공동대 주변의 지반침하를 방지하기 위하여 모르타르로 공동을 충전한다. 이 방법을 공동충진 그라우팅(cavity filling grouting)이라 하며 터널 그라우팅의 한 종류이다.

(4) 접촉 그라우팅

접촉 그라우팅은 콘크리트 구조물과 연결한 지반을 서로 접촉시키는 그라우팅 공법

으로 시멘트 현탁액을 주입재로 사용한다. 이 공법은 콘크리트 타설 후 양생과정에서 콘크리트 수축, 구조물의 침하 등으로 공극이나 틈이 생겨 이들을 통하여 누수가 발생하거나 누수 가능성이 있을 때 적용시키는 방법으로서 주로 콘크리트 댐의 경사부나 취수터널의 크라운(crown) 부분에 시공한다.

표 2.2 그라우팅 공법별 분류(맹승섭, 2009)

공법	시공방식		세부공법
주입 공법	1. 롯데주입	단관로드 이중관로드 삼중관로드	Cement Grouting, SP(Superfine Permeation Method), SGR(Space Grouting Rocket system), JCM(Just selected Chemical Grouting Method)
	2. 스트레나주입	싱글 스트레나, 이중관 스트레나, 이중관 더블패커	MIS(Micro Injection-Process System), SP(Superfine Permeation Method), MSG, 솔레땅쉬공법
	3. 케이싱주입	케이싱, 싱글패커, 더블패커	Cement Grouting, LW(Labiles wasser glass), Urethane Injection
	4. 멘젯트 튜브주입	이중관 더블패커	MSG(Micro Silica Grouting)
교반 혼합 공법	1. 기계적혼합 처리 방식	-	CGS(Compaction Grouting System), CDM(Cement Deep Mixing), SWING(Spreadable WING), DCM(Deep Cement Mixing Method)
		Soil Cement Mixing	DWM(Deep Wing Mixing), SCW(Soil Cement Wall), SMW(Soil Mixing Wall)
	2. 분사혼합 처리방식		Twin-jet DJM(Dry Jet Mixing), CCP(Chemical Churning Piling Method), JSP(Jumbo Special Pile Pattern)

표 2.2 계속

공법	시공방식		세부공법
치환 공법	1. Open Cut	점토 혹은 콘크리트 치환	-
	2. Jet Grouting	Column type, Panel type, Wing type	SQJ(Square Jet Method), Twin-jet, RJP(Rod in jet Pile), J.S.P(Jumbo Special Pile Pattern), SIG(Super Injection grout)
	3. 지중연속벽 설치	MJM(Mortar Jet Method), CIP(Cast In concrete Pile), Slurry Wall	-
그라우트 파일 공법	그라우트 파일방식		MJM(Mortar Jet Method), SCM(Special Chemical Grouting Method), SIP(Soil-Cement Injected Precast Pile)

## 2.2 그라우팅 설계

### 2.2.1 그라우팅공법의 선정

그라우팅공법의 선정은 지반개량을 할 필요가 있는 개소에 대해서 사전에 토질, 지하수, 지하 매설물, 우물, 공공 용수역 등의 조사를 하고, 그라우팅공법에 의하는 것이 공사현장의 보안, 지하 매설물의 보호, 주변 가옥·공작물의 보전, 지하수위 저하방지 등의 관점에서 적당하다고 판단되는 경우에 선정한다.

특히 대상 지반이 초연약 점성토층이나 고유기질의 경우 그라우팅 공법의 선정에 있어 그 효과면에서 특히 신중하게 검토할 필요가 있으며 그 종류는 표 2.3과 같다.

표 2.3 그라우팅로드 구성에 의한 그라우팅공법의 종류

그라우팅공법	로드 구성	그라우트 혼합방식	겔화시간	그라우팅 방식	공법명		
그라우팅	약액 그라우팅	단관	1.0Shot	완결(수십분)	단관로드	시멘트밀크(몰탈) 주입공법	
			1.5Shot	완결(수분)	단관로드	L.W공법	
		2중관	단관스트레이너	1.5Shot	완결(수분)	단관스트레이너	스트레이너(strainer) 주입공법
				2.0Shot	급결(수십초)	2중관 단상	LAG공법, Carbo Rock(기체액체반응형) 공법
			더블팩커	1.0Shot	완결(수분)	2중관 더블팩커	TAM공법
				1.5Shot	완결(수분)	2중관 더블팩커	LW공법
	3중관	2중관	2.0Shot	급결(수십초)	2중관 광복합	JS-CGM공법	
			2.0Shot	급결(수십초) 완결(수분)	2중관 복합	CGM공법	
		2.0Shot+ 1.5Shot	급결, 완결	다중관 복상	MGP공법		
	고압 분사 혼합 그라우팅	단관	1.5Shot	완결(수십분)	단관로드	CCP공법	
		2중관	1.0Shot	완결(수십분)	단관로드	JSP공법, CJM공법	
		3중관	1.0Shot	완결(수십분)	단관로드	RJP공법, SRC공법, MCP공법	
	콤팩션 그라우팅	단관	1.0Shot	완결(수십분)	단관로드	Compaction Grouting, CGS공법, CGP공법	
		2중관	1.0Shot	완결(수십분)	단관로드	CJM(Water Jetting + Compaction Grouting)공법	
		3중관	2.0Shot+ 1.0Shot	급결(수십초), 완결(수분)	다중관 복상	MGP(Chemical Grouting + Compaction Grouting)공법	

## 2.2.2 그라우팅 계획

그라우팅공법의 선정이 결정되었다면 그라우팅 목적을 명확하게 한 후에 지반조건, 시공조건, 주변환경 조건 등의 기초자료에 의하여 합리적·경제적인 개량범위, 그라우트·그라우팅 방식, 그라우트량, 룯드의 설치형태, 그라우팅공의 배치 등을 결정한다.

그라우팅설계에 있어서 우선 명확하게 해야 할 사항은 그라우팅 목적이다. 그라우팅 목적은 다음과 같이 3가지로 크게 구별된다.

- (1) 토립자의 공극이나 지반 중의 균열에 충전하고, 지하수의 용출을 방지한다.(차수)
- (2) 토립자 상호간의 점착력을 높이거나, 압밀효과에 의해 연약지반의 강도를 증가시킨다(지반보강).
- (3) 지반 내 또는 지반과 구조물과의 사이에 생긴 공간 등을 충전하여 지반 및 구조물의 변위를 방지한다(공동충전).

실제 그라우팅에 의해서 얻어지는 효과는 차수와 지반보강이 복합되어 나타내는 것이 대부분이지만, 무엇을 주목적으로 생각하느냐에 따라서 그라우팅 설계는 크게 변화하기 때문에 그라우팅 목적을 신중하게 확인할 필요가 있다.

그라우팅 설계는 토질 공학적 이론 계산에 의해 본체 공사에 꼭 필요한 지반개량 범위와 정도를 명확하게 하고, 그것을 만족시킬 수 있는 그라우트, 그라우팅방식, 그라우트량 등을 공학적으로 결정하는 것이 바람직하지만, 현실적으로는 보통의 경우 유사 공사에서의 과거 실적을 기준으로 이루어지는 것이 대부분이고, 토질 공학적 이론계산은 그 타당성을 검증할 때의 참고로써 보조적으로 사용되고 있는 것이 실정이다.

이것은 지반의 불균일성에 덧붙여 그라우트의 흠 속에서 개량 후 지반의 공학적 성질에 미해명·불확정적인 요소가 많이 남겨져 있기 때문이며, 토질 공학적 이론계산에 의해 그라우팅 설계를 행할 수 있도록 하기 위해서는 각 기업자, 건설업계, 학계, 제연구 기관 등이 일체가 되어서 현장 데이터의 수집·축적 및 해석을 계속적으로 실시하는 것이 필요하다.

### 가. 그라우트의 선정

그라우트는 그라우트의 특성을 충분히 파악하고서 그라우팅목적, 그라우팅대상 지반의 상황에 따라 안정성, 시공성, 경제성 등을 종합적으로 검토하여 선정한다.

(1) 그라우트의 특성

그라우팅공법의 설계를 하는데 있어서 고려해야 하는 그라우트의 특성으로써는 침투성(점도·겔타임), 강도 특성, 고결성, 안정성 등이 있다.

1) 침투와 고결의 메카니즘

물유리의 예를 들면, 그림 2.4와 같이 주입된 약액은 최초에는 저분자 용액이지만 시간이 경과함에 따라 물유리의 중합이 행해져서 고분자화 되고 콜로이드가 커지게 된다. 그리고 그 콜로이드 또는 겔화가 진행되고 있는 물유리는 최초 토립자의 여과작용에 의해 토립자와 토립자의 점점 부근에 정착하여 쌓이고 다시 토립자 표면을 물유리층이 덮게 된다. 처음에는 약액이 공극을 투과해서 침투범위를 넓혀 가지만 어떤 시점에서는 공극이 막히고 주입액이 지반에 침투하지 못하게 되면 주입이 완료된다. 이와 같이 토립자의 점점을 중심으로 해서 토립자 표면을 덮은 규산겔은 1차 결합 또는 2차 결합으로 견고한 규산층으로 되어 토립자 점점을 견고하게 고정하고 또한 연속된 막에 의해 토립자를 연결한다.

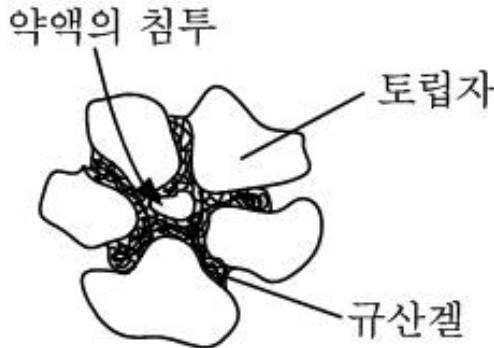


그림 2.4 토립자 공극에서의 약액의 침투와 규산겔에 의한 토립자 고결의 모형도(島田 外, 1977)

토립자 상호간의 규산에 의한 정착은 규산층에서 분자간의 응집력과 규산층 및 토립자 표면의 부착력으로 이루어진다. 이 가운데 규산층과 토립자 표면의 부착력은 사질토의 경우 van der Waal'S Force나 수소결합 등에 의한 2차 결합이 주체가 된다(島田 外, 1977).

점도분이 많아짐에 따라 약액의 입자간의 침투는 불충분해지므로 전체의 균질한 고

결효과는 감소한다. 이와 같은 토립자의 약액의 상호작용에 의해 약액 주입 전 모래의 전단강도가 입자 상호간의 접촉이나 맞물림에 의한 마찰로 생긴 요소가 주된 것이었으나, 약액주입 후 모래의 전단강도는 이 마찰로 인한 요소 이외에 규산층 토립자 간의 고결로 인한 점착력의 요소가 추가되었다고 생각할 수 있다.

## 2) 물유리의 겔화 원리

물유리의 겔화에 관해서는 오래 전부터 많은 연구가 있었지만 결정적인 이론은 아직까지 불분명하며 Iler(1979)에 의하면 물유리의 겔화는 다음 그림 2.5와 같은 단계를 거쳐서 행해진다고 생각된다.

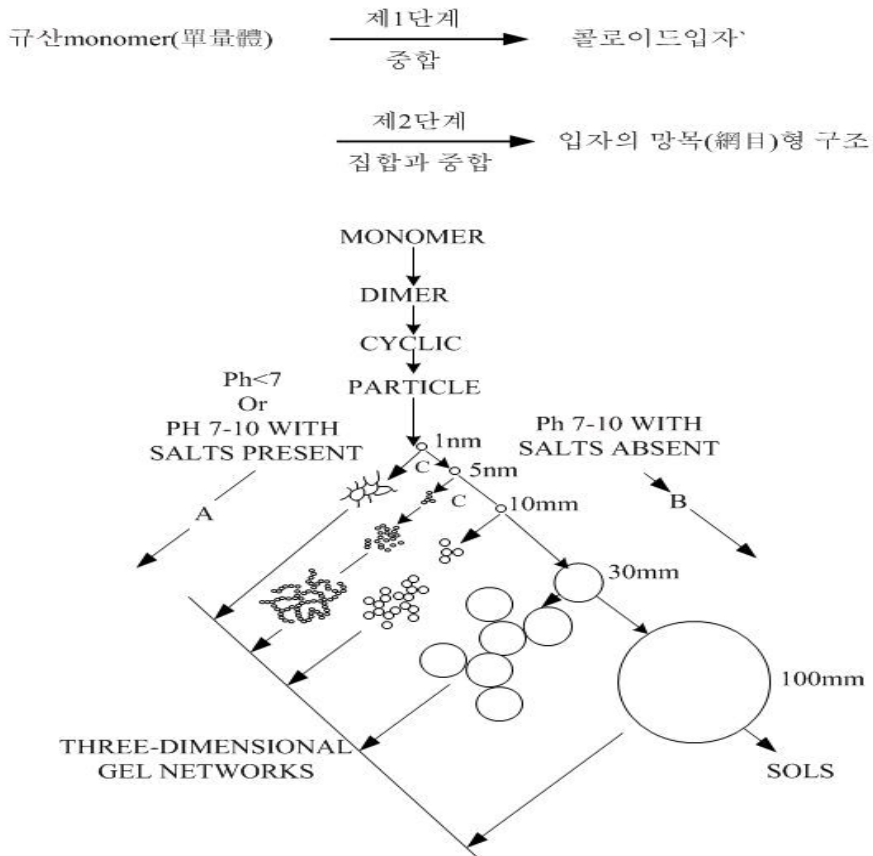


그림 2.5 물유리의 겔화 과정(Iler, 1979; Vail, 1952; 島田 外, 1977)

제1단계에서 규산모너머가 중합되어 고분자화해서 콜로이드 입자를 형성하고, 제2단계에서는 이 입자들이 서로 집합·중합하여 연속적인 구조를 만들어 용매를 통해 확장해서 겔화를 이루게 된다.

즉, 제1단계에서 규산은 시라놀(Si—OH)끼리 탈수해서 중합하고 실록산(siloxane)결합(—Si—O—Si)을 하며 입자형의 1차 입자로 되고 1차 입자끼리 집합해서 결합하고 콜로이드 집합체를 형성한다. 이 집합체는 콜로이드 2차 입자라고 부를 수 있지만 이것이 용액 전체로 확장해서 겔을 형성한다. 이러한 1차 입자의 결합 조치단계에는 입자는 수소결합에 의해 약하게 연결되지만 규산콜로이드 표면이 시라놀로 되는 점을 고려한다면 시라놀 사이에 축합이 일어나서 입자 간에 실록산 결합이 형성되는 결과, 입자끼리 견고하게 연결되어 그림 2.6과 같이 망상형(3차원)의 겔을 만든다.

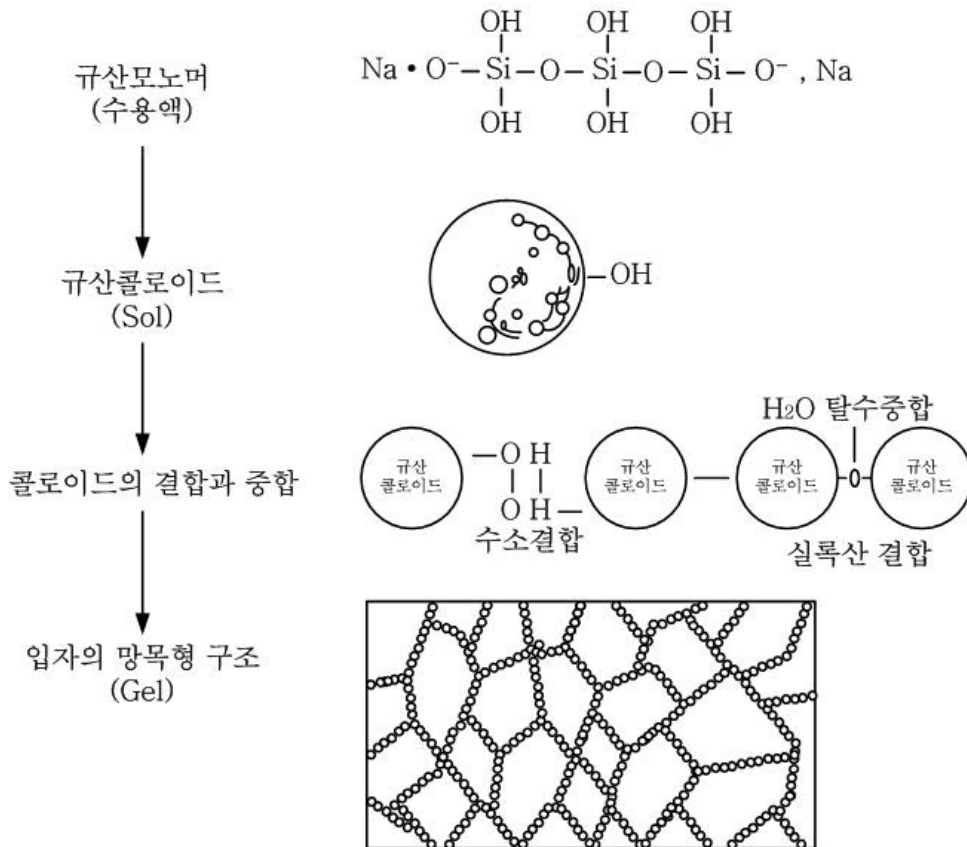


그림 2.6 물유리약액의 겔화 과정(Iler, 1979; Vail, 1952; 島田 外, 1977)



규산입자의 등전점은 약알칼리성 부근에 있으며 알칼리 용액에 있어서는  $\text{OH}^-$  이온을 흡착해서 음전하를 띄고 있다. 따라서 pH가 높을수록 전기적 반발력이 크고 응집되기 어려우며 반대로 산을 더하여 pH가 저하됨에 따라 전기적으로 중화되어 반발력이 적게 되어 응집되기가 쉽다. 이것이 물유리에 산을 더한 경우의 겔화의 원리이다. 또한, 물유리의 각종 염류를 더해도 응집된다. 이 경우에도 원리적으로 산의 경우와 같다(島田 外, 1977).

### 3) 침투에 관한 이론식

주입에 있어서 침투이론식은 약액의 고결시간, 점성, 주입압력, 주입속도, 주입시간, 주입공의 유효경, 주입방식 및 지반의 투수계수, 공극률, 공극경 등과 상관관계가 있다. 더욱, 실제 지반의 불균질성, 지하수의 유동, 주입재 점도의 경시변화, 고결되면서 수반되는 약액의 복잡한 침투기구 등과 관련이 있다. 따라서, 약액의 침투기구를 엄밀히 수식화 한다는 것은 어려운 일이며, 지반의 불균질성을 감안한다면 오히려 무의미하다고 까지 생각할 수 있지만 많은 연구자들에 의해서 침투성에 관한 경험식들이 제안되고 있다. 이러한 침투이론식들은 크게 현탁액형 침투이론식과 용액형 침투이론식으로 구분할 수 있으며 전반적으로 다음과 같은 가정들을 전제로 한다(천병식, 1998).

- 주입재의 침투는 층류로써, Darcy의 법칙에 따른다.
- 주입재의 비중은 물과 큰 차이가 없으며, 중력은 무시할 수 있다.
- 주입재의 점성은 일정불변이다.
- 지반은 균질하게 무한히 계속되며, 구속하는 것이 없다.
- 지반은 물로 포화되어 있고, 지하수의 유동은 없다.

#### 가) 뉴턴 유체의 지반중의 침투이론식

용액형주입재에 대한 침투이론식은 현탁액형에 비해서 많이 제안되어 있다. 어떤 제안식이든 유속이 그 유선의 동수구배에 비례한다는 Darcy의 법칙을 기본으로 하고, 중력의 영향을 무시한다는 가정에서 유도된다.

① Maag의 식(草野, 1984).

$$t = \frac{\mu n (R^3 - r^3)}{3khr} \quad (2.3)$$

여기서,  $t$  : 주입소요시간(sec)

$n$  : 지반의 공극률

$k$  : 지반의 투수계수(cm/sec)

$h$  : 수두(주입압)(cm)

$\mu$  : 물과 약액의 점도비

$R$  : 주입유효반경(cm)

$r$  : 주입공반경(cm)

그러나 Maag의 식은 켈타임, 공극충전율, 주입관의 형식과는 관계가 없기 때문에 島田 등(島田 外, 1977)은 주입특성을 나타내는 정수를 설정하여 Maag의 식을 간단히 하여 다음과 같은 실용 식을 제시한 바 있다.

$$t = \frac{\alpha n \beta}{3A k h r} (R^3 - r^3) \quad (2.4)$$

여기서,  $\alpha$  : 공극충전율

$\beta$  : 약액의 동점성계수

$t$  : 주입소요시간(sec)

$n$  : 지반의 공극률

$k$  : 지반의 투수계수(cm/sec)

$h$  : 수두(주입압)(cm)

$\mu$  : 물과 약액의 점도비

$R$  : 주입유효반경(cm)

$r$  : 주입공반경(cm)

$$A = \text{유효주입공계수} \left( \frac{r_0'}{r_0} \right)$$

$r_0'$  : 실제의 침투원 반경

$r_0$  : 주입공 반경(cm)

② Karol의 식(Karol, 1960)

주입재가 반경  $r$ 의 구상으로 침투하는 것으로 가정하여 식 (2.5)와 같이 제안 되었다.

$$r = 6.2 \cdot \sqrt{\frac{1}{\eta} q \cdot t / n} \quad (2.5)$$

여기서,  $r$  : 침투거리(ft)

$q$  : 주입량(l/min)

$n$  : 공극률

$\eta$  : 주입재의 점성계수

$t$  : 켈타임(min)

(2) 그라우팅 목적에 의한 검토

그라우팅 목적은 크게 분류하면 차수, 지반보강, 공동 충전으로 나뉜다.

- ① 차수 목적 : 투수성 지반에 대한 차수효과를 발휘하는 그라우트는 대상지반의 공극에 침투고결 할 수 있는 것이 바람직하다. 대상지반이 모래·자갈층으로 세립분이 적은 경우에는 현탁액형의 그라우트를 사용하는 것도 가능하다. 그러나 모래·자갈층이라도 세립분이 어느 정도 이상 혼재할 경우나 일반적인 모래질토를 대상으로 하여 차수를 꺾을 경우에는 보통 침투성에 뛰어난 용액형의 그라우트를 선정한다. 특히 지하수에 흐름이 있고, 그라우트가 유출 희석되어 효과가 떨어질 우려가 있는 경우에는 희석에 강하고, 켈타임이 짧은 그라우트로 할 필요가 있다. 또 점성토의 균열이나 토층의 경계로부터 누수를 방지하려면 현탁액형의 그라우트가 유효한 경우가 많다.
- ② 지반보강 목적 : 모래질토에 대해서는 지반의 전체적 보강을 기대할 수 있도록

침투성이 양호한 용액형의 그라우트를 선정한다. 특히 강도의 증가를 목적으로 하는 경우에는 현탁액형의 그라우트를 선정하기 쉽지만, 오히려 침투성을 중시하는 편이 좋다. 점성토에 대해서는 맥상그라우팅에 의한 압밀효과에 의한 것이기 때문에, 호모겔 강도가 큰 현탁액형의 그라우트를 선정한다.

- ③ 공동충전 목적 : 지반 중의 공극이나 구조물과 지반 사이에 생기는 공극의 충전 등을 목적으로 할 경우에는 그라우트의 침투성이 문제가 되는 경우가 적기 때문에, 통상 호모겔 강도가 크고 저렴한 시멘트·벤토나이트계의 그라우트나 현탁액형의 그라우트(모르타르 등)를 선정한다.

목적별 그라우팅의 종류는 다음 표 2.4와 같다.

**표 2.4 목적별 그라우트의 분류**

항 목		기본적인 조건	
개량 의 목적	차수	침투성을 고려한 저점성 용액형 약액	
	지반 보강	침투	저점성 용액형 약액
		맥상	겔타임이 짧고 호모겔 강도가 큰 현탁형 약액
		침투.맥상	호모겔 강도가 크고 침투성이 있는 약액
	용수 방지	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지하수에 회석 시 겔타임이 변하지 않은 약액</li> <li>• 급결성 고결의 약액(용액 또는 현탁형)(2중관 사용)</li> </ul>	
복합 그라 우팅	선행그라우팅	겔타임이 짧고 호모겔 강도가 비교적 큰 현탁형 약액	
	본그라우팅	선행그라우트와 같이 침투성을 갖는 약액	
특수지반		(산성, 알칼리성 지반) 사전에 check하여 그라우트를 선정	
기타		환경 보존성을 검토(독성, 지하수 오염, 수질 오탁 등)	

(3) 지반에의 침투성에 의한 검토

할렐그라우팅을 지향하는 경우 이외에는 그라우팅 목적이 차수나 지반보강을 대상으로 하는 지반 내에 그라우트가 침투되는 것이 필요하다.

① 현탁액형 그라우트의 침투성 : 현탁액형의 그라우트를 대상지반에 사용할 수 있는지 아닌지 다음 식으로 판단한다.

$$\frac{D_{15}(\text{지반토})}{G_{85}(\text{그라우트})} \geq 15 \quad (2.6)$$

$$\frac{D_{10}(\text{지반토})}{G_{95}(\text{그라우트})} \geq 8 \quad (2.7)$$

여기서,  $D_{15}$ ,  $D_{10}$  : 지반토의 입경가적곡선의 15%, 10% 입경

$G_{85}$ ,  $G_{95}$  : 그라우트의 입경가적곡선의 85%, 95% 입경

식 (2.6), 식 (2.7)을 동시에 만족하는 지반에 대해서는 현탁액형 그라우트의 사용이 가능하다. 표 2.5는 그라우트의 입경을 나타낸다.

표 2.5 그라우트의  $G_{85}$ ,  $G_{95}$ 의 값

(단위:  $\mu\text{m}$ )

그라우트의 종류	$G_{85}$	$G_{95}$
보통시멘트	67	74
조강시멘트	25	34
플라이 애시	47	52
점 토	26	50
콜로이드 시멘트	18	27
초미립자 시멘트	6	8
벤토나이트	1.5	7

② 용액형 그라우트의 침투성 : 현탁액형 그라우트의 사용이 곤란하다고 생각되는 중사·세사 등의 지반에 대해서는 용액형 그라우트를 사용한다.

용액형 그라우트의 침투성은 점토에 의해서 크게 좌우되지만, 일반적으로 투수계

수가  $10^{-3}$ cm/sec 정도까지의 지반에 사용할 수 있다. 또 겔타임이 긴 배합의 경우에는 투수계수가  $10^{-4}$ cm/sec 정도의 지반에까지, 그 침투 가능범위가 확대된다.

#### (4) 환경 위해성 검토

특히 그라우팅 장소에 근접하여 하천, 호수와 늪, 양어장, 농작물, 우물 등이 존재할 경우에는 그라우트 자체가 안전성이 높은 것이라도 소정의 범위 내에 확실하게 침투되도록 겔타임을 포함하여 신중하게 검토해야 한다.

### 나. 펌프압송방식의 선정

펌프압송방식의 선정은 각종 방식의 특징을 충분히 파악하고, 그라우팅목적, 지반조건, 시공조건, 주변 환경조건, 사용하는 그라우트와의 적합성, 그라우팅공법에 대한 기대도, 경제성 등을 종합적으로 판단하여 결정할 필요가 있다.

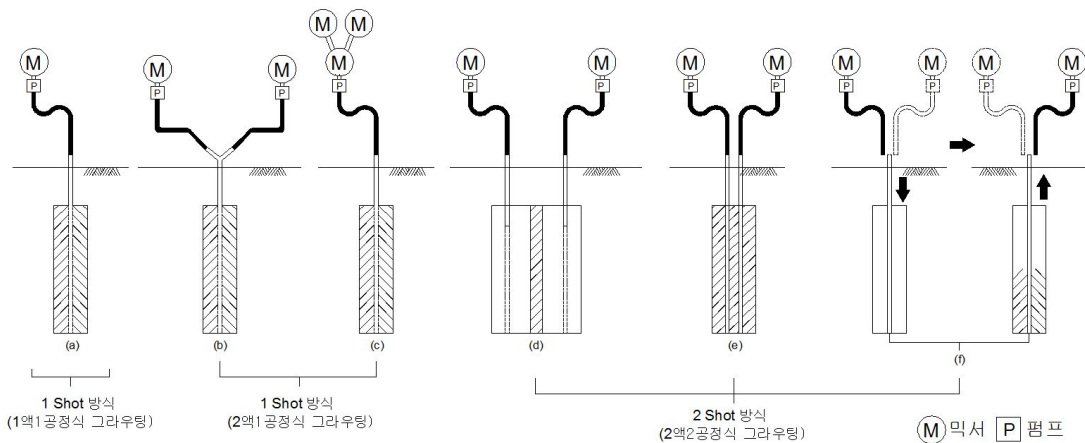


그림 2.7 펌프압송방식(그라우팅환경공학, 2012)

### 다. 그라우트량의 계산

그라우트량의 계산은 개량 대상토층의 지반조건이나 그라우팅 목적에 적합한 그라우트의 종류 및 펌프압송방식 등 기술적인 면과 경제적인 면을 고려하면서 개량 지반에 가장 효과가 얻어지도록 계획할 필요가 있다.

일반적으로 그라우트량을 구하는 기본 식은, 개량 대상토량  $V$ 에 그라우팅률  $\lambda$ 을 곱한 식 (2.8)과 같다.

$$Q = V\lambda = Vn\alpha(1 + \beta) \quad (2.8)$$

여기서,  $Q$  : 개량 대상 지반에 대한 그라우트량( $m^3 = 1,000l$ )

$V$  : 개량 대상 지반의 체적( $m^3$ )

$\lambda$  : 그라우팅률

$n$  : 공극률

$\alpha$  : 충전율

$\beta$  : 손실계수

식 (2.8)에 의한 그라우트량의 산정은 입자간 침투그라우팅을 전제로 한 것이며, 맥상그라우팅과 같은 경우에는 적용하기 어렵다.

그러나 맥상그라우팅 형태에서의 그라우트량의 계산방식으로써 현재 확립된 것이 없기 때문에 경험적으로 맥상그라우팅의 경우에도 위 식을 적용하고 있는 것이 현실이다. 더욱이 그라우팅률의 계산에 관해서는 맥상에 그라우팅 된 호모겔을 가압하는 것에 의한 체적수축을 고려하여 그라우팅률을 결정하는 사고방식도 있지만, 아직 일반적이지 않다.

#### (1) 공극률

보통 지반의 공극은 일반적으로 물과 가스로 점유되어 있는 부분을 나타내고 있다. 공극수는 자유수와 흡착수로 이루어져 있다. 이 중에서 자유수는 중력수라고도 말하고, 각종 배수공법을 실시하는 것에 따라 배제할 수 있는 물이다. 한편 흡착수는 보통 실시하는 배수공법 등을 사용해도 배제할 수 없는 물을 말한다. 그라우트량의 검토에서의 공극률은 그라우팅에 의해 그라우트로 바꿀 수 있는 자유수가 차지하는 체적을 대상으로 해야 하며, 이것을 유효 공극률이라고 한다.

공극률은 토질조사에 의해 실측하는 것이 바람직하지만, 실측이 곤란한 경우에는 경험적으로 유사지반에서의 시공실적으로부터 결정하는 경우도 있다.

### (2) 충전율

충전율은 개량 범위 내에 있어서 소정의 그라우팅 효과를 얻기 위해서 필요로 하는 것이며, 공극에 대해서 그라우트를 바꿔놓는 비율로써 나타낸다. 이 값은 개량 대상 지반의 토질 성상, 그라우트의 침투성 및 그라우팅 형태 등에 의해 달라진다.

### (3) 손실계수

실제 그라우팅에 있어서 계획된 개량 범위 내에 소정의 그라우팅 효과를 얻기 위해서는 계획된 개량범위 외에까지 약액이 미치는 것은 피할 수 없으며, 이러한 상태는 시공상의 안전율로써 그라우팅률 속에 고려할 필요가 있다. 이 값은 개량 대상 물건의 중요도, 개량효과의 기대도 등에서 결정되어야 하는 것이지만, 현재는 이 계수에 대한 이론적인 뒷받침이 되어있지 않고 경험적으로  $\beta = 0.1$  정도가 사용되고 있는 경우가 많다. 표 2.6은 건설부(1986)에서 제시하고 있는 토질에 의한 그라우트의 충전율을 보여준다.



표 2.6 토질에 의한 그라우트의 충전율·그라우팅률의 참고치(건설부, 1986)

토질	N	투수 계수 (cm/s)	n(%)	그라우트종별	충진율(%)		그라우팅율(%)		비고	
					목적별		목적별			
					보강	차수	보강	차수		
자갈 모래	무르다	4~10	10 <sup>1</sup>	40~50	현탁액계	95	100	43~48	45~50	$\alpha \cdot (1 + \beta) :$ 충진율 $n \cdot \alpha (1 + \beta) :$ 그라우팅율
					중정도	-	100	-	45~50	
	중정도	10~30	10 <sup>0</sup>	35~40	현탁액계	95	-	33.3~38.0	-	
					용액계	90	100	31.5~36.0	35~40	
	조밀	30~50	10 <sup>-1</sup>	30~35	현탁액계	90	-	27.0~31.5	-	
					용액계	90	95	27.0~31.5	28.5~33.3	
사질토	무르다	4~10	10 <sup>-2</sup>	45~50	용액계	90~95		40.5~47.5		
	중정도	10~30	10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-3</sup>	40~45	용액계	90~92		36.0~41.4		
	조밀	30~50	10 <sup>-3</sup> ~10 <sup>-4</sup>	35~40	용액계	80~85		28.0~34.0		
점성토	무르다	0~4	10 <sup>-4</sup> ~10 <sup>-5</sup>	60~75	현탁액계	40	-	24~30	-	
					용액계	45	-	27~34	-	
	중정도	4~8	10 <sup>-4</sup> ~10 <sup>-5</sup>	50~60	현탁액계	30	-	15~18	-	
					용액계	30	-	15~18	-	
부식토	0~5	10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-3</sup>	70~90	현탁액계	60		42~54			
				용액계	-	100	-	70~90		

- (주) 1. 토질조사 결과 N치, 투수계수, 공극률이 표와 다를 때는 공극률을 우선한다.  
 2. 공극률이 분명하지 않을 때는 N치로 추정  
 3. 손실계수  $\beta$ 는 0.1로 한 값임.(이 값은 현장시험에서 결정하는 것이 좋다.)  
 4. 그라우팅목적의 중요도로 충전율을 고려한다.

(4) 점성토

점성토지반에 그라우팅 시 그 그라우트량을 계산하는 방법에는 다음의 2 가지 식이 있다.

① 토의 함수비 현상에 의한 방법

국부압축현상에 의한 탈수로 자연함수비( $W$ )의 저하, 이때의 가압계수( $f$ )에 의한 그라우트량( $Q$ )은

$$Q = V \cdot \frac{G_s}{1+e} \cdot (W - W_p) \cdot f \quad (2.9)$$

여기서,  $G_s$  : 토입자의 비중

$e$  : 토입자의 공극비

$W$  : 자연함수비

$W_p$  : 소성한계

$f$  : 가압계수

$V$  : 개량 대상 지반의 체적( $m^3$ )

점성토에 현탁형 Water-Glass를 그라우팅 하는 경우의 가압계수는 1.1~1.6정도이다.

② 토의 압축에 의한 방법

그라우팅에 의한 토의 압축으로 공극량이 감소되는 현상에 의한 그라우트량( $Q$ )은 다음 식 (2.10)과 같이 계산한다.

$$Q = V \cdot \frac{C_c}{1+e} \cdot f \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o} \quad (2.10)$$

여기서,  $P_o$  : 압밀항복하중

$P_o + \Delta P$  : 그라우팅 압력

$e$  :그라우팅 후의 공극비  
 $f$  : 가압계수  
 $C_c$  : 압축지수  
 $V$  : 개량 대상 지반의 체적( $m^3$ )

(4) 모래질토

모래질토의 경우에는 유효공극에 그라우팅 되는 약액량의 충전에 의한 그라우트량 ( $Q$ )은 다음 식 (2.11)과 같이 계산한다.

$$Q = V \cdot g_r \cdot f \quad (2.11)$$

여기서,  $g_r$  : 유효공극 그라우팅율  
 $f$  : 가압계수  
 $V$  : 개량 대상 지반의 체적( $m^3$ )

표 2.7 토질조건에 따른 물성치

토질		N치	투수계수 (cm/sec)	공극율(%)
모래와 자갈	느슨함	4~10	$10^1$	45~50
	중위	10~30	$10^0$	35~40
	다져짐	30~50	$10^{-1}$	30~35
사질토	느슨함	4~10	$10^{-2}$	45~50
	중위	10~30	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	40~45
	다져짐	30~50	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	35~40
점성토	느슨함	0~4	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	60~75
	중위	4~8	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	50~60
부식토		0~5	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	70~90

다. 로드의 설치형태

로드의 설치형태는 설치 방향에 따라 그림 2.8에 나타내는 바와 같이 수직, 경사, 수평에 로드를 설치하는 경우와 터널 갱내로부터 로드를 설치하는 경우 등으로 나뉜다.

이들은 지표면의 이용 상황 등으로부터 제약되는 작업 공간, 지하매설물의 상황, 시공 심도, 천공 정밀도, 공기, 공사비용 등을 종합적으로 고려하여 결정한다.

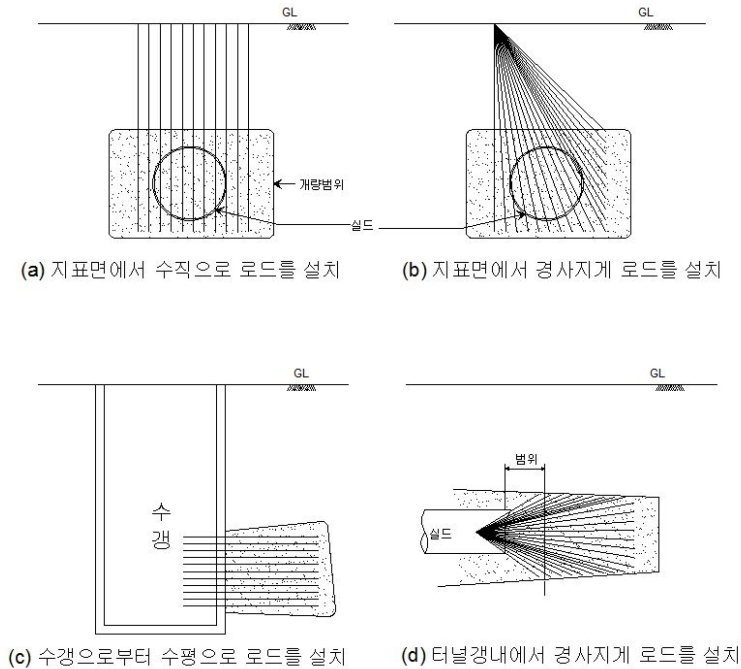


그림 2.8 로드의 설치형태(그라우팅환경공학, 2012)

각 그라우팅방법의 특징 및 선정에서 유의할 점은 다음과 같다.

(1) 로드 수직설치 시

- ① 지표면의 이용 상황이나 지하매설물에 의한 제약이 없는 경우에 선정되고, 그라우팅효과의 확실성, 공기, 공사비용의 면에 뛰어나다.
- ② 그라우팅효과는 천공 정밀도에 의존하고 있고, 개량범위 전체에 동등한 그라우팅효과를 기대할 수 있는 천공심도는 토질에도 의하지만, 일반적으로 천공지름의 차에 의해 단관로드 펌프압송방식, 2중관 단상펌프압송방식 등의 경우에 25~30m, 2중관 더블팩커-펌프압송방식의 경우에는 35~40m 라고 알려지고 있다.
- ③ 개량범위의 상부에 천공 그 자체에 의해 땅의 흐트러짐이 생기는 토층이 존재하는 경우에는 로드의 설치형태, 천공 부위충전처리 등에 충분한 검토가 필요하다.

(2) 로드 경사설치 시

- ① 지표면의 이용 상황이나 지하 매설물에 의해서 로드의 설치 위치에 제약을 받는 경우에 채택되지만, 수직으로 로드를 설치할 경우에 비해 천공 정밀도가 약간 떨어진다. 이 때문에 로드를 경사지게 설치하여 시공하지 않으면 안되는 경우에는 그라우팅기계의 안정을 충분히 행하여 정밀도의 향상을 꾀할 필요가 있다.
- ② 앞 ①항 이외에 관해서는 수직으로 로드를 설치할 경우와 거의 마찬가지로 특징을 갖는다.

(3) 로드 수평설치 시

- ① 지표면에 수직 또는 경사지게 로드를 설치하는 것이 곤란한 경우, 또는 개량위치가 깊기 때문에 정밀도상, 경제상에서 지표면으로부터 그 시공이 불리한 경우 채택된다.
- ② 체수 모래층의 천공에 즈음해서는 용수대책을 필요로 하는 외에 수직 또는 비스듬하게 로드를 설치할 경우에 비해 자명현상(사질지반에 있어서 토립자가 로드 주변에 국부적으로 죄어 굳어져 로드의 회전이 곤란하게 된 현상)에 의한 천공 불능에 바치는 경우가 많다.
- ③ 그라우팅공사와 본체공사를 병행하여 시공할 수 없기 때문에, 천제공사가 길어진다.

(4) 터널 갱내시공 시

- ① 전체적으로 앞 (3)항 수평으로 로드를 설치할 경우와 마찬가지로 말할 수 있다.
- ② 터널 전면(이하 막장이라 한다)으로부터 반복해서 그라우팅을 실시하여 추진할 경우 중첩범위(그림2.8에서 막장전방의 기개량부분을 말한다)의 길이는 2~3m가 일반적이다.
- ③ 1회당 개량의 천공 한계길이는 천공 정밀도로부터 사질토의 경우 10m정도, 점성토의 경우 15m라고 알려지고, 실 개량길이는 이 길이로부터 중첩범위 길이를 줄인 것이 된다.

## 라. 그라우트공의 배치

그라우팅공의 배치는 각 공에서 그라우트의 침투범위가 겹치도록 결정하지 않으면 안되므로, 그라우트의 침투범위를 구하는 이론식·실험식이 몇 가지 알려지고 있지만, 어떠한 식도 지반의 상태, 그라우트의 침투성 등에 대해 많은 가정을 만들고 있으므로 침투범위의 결정에 있어서 이러한 식에서 얻어진 값 이오에 시공실적을 참고로 하여, 현장 시험결과에 의해 결정할 필요가 있다.

그라우팅공의 배치는 그림 2.9에 나타내는 바와 같이 단열식과 복렬식으로 나누어진다.

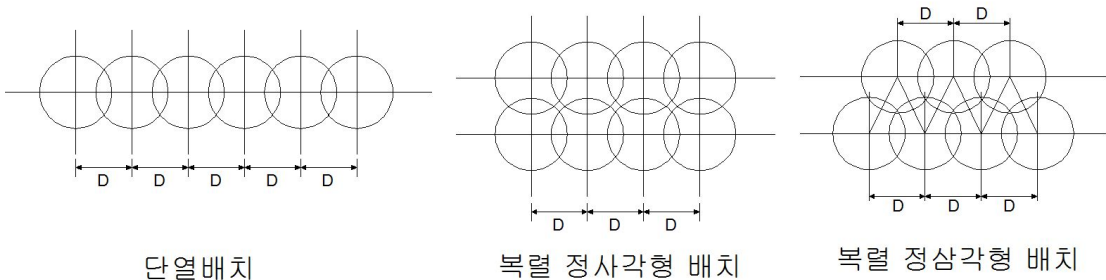


그림 2.9 그라우트공의 배치(그라우팅환경공학, 2012)

설계목표로써 일반적으로 채택되고 있는 그라우팅공의 배치 예를 나타내면 다음과 같다.

(1) 개량범위가 벽모양으로 가늘고 긴 경우

① 차수 목적

㉠ 단열 배치 :  $D = 0.6\text{m} \sim 0.8\text{m}$

㉡ 복렬 정삼각형 배치 :  $D = 1.0\text{m} \sim 1.2\text{m}$

② 지반보강 목적

㉠ 단열 배치 :  $D = 0.8\text{m} \sim 1.0\text{m}$

㉡ 복렬 정삼각형 배치 :  $D = 1.0\text{m} \sim 1.2\text{m}$

(2) 개량범위가 블록형태로 정리되어 있는 경우

① 차수 목적

정사각형 배치 :  $D = 1.0\text{m} \sim 1.2\text{m}$

② 지반보강 목적

정사각형 배치 :  $D = 1.0m \sim 1.5m$

이상은 수직으로 로드를 설치할 경우의 표준적인 사고방식을 나타낸 것이며, 그라우팅방법에 의해서는 다음과 같은 점에 유의하여 그라우팅공의 배치를 생각하는 것이 필요하다.

㉠ 경사시공 시

그라우팅공 침단에서 표준으로 하는 간격을 유지하도록 설계한다.

㉡ 수평시공 시

보통 토층의 퇴적은 상하방향으로 층상을 나타내고, 그라우트는 토층을 따라 수평방향으로 침투하기 쉬운 것에서 상하방향의 그라우팅공 간격을 조밀하게 한다.

표 2.8 토질별 그라우팅 간격(건설부, 1986)

토 질	주입목적		약액
	지수(m)	보강(m)	
점 성 토	-	1.0 ~ 2.0	현 탁 형
모 래	0.6 ~ 1.0	0.8 ~ 1.2	용 액 형
모래·자갈	0.8 ~ 1.2	1.0 ~ 1.5	용액형, 현탁형

## 2.3 물의 흐름

### 2.3.1 흡속의 물의 흐름

#### 가. Darcy 흐름이론

흡속으로의 물의 흐름은 그림에서 보는 바와 같이 두 점 사이의 수두차( $\Delta h$ )에 의하여 유발된다. 동일 수두차에서 이동거리( $\Delta s$ )가 길면 수두손실로 인해 흐름유속은 점점 약해져 결국 흐름이 멈춘다.

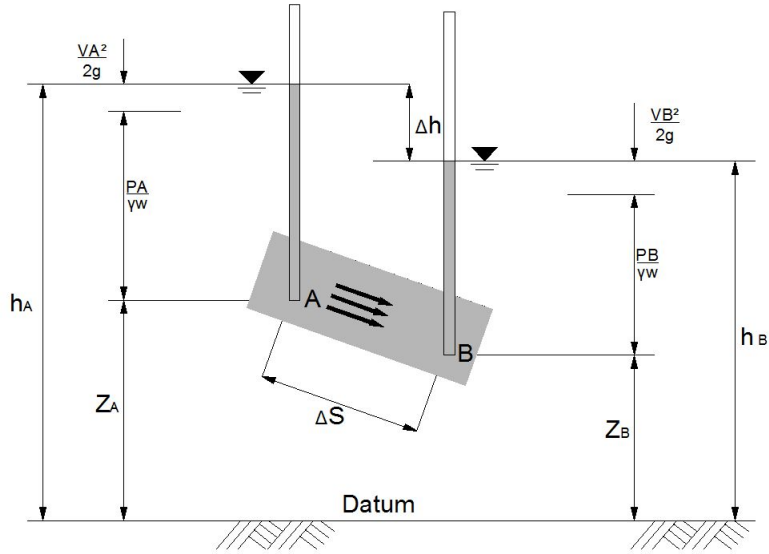


그림 2.10 흡속의 물의 흐름 개략도(이행우, 2005)

그림 2.10에서 두 지점 A, B에 Bernoulli의 정리를 적용하면 다음 식 (2.12)와 같다.

$$\left(Z_A + \frac{P_A}{\gamma_w} + \frac{V_A^2}{2g}\right) = \left(Z_B + \frac{P_B}{\gamma_w} + \frac{V_B^2}{2g}\right) \quad (2.12)$$

그러나 흡속의 흐름 유속은 아주 작고, 흡은 등반균질(Homogeneous and Isotropic)이라고 가정하면, 두 단면에서의 유속  $V_A$ 와  $V_B$ 가 같으므로 두 지점의 수두차  $\Delta h$ 는 식 (2.13)과 같이 계산된다.

$$\Delta h = h_A - h_B = \left(Z_A + \frac{P_A}{\gamma_w}\right) - \left(Z_B + \frac{P_B}{\gamma_w}\right) \quad (2.13)$$

여기서,  $h_A, h_B$  : 각각 A, B 지점의 전수두(m)

$Z_A, Z_B$  : 각각 A, B 지점의 위치수두(m)

$P_A, P_B$  : 각각 A, B 지점의 압력( $\text{kN/m}^2$ )

$V_A, V_B$  : 각각 A, B 지점의 유속(m/s)



$\gamma_w$  : 물의 단위중량( $\text{kN/m}^2$ )

두 지점의 전수두  $h_A, h_B$  는 피에조미터를 설치하였을 때 측정되는 수두의 높이이다. 두 점 사이의 물의 흐름은 전수두차( $\Delta h$ )에 의하여 발생한다.

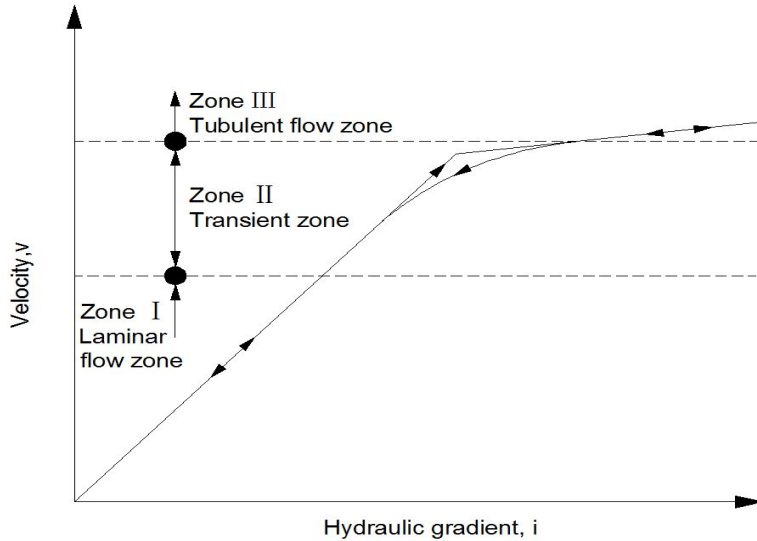


그림 2.11 자연 흠 속 유속과 동수경사의 관계(이행우, 2005)

그림 2.11은 자연상태 지반의 수두경사와 흐름유속을 도시한 것이다. 그림 2.11에서 Zone I 에서는 흠속의 흐름유속이 수두경사에 비례하고 ZoneIII에서는 수두경사가 증가해도 유속은 변하지 않는다. 관수로의 흐름이론에서 Zone I 은 층류이고 ZoneIII은 난류 흐름으로 분류하고 ZoneII은 층류에서 난류로 변하는 천이구역이라 한다. 보통 흠속의 흐름은 층류로, 사석, 자갈, 굵은 모래속의 흐름은 난류흐름으로 간주한다. (Taylor, 1948).

Darcy(1856)는 층류에서의 흐름이론을 식 (2.14)와 같이 정립하였다.

$$v = ki \tag{2.14}$$

여기서,  $v$  : 흠속의 물의 유속( $\text{m/s}$ )

$k$  : 포화상태에서 투수계수(m/s)

$i$  : 동수경사

식 (2.14)에서 동수경사(hydraulic gradient)  $i$ 는 두 지점간의 수두차를 거리로 나눈 값이다. 즉 흠속의 모든 유체의 흐름 유속은 수두경사에 비례하고 그 비례상수는 투수계수(coefficient of permeability)이다. 따라서 난류의 흐름은 Darcy의 흐름법칙을 따르지 않는다.

유체의 흐름특성은 식 (2.15)의 레이놀즈 수로 분류하는데,  $R_e < 200$  흐름은 층류인 Darcy 흐름으로,  $R_e \geq 200$ 인 흐름은 난류의 Non-Darcy 흐름으로 구분한다 (최홍식, 2004; Li 등, 1998; Stephenson, 1979). 그러나 층류와 난류의 구분은 흐름 상태에 따라 그 양식을 달리 한다.

$$R_e = \frac{vR}{\nu} \quad (2.15)$$

여기서,  $R_e$  : 레이놀즈 수

$v$  : 유체의 유속

$R$  : 유체의 통과 매체 입자의 평균수리심

$n$  : 유체의 통과 매체의 공극율

$\nu$  : 유체의 동점성 계수

두 지점간의 유량은 식 (2.16)과 같이 유체의 흐름유속에 흐름의 직각 방향의 단면적을 곱하여 구한다.

$$Q = AV = kiA \quad (2.16)$$

흠속의 물의 흐름해석에서는 식 (2.14) Darcy의 법칙 및 식 (2.16)의 연속방정식이 기본이 된다.

## 2.3.2 사석층의 물의 흐름

### 가. 사석의 물리적 특성

사석의 물리적 특성은 흙과 비교하였을 때 차이가 크기 때문에 사석층 내 물의 투과 흐름이론은 흙 속의 물의 투과 흐름이론과 같지 않다. Li 등(1998) 및 최홍식 등(2004) 많은 수공학자들이 사석층 내 물의 흐름을 마찰력이 관수로 흐름이론을 도입하여 사석층 내의 흐름유속( $V$ )과 수두손실( $i$ )과의 관계를 정립하고 사석층 내의 흐름 유속을 계산했다.

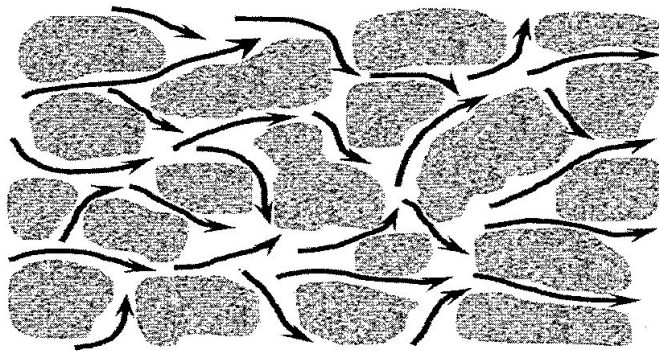


그림 2.12 사석층의 물의 흐름(이행우, 2005)

Taylor(1948)는 그림 2.12와 같이 큰 공극을 가진 사석층의 흐름에서 평균수심(mean hydraulic radius),  $R$ 을 식 (2.17)과 같이 정의하였다.

$$R = \frac{V_v}{S_A} \quad (2.17)$$

여기서,  $V_v$  : 사석층 내 공극의 체적( $m^3$ )

$S_A$  : 공극의 표면적( $m^2$ )

사석의 공극률  $n$  및 공극비  $e$ 는 식 (2.18)과 같다.

$$n = \frac{V_v}{V} \tag{2.18}$$

$$e = \frac{V_v}{V_r} = \frac{V_v}{V - V_v}$$

여기서,  $V$  : 공극을 포함한 총체적( $m^3$ )

$V_r$  : 사석의 체적( $m^3$ )

$V_v$  : 공극의 체적( $m^3$ )

또한,  $A_{MS}$ 는 단위사석 질량당 표면적( $m^2/kg$ )으로 식 (2.19)와 같이 나타낸다.

$$A_{MS} = \frac{S_A}{M_R} \tag{2.19}$$

식 (2.20)에서  $M_R$ 은 사석의 질량( $kg$ )이고, 식 (2.19)를 다시 정리하면 다음 식 (2.20)과 같다.

$$R = \frac{V \cdot n}{A_{MS} \cdot M_R} \tag{2.20}$$

여기서, 단위사석 체적 당 표면적 ( $m^2/m^3$ )를  $A_{VS}$ 라 하면,

$$A_{VS} = \frac{S_A}{V_r} \tag{2.21}$$

식 (2.18)의  $V_v$ 와 식 (2.21)의  $S_A$ 를 식 (2.17)에 대입하면 식 (2.22)가 얻어진다.

$$R = \frac{e}{A_{VS}} \tag{2.22}$$

사석의 밀도  $\rho(\text{kg/m}^3)$ 는

$$\rho = \frac{M_r}{V_r} \quad (2.23)$$

이므로, 식 (2.21)의  $V_r = S_A/A_{VS}$ 를 식 (2.23)에 대입하여 정리하면 식 (2.24)가 얻어진다.

$$A_{VS} = \rho A_{MS} \quad (2.24)$$

예로 평균직경이  $d$ 인 구형사석에 대한  $A_{VS}$ 는 다음과 같다.

$$A_{VS} = \pi d^2 / \left( \frac{1}{6} \pi d^3 \right) = \frac{6}{d} \quad (2.25)$$

따라서  $A_{VS}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$A_{VS} = \frac{J}{d} \quad (2.26)$$

식 (2.26)을 식 (2.22)에 대입하면

$$R = \frac{ed}{J} \quad (2.27)$$

여기서,  $J$ 는 상수이고, 사석의 표면적 효율(surface area efficiency)의 정도를 나타낸다. 구형인 경우  $J = 6$ 이다. 여기서 상대적인 형상계수( $r_E$ )를 도입하면, 즉 사석이 완전한 구라고 가정하면 상대적인 형상계수  $r_E$ 를 1로 나타낼 수 있다. 일반사석의 상대적인 형상계수  $r_E$ 는 다음 식 (2.28)과 같이 나타낸다.

$$r_E = \frac{J_{rock}}{J_{sphere}} = \frac{J_{rock}}{6} \quad (2.28)$$

$r_E$ 는 상대적인 표면적 효율이다. 따라서, 일반사석의  $A_{VS}$ 와  $R$ 은 다음과 같다.

$$A_{VS} = \frac{6r_E}{d} \quad (2.29)$$

$$R = \frac{ed}{6r_E} \quad (2.30)$$

방조제 바닥사석층에 사용되는 사석은 보통 석산에서 깎돌을 사용하기 때문에 정확한 구가 아니다. 바닥사석층에 사용된 사석의 형상계수  $r_E$ 를 추적하면 다음과 같다. 보통 사석의 공칭직경은 사석을 정확한 구로 보았을 때 식 (2.31)과 같다.

$$D_n = CD_s \quad (2.31)$$

여기서,  $D_n$  : 사석의 공칭직경

$C$  : 환산계수

$D_s$  : 사석을 구로 환산한 직경

사석의 단위체적당 단면적,  $A_{VS}$ 는,

$$\begin{aligned} A_{VS} &= \pi d^2 / (\pi d^3 / 6) = \pi D_s^2 / (\pi D_s^3 / 6) \\ &= \pi \left( \frac{D_n}{C} \right)^2 / \left( \pi \left( \frac{D_n}{C} \right)^3 / 6 \right) \\ &= \frac{6C}{D_n} \end{aligned} \quad (2.32)$$

식 (2.32)를 식 (2.29)에 대입하면 다음과 같다.

$$A_{VS} = \frac{6r_E}{d} = \frac{6C}{D_n} \quad (2.33)$$

식 (2.33)에서 사석의 평균직경  $d$ 와 공칭직경  $D_n$ 이 같다면 사석의 형상계수  $r_E = C$ 이다. 일반적으로 간척사업의 바닥사석재로 사용하는 석산 쇄석의 환산계수  $C = 0.806$ (농업기반공사, 2002)을 쓰고 있다. 따라서 사석의 형상계수  $r_E = 0.806$ ,  $J_{rock} = 4.80$ 이다.

## 제 3 장 실내실험 방법 및 결과

### 3.1 현장 상황 및 현장조건

본 연구에서 그라우팅 차수효과를 확인하기 위한 실험이며 다음 그림 3.1과 같이 제체, 댐 등 사석층으로 이루어진 구조물 하부에 해수 및 유수의 침투로 인해 사석층 위 토사가 사석층을 통해 유출되어 댐, 제체가 무너져 각종 사고 및 피해가 발생하고 있다. 또한 사석층에 그라우팅을 실시하여 차수벽을 형성시켜야 하나 공극이 큰 사석층은 담수 또는 해수로 포화가 되어 있고 심지어 유속이 존재하여 그라우트재가 용출되는 문제 때문에 차수벽을 형성 시키지 못하거나 차수벽이 형성되었어도 제 기능을 발휘하지 못한다.

따라서 본 연구에서는 그라우트재에 수중 용출특성을 보완하여 공극이 큰 사석층에 적합한 그라우트재를 찾고 주입조건을 결정하는데 목적이 있다.

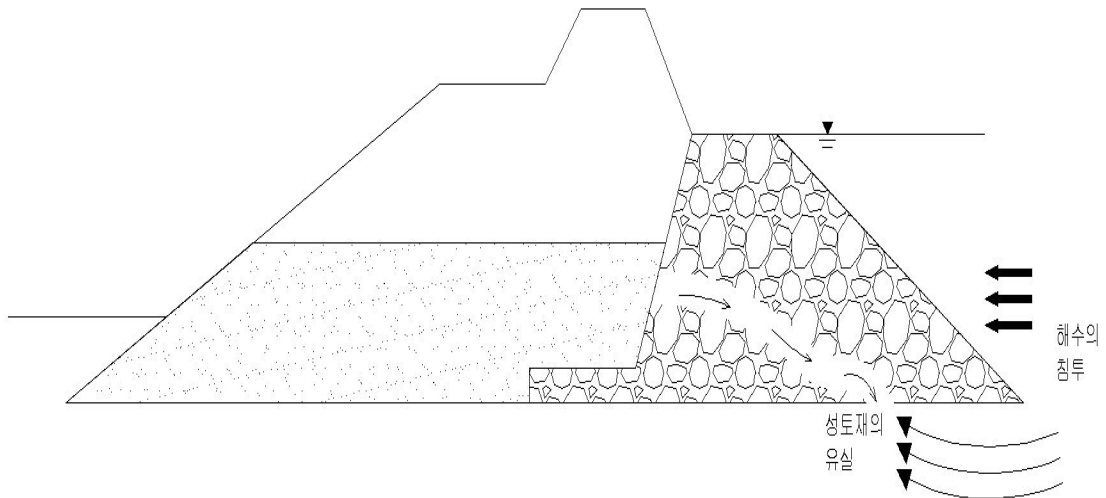


그림 3.1 현장상황 모식도



## 3.2 시료 및 시험기

본 연구에서 그라우팅 차수효과를 확인하기 위해 시험에 사용된 시료는 전라남도 화순군 채석장 레미콘 현장에서 1차 파쇄된 사석이며 크기는 약 15~40cm로 다양한 분포를 나타내었지만, 모형실험에서는 20~30cm 사석만을 사용하여 현장상태를 재현하고자 하였다. 시험에 사용된 사석은 그림 3.2와 같다.

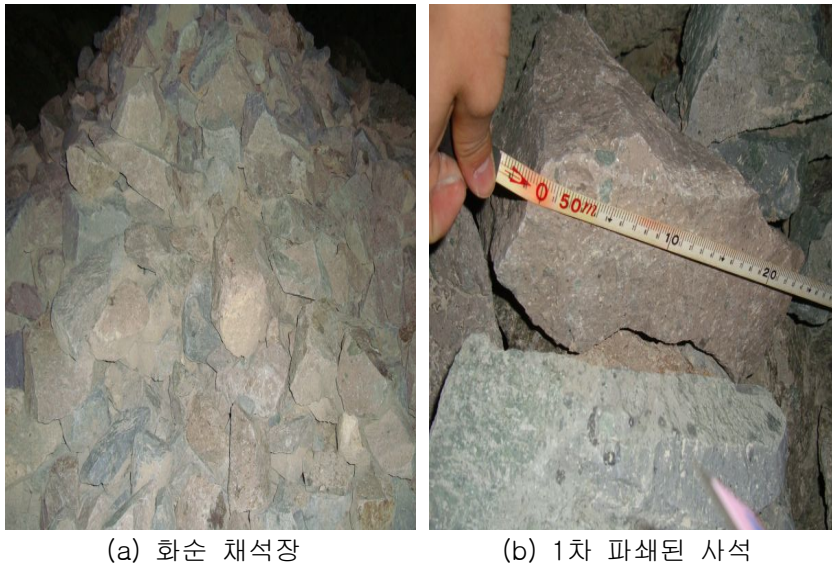


그림 3.2 시험에 사용된 사석

시험장비는 D 40cm × L 200cm 모형토조로서 현장상태를 그대로 재현하고자 다음 그림 3.3과 같이 그라우팅 및 주입장치의 모형을 설계하였다. 원형의 쇠석을 사용하여 실험을 진행하였고, 유속조건을 주기 위해서 양쪽 부분에 2개의 유수밸브를 장착하여 측방에서 유속을 줄 수 있도록 제작하였다. 유속밸브를 당초 4개에서 2개로 줄인 이유는 아크릴 자체 모형의 변형을 줄이고자 함이며, 유속 측정과 모형토조에 총 들어갈 물의 양은 유량계를 통하여 측정하였다. 실제 제작된 시험기구의 모습은 그림 3.4와 같다.

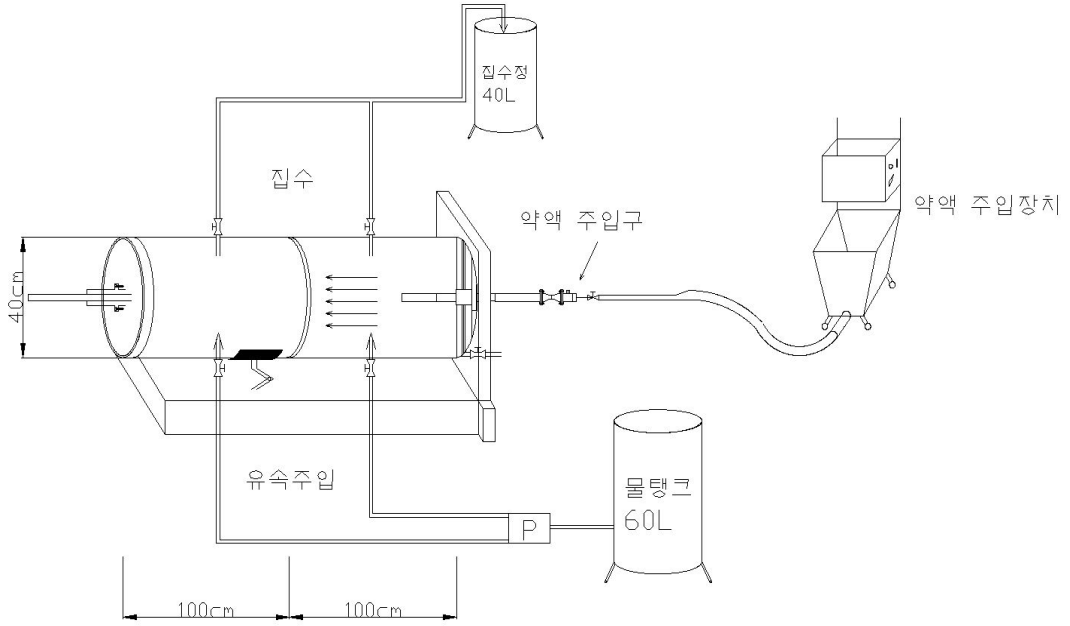


그림 3.3 그라우팅 및 주입장치 모식도



그림 3.4 그라우팅 시험기

### 3.2.1 시료의 배합비 및 주입조건

본 연구에 사용된 주입재료는 사석 충전용 주입재료로써 모르타르(OPC + 석회 + 모래(4, 5, 6호))와 수중 불분리체를 통하여 시멘트와 모래의 분리를 방지하고, 팽창제를 넣어 사석과 사석 사이의 큰 공극을 메우고자 하였다. 또한 점성이 높아지기 때문에 유동화제를 첨가하여 유동성을 높임으로써 주입 시 워커빌리티를 높여주고 사석층에 유속이 흐를 때에 씻김이 적고 분리가 일어나지 않는 최적의 주입재료를 찾고자 하였다. 주입시험에 사용된 주입재료의 배합비는 다음 표 3.1과 같다.

표 3.1 시험에 사용된 주입재료의 배합비(OPC+기타 OPC+석회+모래 모르타르 1포, 25kg 기준)

구분 (사석용재료)	OPC (kg)	기타 OPC (kg)	석회 (kg)	모래(kg)			수중 불분리 체(g)	팽창 제(g)	유동화 제(g)	
				4호	5호	6호				
일반형	저점도	8.75	-	4	5	6	1.25	57.5	125	131.25
	고점도	8.75	-	4	5	6	1.25	75	125	131.25
속경형	저점도	7.61	1.14	4	5	6	1.25	57.5	125	131.25
	고점도	7.61	1.14	4	5	6	1.25	75	125	131.25

실내 그라우팅 실험을 통하여 유속의 조건에 따른 주입재료가 사석층의 그라우팅의 영향을 평가하고자 다음 표 3.2와 같이 실험 조건을 선정하였다. 수중에서 그라우트제의 불분리를 위해서는 빠른 경화시간을 필요로 하기 때문에 경화속도를 기준으로 하여 일반형과 속경형을 나누어 개발된 재료를 선정, 사석층의 큰 공극을 채우려면 충분한 점성을 가져야 한다고 판단하고 고점도와 저점도로 나누어 개발된 재료를 선택하였다. 또한 당초 유속조건은 현장에서 유속을 약 1 cm/sec로 측정하여 실험에 0, 10 cm/sec의 유속을 추가하여 실험을 진행하고자 하였으나 유속조건 1 cm/sec를 맞추기 어려워 극단적으로 유속이 없는 0 cm/sec와 약 10배 정도 유속인 10 cm/sec를 실험에 적용시켜 진행하였다.

실험에 사용된 주입속도 10, 20 l/min도 실제 그라우팅에 사용되는 장치의 속도를 반영시켜 10 l/min, 약 2배의 주입속도인 20 l/min의 주입속도를 선정하였다.

표 3.2 실험조건

항목	주입재료	지반조건	유속조건	주입속도	기타
	4 가지	1 가지	2 가지	2 가지	
조건	일반형 저점도 일반형 고점도 속경형 저점도 속경형 고점도	사석층	0 cm/sec 10 cm/sec	10 l/min 20 l/min	

### 3.2.2 실험 절차

시험에 사용된 그라우팅 장치는 그림 3.5와 같고 시험장치의 구성은 직경 0.4m 길이 1.0m의 아크릴 2개, 각 아크릴을 연결 시켜주는 연결 봉 12개, 연결 링 2개 그리고 상판으로 이루어져 있다. 그리고 그라우팅 장치는 약 45°까지 올릴 수 있으며 이는 사석을 충전할 때 실험을 수월히 진행하고자 함이다.

#### 가. 시험장치 조립 및 사석충전

- ① 시험장치는 원통형 아크릴을 유속구의 방향이 맞게 조립한 후 연결링을 연결봉에 맞춰 조립한다. 이 때 원통형 아크릴에 그라우트재의 주입을 마친 후 원활한 탈형을 위해 박리제를 발라준다.
- ② 시험장치에 들어갈 사석은 크기가 다양하여 약 20cm~30cm의 크기를 엄선하여 유속구, 주입구를 막지 않고 공극이 최대한 적게 생기도록 하나씩 채워 넣는다.



그림 3.5 그라우팅 장치 조립

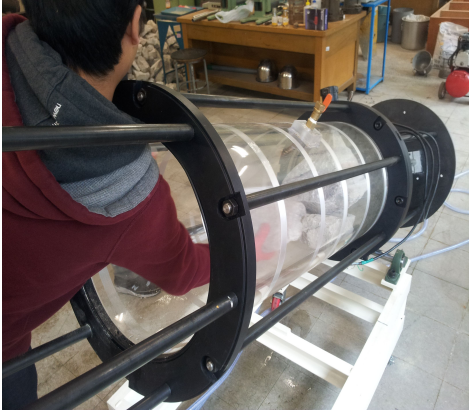


그림 3.6 사석 충전

## 나. 그라우트재의 배합

- ① 그라우트재의 배합은 미리 배합된 모르타르(OPC+모래4,5,6호+석회)와 수중 불분리제, 팽창제, 유동화제, 물을 정해진 비율로 정확히 측정한다.
- ② 가장 처음은 물에 유동화제를 넣고 약 2~3분 동안 교반하여 유동화제가 충분히 물에 희석이 될 수 있도록 한다.
- ③ 유동화제가 충분히 희석된 물에 모르타르, 수중불분리제, 팽창제를 동시에 넣고 뭉쳐진 알갱이 없이 잘 섞이도록 약 10분 이상 충분히 섞어준다.

## 다. 사석 포화 및 유속, 그라우트 주입

- ① 유속주입장치를 통해서 조립한 그라우트 시험장치에 물을 넣고 사석을 포화시킨다. 아크릴 상부에 최대한 남은 공간이 없도록 물을 채워주고 주입구, 집수구에 파이프를 연결한다.
- ② 사석이 포화된 상태에서 물이 빠져 나가지 않도록 각 밸브를 잠근 상태에서 주입장치에 교반해놓은 그라우트재를 주입한다.



그림 3.7 사석 포화

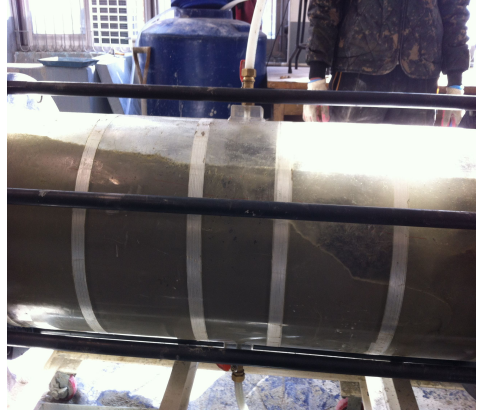


그림 3.8 그라우트재 주입양상



그림 3.9 유속 주입



그림 3.10 주입장치 및 주입

### 3.3 주입돌레 측정

#### 3.3.1 그라우트재 주입 돌레 측정개요

본 연구에 사용된 그라우트재는 공극이 큰 사석층에 그 공극을 채워줌으로서, 포화된 사석층에 흐르는 유속에 그라우트재가 용출되지 않고 경화되어 차수벽을 형성시키는데 주목적이 있다. 직경 20~30cm의 큰 사석 사이의 공극을 채우기 위해서는 점성, 팽창성이 커야 하며 돌레 측정은 이 점성과 팽창성에 대해 평가하기 위해 측정하였다.

본 연구에서는 투명하여 육안 상 구별이 가능하였고, 그라우트재를 주입한 직후 주입구로부터 20cm 간격으로 그라우트재가 채워진 부분까지 돌레를 측정하여 기입하고 약 3 ~ 5시간 후 다시 돌레를 측정하여 그라우트재의 주입 및 팽창 양상을 확인하고자 하였다.

실험에 사용된 원통형 아크릴을 횡단면적으로 보았을 때 원주가 약 1.33m이고 그림 3.11과 같이 간격 20cm마다 측정한 돌레 길이를 좌우 대칭으로 도식화 하였다. 그림 3.11과 같이 돌레길이를 측정한 결과는 표 3.3, 표 3.4와 같다.

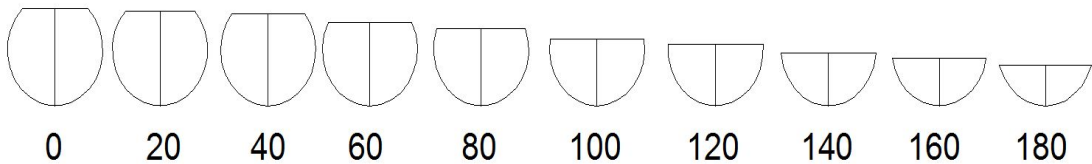


그림 3.11 2m 원통형 아크릴의 간격마다 주입재의 돌레 측정방법

표 3.3 일반형 재료에 대한 돌레 측정길이

항목	재료	주입 속도 (L/min)	유속 조건 (cm/sec)	측정시간 (h)	아크릴 간격 마다 주입제 돌레 측정 간격(m)									
					0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
일반형	저점도	10	0	주입 후	1.01	0.98	0.96	0.88	0.83	0.74	0.70	0.64	0.60	0.55
				3시간 후	1.00	0.96	0.94	0.87	0.82	0.75	0.72	0.69	0.64	0.62
			10	주입 후	1.33	1.33	1.1	0.98	0.74	0.63	0.35	0.3	0.3	0.3
				3시간 후	0.88	0.86	0.84	0.81	0.75	0.7	0.68	0.65	0.65	0.65
		20	0	주입 후	1.33	1.33	1.33	1.04	0.7	0.5	0.32	0.3	0.28	0.27
				3시간 후	0.94	0.93	0.88	0.85	0.8	0.8	0.73	0.64	0.6	0.6
			10	주입 후	1.05	1.02	1.09	0.9	0.8	0.68	0.55	0.38	0.33	0.33
				3시간 후	0.84	0.83	0.8	0.78	0.74	0.73	0.7	0.71	0.7	0.7
	고점도	10	0	주입 후	1.2	1.11	1.15	1.16	1.09	0.8	0.65	0.55	0.46	0.55
				3시간 후	1.2	1.11	1.15	1.10	1.01	0.81	0.66	0.57	0.48	0.62
			10	주입 후	1.33	1.33	1.33	1.17	0.88	0.72	0.3	0	0	0
				3시간 후	1.33	1.33	1.33	1.33	0.93	0.9	0.65	0.5	0.3	0.3
		20	0	주입 후	1.33	1.33	1.33	1.13	0.96	0.62	0.45	0.3	0.3	0.3
				3시간 후	1.33	1.33	1.33	1.15	1.02	0.89	0.85	0.74	0.6	0.4
			10	주입 후	1.33	1.33	1.33	1.1	0.85	0.83	0.6	0.3	0.3	0.3
				3시간 후	1.33	1.33	1.33	1.1	0.95	0.8	0.65	0.55	0.55	0.55



표 3.4 속경형 재료에 대한 돌레 측정길이

항목	재료	주입 속도 (L/min)	유속조건 (cm/sec)	측정시간 (h)	아크릴 간격 마다 주입재 돌레 측정 간격(m)										
					0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	
속경형	저점도	10	0	주입 후	1.06	0.92	0.84	0.80	0.79	0.77	0.72	0.72	0.72	0.71	
				3시간 후	1.12	0.97	0.88	0.84	0.80	0.78	0.81	0.77	0.80	0.77	
			10	주입 후	0.95	0.95	0.93	0.75	0.73	0.68	0.63	0.54	0.5	0.3	
				3시간 후	1.13	1.09	0.99	0.88	0.88	0.82	0.78	0.7	0.7	0.6	
		20	0	주입 후	1.33	1.33	1.33	1.0	0.66	0.58	0.32	0.3	0.3	0.3	
				3시간 후	1.33	1.33	1.33	1.33	1.05	0.95	0.79	0.7	0.65	0.65	
			10	주입 후	1.05	1.05	1.0	0.84	0.72	0.64	0.6	0.6	0.57	0.57	
				3시간 후	1.23	1.1	1.07	0.9	0.8	0.8	0.75	0.7	0.7	0.68	
		고점도	10	0	주입 후	1.33	1.33	1.33	1.1	0.76	0.3	0.3	0	0	0
					3시간 후	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	0.9	0.45	0	0	0
				10	주입 후	1.33	1.33	1.33	1.11	0.92	0.72	0.49	0.4	0.3	0.3
					3시간 후	1.33	1.33	1.33	1.33	0.97	0.82	0.66	0.63	0.6	0.3
	20		0	주입 후	1.33	1.33	1.33	1.1	0.88	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3	
				3시간 후	1.33	1.33	1.33	1.33	1.19	1.03	0.65	0.65	0.65	0.65	
			10	주입 후	1.33	1.33	1.33	1.15	1.03	0.55	0.3	0.3	0.3	0.3	
				3시간 후	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.14	0.7	0.65	0.63	0.55	

### 3.3.2 주입시간에 따른 둘레 측정결과

#### 가. 일반형 주입재

표 3.3에서 측정된 결과를 통해 X축은 아크릴의 간격, Y축은 측정된 둘레로 그래프를 작성하였고 주입 후와 3시간 후를 비교하여 그라우트재의 주입, 흐름, 팽창 양상을 확인할 수 있도록 하였다. 그림 3.12는 일반형저점도, 그림 3.13은 일반형고점도 그라우트재의 흐름 양상을 나타낸 그래프이다.

##### (1) 일반형 저점도

일반형 저점도 그라우트재는 유동성이 비교적 높아 주입 후 0.2 ~ 0.4m 부분까지는 그라우트재가 가득 채워졌으나 조금씩 흘러 내려가고 일반형저점도 그라우트재에서는 시간에 따라 측정한 둘레만으로는 팽창의 정도를 확인할 수 없었으며 다만, 육안 상으로 그라우트재의 표면에서 기포가 발생하여 지속적으로 빠져나온다는 것으로만 팽창이 발생을 한다고 확인 할 수 있었다. 그림 3.12는 주입 후와 3시간 후의 흐름이 거의 동일하여 큰 차이를 발견할 수 없지만 그림 3.13, 그림 3.14, 그림 3.15에서 그라우트재가 주입 직후 0.2~0.4까지는 상부까지 가득 차고 차츰 밀려 나가지만 주입 후 3시간이 경과하여 둘레를 측정하였을 때 가득 차 있던 0.2~0.4m 부분의 그라우트재는 0.8~1.0m 부분까지 떨어진 상태였다.

이러한 경향은 일반형저점도 그라우트재의 경우 유동성이 높고 경화속도 또한 느려 3시간이 경과한 후에도 겔상태로 포화된 사석 내에서 쉽게 경화되지 못할 뿐 아니라 물과 함께 유동성이 더 커져 차츰 흘러 내려갔을 것으로 판단된다.

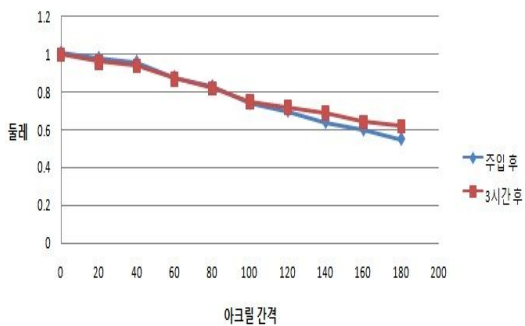


그림 3.12 일반형저점도 유속0, 주입10의 주입양상

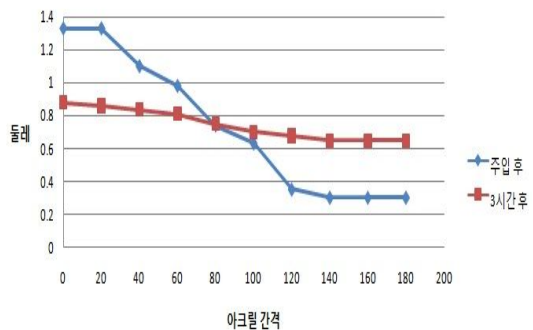


그림 3.13 일반형저점도 유속10, 주입10의 주입양상

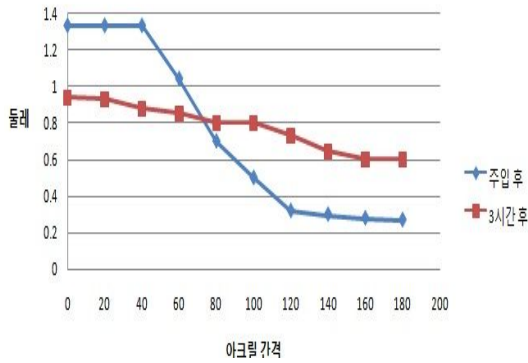


그림 3.14 일반형저점도 유속0, 주입20의 주입양상

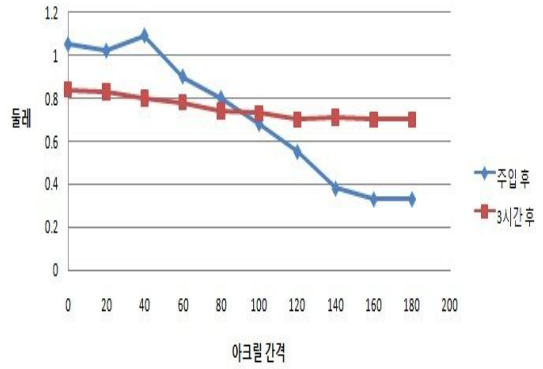


그림 3.15 일반형저점도 유속10, 주입20의 주입양상

(2) 일반형 고점도

일반형 고점도 그래우트재는 4가지 그래프를 볼 때 그림 3.16을 제외하고 그림 3.17, 그림 3.18, 그림 3.19는 주입 후에 주입구와 가까운 0~0.4m까지 그래우트재가 가득 채워졌고 3시간이 경과된 후 그래우트재는 주입 후의 그래프보다 높게 나타났고 전체적인 부피 또한 증가함을 확인할 수 있었다. 이러한 경향은 주입구에 가까운 부분에 가득 찬 그래우트재의 부피가 팽창함을 확인할 수 있었고, 일반형저점도와 비교하여 시간의 흐름에도 점성이 높아 흘러내리지 않았거나 미미하게 흘러내렸어도 고점도의 팽창성에 의해 주입 후의 양상과 비슷하나 더 높은 둘레 값을 나타냈다.

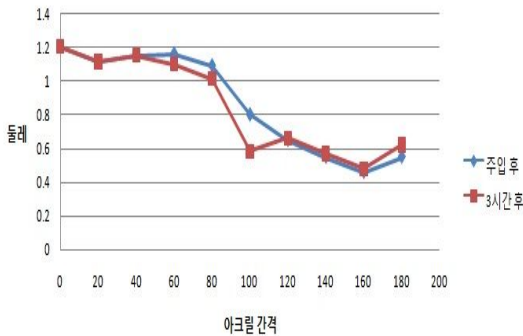


그림 3.16 일반형고점도 유속0, 주입10의 주입양상

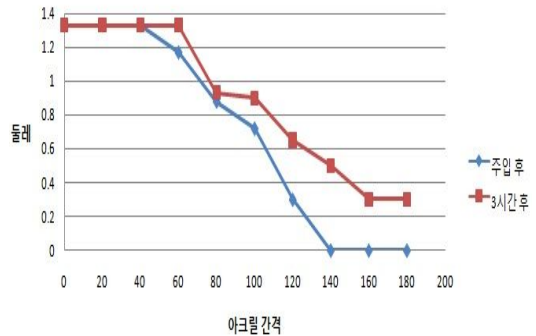


그림 3.17 일반형고점도 유속10, 주입10의 주입양상

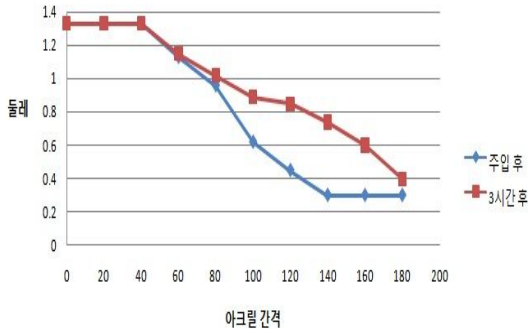


그림 3.18 일반형고점도 유속0, 주입20의 주입양상

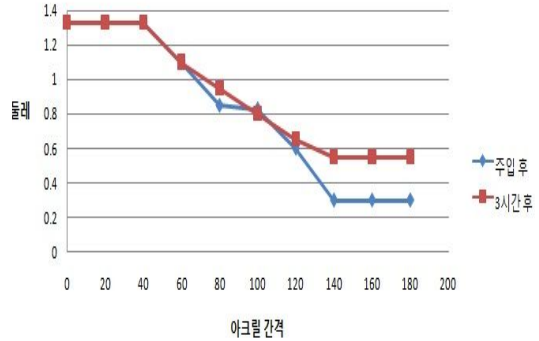


그림 3.19 일반형고점도 유속10, 주입20의 주입양상

### 나. 기존 주입재와 속경형 주입재

표 3.4에서 측정된 결과를 통해 X축은 아크릴의 간격 Y축은 측정된 두레로 하여 그래프를 작성하였고 주입 후와 3시간 후를 비교하여 그라우트재의 주입, 흐름, 팽창 양상을 확인할 수 있도록 하였다. 그림 3.22 ~ 그림 3.25는 속경형 저점도, 그림 3.26 ~ 그림 3.29는 속경형 고점도 그라우트재의 흐름 양상을 나타낸 그래프이다.

#### (1) 시멘트페이스트, 모르타르

개발된 그라우트재와의 비교를 위해 그라우팅에 보편적으로 사용되는 시멘트페이스트(시멘트풀)과 시멘트와 잔골재를 배합한 모르타르로 시험을 진행 한 결과는 그림 3.20과 같다. 모르타르의 경우 주입 직후 주입구 부분이 가득 차고 시간이 경과됨에도 흘러내리지 않았고 이는 유수에 의해 재료분리가 발생해 모래만 있어 유동성이 작아 흘러내리지 않았던 것으로 판단된다. 시멘트의 경우 주입 후 시멘트 페이스트가 흘러내려 3시간이 경과한 후에도 거의 비슷한 형태를 유지하였다. 그림 3.20은 시멘트 페이스트의 주입양상이다.

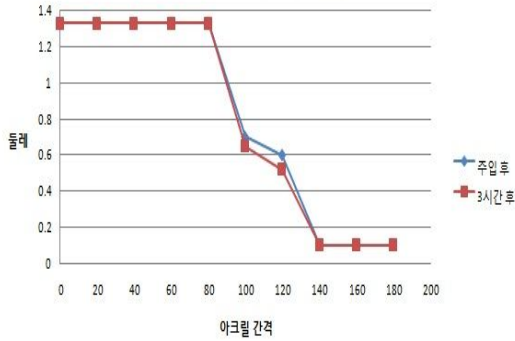


그림 3.20 모르타르의 주입양상

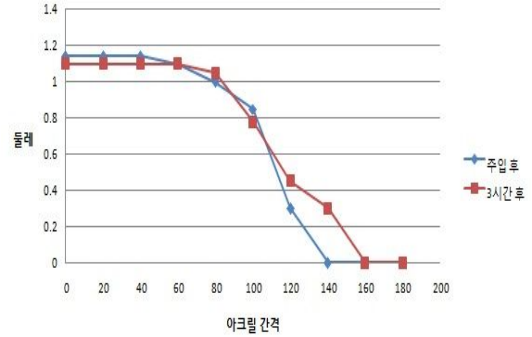


그림 3.21 시멘트페이스트의 주입양상

(2) 속경형 저점도

속경형 저점도 그라우트재 그림 3.21, 3.24는 주입 할 때 어느 정도 유동성이 있어 주입구 부분에 가득차지 않고 흘러 내렸고 3시간이 경과 된 후에 관찰된 둘레와 흐름 양상은 거의 유사하였으나 3시간 후 측정값이 약간 높게 나온 것으로 보아 그라우트재가 팽창했다고 판단된다. 또한 주입 시의 유동성이라면 3시간 동안 충분히 흘러내려 주입구 부분과 입구 부분의 둘레가 비슷하게 측정이 되었겠지만 주입 직후와 3시간 후의 흐름 양상이 거의 비슷한 것은 속경형 그라우트재가 경화속도가 빨라 흘러내리지 못하고 팽창하면서 경화 되었다고 판단된다. 그림 3.22, 3.23의 경우 주입 직후 0 ~ 0.4m 부분까지 가득차고 서서히 흘러내리는 양상을 보였고 3시간이 경과 한 후에는 0.6m까지 팽창이 된 것을 확인할 수 있었다. 그리고 그 뒤 서서히 흘러 내렸던 부분 역시 큰 폭의 차이로 팽창함을 확인할 수 있었다.

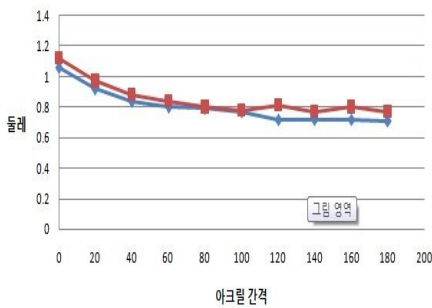


그림 3.22 속경형저점도 유속0 주입10의 주입양상

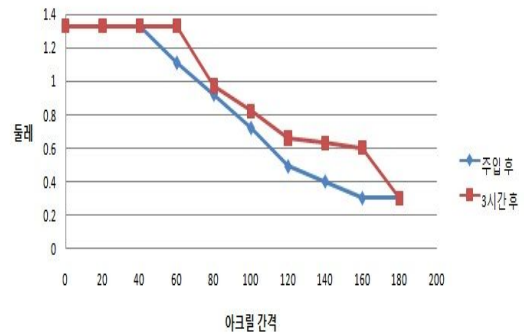


그림 3.23 속경형저점도 유속10 주입10의 주입양상

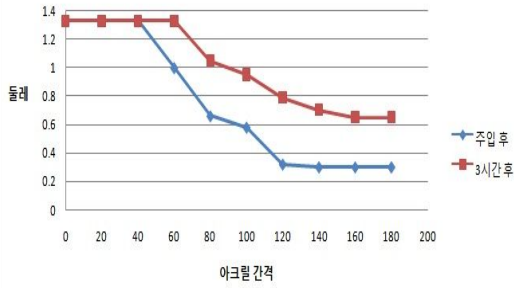


그림 3.24 속경형저점도 유속0 주입20의 주입양상

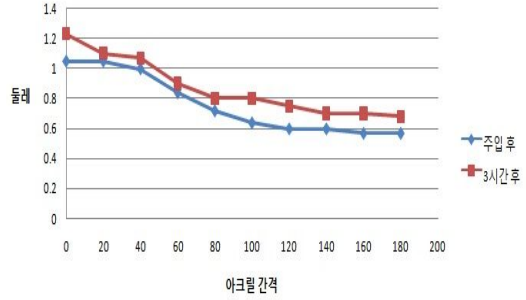


그림 3.25 속경형저점도 유속10 주입20의 주입양상

### (3) 속경형 고점도

속경형 고점도 그라우트재의 경우 그림 3.25 ~ 그림 3.28 모두 0 ~ 0.4까지 주입 직 후 가득 채워졌으며 차츰 흘러내렸고 3시간이 경과된 후 팽창에 의해 0.6 ~ 0.8까지 그라우트재가 가득 차 있었으며 흘러내린 부분 역시 큰 폭으로 팽창이 됨을 확인할 수 있었다.

이런 경향은 속경형 고점도는 점성이 강하고 경화속도 또한 빠른 탓에 그라우트재가 미처 흘러내리지 못하고 사석의 공극을 채우면서 빠르게 팽창 및 경화를 한 것으로 판단된다.

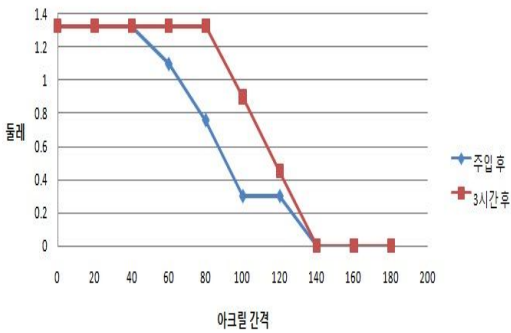


그림 3.26 속경형고점도 유속0 주입10의 주입양상

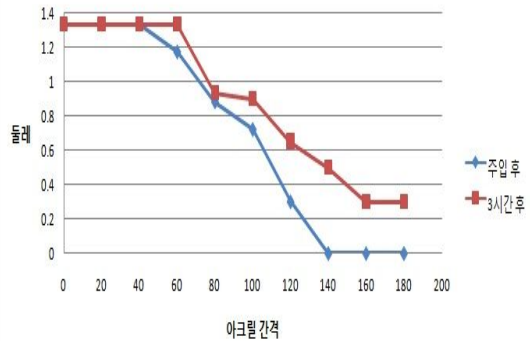


그림 3.27 속경형고점도 유속10 주입10의 주입양상

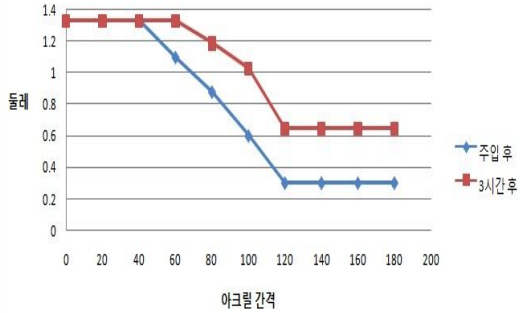


그림 3.28 속경형고점도 유속0 주입20의 주입양상

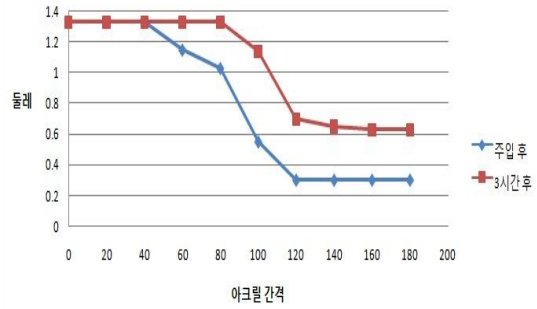


그림 3.29 속경형고점도 유속10 주입20의 주입양상

### 3.3.3 유속유무에 따른 둘레 측정결과

본 연구는 포화된 사석층에 유속이 흐르고 유속에 용출되지 않고 사석층의 공극을 채워 차수벽을 형성 시키는데 주 목적이 있다. 따라서 시험기구의 하부에 2개소 유속 장치를 설치하고 그라우트재를 주입시키는 과정에서 그라우트재가 물에 용출되는지를 확인하고 유속이 있을 때 그라우트재의 주입 및 흐름 양상을 살펴보고자 하였다.

#### 가. 일반형그라우트재

그림 3.30, 그림 3.31은 저점도이며 각각 주입속도 10 l/min에서 유속유무에 따른 비교결과, 주입속도 20 l/min에서 유속유무에 따른 비교결과이다.

유속 없이 포화된 사석층에서의 그라우팅과 유속이 존재하는 포화된 사석층을 구별하기 위해 유속 0 cm/sce와 10 cm/sec를 적용시켜 시험을 하였고 일반형저점도(주입속도 10 l/min)의 경우 유속이 10 cm/sec일 때 주입 후 주입구와 가까운 부분이 가득 차고 3시간이 경과 후 그라우트재가 흘러내려 경사가 완만 해졌다. 하지만 일반형저점도(주입속도 20 l/min)에서는 유속이 0 cm/sec 일 때 주입 후 주입구와 가까운 부분이 가득차고 3시간이 경과 후 그라우트재가 흘러내려 경사가 완만해졌다.

그림 3.32, 그림 3.33은 고점도이며 각각 주입속도 10 l/min에서 유속유무에 따른 비교결과, 주입속도 20 l/min에서 유속유무에 따른 비교결과이다.

일반형고점도의 경우 주입속도, 유속과 상관없이 유속0, 10 cm/sec, 주입 후, 3시간 후 4가지 경우의 경향이 거의 비슷한 양상을 보였다.

그림 3.30은 다소 유속에 영향을 미치는 보이는 결과가 도출되었지만 나머지 그림 3.31, 3.32, 3.33은 유속이 존재해도 그라우트재 주입 시 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단되고 그림 3.30의 경우 그라우트재의 배합과정에서 숙련도가 부족하여 정확한 배합이 되지 않은 것으로 판단된다.

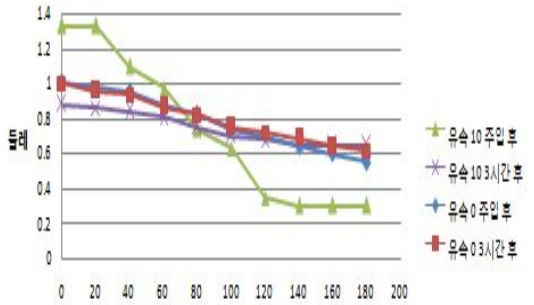


그림 3.30 일반형저점도-주입속도10  
흐름양상

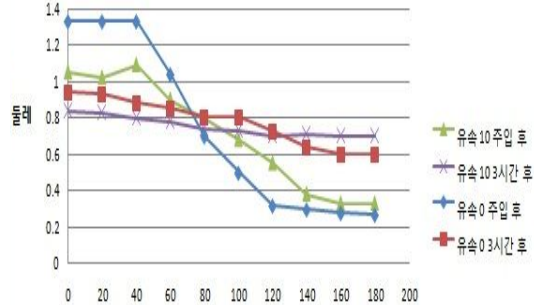


그림 3.31 일반형저점도-주입속도20  
흐름양상

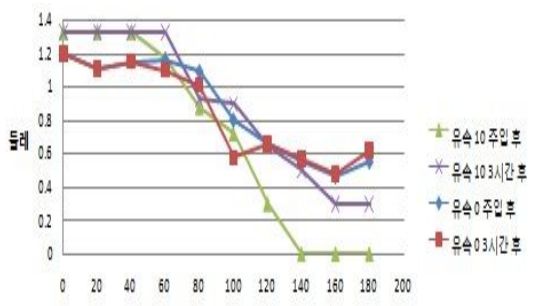


그림 3.32 일반형고점도-주입속도10  
흐름양상

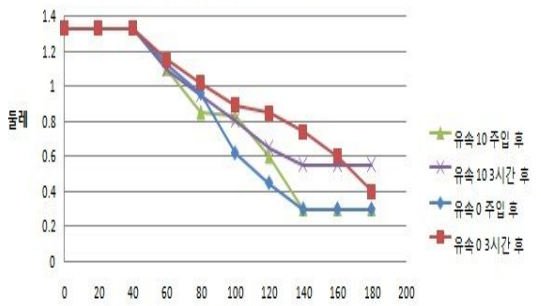


그림 3.33 일반형고점도-주입속도20  
흐름양상



## 나. 속경형그라우트재

속경형저점도의 경우 주입속도 10 l/min은 유속 10 cm/sec 적용 시 주입구 부분은 가득차고 점차 흘러내려 급하게 경사를 이루는 양상을 보였고, 유속이 없었을 때에는 주입 직 후 바로 흘러내려 완만한 경사를 이루는 양상을 보였다. 하지만 주입속도 20 l/min는 반대로 유속이 없었을 때 주입구 부분이 가득차고 점차 흘러내려 경사가 급한 양상을 보였고 유속이 10 cm/sec일 때 주입 후 바로 흘러내려 경사가 완만한 양상을 보였다.

속경형고점도의 경우 유속, 주입속도와 상관없이 거의 비슷한 유형의 그래프가 나타났으며 그라우트재가 팽창하여 주입량이 늘어난 것 외에 유속과 관련하여 그라우트재가 용출되거나 흐름이 변한 부분은 없다고 판단된다.

이런 경향 역시 속경형저점도와 유사하게 유속이 그라우트재의 흐름 및 차수벽 형성에 큰 영향을 미치지 못하며 경향이 조금씩 다르게 나타나는 것은 그라우트재의 배합, 주입시간이 일정하지 못해 조금씩 다르게 나온 것으로 판단된다.

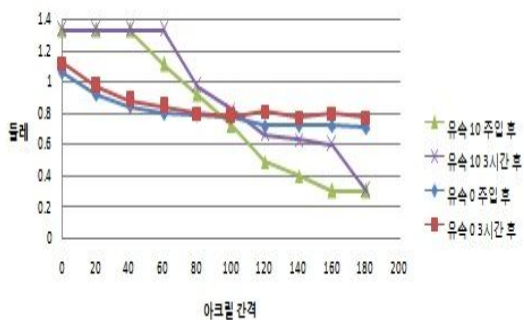


그림 3.34 속경형저점도-주입속도10  
흐름양상

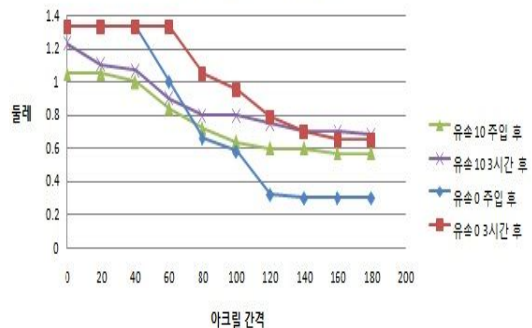


그림 3.35 속경형저점도-주입속도20  
흐름양상

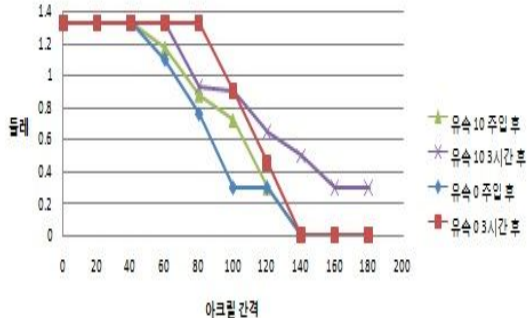


그림 3.36 속경형고점도-주입속도10  
흐름양상

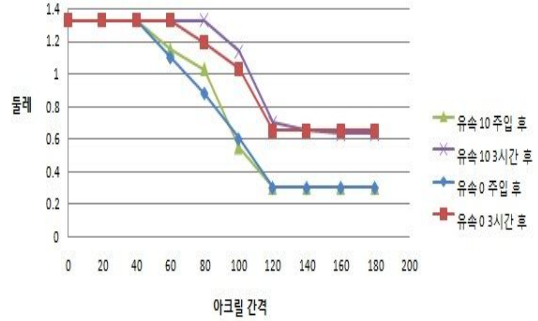


그림 3.37 속경형고점도-주입속도20  
흐름양상

### 3.3.4 기존 주입재와 개발 주입재 비교결과

#### 가. 기존 주입재와 일반형 개발재

기존 주입재의 경우 주입구 부분의 충전성은 높으나 주입길이에 따라 주입률이 감소함을 확인할 수 있다. 모르타르의 경우 주입구 부분은 가득차고 점점 흘러내려 급격한 하향 곡선이 그려졌고 3시간이 경과 후에도 거의 유사한 양상을 띄었고 이런 경향은 모르타르의 경우 시멘트와 모래의 재료 분리로 인해 주입구 부분은 모래가 입구 부분 즉 주입구 반대쪽에서는 시멘트가 침전되는 현상을 보인 것 때문이라고 판단된다. 시멘트와의 재료분리가 된 모래의 경우 유동성을 잃어 초반에 주입된 그대로 유지되고 모르타르의 경우 팽창률이 오히려 (-)값이 도출 되었는데 이런 결과는 주입된 재료가 주입 도중 배수밸브를 통해 빠져나간 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용된 일반형개발재의 경우 재료분리가 거의 일어나지 않고 유동성이 높아 주입길이 180cm까지 침투성이 높음을 확인할 수 있었다. 또한 일반형 개발재의 경우 미미하지만 재료의 팽창이 발생하여 사석층의 공극을 채우는 역할을 해준다고 판단된다.

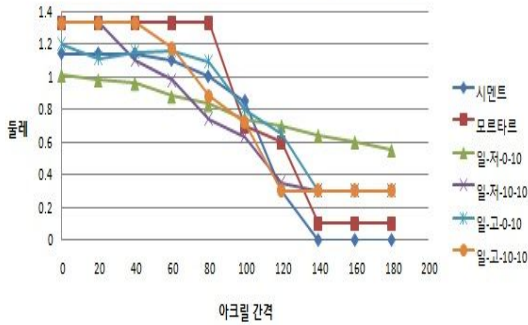


그림 3.38 기존주입재와 일반형개발재의 비교(주입10)

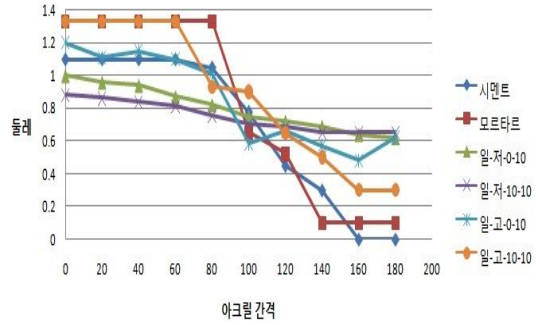


그림 3.39 기존주입재와 일반형개발재의 비교(3h)

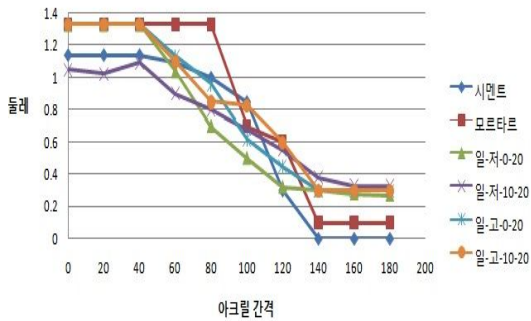


그림 3.40 기존주입재와 일반형개발재의 비교(주입20)

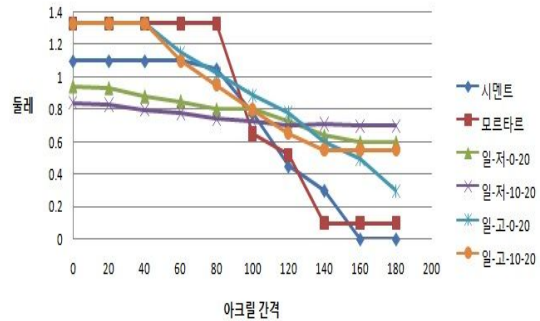


그림 3.41 기존주입재와 일반형개발재의 비교(3h)

### 나. 기존 주입재와 속경형 개발재

속경형개발재의 경우 기존 주입재와 유사하게 주입구 부분에 가득차고 후반부는 충전률이 약하지만 경화속도가 빨라 개발재가 흘러내리는 동안에 팽창 및 경화를 통해 사석사이 공극을 채우고 후반부에 충전률이 부족한 부분도 팽창되어 약 1/2 정도 충전이 되는 것을 확인할 수 있다.

속경형의 경우 팽창이 잘되었고 후반부 충전률 또한 높아 속경형 개발재가 단시간 내에 차수벽을 형성할 수 있으며 경제적으로도 가장 뛰어난 것으로 판단된다.

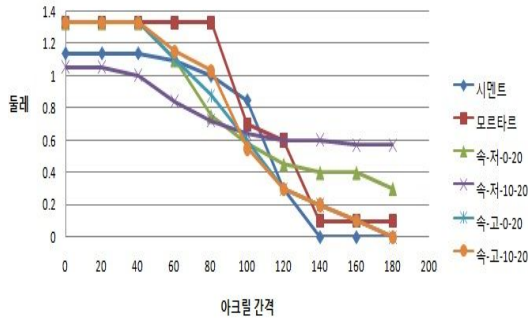


그림 3.42 기존주입재와 속경형개발재의 비교

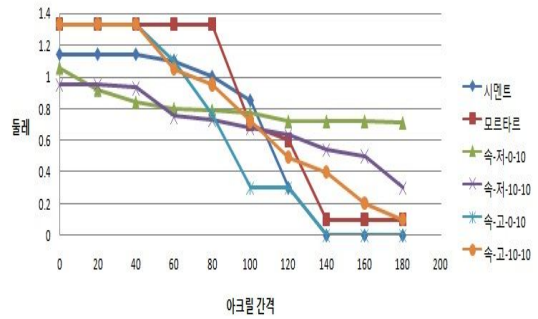


그림 3.43 기존주입재와 속경형개발재의 비교

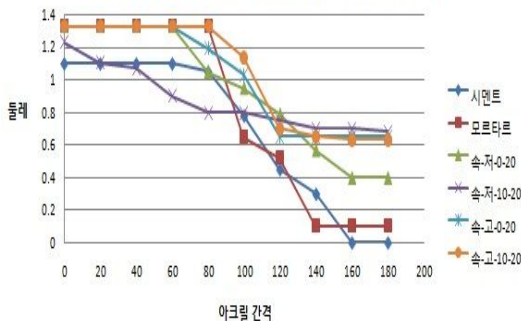


그림 3.44 기존주입재와 속경형개발재의 비교(3h)

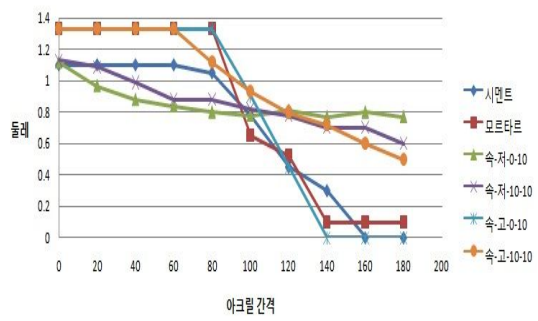


그림 3.45 기존주입재와 속경형개발재의 비교(3h)

### 3.3.5 그라우트재의 팽창률 분석

본 연구에서 들레 측정을 하는 목적은 흐름 양상을 지켜보고 궁극적으로 그라우트재의 팽창성에 대한 평가를 하기 위함이다. 동일한 조건으로 측정된 각 구간 별 들레와 길이 0.2m를 곱한 값을 그라우트재의 주입량으로 판단하고 주입 후와 주입 후 3시간 경과한 시점을 비교하여 그라우트재의 팽창성을 비교한 결과가 표 4.3이다.

표 3.5를 일반형, 속경형으로 구분하여 그래프로 작성하고 주입 후와 3시간 후의 주입량을 비교하여 나타낸 그래프가 그림 3.46, 그림 3.47이고 주입량을 퍼센트로 환산하여 팽창률로 환산한 것이 그림 3.48이다. 그림 3.46, 3.47을 확인하면 팽창성은 일반형 그라우트재 보다 속경형 그라우트재에서 더 크다는 것을 확인 할 수 있다.

그림 3.48에서 팽창률을 살펴보면 일반형에서는 고점도(유속10/주입속도20)일 때 19.94%로 가장 높게 평가 되었고, 속경형에서는 33.96%로 역시 고점도(유속10/주입속

도20)일 때 가장 높게 평가되었다. 다소 그래프가 경향이 다르지만 저점도보다 고점도 그라우트재의 팽창률이 높게 평가 되었다.

표 3.5 측정시간에 따른 그라우트재의 팽창률

개발재 (유속/주입속도)	측정 시간 (h)	주입 량	팽창 률 (%)	개발재 (유속/주입속도)	측정 시간 (h)	주입 량	팽창 률 (%)
모르타르 (0/20)	0	138.4	-1.91	시멘트페이스트 (0/20)	0	110.6	0.90
	3	135.8			3	111.6	
일반형저점도 (0/20)	0	121.4	11.19	일반형저점도 (0/10)	0	137.9	1.92
	3	136.7			3	140.6	
일반형저점도 (10/20)	0	121.9	8.96	일반형저점도 (10/10)	0	120.6	8.64
	3	133.9			3	132	
일반형고점도 (0/20)	0	134.4	14.94	일반형고점도 (0/10)	0	138.1	5.75
	3	158			3	146.5	
일반형고점도 (10/20)	0	138.8	11.14	일반형고점도 (10/10)	0	132.6	12.42
	3	156.2			3	151.4	
속경형저점도 (0/20)	0	132.8	18.53	속경형저점도 (0/10)	0	141.2	5.80
	3	163			3	149.9	
속경형저점도 (10/20)	0	131.8	12.89	속경형저점도 (10/10)	0	120.2	19.44
	3	151.3			3	149.2	
속경형고점도 (0/20)	0	116.8	33.71	속경형고점도 (0/10)	0	102.4	23.24
	3	176.2			3	133.4	
속경형고점도 (10/20)	0	119.8	33.96	속경형고점도 (10/10)	0	131.4	24.13
	3	181.4			3	173.2	

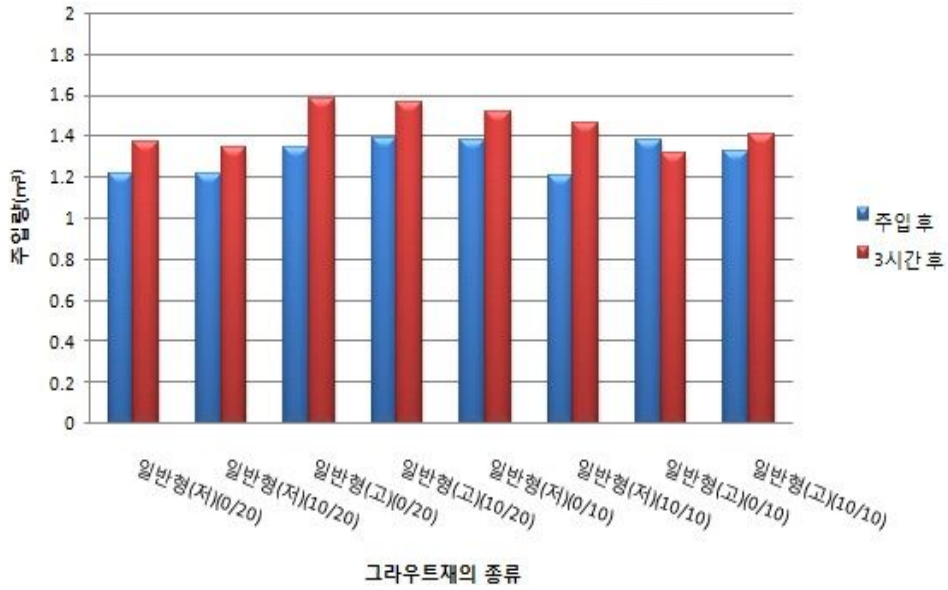


그림 3.46 일반형 그라우트재의 주입량

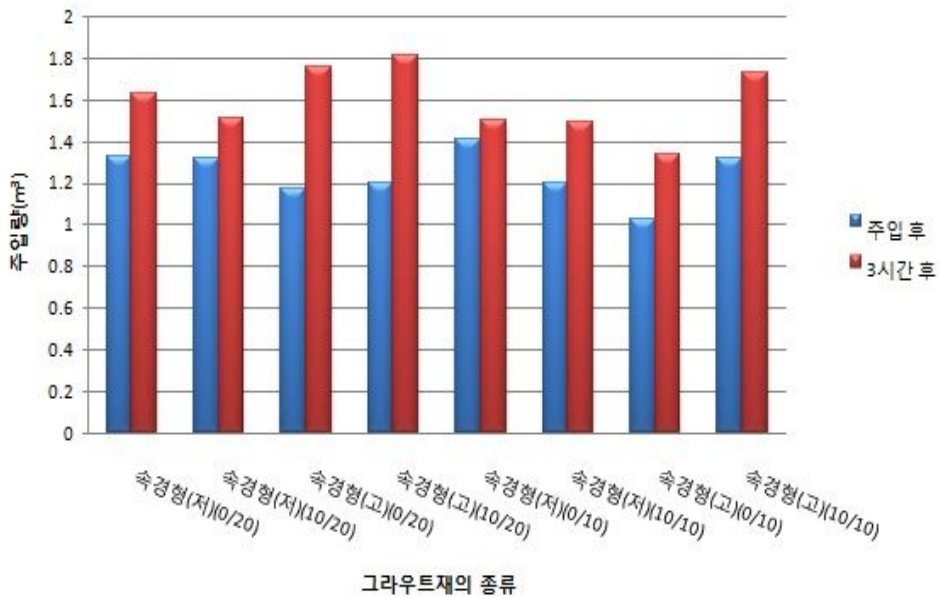


그림 3.47 속경형 그라우트재의 주입량

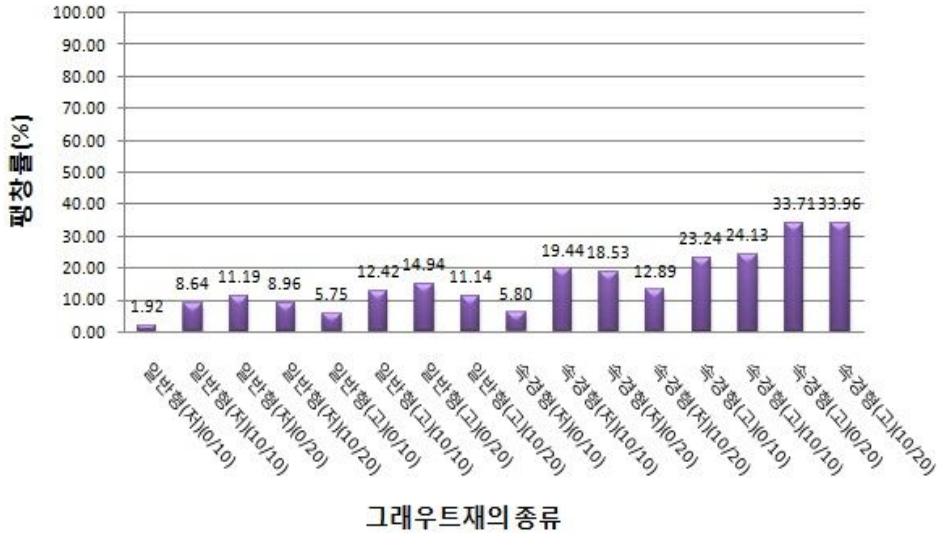


그림 3.48 그라우트재의 팽창률

### 3.4 그라우트재의 강도평가

본 실험은 4가지(일반형저점도, 일반형고점도, 속경형저점도, 속경형고점도)의 그라우트재를 일축압축강도 시험용 마이터박스에 성형하고 그라우트재의 팽창 특성 때문에 성형박스 위로 부풀어 오른 부분을 컷팅 하고 지름 5cm 높이 10cm으로 맞추어 약 7 일 간 양생을 시켰으며 이를 일축압축시험기를 사용하여 파괴하였다. 압축 속도는 0.05mm/min, 압축 강도는 1t/min 이다.



그림 3.48 일축압축시험기

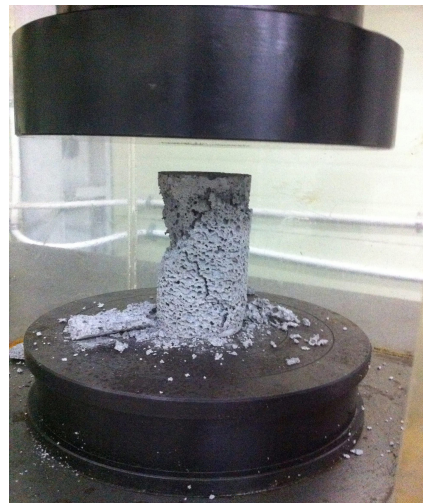
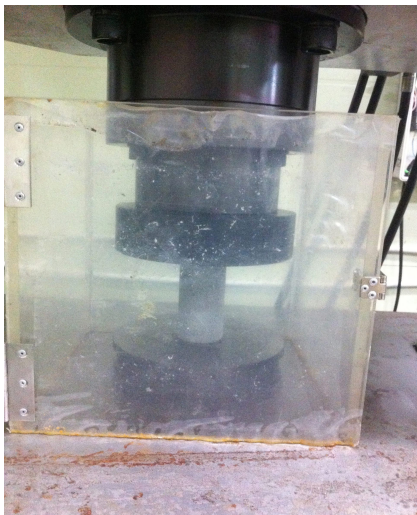


그림 3.49 일축압축강도 Test

### 3.4.1 일축압축강도 평가 결과

표 4.4는 일축압축강도 시험 결과를 나타낸 표이며 각 Case별로 2개의 시험을 하였으며 이를 평균을 내어 확인한 결과 강도가 가장 높게 나온 것은 속경형 저점도이고 일반형 고점도가 가장 강도가 낮게 측정되었다.

공시체를 성형하고 약 7일간 양생하여 제작된 공시체는 외관은 눈에 띄게 공극이 많아 마치 현무암과 같았고 강도 평가 시 공시체가 전체적인 파괴보다 상부 또는 하부



에서 국부적으로 파괴가 일어나는 것으로 보아 공시체에 생기는 공극이 파괴에 큰 영향을 미친다고 판단된다. 보통 포틀랜드 시멘트 7일 압축강도에 비해 현저히 낮아 강도 면에서는 취약하다고 판단된다.

**표 3.6 일축압축강도 시험 결과**

	강도(MPa)	평균	변형율(%)
일반형 저점도(1)	1.65	1.855	1.4
일반형 저점도(2)	2.06		1.28
일반형 고점도(1)	1.64	1.695	1.69
일반형 고점도(2)	1.75		2.83
속경형 저점도(1)	2.15	2.145	2.53
속경형 저점도(2)	2.14		2.87
속경형 고점도(1)	2.17	2.0	2.09
속경형 고점도(2)	1.82		1.64

**표 3.7 포틀랜드 시멘트의 압축강도(MPa)(건설재료학, 2008)**

	보통포틀랜드 시멘트	중용열포틀랜드 시멘트	조강포틀랜드 시멘트	저열포틀랜드 시멘트	내황산염포틀랜드 시멘트
1일	-	-	12.7 이상	-	-
3일	12.7 이상	10.8 이상	24.5 이상	-	8.8 이상
7일	19.6 이상	17.7 이상	27.5 이상	7.3 이상	15.7 이상
28일	28.4 이상	27.9 이상	30.4 이상	17.7 이상	20.6 이상

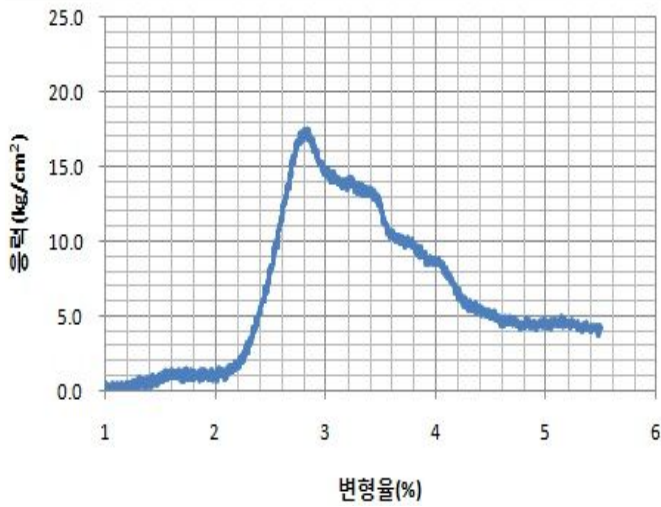
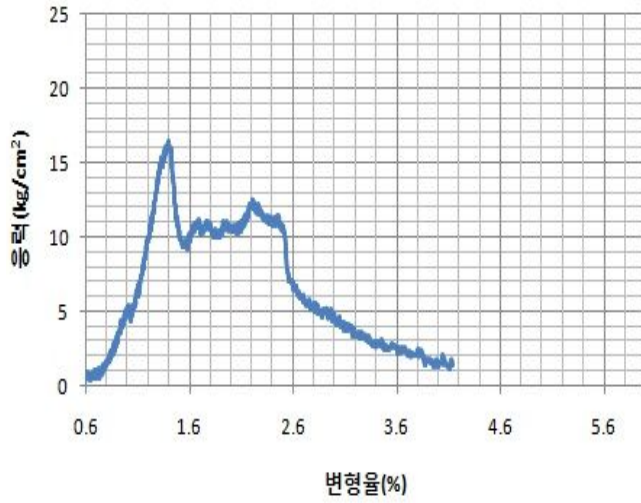
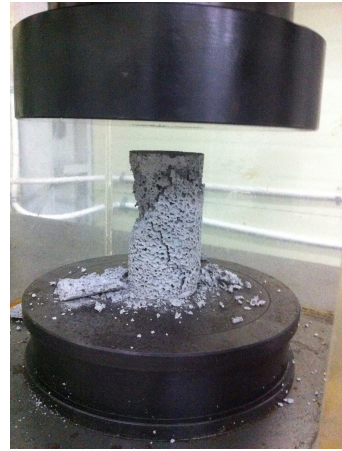
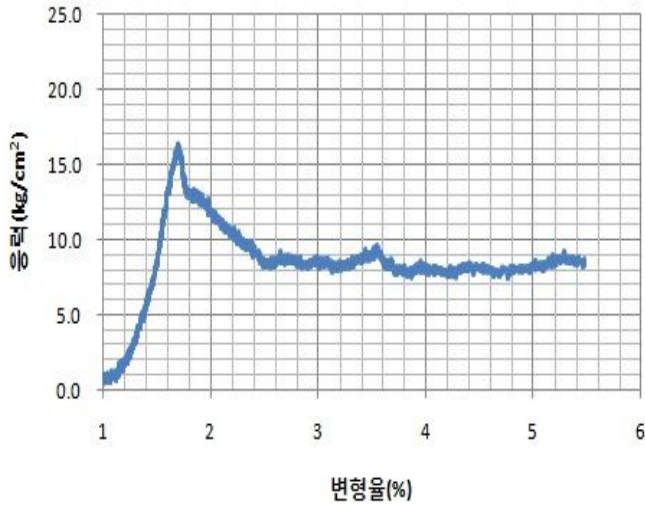
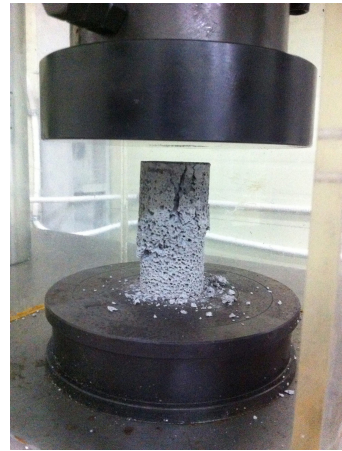
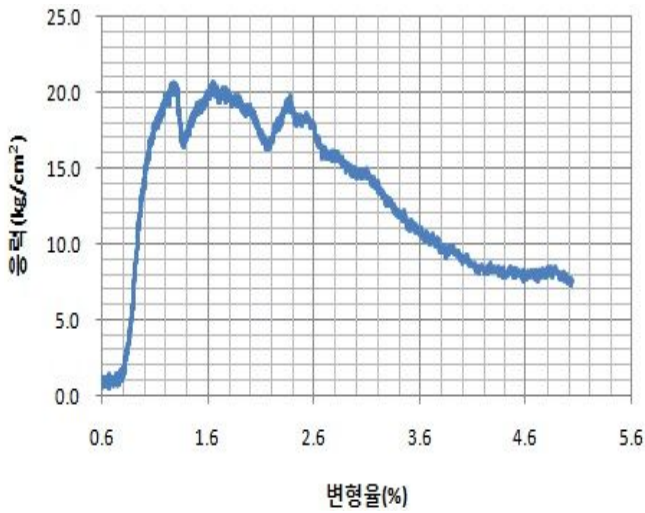


그림 3.51 일반형저점도 일축압축강도 측정 결과 및 파괴양상

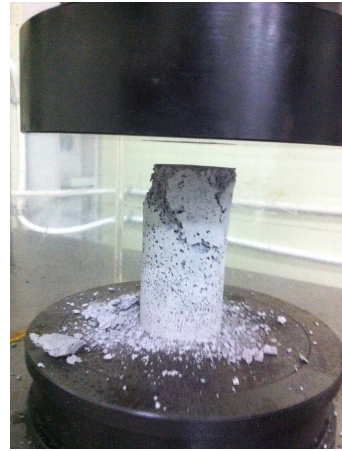
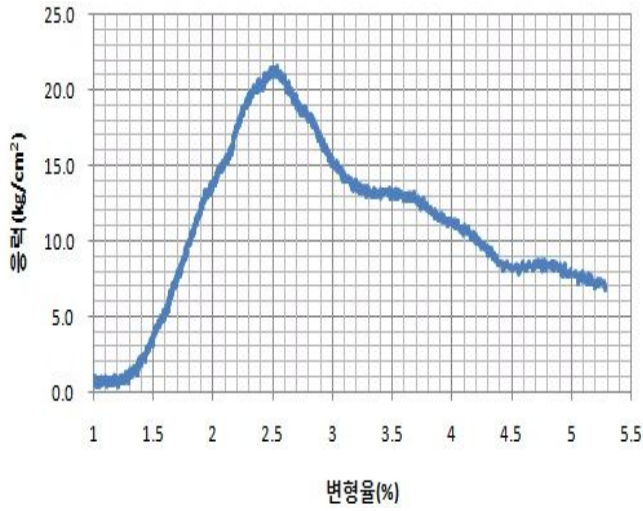


(a)

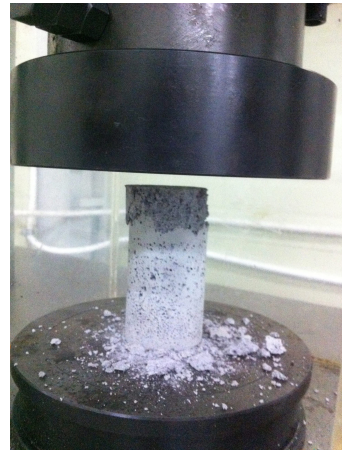
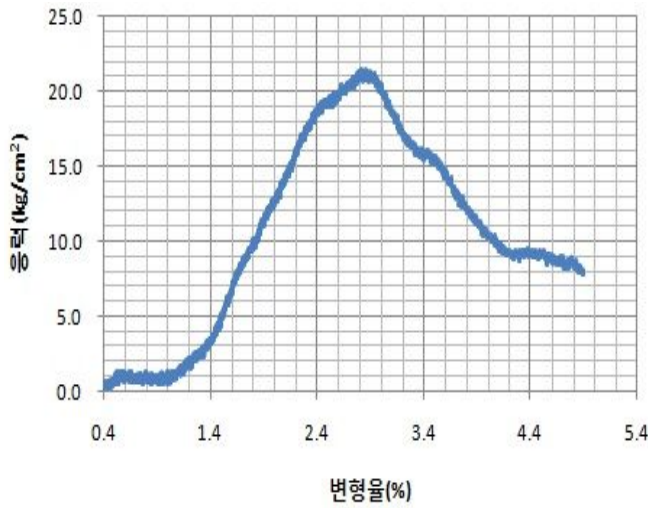


(b)

그림 3.52 일반형고점도 일축압축강도 측정 결과 및 파괴양상

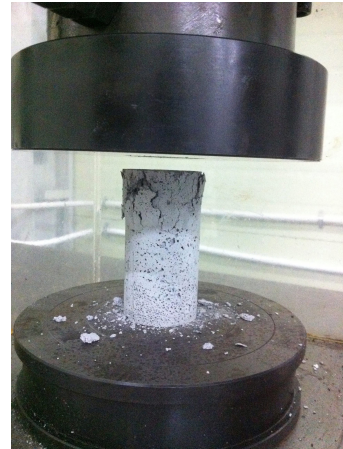
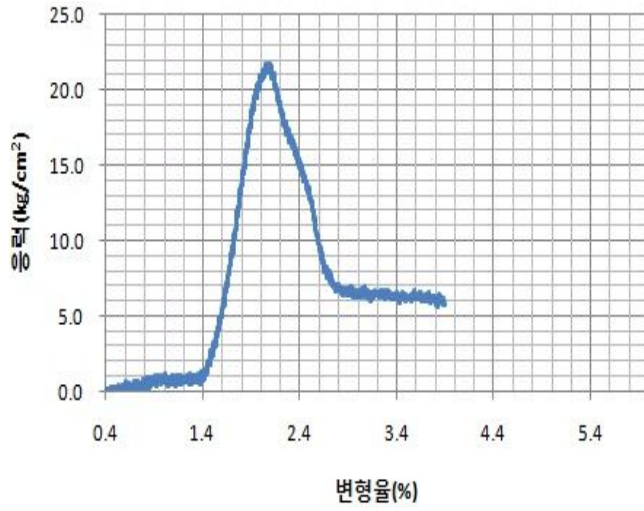


(a)

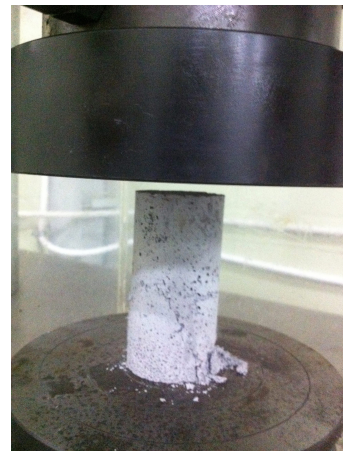
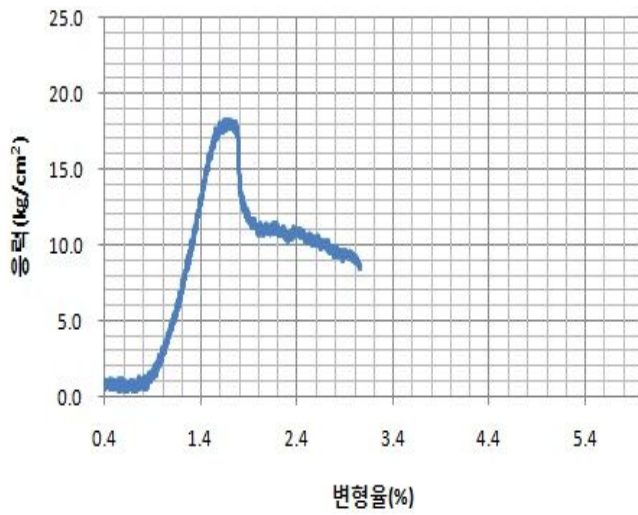


(b)

그림 3.53 속경형저점도 일축압축강도 측정 결과 및 파괴양상



(a)



(b)

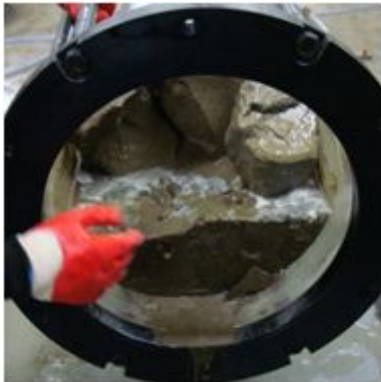
그림 3.54 속경형고점도 일축압축강도 측정 결과 및 파괴양상

## 3.5 수중불분리 평가

본 실험은 포화된 사석층에 그라우트재를 주입하여 사석사이에 그라우트재를 충전시키는데 목적이 있으며 이 그라우트재가 수중에 용탈되지 않고 그라우트재로써 역할을 할 수 있는지에 대한 실험이다. 일반적으로 잔골재의 비중은 2.5 ~ 2.65이며, 시멘트의 비중은 3.1 ~ 3.15로써 그라우트재가 용탈되어 선단부에서 끝단부에 시멘트가 쌓인다면 선단부와 끝단부의 비중 값의 차이가 발생되어 재료 분리가 일어난 것이라고 판단하였다.

### 3.5.1 수중불분리 평가 결과

비중시험을 통해 분석한 결과 일반적으로 선단부가 끝단부보다 더 크게 평가되었고, 이는 시멘트의 용출이 발생하였으나, 그 차이는 미미함을 알 수 있다. 모르타르의 경우 모래와 시멘트의 재료분리로 인해 끝단부의 비중이 크게 평가 된 것으로 판단된다. 그림 3.55는 시멘트, 모르타르의 재료분리가 일어난 모습을 나타낸 것이다.



(a) 입구의 침전된 시멘트



(b) 주입구 재료분리된 모래

그림 3.55 재료 분리현상

표 3.8 비중 측정량

재료 \ 비중	선단부	끝단부	편차
모르타르(유속0 주입20)	2.161	3.104	0.943
일반형 저점도(유속0 주입20)	2.541	2.552	0.011
일반형 저점도(유속10 주입20)	2.501	2.555	0.054
일반형 고점도(유속0 주입20)	2.574	2.660	0.086
일반형 고점도(유속10 주입20)	2.271	2.377	0.106
속경형 저점도(유속0 주입20)	2.645	2.842	0.197
속경형 저점도(유속10 주입20)	2.552	2.731	0.179
속경형 고점도(유속0 주입20)	2.311	2.328	0.017
속경형 고점도(유속10 주입20)	2.337	2.428	0.091

### 3.6 그라우트재의 통수능 평가

본 실험은 투수실험평가로 압력 없이 자유 낙하고를 주었고 통수능 평가가 어려워 다음과 같은 실험전경으로 평가를 하였다. 모형 아크릴의 크기는 지름 5.5cm × 높이 12cm이고, 개발재료의 침투시간 간격은 1, 4, 24, 48h로 측정 후 48h 후 물이 통과한 양을 정수위 투수계수로 환산하여 계산을 하였다.



통수능 시험 직후



1시간 후



4시간 후



24시간 후



48시간 후

그림 3.56 통수능시험 전경

### 3.6.1 통수능 평가 결과

통수능 실험에 사용된 모형토조는 지름 5cm, 높이 12cm 이고 하부에 모래가 빠져나가지 않도록 철망을 대고 모래는 약 4.3cm 개발재는 약 3.9cm 넣고 일주일동안 실온으로 양생 시켜주었다. 그라우트재 상부 약 3.8cm의 공간에 물을 채우고 물이 증발하지 않도록 밀폐를 시키고 물이 얼마나 빠져 나가는지 1시간, 4시간, 24시간, 48시간별로 측정하였으며 24시간 까지는 수위의 변동이 거의 없었으며 48시간을 측정했을 때 1.2cm의 물이 통과하였다. 정수위 투수계수로 환산 시 표 3.9와 같이  $7.13 \times 10^{-6}$  만큼



투수계수는 아주 작으며 이 또한 그라우트재를 통과한 물의 양이 아니라 모형토조 벽면을 타고 흘렀을 것이라 판단된다.

따라서, 환산된 투수계수의 경우 미미하게 투수가 되지만 벽면을 타고 흘러내린 물의 양을 생각한다면 그라우트재를 통과하여 흘러내린 물이 거의 없다 즉, 차수가 된다고 판단된다.

**표 3.9 투수능 평가결과**

투수능 실험 결과	48시간 후 통과량	정수위 투수계수
일반형 저점도	28.50	$7.13 \times 10^{-6}$
일반형 고점도	23.75	$6.54 \times 10^{-6}$
속경형 저점도	23.75	$6.54 \times 10^{-6}$
속경형 고점도	19.00	$5.28 \times 10^{-6}$

## 제 4 장 결 론

본 연구는 사석층에 기존의 계면 활성제가 가지는 단점인 수중 장기 용출 특성을 보완할 수 있는 그라우트제 및 수중 씻김 저항성이 우수한 그라우트제의 개발을 통해 실내모형시험을 이용하여 유속이 흐를 때에 사석층에서의 그라우팅에 의한 차수효과를 규명하고자 직경 0.4m, 길이 2m의 특수 제작된 그라우트 시험기를 이용하여 유속조건과 주입조건을 달리하여 총 4가지의 개발된 그라우트제의 차수, 강도 등을 평가하고자 하였으며 이를 요약하면 다음과 같다.

1. 시간에 따른 그라우트제의 흐름, 팽창 양상을 살펴본 결과, 일반형저점도 그라우트제는 유동성이 크며, 경화속도 또한 느려 주입범위가 넓은 지역에 적합하며 일반형 고점도 그라우트제는 유동성은 작으나 팽창성이 뛰어나 사석층 같이 공극이 크고 유속이 없는 지반에 적합하다. 또한, 속경형 그라우트제의 경우 일반형과 유사한 결과를 나타내었으나 경화속도가 빨라 포화된 사석층에 더 적합한 것으로 분석되었다.
2. 유속(0cm/sec, 10cm/sec)에 따른 그라우트제의 수중 씻김 저항성에 대해 평가한 결과, 일반형저점도 유속 10cm/sec 주입속도 10L/min의 경우에는 다소 유속의 영향을 받아 그라우트제가 흘러내렸지만 다른 시험에서 유속의 영향을 거의 받지 않는 것으로 분석되었다.
3. 기존 주입제와 개발 주입제의 비교 결과, 기존주입제의 경우 포화된 사석층에 주입할 때에 재료분리가 일어나 그라우트제로써 역할을 수행하기 힘들지만, 개발 주입제는 재료분리가 일어나지 않고 완결-일반형, 급결-속경형에 따라 사용 가능하며 공극이 작은 곳-저점도, 공극이 큰 곳-고점도를 사용하여 용도에 맞게 사용이 가능 할 것으로 사료된다.
4. 팽창률은 33.72%, 33.96%로 속경형 고점도가 가장 크게 발생하였으며 일반형 저점도에서는 거의 팽창이 일어나지 않았다. 저점도에 비해 고점도의 팽창성이 더 높은 것으로 판단되며, 고점도가 경제적인 것으로 사료된다.

5. 비중실험을 통해 개발재의 수중불분리 평가한 결과, 기존 주입재인 모르타르의 경우 선단부는 2.161, 끝단부는 3.104로 재료분리가 일어났으나, 본 연구에 사용된 개발재는 그 편차가 미미하여 재료분리가 일어나지 않았다.
  
6. 정수위 투수실험평가로 압력 없이 자유낙하고를 주었고 평가 결과 일반형 저점도의 경우  $7.13 \times 10^{-6}$  cm/sec로 가장 크나 개발재로서의 차수효과는 양호한 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 김생빈, 임정호, 오재화, 이상호(2008), “건설재료학”, pp.81
2. 김진춘(1999), “지반개량용 초미립자 시멘트의 주입특성에 관한 연구”, 한양대학교 박사논문.
3. 김혜양(2011), “지반보강용 실리카졸-시멘트 그라우팅제의 특성에 관한 연구”, 한양대학교 박사논문
4. 농업기반공사, 2002, “화옹방조제 끝막이 보고서”
5. 맹승섭(2009), “제체 그라우팅을 위한 시멘트 그라우트제의 입도 한계 연구”, 서울시립대학교대학원 석사논문.
6. 부성안, 엄태선, 장의웅, 박창근(2008), “방조제 그라우팅 보강기술 개발”, 한국농촌공사 자체자금연구보고서, pp.45-65
7. 유현구, 부성안, 한상재, 김수삼(2008), “침투 그라우팅 기법의 최적 배합 설계에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 정기 학술대회
8. 양형철, 김건호, 김보석, 김승희, 김영섭, 김창근, 김호열 외 7명 공저(2012), “그라우팅환경공학”, pp.171-186
9. 이행우, “방조제 바닥사석층의 규모 및 통수성에 따른 제체 침투특성 연구”, 서울대학교 대학원 농공학과 농업토목전공 박사학위논문
10. 일본 콘크리트공학협회(1983), “콘크리트 용어사전”, p. 37
11. 일본 태평양시멘트(2001), “콘크리트의 기초지식”, p. 17
12. 쌍용양회(2008), “방조제 그라우팅 보강기술 개발”, p. 14-17
12. 장의웅, 정형재, 부성안, 송성호(2001), “댐 그라우팅 설계 및 시공 실무지침서, 농업기반공사 자체자금연구보고서
13. 천병식(1998), “최신지반주입이론과실제”, 원기술 pp.95~p101, pp.313~334.
14. 최홍식(2004b), “Non-Darcy 흐름특성을 고려한 최종체질 수리특성분석“, 한국수자원학회논문집, 제37권, 제 8호, pp.613-622
15. Iler Ralph K(1978), “The Chemistry of Silica”, John Wiley & Sons, Inc., pp.172~311.
16. Karol, R. H.(1960), “oils & Soil Engineering, Chap. 17” Prentice Hall Eng. Mechanics Series, Englewood Cliffs, N. Y..

17. Li, B., Garga, V. K., and Davies, M. H., 1998, "Relationships for Non-Darcy Flow in Rockfill", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.124, No.2, pp.206-212
18. Laura G. Girard, Paul E., Clopper(2006), "Integration European Partially Grouted Riprap for Stream Stability and Bridge Scour Protection",
19. Nonveiller, E.(1989), "Grouting Theory and Practice"
20. Stephenson, D., 1979, *Rockfill in Hydraulic Engineering*, Elsevier Science Publishers BV(North-Holland), Amsterdam, The Netherlands, pp. 19-24
21. Talor, D. W., 1948, "Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley and Sons Inc. New York
22. Vail James G.(1952), "Soluble Silicates ; Their Properties and Uses", Vol.2, Reinhold Publishing, New York.
23. YANG Ping, PENG Zhen-bin, TANG Yi-qun, PENG Wen-xiang, HE Zhong-ming(2008), "Penetration grouting reinforcement of sandy gravel", *J. Cent South Univ. Technol*
24. 草野一人(1984),"薬液注入工法ハンドブック"吉井書店,p.6,pp.191~193.
25. 島田俊介,兼松陽(1977),"最新の地盤住入工法",理工圖書..
26. 柴崎光泓, 下田一雄, 野上明男(1982), "薬液注入工法の設と施工", 山海堂, pp. 30~31, 233~246

## 감사의 글

석사로는 1년 6개월 이지만 나에게 토질연구실은 4학년 연계1학기 과정부터 2년 6개월의 전부였고 살아온 날 중에 가장 보람차고 뜻 깊은 시간을 보내온 것 같다는 생각이 들고 이렇게 논문을 마치기까지 저에게 힘을 주시고 격려, 충고를 아낌없이 해주신 모든 분들에게 감사의 마음을 전합니다.

사회생활을 하다 다시 공부를 시작해 토질실험이란 과목에서 처음 뵈 김대현교수님의 모습에 여태 살아오며 처음으로 저의 멘토가 생겼다고 생각 할 만큼 감동이었습니다. 실험을 마치면 학생들과의 대화를 통해 한 사람 한사람 이름을 불러 주시고 기억해 주시는 교수님은 그 모습 그대로 저희가 실험과 연구를 하는 동안 아무리 바빠도 학생들과의 만남은 절대로 소홀히 하지 않으셨습니다. 석사생활이 끝나는 지금 이 순간까지도 저희 걱정해주시고 저의 버팀목이 되어주신 교수님 정말 감사드립니다.

호탕한 성격에 복도에서 뵈면 항상 밝게 웃어주시는 박길현교수님, 항상 잘 웃으시고 토목과를 많이 생각하시는 김운중교수님, 모르는걸 들고 찾아가면 바빠도 성심껏 알려주시는 박정웅교수님, 말은 별로 없으셔도 항상 학생들을 생각해주는 김성홍교수님과 이원희교수님, 제 마지막 학기에 부임하셔서 함께 재료실험을 진행하면서 많은 이야기를 나누고 많은 조언을 해주시면 박상준교수님 모두에게 감사드립니다.

연구를 하면서 몰라서 답답하고 힘이들 때 꼼꼼하고 자기일처럼 알려주신 김선학교수님, 맛있는 밥과 함께 좋은 말씀 잘해주시는 박상범교수님, 우스게 소리를 많이 하시지만 재밌게 알려주신 양승현교수님, 거칠지만 항상 직언을 해주시는 김영균교수님께 감사의 말씀 전합니다.

조선대학교를 편입해 학사2년 석사1년 6개월이란 긴 시간동안 뒷바라지 해주시고 항상 공부핑계, 연구핑계로 한번도 제대로 챙겨드리지 못했지만 이 아들 생각뿐인 우리 아버지, 어머니 힘들어도 힘내라고 북돋아준 우리 형에게 정말 죄송하고 정말 감사해요 이제는 더 잘하겠습니다.

아낌없는 지원을 해주시고 토질연구실의 견인차 역할을 해주시며 만형 김현태박사님, 박사 논문 쓰시면서 정말 걱정, 근심 많으셨지만 연구실에 많은 도움과 힘이 되어 주신 허홍균박사님, 바쁜 와중에도 밝게 전화 받고 즐겁게 이야기 해주시는 임재춘 박사님, 좋은 말씀 많이 해주시는 서준형선배님, 나의 아버지 같은 김문채부사장님 감사합니다.

2년 6개월이란 세월 속에 토질연구실은 정말 저에게 많은 사람을 남겨준 것 같습니다. 항상 짜증아닌 짜증을 내지만 후배를 생각하는 마음만큼은 저에게 그 어떤 선, 후배보다 더 소중한 호철이형, 비록 한 학기 밖에 같이 지내지 못했지만 일하면서도 전화로 문자로 격려를 아끼지 않았던 광기형, 토질연구실 내 버팀목이 되고 곳곳히 우리 모두를 이끌어준 박경호예비박사님, 학교에서 동거동락 하듯 함께 지내주고 모르는 걸 물어보면 적극적으로 알려준 성우형, 지난 1년 6개월 가장 많이 보고 오랜시간 같이 지내 정말 친 동생같은 나의 석사동기 상주, 힘들게 일하면서도 연구실을 찾아와 힘을 실어준 일훈이, 대훈이 항상 웃으며 나에게 힘이 되어준 태광이, 홍욱이 그 지옥같던 그라우팅 실험을 도와주고 이제 우리 식구가 된 성삼이, 제웅이, 민우, 민석이, 태훈이에게도 정말 너무 감사합니다.

학부생때부터 여러모로 많이 도와주던 학과실 민영이, 뭐든 일처리 하나 빠르고 정확한 정환이, 같은 석사생활하면서 많이 도와주고 챙겨주던 병철이, 인호, 경면이, 승민이 대운이, 지승이도 고맙고 어느덧 1년이나 지나 이제 학교생활에 적응했지만 티격태격하면서 잘 지내는 나리누나, 성윤이도 항상 도와줘서 감사합니다.

마지막으로 1년이라는 세월을 지나 항상 나만 좋아해주고 석사생활부터 만나 연구에 논문에 바쁘다는 핑계뿐이지만 더 많이 날 사랑해주고 지켜준 진아에게 고맙다는 말을 전합니다. 사회생활로 나아가 어떤 일을 겪을지 모르지만 1년 반 석사생활에서 배운 것을 토대로 힘들어도 이겨내고 더욱 힘차게 살아가겠습니다.

2013년 8월  
鄭 信 紘