

## 모형시험을 통한 지반보강 그라우팅의 적정주입압력 연구

### Investigation of the Optimum Injection Pressure in Pressure Grouting by Laboratory Model Tests

박 종 호\*<sup>1</sup> Park, Jong-Ho

박 용 원\*<sup>2</sup> Park, Yong-Won

#### Abstract

The ground reinforcement effect of pressure grouting depends on grout penetration into ground. It is not, however, easy to predict the grout penetration in the design process because of the heterogeneity of ground conditions. This study investigates the proper grouting pressure and grouting method through laboratory model tests for pressure grouting using loose to medium dense crushed rock and sandy ground using specially designed and fabricated device. The optimum injection pressure, grout quantity and injection time are investigated through performing pressure grouting under changing conditions of injection in this test. From the test results, it was found that optimum injection pressure covers the range of 3 to 4kg/cm<sup>2</sup>.

#### 요 지

지반보강 그라우팅은 대상지반의 공학적 특성 및 사용 목적에 따라 주입재 종류, 주입압력, 주입량 등을 적절히 선택해야 효율적이고 경제성 있는 시공이 될 수 있다. 특히, 압력 그라우팅 공법을 전고한 암반층이 아닌 일반 토사층에 적용시 압력이 높은 경우 수압파쇄에 의한 주입재 이탈 등의 문제가 발생하기 쉬우므로 현장조건에 알맞는 주입압력을 미리 설정하는 것이 필요하다. 이 연구는 느슨 내지 중밀 정도의 쇄석과 모래를 이용한 실험실 모형시험을 통하여 적정 주입압과 주입방법을 밝히기 위해 수행되었다. 최적 주입압, 주입량 그리고 주입시간을 조사하기 위해 실험과정에서 주입조건을 변화시켰다. 시험결과로부터 쇄석 및 모래지반에서 압력그라우팅의 최적 주입압은 3~4kg/cm<sup>2</sup>임을 알 수 있었다.

**Keywords :** Ground reinforcement, Optimum injection pressure, Pressure grouting

#### 1. 서 론

자연지반을 굴착하여 터널이나 사면을 조성하는 경우 절취되는 대상지역이 넓거나 규모가 큰 터널인 경우에는 불연속면의 연장이 길어지고 취약부분의 노출도 상대적으로 많아지면서 주변지반의 안정성이 감소하게 되어 지반 보강에 의한 안정성 확보의 필요성이 커지

게 된다. 현재 주로 사용되는 사면보강공법으로는 쏘 일 네일링 및 록볼트공법과 앵커공법 등이 있고, 터널의 천단부 붕락을 방지할 목적으로 포폴링과 파이프로프 및 프리그라우팅 공법 등을 이용하고 있으며, 이 공법들은 원지반을 굴착한 후 이형철근이나 강관 등의 보강재를 지반 내에 천공·삼입하고 흠 내에 그라우트를 주입하여 대상구간의 전단저항력을 증가시킬 목적

\*1 정회원, 명지대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph. D Candidate, Dept., of Civil Engrg., Myongji Univ., jongho2000@hanmail.net)

\*2 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept., of Civil & Environmental Engrg., Myongji Univ)

으로 토사지반, 풍화암 또는 파쇄 연암구간에 자주 적용되고 있다. 그러나, 이러한 공법은 균열이 심한 암반 지역이나 이미 붕괴되어 이완된 토사지반에 적용할 경우 그라우팅 품질이 저하되거나 추가적인 주입작업이 수반되어야 하므로 경제적 손실이 발생하게 된다. 또한 지하수의 영향을 받는 구간에서도 천공홀을 중력에 의한 채움 방식으로만 시공하므로 주입률이 저하되어 설계강도에 도달하지 못하고 장기적으로 불안정을 초래하는 경우도 있다. 다행히 최근에는 소구경 현장타설 말뚝이나 다단 그라우팅과 같이 가압 그라우팅 방식으로 시공되는 지반보강공법의 적용이 증가하고는 있으나 아직까지 적정주입압력 및 시공방법, 그리고 보강효과 등이 명확히 규명되지 않아 주로 경험에 의존하는 설계와 시공이 이루어지고 있는 실정이다. 한편, 가압 그라우팅 방식에 의한 지반보강이 경제적이고 합리적인 공법이 되기 위해서는 더 많은 실험적 연구가 필요하다. 따라서 이 연구에서는 근래 터널 및 대절토 사면 굴착 공사시 안정성 확보를 위해 자주 적용되고 있는 지반 보강공법들의 주요공정에 속하는 압력 그라우팅을 이미 붕괴되어 이완된 사질토 지반이나 풍화암 파쇄대 지반보강에 적용할 경우 보강효과가 극대화되는 적정 주입압을 결정하기 위하여 쇄석과 모래를 이용한 모형지반을 각각 조성하고 상재압과 주입압력을 변화시키면서 압력 그라우팅 시험을 실시하고 분석하였다.

## 2. 그라우팅 관리법

압력 그라우팅공법은 지반의 투수성을 감소시키거나 강도를 증진시킬 목적으로 주입재를 적당한 압력으로 지층에 침투시키는 공법으로서 지반조건이나 주입압력에 따라 그 개량효과가 크게 달라질 수 있다. 특히, 대상 지반 조건에 부합되는 적정한 주입압력 결정을 통하여 주입범위, 주입량, 주입시간을 결정하여 경제적인 시공을 유도하고 주입 목적을 만족하는 확실한 지반개량 효과를 얻을 수 있도록 해야하나, 압력 그라우팅 방식을 견고한 암반층이 아닌 일반 토사층에 적용하는 경우에는 높은 주입압으로 인해 수압파쇄에 의한 주입재 이탈 등의 문제가 수반될 수 있으므로 현장의 지반조건에 맞는 주입압과 주입량 조절이 필요하다. 한편, 주입 시공시 주입압과 주입량을 조절하는 방법에는 정압 주입방법과 정량 주입방법이 있으며 최근에는 이를 종합관리

하는 시스템으로서 자기기록계를 이용하는 방법이 많이 사용되고 있다.

### 2.1 정량적 관리법

#### (1) 정압 주입법

정압 주입은 주입시 압력을 일정하게 유지하도록 단위시간당 주입량을 조절하면서 주입하는 방법이다. 주입 압력은, 원칙적으로 주변에 나쁜 영향을 미치지 않는 범위에서 높은 압력을 주는 것이 효과적이다. 따라서, 정압 주입의 경우 제한 압력을 어떻게 결정하느냐에 따라 성패가 좌우될 수 있으며, 지나치게 낮으면 주입량이 적어 만족한 결과를 얻을 수 없게 된다. 일반적으로 주입압은 주입 펌프의 분출시 압력이고, 실제 주입관을 떠나 지반에서의 주입재가 받는 압력은 상당한 손실이 있는 것으로 예상되지만 그 정확한 압력의 측정은 곤란하다. 한편, 지반 중에 주입재가 포화상태가 된 경우 파스칼의 원리대로 펌프의 분출 압력이 순간적으로 지반에 작용해 주변에 나쁜 영향을 미치는 경우가 종종 있으므로 주의해야 한다.

#### (2) 정량 주입법

정량 주입 방법은 주입시 단위 시간당 주입량을 일정하게 정하고 주입압력의 변화를 감시해 압력이 초기의 주입압력에서 서서히 상승하여 특정압력 이상의 압력을 받을 때, 즉 주변에 나쁜 영향을 끼치게 되기 직전까지 주입을 계속하는 주입방식이다. 단위 시간당 주입량은 시험시공에 의해 결정하게 되는데 시공능력, 경제성에 비추어 일반적 지층에 대해서는 15~30 l/min 정도로 하는 것이 적당하다. 정량 주입방식에서 단위시간당 주입량을 과다하게 설정하면 초기에 압력이 크게 상승하며 주변에 나쁜 영향을 주는 경우가 있으므로 주의가 필요하다.

#### (3) 자기기록계 이용법

자기기록계를 이용한 주입방법은 시간(t)과 주입압력(p) 그리고 주입량(q)을 상호 조정하면서 지반조건에 부합되도록 시공을 관리하는 방법으로서, 효과적으로 높은 최종 주입압을 달성하기 위해 주입압의 절대치보다는 시간적 변화를 고려함으로써 시공 관리상 유력한 판단 자료가 된다. 자기기록 압력 유량계는 주입시 지반내의 주입재의 거동을 탐지하기 위한 유용한 방법

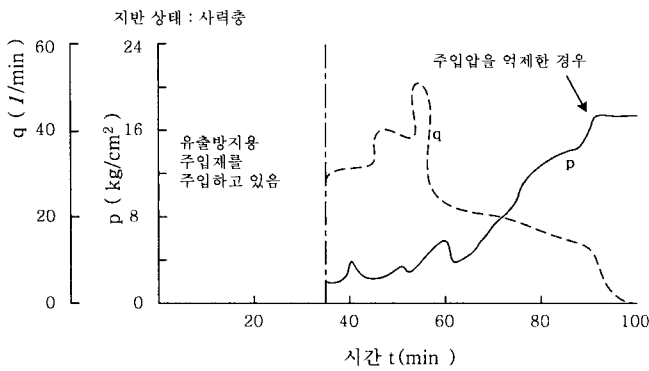


그림 1. 시멘트밀크 주입곡선(島田俊介, 1982)

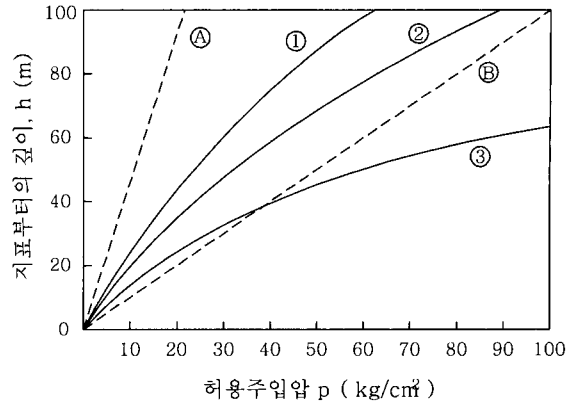


그림 2. 지표부터의 깊이와 허용 주입압(島田俊介 등, 1982)

으로서 주입압력과 주입량이 시간 경과에 따라 기록지에 연속적으로 기록된다. 이 기록지에 나타난 그래프는 시공시에는 주입관리용으로 사용되고, 주입이 완료된 후에는 주입량을 산정하는 자료가 되며 그림 1은 시멘트밀크 주입시 t-p-q 곡선을 이용한 관리의 예이다.

그림에서 시간(t)의 경과에 따라 주입압(p)은 점차 상승하고 주입압을 일정한 크기로 억제하면 주입량(q)은 감소된다. 또한, 주입량(q)을 일정하게 하면 주입압(p)이 상승한다. 이런 형태의 t-p-q 곡선은 일반적으로 시멘트밀크의 주입시 나타난다. 단, 급결성 화학약액을 복합 주입하는 경우는 여러 가지 조건이 다르므로 이와 같은 형태의 반응곡선이 나타나지 않는 경우도 많다. 실제로 주입 시공중에 현장에서 자기기록계에 표시되는 주입곡선은 쉽게 읽을 수 있지만 그 해석과 판단에는 상당한 경험과 숙련이 요구된다.

## 2.2 경험적 관리법

### (1) 적정주입압력

주입압과 연관되는 요소는 대단히 많으며 적정한 주입압을 주입 효과와 결부시켜 이론적으로 결정하는 것은 매우 복잡하다. 따라서, 실제 시공에서는 주입깊이에 따른 지중 압력이나 간극수압의 크기를 참고로 최대허용 주입압력을 설정하고 이것을 관리기준으로 삼는 방법을 생각할 수 있다. 또한, 설정한 주입압은 시공전의 시험주입에 의해서도 어느 정도 확인할 수 있지만 이 값 역시 주입효과와 직접적인 연관성은 작다.

한편, 지중 압력으로 허용 주입압을 구하는 것은 주입의 영향으로 지반이 할렬되거나 융기되는 것을 방지하기 위하여 해당 깊이의 토피압을 이용하는 경우가 많다.

예를 들면 미국 개척국에서는 암반 주입시 허용주입압( $\text{kg/cm}^2$ )은 주입깊이(m)의 0.23배 이하가 되도록 제안하고 있다. 그러나, 이렇게 낮은 주입압에서는 만족스러운 주입효과를 얻을 수 없는 경우도 많으므로 더 큰 주입압에 의한 주입도 제안되고 있으며, 島田俊介 등(1982)은 허용주입압과 지표로부터의 깊이 관계를 그림 2와 같이 정리하였다.

여기서, ①  $p=0.23h$  (미국개척국)

②  $p=h$  (이탈리아)

③ 층상암반

④ 주입이 끝난 암반의 하부

⑤ 괴상암반

### (2) 경험적 주입압과 속도

그라우트 주입은 일반적으로 지반강도가 작은 토사 지반에서 실시되므로 가능한 한 주입압력을 낮게 하기 위하여 허용 주입압을 미국 개척국에서 제안한 것처럼 낮은 값인 주입심도(m)당  $0.2 \sim 0.3 \text{kg/cm}^2$ 로 실시하는 예가 많으며, 이것은 주입 심도에 해당하는 정수압의 2~3배를 기준으로 하는 것이다.

한편, 일본 국철 설계 및 시공 지침에서는 주입재를 주입하기 위해서는 주변 간극수압보다 높은 압력이 필요하지만 그 차이는 가능한 작게 하는 것이 바람직하고 너무 차이가 큰 경우 주변지반을 교란하거나 지표면 또는 유효범위 밖으로 유출될 수 있으므로 주의를 요하도록 하였으며, 다음과 같이 주입압력의 범위를 제한하고 있다.

$$p' < p < (3 \sim 5)p' \quad (1)$$

여기서,  $p$  : 주입압,  $p'$  : 간극수압

그러나 주입압은 앞 절에서 언급한 바와 같이 지반조건, 환경조건 시공목적 등에 따라 달라질 수 있으며, 주로 주입의 대상이 되는 사질토 지반에서의 경험적 수치는 일반적으로 2~5kg/cm<sup>2</sup> 정도이고, 때로는 10kg/cm<sup>2</sup> 이상 되는 경우도 있다. 또한, 주입압에 의해 상부 구조물이 나쁜 영향을 받는 경우가 있으므로 구조물의 주변에 주입을 할 때는 상재압을 고려하여 겔타임을 길게 하고 낮은 주입압으로 서서히 주입하는 것이 효과적이다.

특히, 토사지반에 대한 그라우팅시 주입속도는 겔화가 진행되지 않는 범위 내에서 될 수 있는 한 느리게 하는 것이 좋다.

### 3. 시험조건 및 방법

#### 3.1 모형토조 및 주입장치

이 연구에 사용된 모형토조 및 강사장치, 그라우팅 장

비 등은 직접 제작하여 사용하였으며 각각에 대하여 설명하면 다음과 같다.

#### (1) 모형토조

모형시험은 가로×세로×높이가 80×100×90cm(I)와 80×80×90cm(II)인 철제 토조를 제작하여 사용하였으며 토조는 모형지반 조성이 용이하도록 상부와 전면판 탈착이 가능케 하였다. 또한 토조 상부에는 기어식 핸들을 2개씩 설치하여 상재압을 조절할 수 있도록 하였고, 토조의 규격 및 토압계 매설 위치는 그림 3, 4와 같다.

#### (2) 강사장치

수 차례 실시되는 모형지반의 상대밀도를 매 회마다 균질하게 조성하기 위하여 강사장치를 제작하였다. 강사장치는 그림 5와 같이 목재를 사용하여 만들었으며, 시료가 상부에서부터 두 단계를 거쳐 토조에 낙하되도록 하였다.

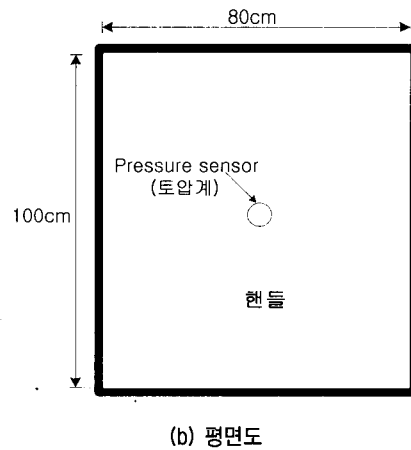
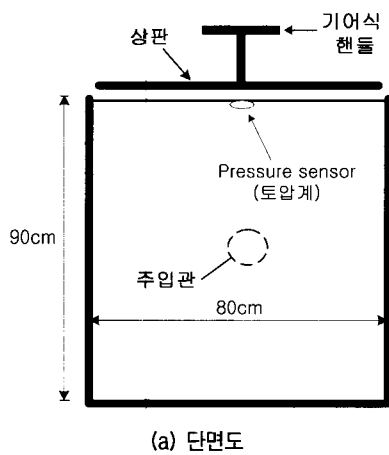


그림 3. 모형 토조 (I)

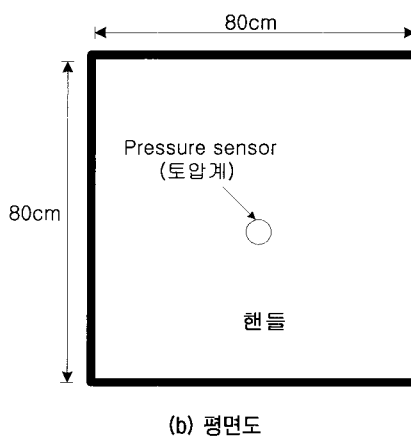
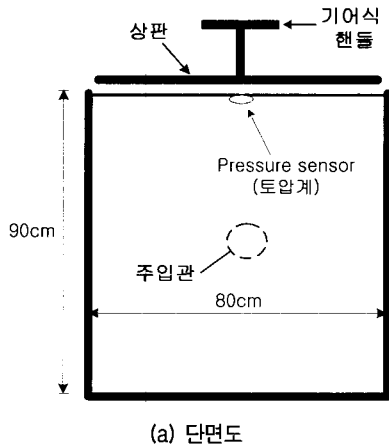


그림 4. 모형 토조 (II)

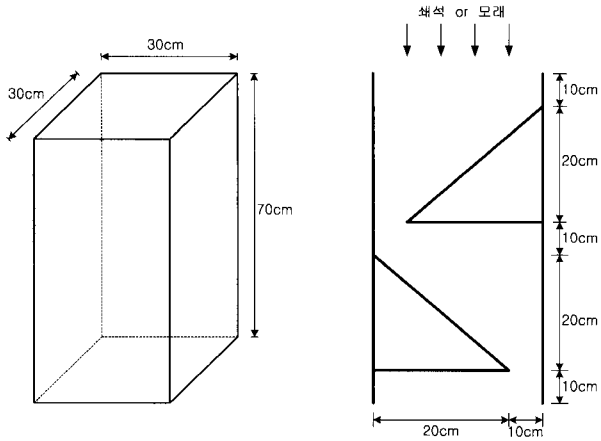


그림 5. 강사장치

### (3) 주입장치

그라우트를 압력 주입하기 위한 장치는 주입탱크와 주입관 그리고 주입관에 압력을 가할 수 있는 콤프레셔로 구성되어 있으며, 압력을 일정하게 유지시키기 위하여 컨트롤러를 부착하였다. 또한, 주입탱크의 용량은 20ℓ이며 10kg/cm<sup>2</sup>의 압력에 견딜 수 있도록 제작하였고, 기타 주입호스와 주변 장치 등은 그림 6과 같다.

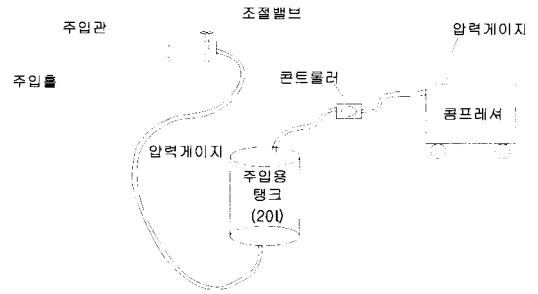


그림 6. 주입용 탱크 및 콤프레셔

## 3.2 모형지반 물성 및 시험방법

### (1) 모형지반 물리적 특성

이 연구에서는 풍화암 파쇄대지반과 풍화토 지반을 시험대상으로 정하고 각각 모형 지반을 조성하였다. 우선 토조(I)은 파쇄가 심한 풍화암 지반이 붕괴로 이완된 상태를 모사하기 위하여 쇄석(GW)을 이용하여 모형지반을 조성하였으며, 토조(II)는 비교적 느슨한 풍화토 지반을 모사하기 위하여 모래(SP)를 이용하여 모형지반을 만들었다. 시험에 사용된 시료의 물리적 특성은 다음 표 1, 그림 7과 같다.

표 1. 시료의 기본물성

구분	USCS	함수비 (%)	비중 (Gs)	$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> )	공극비 (e)
풍화암(쇄석)	GW	3.3	2.66	1.90	1.54	0.61
풍화토(모래)	SP	6.6	2.63	1.70	1.38	0.78

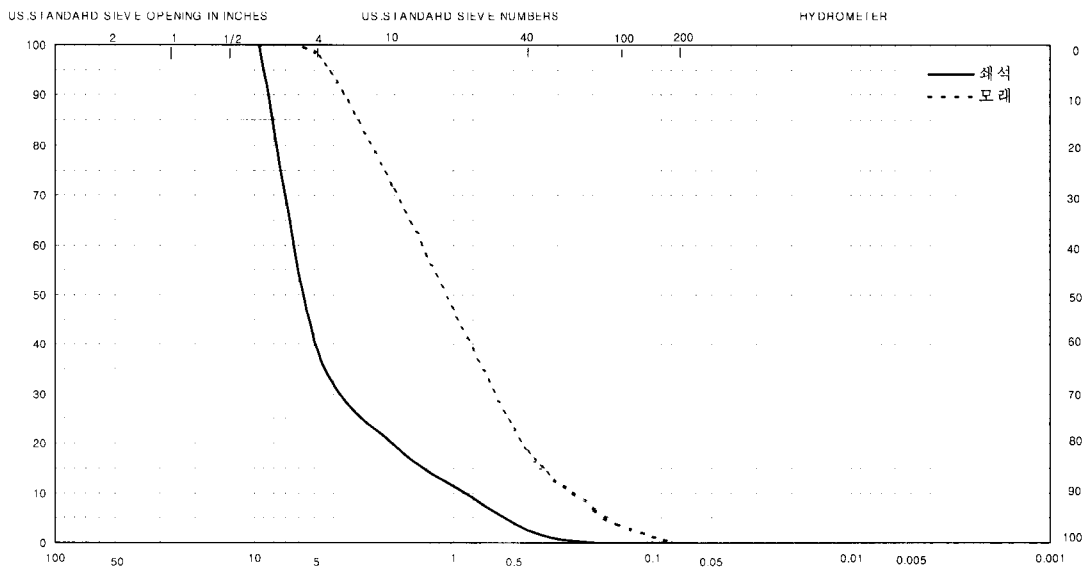


그림 7. 시료의 입도분포 곡선

(2) 모형지반 조성

토조 I에서는 풍화암 지반을, 토조 II에서는 풍화토 지반을 모사하여 각각 시험을 하였으며, 세부적인 방법은 다음과 같다.

- ① 토조의 전면 하부판을 조립하고 토조 하부에 약 3cm 두께의 샌드매트를 포설한 후 강사장치를 이용하여 균질한 상대밀도의 모형지반을 조성한다. 이때 시료는 함수비를 조절하여 미리 준비해 놓은 쇠석과 모래를 사용한다.
- ② 강사장치의 낙하고를 일정하게 유지시키면서 모형지반을 조성하고 토조 중앙부까지 지반이 조성되면 그라우트 주입용 관을 설치한다.
- ③ 강사장치에 의해 조성된 모형지반은 사전에 강사장치 낙하고를 변화시키면서 낙하시험을 수 차례 반복하여 동일한 상대밀도로 모형지반이 조성됨을 확인하였다.
- ④ 상부지반을 조성하기 위하여 전면 상부판을 조립하고, 강사장치를 이용하여 모형지반을 완성한다. 이때 토조 최상부에는 약 3cm의 샌드매트를 고르게 포설하고 중앙부에 상부 토압계를 설치한다.

- ⑤ 토조의 상판을 조립하고 계획된 시험조건에 따라 상재압과 주입압력을 변화시키면서 그라우팅을 실시한다.

(3) 시험조건 및 방법

모형지반 조성이 완료된 후 먼저 상재압과 그라우팅 압력을 변화시키면서 각각의 시료에 9회씩 총 18회의 주입시험을 실시하였으며 시험조건은 표 2와 같다. 또한, 그라우트의 주입량 증가에 따른 그라우트 구근의 부피 증가율을 확인하기 위하여 주입량을 2배씩 증가시키면서 제 2차 주입 시험을 4단계로 구분하여 실시하였으며, 각 단계별 시험 주입량은 표 3과 같다. 그리고 표 4는 주입재료의 겔화가 구근형성에 끼치는 영향을 알아보기 위하여 주입시간을 변화시키면서 실시한 제 3차 주입시험 조건이다. 한편, 주입압의 범위는 문헌 조사를 통하여 사질토 지반에 가장 일반적으로 적용되는 경험적 주입압력(2~5kg/cm<sup>2</sup>)으로 정하였으며, 절취고가 약 8m 정도인 사면을 대상으로 최대 상재압을 결정하였다. 또한, 주입시험용 그라우트는 현재 터널 및 사면보강용 가압 그라우팅에 주로 적용되고 있는 각 공법의 시방기준과 같은 조건으로 배합하여 사용하였으며, 배합기준은 표 5와 같다.

표 2. 모형시험 압력조건

구분		상재압(kg/cm <sup>2</sup> )			비고
		0.2	1.0	1.5	
주입압 (kg/cm <sup>2</sup> )	2.0	Q0.2P2.0	Q1.0P2.0	Q1.5P2.0	토조 I : 쇠 석 토조 II : 모 래
	3.5	Q0.2P3.5	Q1.0P3.5	Q1.5P3.5	
	5.0	Q0.2P5.0	Q1.0P5.0	Q1.5P5.0	

표 3. 주입량 변화 조건

구분	1 단계	2 단계	3 단계	4 단계	비고
주입량(ℓ)	18.0	36.0	54.0	72.0	시 료 : 쇠 석 상재압 : 0.2kg/cm <sup>2</sup> 주입압 : 3.5kg/cm <sup>2</sup>

표 4. 주입시간 변화조건

경과시간(분) 주입량(ℓ)	1차주입 (초 기)	2차주입 (10 분후)	3차주입 (20 분후)	총주입량	총주입시간 (min)	비고
일시주입	18.0	-	-	18.0	0.8~1.0	시 료 : 쇠 석 상재압 : 0.2kg/cm <sup>2</sup> 주입압 : Case-1 (2.0kg/cm <sup>2</sup> ) Case-2 (5.0kg/cm <sup>2</sup> )
지연주입	6.0	6.0	6.0	18.0	21.0~25.0	

표 5. 그라우트 배합비(RPUM공법연구회, 2001)

재 료	시멘트(kg)	혼화재(FRC2호)(kg)	물(ℓ)	비고
수 량	500.0	5.0	841.0	1.0m <sup>3</sup> 기준



그림 8. 시험 순서도

(4) 시험순서

지반조건 및 시험 방법이 결정된 후 주입압 및 상재압, 그리고 주입량과 주입시간을 변화시키면서 그림 8 과 같은 순서로 시험을 실시하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 주입압 영향

준비된 모형토조에 주입압과 상재압을 변화시키면서 시멘트 밀크 그라우팅을 실시하고 지반조건에 따라 형성된 그라우트 구근의 부피를 측정하였다. 구근의 부피 측정은 대형 원통 용기에 물을 가득 채우고 소형 크레인

을 이용하여 구근을 물 속에 넣어 부피를 측정하였다.

시험결과 쇄석과 모래 지반 모두에서 압력 2.0kg/cm<sup>2</sup>과 5.0kg/cm<sup>2</sup>로 주입하여 형성된 구근은 비슷한 크기로 형성 되었으나, 3.5kg/cm<sup>2</sup>으로 주입한 구근의 부피가 가장 크게 나타났으며, 정리하면 그림 9와 같다. 이는 높은 주입압일 때 주입재의 재료분리로 탈수가 발생하면서 용적변화에 의한 구근의 체적감소가 일어나고, 이것에 비례하여 강도가 증가하는 현상이 나타난 것이다. 특히, 압력 3.5kg/cm<sup>2</sup>로 18ℓ를 주입하여 형성된 구근에 대한 구근형성비(구근 부피/그라우트 부피)를 산정한 결과 쇄석(GW)은 3.98 이고, 모래(SP)는 2.82로 쇄석의 부피가 약 41%정도 더 크게 산정되었으며, 쇄석과 모래지반에 형성된 구근의 주입압력별 평균 부피는 표 6에 요약정리 하였다.

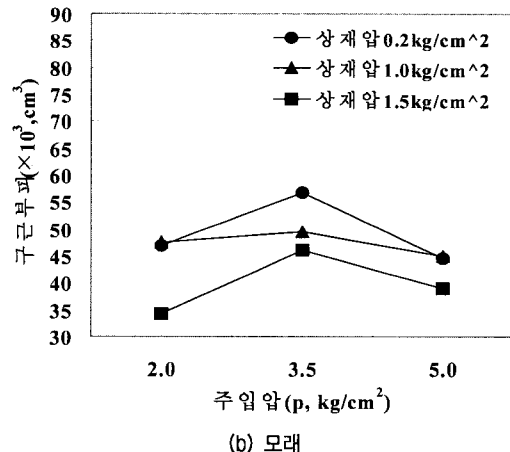
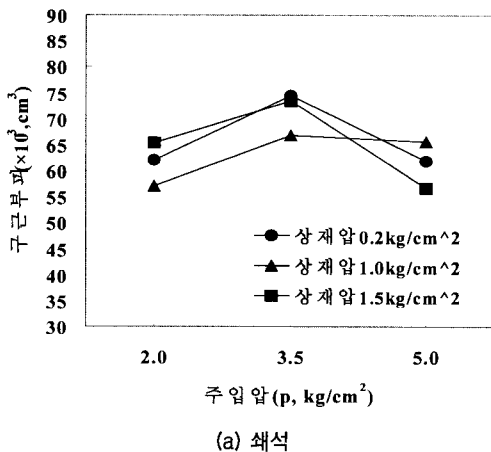


그림 9. 주입압에 따른 구근부피 변화

표 6. 쇠석지반에 형성된 구근 부피(cm<sup>3</sup>)

구 분	주 입 압 (kg/cm <sup>2</sup> )			평균부피 (cm <sup>3</sup> )	
	2.0	3.5	5.0		
쇠석	2.0	61553	71567	61307	64809
모래	3.5	42983	50767	42817	45522

#### 4.2 상재압 영향

그림 10은 상재압이 구근의 부피형성에 끼치는 영향을 알아보기 위해 주입시험 결과를 상재압 별로 정리한 것으로서, 쇠석지반은 상재압이 구근 부피형성에 큰 영향을 끼치지 못하는 것으로 나타났으나, 모래지반은 상재압이 증가할수록 구근 부피가 다소 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이 결과는 초기 상재밀도는 느슨하였으나 상재압을 크게 증가( $p=1.5\text{kg/cm}^2$ )시킴으로써 사질토 지반이 보통 조밀한 상태로 다져지면서 공극률이 감소되었기 때문에 주입률이 작아진 것으로 판단된다.

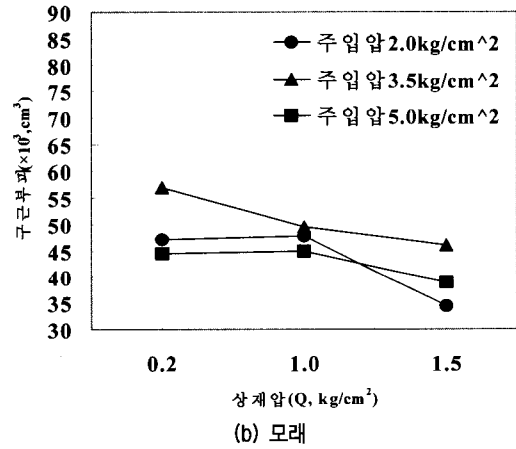
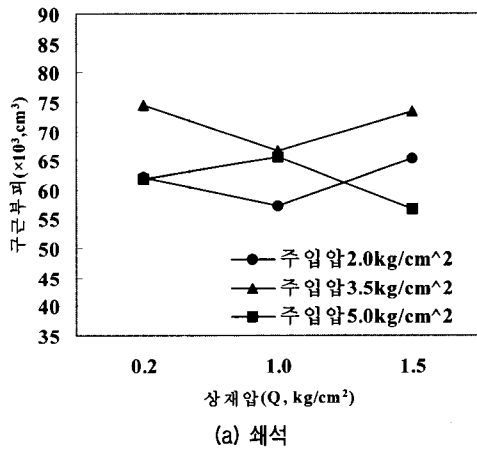


그림 10. 상재압에 따른 구근부피 변화

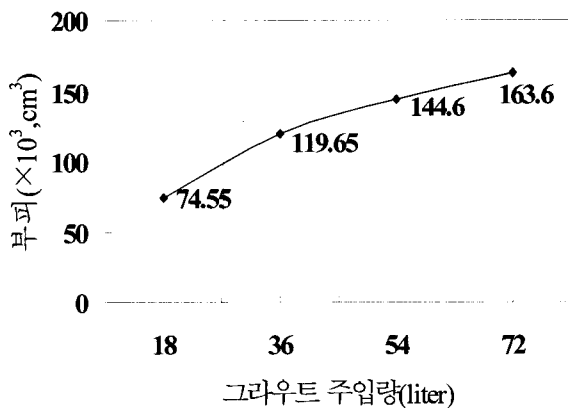


그림 11. 주입량에 따른 구근 부피 변화

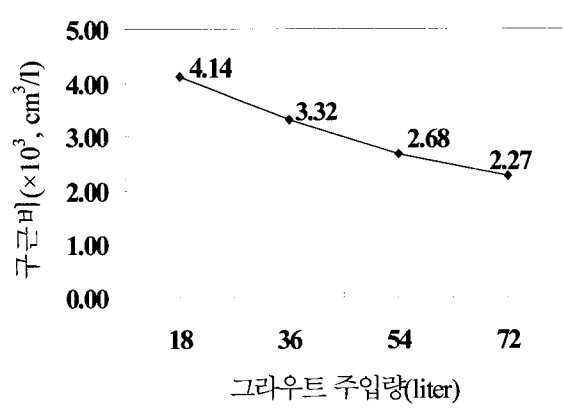


그림 12. 주입량에 따른 구근 형성비

#### 4.3 주입량과 구근부피

그림 11은 그라우트의 주입량이 증가할 때 지반에 형성되는 그라우트 구근의 크기 변화를 알아보기 위하여 쇠석지반을 조성한 후 가장 주입효과가 좋은 3.5kg/cm<sup>2</sup>의 압력으로 주입량을 변화시키면서 그라우팅 시험한 결과이며 주입량이 증가할수록 구근의 부피도 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 주입량 증가에 대한 구근부피의 증가비율을 산정한 결과 그림 12에 나타난 바와 같이 18리터를 주입한 경우의 주입구근비는 4140(cm<sup>3</sup>/ℓ)이며, 주입량 72리터에 대한 주입구근비는 2270(cm<sup>3</sup>/ℓ)로서 구근부피 증가율은 약 1/2정도까지 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 따라서 파쇄가 심한 암반지역이나 느슨한 사질토지반에 시멘트밀크 그라우팅을 할 경우 경제성을 고려한 각 노즐당 적정주입량은 36ℓ가 효과적이라 판단된다.



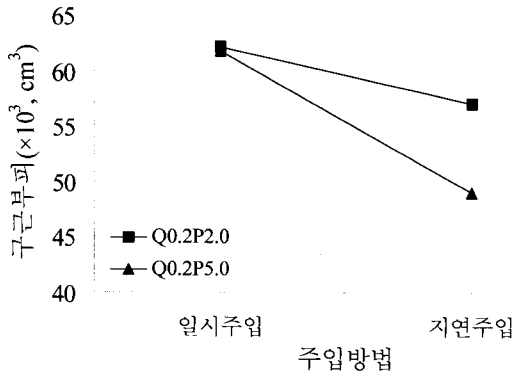


그림 13. 주입시간에 따른 구근 부피 변화

#### 4.4 겔타임과 구근부피

그림 13은 주입시간을 고려한 구근의 부피변화를 알아보기 위한 시험결과로서 상재압이  $0.2\text{kg/cm}^2$ 로 고정된 상태에서 우선 동일한 주입량( $18\ell$ )을 10분 간격으로 각각  $6\ell$ 씩 3회에 나누어 지연 주입한 결과, 압력  $2.0\text{kg/cm}^2$ 로 주입한 경우에는 일시에  $18\ell$ 를 주입하여 형성된 구근보다 8.1% 정도 부피가 감소하였다. 한편, 압력  $5.0\text{kg/cm}^2$ 로 주입하여 형성된 구근의 부피감소는 20.7%로서 높은 압력에서 더 많은 부피감소가 발생하였다. 따라서, 주입시간이 길어져 겔화가 시작된 주입재를 그라우팅 할 경우 구근의 부피는 감소하는 것으로 나타났으며, 높은 압력으로 주입하여 형성된 구근 부피가 상대적으로 더 작아지는 것을 알 수 있었다. 따라서 그라우팅 구근의 부피를 크게 형성시키기 위해서는 겔화가 시작되기 전에 일시에 주입하여 보강하는 것이 더 효과적인 것으로 나타났다.

#### 5. 결론

이 연구에서는 파쇄가 심한 풍화암 지반이나 이미 붕괴되어 이완된 느슨한 사질토 지반에 압력 그라우팅 방식의 보강공법을 적용할 경우 필요한 적정주입압력을 알아보기 위하여, 쇄석과 모래를 이용한 모형지반을 조성하고 그라우팅 시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 쇄석(GW)과 모래(SP)에 대한 그라우팅 시험결과 두 모형지반 모두  $3.5\text{kg/cm}^2$  압력으로 주입할 때 가장 큰 그라우팅 구근이 형성되는 것으로 나타났다. 또한, 쇄석은 주입시 상재압의 영향이 크지 않았으나

모래는 상재압이 증가할수록 구근이 작아지는 경향을 보였다.

- (2) 주입재의 주입량에 따른 구근 부피변화 시험결과  $3.5\text{kg/cm}^2$ 의 압력으로  $18\ell$ 를 주입한 경우 주입 구근비는  $4140(\text{cm}^3/\ell)$ 이었으며, 주입량  $72\ell$ 에 대한 주입 구근비는  $2270(\text{cm}^3/\ell)$ 로, 주입량이 증가할 경우 구근부피 증가량은 약 1/2정도까지 점차적으로 감소하는 경향을 나타냈다.
- (3) 겔타임에 따른 구근 부피 변화를 파악하기 위한 시험에서 동일한 주입량( $18\ell$ )을 10분 간격으로 각각  $6\ell$ 씩 3회에 나누어 주입한 결과 압력  $2.0\text{kg/cm}^2$ 로 주입한 경우에는 일시에 주입하여 형성된 구근의 부피보다 8.1%정도 감소하였으며,  $5.0\text{kg/cm}^2$  압력으로 주입하여 형성된 구근의 부피는 20.7%로 더 많은 부피 감소가 발생하였다.
- (4) 결과적으로 느슨 내지 보통 조밀한 사질토 지반에서 그라우팅할 경우 시멘트밀크 그라우팅은 구근 부피에 의한 영향이 지반 전체강도증가에 큰 영향을 줄 것이므로  $3\text{kg/cm}^2 \sim 4\text{kg/cm}^2$ 의 압력으로 연속하여 주입하는 것이 지반개량에 가장 효율적인 것으로 판단된다.

#### 참고 문헌

1. 건설교통부(1996), "건설공사의 안전시공을 위한 지반보강 신기술개발 및 실용화연구", pp.216-222.
2. 대우 건설기술연구소(1988), "지반 개량을 위한 그라우팅 공법에 관한 연구", pp.87-95, 107-111, 216-218, 260-272.
3. 박용원, 박종호, 신락현, 정기훈(2000), "FRP 사면보강 그라우팅 공법의 현장적용성연구", 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집. pp.143-150.
4. 박종호, 박용원, 김병일, 홍성수(2002), "지반보강 그라우팅 적정 주입압력에 관한 실험적연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.495-498.
5. 중앙대학교(1994), "고압분사 주입공법(SIG)에 의한 지반개량체의 특성에 관한 연구보고서", pp.93-108.
6. 천병식(1988), "최신 지반주입 이론과 실제", 원기술, pp.81-85, pp.108-109, p.152.
7. 토목공법연구회(1999), "그라우팅 편람", 창우출판, pp.47-49, p.170.
8. RPUM공법연구회(2001), "RPUM공법 소개 및 적산자료", p.78.
9. 島田俊介, 兼松陽(1982), "最新の地盤注入工法, 理工圖書".
10. 島田俊介, 多久實(1983), "非アルカリ性シリカゾルグラウトを用いた地盤注入工法と施工例", 土木施工 24卷2號~7號.
11. 柴崎光弘, 下田一雄(1985), "最新薬液注入工法の設計と施工", 山海堂, pp.105-107.
12. Karol, R.H(1983), "Chemical Grouting", Marcel Dekker, Inc.

(접수일자 2003. 2. 21, 심사완료일 2003. 4. 23)