

그라우팅공법의 최적 주입비와 강도에 관한 연구

A Study on the Injection Efficiency and Strength for Grouting Method

김 상 환¹ Kim, Sang-Hwan

김 태 균² Kim, Tae-Kyun

최 제 인³ Choi, Jae-In

임 기 운⁴ Yim, Ki-Woon

Abstract

This paper presents the injection efficiency of 2.0 shot system which was verified by strength and injection time. In order to perform this study, laboratory model tests and field tests are carried out. The laboratory model tests consist of the test of injection time for verifying the injection ratio, and the tests of homo-gel and sand-gel strengths for estimating the characteristic of strength. It is found that the injection ratio of 1:2 shows the best seepage into the ground. The results of the strengths are also larger than other injection ratio. The large strength will also be expressed by field tests at construction site.

요 지

본 논문에서는 2.0 Shot 방식의 최적 주입비를 산정하고 이에 대한 주입시간과 강도에 대한 검증을 실시하였다. 따라서 본 연구를 수행하기 위하여 유체거동 지배방정식을 이용하여 최적 주입비를 산정하고 이에 대한 검증으로 실내실험과 현장실험을 실시하였다. 실내실험은 주입비의 변화에 따른 주입시간의 비교, 재령과 공극비의 변화에 따른 강도 특성을 예측하기 위한 호모겔과 샌드겔의 강도실험으로 구분하여 실시하였다. 연구결과 2.0 Shot 방식의 최적 주입비는 1:2일 경우 침투가 가장 효율적으로 나타났다. 강도 실험에서도 다른 주입비에 비해 최적 주입비가 큰 강도를 발현하는 것으로 나타났다. 또한 현장실험을 통하여 현장에서도 높은 강도가 발현될 것으로 판단된다.

Keywords : Grouting, Homo-gel, Injection efficiency, Reinforcement of ground, Sand-gel

1. 서 론

1824년 영국의 Joseph Aspdin에 의하여 포틀랜드 시멘트가 발명(Nevile, 1982)된 이후 수리 및 광산분야에서 시멘트를 주입하는 그라우팅공법이 적용되기 시작하였다. 그라우팅공법의 한 분류인 약액주입공법은 지반을 강화시키거나 차수목적으로 사용된 경우는 국내 외에 많은 사례가 있다(Miyasaka 외 6, 1992). 국내에서도 1970년대 이후부터 도심 지하철건설 및 건축현장,

항만건설현장 등에 지반보강목적과 차수목적으로 약액 주입공법이 매우 폭 넓게 활용되고 있다. 그러나 20년 전에 도입된 공법들이 국내의 실정에 맞게 사용되지 않는 공법의 규정이 그대로 설계에 반영되고 있는 문제점이 있다(천병식, 2005).

그라우팅공법에 대한 연구는 모형실험을 통한 시멘트그라우팅 지수기법의 주입특성에 관한 연구(최춘식 외 3, 2002)가 있었으며 LW주입에 의한 지반보강 및 환경영향성에 관한 연구(천병식 외 3, 2006)도 있었다.

1 정회원, 호서대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hoseo Univ., kimsh@hoseo.edu, 교신저자)

2 건국대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Konkuk Univ.)

3 명보산업개발(주) 대표이사 (President, Myungbo Industry Development Company.)

4 정회원, (주)도화종합기술공사 상무 (Member, Managing Director, Dohwa Consulting Engineers Co.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

또한 BGI 지반보강 공법에 관한 연구(유남재 외 2, 2009)와 그라우팅재의 호모겔과 샌드겔의 강도증진 성상에 관한 연구(천병식 외 2, 2001)도 있었다. 이러한 연구들은 대부분 호모겔 공시체의 강도측정과 주입지반의 투수계수 측정에 중점을 두고 있기에 주입재의 주입비에 따른 연구에 관해서는 미흡한 것이 실정이다.

따라서 본 연구에서는 문헌조사를 통하여 주입방식에 대하여 검토하였고 그에 따라 유체거동 지배방정식을 이용하여 최적 주입비를 산정하였다. 산정된 최적 주입비의 검증에 위하여 주입비의 변화에 따른 주입시간을 분석하였고, 강도에 따른 검증을 위하여 다양한 인자의 변화에 따른 일축압축강도를 비교하였다. 또한 현장 실험을 통하여 실내실험에 대한 검증을 실시하였다.

2. 그라우팅공법의 주입방법 검토

그라우팅이란 지반특성을 목적에 부합하게 개량하기 위해 특별한 성질을 갖는 주입재를 중력이나 펌프를 이용하여 충전하거나 지반 속으로 침투시키는 것이다(천병식, 1997). 그라우팅공법의 한 종류인 약액주입공법은 주입재, 주입방식 등으로 다양하게 분류된다. 따라서 국내에서 시공되고 있는 약액주입공법의 문헌조사를 실시하여 각 공법간의 비교 및 검토를 실시하였다.

2.1 약액주입공법의 종류

국내에서 시공되고 있는 대표적인 약액주입공법으로는 LW공법, SGR공법, ASG공법, BGI공법이 있으며 이에 대한 특징과 장단점은 다음과 같이 설명할 수 있다.

2.1.1 LW공법

1952년 독일의 Hans Jahda 교수가 개발한 공법으로 희석된 물유리 용액과 소량의 시멘트를 혼합한 다음 일정시간을 기다려 위에 뜬 물을 취하여 주입한다. 주입방식은 주입재를 이루는 모든 재료를 동일한 믹서에 혼합한 후, 1개의 펌프와 단관에 의해 지반에 주입하는 1.0 Shot 방식으로 주입한다. 적용범위로는 실트질, 점성토 및 점토질 실트 외 토사 등이 있지만 0.9mm이하의 토질에서는 시멘트를 침투할 수 없어 시멘트 위에 뜬 물 및 시멘트와 반응제의 물유리만을 침투시킨다.

LW공법의 배합비는 표 1과 같이 A액과 B액이 1:1의 비율로 주입되는 것을 볼 수 있으며 LW공법의 장점과 단점은 다음에 나타난 표 2와 같이 정리될 수 있다.

2.1.2 SGR공법

SGR공법은 물유리계 주입재를 사용하는 이중관 복합 주입공법의 일종이다. 대상지반에 대하여 목적범위를 보다 확실하게 개량하기 위하여 Rocket이라 불리는

표 1. LW공법의 배합비(김형원, 2005)

구분	표준배합(200ℓ)				혼합후 점도 (CPS)	Gel time (분:초)	
	A액(100ℓ)	B액(100ℓ)					
	물유리	시멘트(kg)	벤토나이트(kg)	B액의 W/C+벤토나이트			
LW-1	(A)	70	35		254	25~40	1:20
		70	50		168	35~40	0:52
	(B)	50	20		168	5~7	2:30
		50	35		254	6~8	1:20
LW-2	(A)	70	35	3	231	50~55	1:15
		70	50	5	149.5	60~65	0:55
	(B)	50	35	3	231	45~55	1:20
		50	50	5	149.5	50~55	0:55
	(C)	50	20	2	422	40~55	3:00
		50	35	2.5	227	45~55	1:20

표 2. LW공법의 장점과 단점(윤정섭, 2005)

장점	단점
<ul style="list-style-type: none"> 침투성이 양호 주입장치, 주입재료가 취급용이 주입 후 쉽게 재주입이 가능 완전 풍화된 석회암면 	<ul style="list-style-type: none"> 주입압력의 세심한 측정이 필요 차수효과가 떨어짐(지하수 유동시) 진동 및 충격에 저항이 적다. 미세공극의 지반효과가 불확실

특수한 선단장치와 3조식 교반장치로 구성된다. 대상지 반에 형성시킨 Inducement Space라 불리는 유도공간을 통하여 급결성과 완결성의 주입재를 저압에 의해 연속으로 복합 주입한다. 주입방식으로는 A액과 B액이 별개의 믹서와 송액계통을 사용하지만 주입관 시점에 있는 Y자 형태의 관에서 합류되어 지중에 주입되는 1.5 Shot 방식을 사용한다. SGR공법의 적용범위는 주입재의 분류가 12개로 되어 있어 모든 토질에서 적용이 가능하다.

SGR공법은 표 3에 나타난 바와 같은 배합비를 사용하여 A액과 B액이 1:1의 비율로 주입되며 SGR공법의 특징은 다음 표 4와 같이 나타낼 수 있다.

2.1.3 ASG공법

활성실리케이트 약액을 이용한 ASG공법은 물유리를 안전, 무해한 약품인 알칼리 토금속계의 특정물질로 현장에서 실리케이트의 제조 플랜트를 이용하여 고속 교반 반응을 시켜 제조한다. 주입방식으로는 A액과 B액이 각각 별도의 믹서에서 혼합되어 분리된 경로를 통해 주입관의 토출관까지 보낸 후 주입관의 선단에서 분출시 혼합시키는 2.0 Shot 방식으로 이루어진다. ASG공법의 적용범위는 주입재의 종류가 ASG 1호~10호가 있어 모든 토질에서 적용이 가능하다.

ASG공법의 배합비는 표 5에 나타난 바와 같이 A액과 B액이 200ℓ:200ℓ로 1:1의 비율로 주입되며 ASG공법

표 3. SGR공법의 배합비(한국 S.G.R공법협회, 1991)

구분				표준배합	외관	비중	점도	pH	
약액	A액	3호 규산		100ℓ+100ℓ=200ℓ	증명 (약간착색)	1.2	3.8	11.7	
	B액	SGR	1	SGR 각호1box(장) +물 192ℓ=200ℓ	무색	1.06	1.1	8	
			3		투명	1.05			
			9			1.06			
		SGR	2	상동	무색	1.06	1.1	8	
			4		투명	1.05			
			10			1.1			
	(A액+B액)				400ℓ	유백색GEL	1.1		10
	7일후의 일축압축강도(kgf/cm ²)				1, 2호→4	3, 4호→6	9, 10호→3.6	표준사간극비	
	7일후의 투수계수(cm/sec)				2.5×10 ⁻⁶	1.5×10 ⁻⁶	2.5×10 ⁻⁶	0.65	

표 4. SGR공법의 특징

특 징	
<ul style="list-style-type: none"> • 유도공간을 확보하여 대상지반의 전방위로 침투 주입이 가능 • 다양한 종류의 주입재에 의해 모든 토질에 적용이 가능 • 지반의 교란 없이 주입하므로 지반 본래의 강도 상승효과와 인접구조물에 미치는 영향이 적음 • 주입재의 용탈로 인하여 내구성의 저하 및 강도 저하 	

표 5. ASG공법의 배합비

분류	ASG-1호(순결) 400ℓ		ASG-2호(완결) 400ℓ	
	A액(200ℓ)	B액(200ℓ)	A액(200ℓ)	B액(200ℓ)
표준배합	ASG-1 200ℓ	시멘트 60kg CMS-1 20kg 물 170ℓ	ASG-2 200ℓ	시멘트 60kg CMS-2 20kg 물 170ℓ

표 6. ASG공법의 특징

특 징	
<ul style="list-style-type: none"> • 사용되는 주입재는 알칼리 및 SiO₂ 용탈현상이 작아 안정적 • 해수와 같은 염분의 영향을 받지 않음(해수와 반응하여 정상적인 고결이 가능) • 지하수 회색에 따른 고결시간 지연이 현저히 작다.(타공법의 1/3수준) • 급결재와 완결재의 주입 조절로 주입재의 이탈방지 효과가 탁월 • 저 점성(1.2~2.4cps)의 주입재로 침투력이 우수하여 지반보강효과가 우수 • 고결강도는 10~30kg/cm²정도로 지반보강 및 차수효과가 우수 	

의 특징은 표 6과 같다.

2.1.4 BGI공법

BGI공법은 기존의 현탁액형 주입재를 사용하는 공법의 문제점인 고가의 약액 과다사용 및 주입 후 고결강도 부진 등의 약점을 개선하여 보다 경제적이고 효율적인 주입방법이다. 또한 2.0 Shot 방식으로 이중관과 특수한 선단장치를 사용하여 젤타임과 주입재의 호모젤 강도를 조절하여 주입함으로써, 주입목적에 가장 적합한 개량효과를 확실히 얻을 수 있는 공법이다.

BGI공법의 배합비는 표 7에 나타난 바와 같이 A액은 100ℓ, B액은 200ℓ로 A액:B액=1:2의 비율로 주입되며 BGI공법의 특징은 다음 표 8과 같다.

2.2 약액주입공법의 비교 결과

문헌조사를 통하여 국내에서 시공되고 있는 대표적인 약액주입공법인 LW공법, SGR공법, ASG공법, BGI공법에 대하여 비교·분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

각 공법의 특성을 분석한 결과 1.0 Shot 방식의 LW공법은 공법의 특성과 주입의 방식에 따라 강도와 차수효과가 비교적 낮으며 용수가 존재하는 지반에서는 적용하기 힘든 것으로 판단된다. 1.5 Shot 방식을 사용하는 SGR공법은 배합비에 따라 모든 토질에서 주입이 가능하지만 주입재의 용탈현상으로 인한 내구성과 강도가 저하되는 것으로 조사 되었다. 또한 2.0 Shot 방식을 사용하는 ASG공법과 BGI공법은 침투력과 지반보강효과, 차수효과가 우수하지만 최신 공법이기에 공법에 대한

검증과 시공실적이 적은 것으로 판단된다.

결과적으로 공법의 특성과 주입방식의 차이로 인하여 1.0 Shot 방식의 경우는 유속이 없거나 Gel-time이 긴 경우에 적용이 용이하며 1.5 Shot 방식은 유속이 작거나 Gel-time이 어느 정도 소요되는 경우에 적용이 용이한 것으로 판단된다. 또한 2.0 Shot 방식은 유속의 유무와 관련이 없이 적용이 가능하며 Gel-time이 짧은 경우에 적용이 용이한 것으로 판단된다.

3. 최적 주입비 산정과 실험적 검토

문헌조사를 통하여 약액주입공법이 1.0 Shot, 1.5 Shot, 2.0 Shot의 방식을 사용하여 시공되고 있는 것으로 확인되었다. 이중에서 2.0 Shot 방식은 1.0 Shot, 1.5 Shot과는 달리 개별의 믹서에 주입재를 넣어 주입지점에서 혼합되는 방식이다. 따라서 일반적인 지반의 상태에서는 물론이며 용수가 존재하는 지반이나 유속이 빠른 지반에도 주입이 가능하기에 가장 활용성이 높은 것으로 판단된다. 이에 2.0 Shot 방식의 좀 더 효율적인 주입을 위하여 유체거동 지배방정식을 사용하여 최적 주입비를 산정하였고 주입비의 변화에 따른 주입시간을 측정하여 최적 주입비에 대한 검증을 실시하였다.

3.1 유체거동 지배방정식

2.0 Shot 방식의 핵심은 총주입량 $Q = Q_A + Q_B$ 이며, A액(물+물유리)과 B액(시멘트+약재+물)의 주입량비가 $Q_B = \alpha Q_A$ 일 경우, 최적 주입비 α 를 정하는 것이다.

두액의 합류점까지 수두손실(h_L)은 같고 유량의 역류

표 7. BGI공법의 배합비

A액 : 100ℓ		B액(급결) : 200ℓ		B액(중결) : 200ℓ	
성분	표준배합	B액(급결)	표준배합	B액(중결)	표준배합
물유리	50ℓ	BGI-1호	15kg	BGI-2호	5kg
물	50ℓ	시멘트	100kg	시멘트	100kg
		물	158ℓ	물	167ℓ

표 8. BGI공법의 특징

특 징
<ul style="list-style-type: none"> • A, B액을 이중관 선단부에서 합류 혼합하여 수평, 수직방향에 지향성을 주는 특수한 선단장치를 사용 • 주입목적, 지반조건에 따라 젤타임을 설정이 가능 • 호모젤 강도를 임의로 조절이 가능 • 주입관 설치에서 주입종료까지 1공정 • 규산의 감소와 시멘트의 증가로 밀도의 증가와 초기강도를 증가시켜 용탈문제를 해소 • 고결강도는 10~30kg/cm²정도로 지반보강 및 차수효과가 우수

가 없다고 가정할 때 다음과 같은 조건이 성립한다.

$$\text{에너지조건: } h_{LA} = h_{LB}, \text{ 연속조건: } Q = Q_A + Q_B \quad (1)$$

여기서 h_{LA} : A액의 손실수두, h_{LB} : B액의 손실수두,
 Q_A : A액의 유량, Q_B : B액의 유량

수두손실을 Darcy법칙으로 유도하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h_L = f \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g} = \frac{fl}{2gd} \frac{16Q^2}{\pi} = \left(\frac{16fl}{2\pi^2gd^5} \right) Q^2 = KQ^2 \quad (2)$$

여기서, f : 마찰계수, l : 흐름거리, d : 관경, V : 유속, g : 중력가속도, K : 투수계수

따라서 A액과 B액의 손실수두 h_{LA} , h_{LB} 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_{LA} = K_A Q_A^2, \quad h_{LB} = K_B Q_B^2 \quad (3)$$

여기서 h_{LA} : A액의 손실수두, h_{LB} : B액의 손실수두,
 K_A : A액의 투수계수, K_B : B액의 투수계수, Q_A : A액의 유량, Q_B : B액의 유량

상기 기본적인 개념에 따라 그라우팅 시스템의 지배 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K_A Q_A^2 = K_B Q_B^2, \quad Q = Q_A + Q_B = (1 + \alpha) Q_A \quad (4)$$

여기서 K_A : A액의 투수계수, K_B : B액의 투수계수,
 Q : 전체 유량, Q_A : A액의 유량, Q_B : B액의 유량, α : 최적 주입비

다음과 같은 조건에서 $Q_B = \alpha Q_A$ 라 놓으면 $h_L = F(\alpha)$ 이므로 수두손실은 식 (5)와 같은 식으로 나타낼 수 있게 된다.

$$h_L = KQ^2 = (1 + \alpha)^2 KQ_A^2 \quad (5)$$

여기서 h_L : 전체 손실수두, K : 투수계수, Q : 전체 유량, Q_A : A액의 유량, α : 최적 주입비

상기 수두손실을 최소화하기 위한 α 는 $F'(\alpha) = 0$ 이므로 식 (6)에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F(\alpha) &= h_L = KQ_A^2(\alpha^2 + 2\alpha + 1), \\ F'(\alpha) &= KQ_A^2(2\alpha + 2) = 0 \\ \therefore \alpha &= -1 \end{aligned} \quad (6)$$

2.0 Shot 방식은 그림 1과 같이 $\alpha \geq 0$ 조건을 만족하여야 한다.

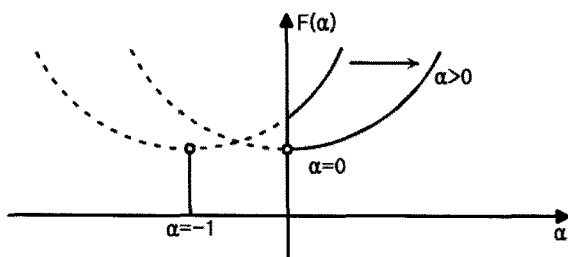
이론 최적 α 는 그림 1(a)와 같이 α 값이 작을 때 형성된다. 그러나 실제 이론에서 다루지지 않는 수두 손실, 그리고 경제성 등을 감안할 때 α 곡선은 그림 1(b)와 같이 오른쪽으로 이동하여 실 최적 주입비 α_T 는 $0 < \alpha_T < 1.0$ 범위 일 것으로 추정된다. 평균값인 $\alpha_T = 0.5$ 로 추정할 때 주입비는 1:2와 혹은 2:1로 서로 2배의 차이가 있어야 한다고 추정된다.

3.2 주입시간 분석을 통한 최적 주입비 검증

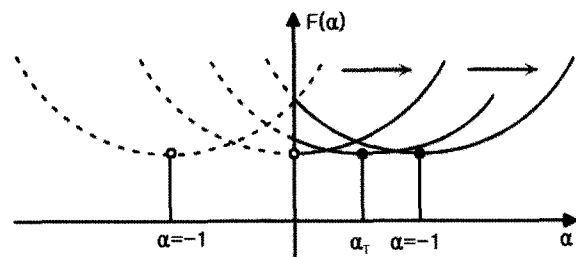
유체거동 지배방정식을 통하여 A액과 B액의 최적 주입비는 A액:B액=1:2인 것을 확인할 수 있었다. 이에 기존에 시공되고 있는 LW공법과 SGR공법의 1:1 주입비, 추가적으로 1:3인 경우를 최적 주입비로 산정된 1:2와 비교하기 위하여 주입비의 변화에 따른 주입시간을 분석하였다. 이를 통하여 유체거동 지배방정식으로 산정된 최적 주입비의 검증을 실시하였다.

3.2.1 실험장치

검증실험에 사용된 모형실험장치는 크게 계측장치,



(a) 이론 α



(b) 실제 최적 α_T

그림 1. 최적 주입비

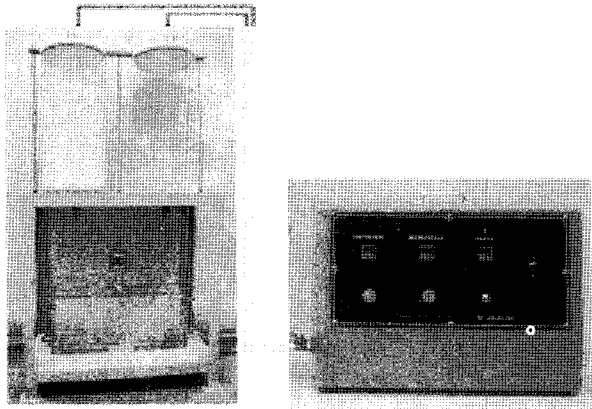


그림 2. 모형실험장치

실험본체, 에어레귤레이터, 에어컴프레서로 구분되며 지반의 모사방법은 주입재의 지반 침투를 확인하기 위하여 워터젤을 이용하였다. 모형실험장치의 전체적인 전경은 그림 2와 같다.

3.2.2 실험의 순서

본 실험은 아크릴 수조에 주입압력을 조절하여 A액(물+물유리):B액(시멘트+약재+물)의 주입비를 1:1, 1:2,

표 9. 실험케이스

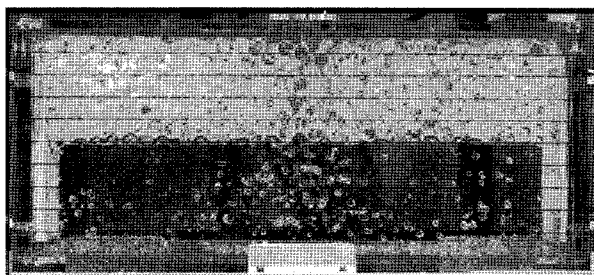
주입재	주입비		
A:A	1:1	1:2	1:3
A:B	1:1	1:2	1:3

1:3로 주입되도록 한 후 동일한 양이 주입되는데 소요되는 시간을 측정하였다. 여기서 1:1의 주입비는 LW공법과 SGR공법에서 적용되고 있다. 1:2의 주입비는 유체저동 지배방정식을 통하여 산정된 최적 주입비이다. 1:3의 주입비는 추가적으로 실시되는 주입비이다. 또한 주입재의 점성으로 인한 침투속도의 차이를 확인하기 위하여 B액을 물:카올리나이트=2:1로 배합하여 실험을 실시하였다. 실험은 점성이 없는 A액:A액=1:1, 1:2, 1:3의 주입비의 실험과 점성이 있는 A액:B액=1:1, 1:2, 1:3의 주입비로 실시된다. 실험한 Case들은 표 9와 같으며 그림 3은 실험의 측정 시작 위치와 측정 종료 위치를 나타낸 것이다.

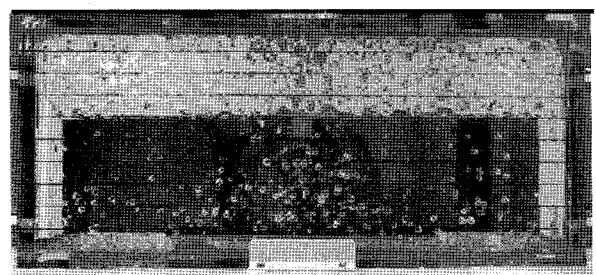
3.2.3 주입비 변화에 따른 주입시간 분석

주입재의 주입비 변화에 따른 주입시간 변화를 분석하기 위하여 그림 3과 같이 모사지반에 일정한 간격으로 측정점을 표시하고 지정된 측정점에서 다음 측정점까지 주입되는 시간을 측정하여 단위 주입량에 따른 주입시간을 비교하였다. 이와 같은 방법으로 각 Case에 따른 결과 값을 정리한 것은 그림 4와 같다.

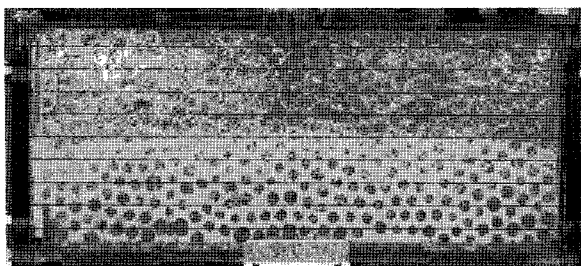
그림 4에 나타난 바와 같이 점성 미혼합시 주입비가 1:2에서 12.14초, 점성 혼합시 주입비가 1:2에서 10.47초로 침투속도가 가장 빠르게 나타났다. 이러한 실험의 결과를 바탕으로 LW공법과 SGR공법에서 적용되고 있는 주입비 1:1과 추가적으로 실시된 주입비 1:3보다 유체저동 지배방정식을 통하여 산정된 최적 주입비 1:2인 경우



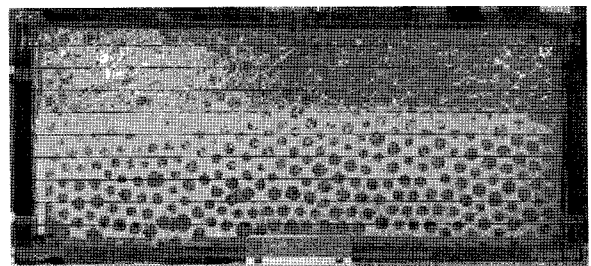
(a) A:A 주입의 측정 시작 위치



(b) A:A 주입의 측정 종료 위치



(c) A:B 주입의 측정 시작 위치



(d) A:B 주입의 측정 종료 위치

그림 3. 실험 주입 과정

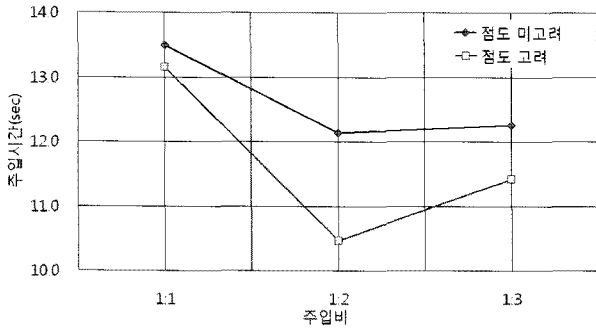


그림 4. 점도와 주입비의 변화에 따른 주입시간 비교

가 주입재의 침투속도가 가장 효율적이라고 판단된다. 또한 점성 혼합시와 미혼합시를 비교해 보면 카올리나이트 혼합시 주입시간이 짧아지는 것으로 측정되었다. 이는 실험시 측정의 위치를 노즐 중앙으로 잡고 주입시간을 체크하여 점성이 있는 재료가 옆으로 퍼지기 전에 중앙 노즐 부분에서 먼저 차오르는 것 때문이다. 그렇기에 주입시간이 점성 혼합시 더 빠르게 측정되었다고 판단되어진다.

4. 강도실험과 현장실험을 통한 최적 주입비의 검증

본 검증실험은 유체거동 지배방정식을 통하여 산정된 1:2의 주입비와 1:1의 주입비로 적용되는 타공법을 강도에 대하여 비교하는데 목적을 두고 있다. 유체거동 지배방정식을 통하여 산정된 1:2 주입비의 강도를 측정하기 위하여 1:2의 주입비로 시공되고 있는 BGI공법을 선정하여 호모겔과 샌드겔의 공시체를 제작하였다. 또한 현장실험을 실시하여 실내실험에 대한 검증을 실시하였다.

4.1 시료 특성

본 일축압축강도실험에서 사용되는 주입재에는 포틀

표 10. 시료의 물리적 특성

비중	건조단위중량 (t/m ³)	공극비(e)	e _{min}	e _{max}	통과량(%)				통일분류법
					No.4	No.10	No.20	No.200	
2.67	1.34	0.57, 0.65, 0.75	0.55	0.78	100	100	0	0	SP

표 11. 모래지반의 N값에 따른 상대밀도와 내부마찰각

N	상대밀도 D _r (%)	조밀한 정도	삼축압축시 ϕ	평면변형 상태 ϕ
<4	0~15	very loose	<30	≈30
4~10	15~35	loose	30~35	31~37
10~30	35~65	medium	35~40	37~44
30~50	65~85	dense	40~45	44~49
>50	85~100	very dense	>45	>49

랜드 시멘트를 사용하기 때문에 충전재가 원활하게 주입될 수 있는 시료를 선정하였다. 이에 따른 시료의 특성은 표 10과 같다.

공극비의 변화에 따라 제작된 공시체를 N치와 내부마찰각, 점착력에 대하여 비교하기 위해서는 각 정수의 변환이 필요하다. 따라서 다음과 같은 과정으로 시료의 정수인 N치, 내부마찰각의 산정을 실시하였다.

N치의 산정은 공극비와 상대밀도를 이용하여 추정할 수 있는데 우선 상대밀도의 경우 공극비를 아래에 표기한 상대밀도에 대한 일반식을 이용하여 도출할 수 있다 (Braja M. Das, 2002).

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100(\%) \quad (7)$$

여기서, D_r : 상대밀도(%), e_{max} : 최대 공극비, e_{min} : 최소 공극비, e : 시료의 공극비

위와 같이 산정된 상대밀도를 Meyerhof가 제안한 표 11을 이용하여 이에 적합한 N치의 범위를 추정하고 평균값의 사용으로 N치를 결정하였다.

추정된 N치를 이용하여 시료의 내부마찰각을 산정할 수 있는데 본 연구에서 실험에 사용된 시료에 대하여 직접전단시험을 실시하여 얻은 결과와 현장실무차원에서 통일분류법에 의해 SP로 분류되는 빈입도조건에서 Dunham이 제안한 식 (8)을 이용하여 내부마찰각을 추정하였다. 그 결과를 정리하면 표 12와 같다.

$$\phi = \sqrt{12N} + 15 \quad (8)$$

여기서, ϕ : 내부마찰각(°), N : 표준관입시험 타격치(회)

상기 과정을 통하여 공극비, 상대밀도, 직접전단시험,

표 12. 시료의 공극비를 통하여 산정된 물성치

공극비 e	상대밀도 D_r (%)	직접전단시험 ϕ (°)	SPT- N치(회/30cm)	추정내부마찰각 ϕ (°)
0.75	13.04	20~24	<4이므로 \approx 4	22
0.65	56.52	30~33	10~30 \approx 25	32
0.57	91.10	40~42	>50이므로 \approx 50	43

N치 등을 통하여 공극비별 추정 내부마찰각은 22°, 32°, 43°로 산정하였다.

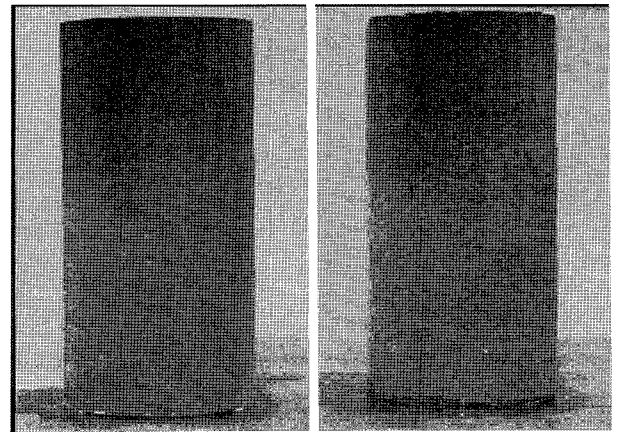
4.2 실험 순서 및 방법

4.2.1 공시체 제작 및 양생

기존의 연구(천병식 외 2, 2001)를 통하여 제작되었던 샌드겔의 경우 혼합수의 배수문제가 있었기에 그 점을 보완하기 위하여 B액을 시멘트 페이스트로 만들어 시료에 주입할 수 있는 주입장치를 제작하였다. 주입장치는 최적 주입비로 산정된 1:2의 비율로 A액과 B액을 주입할 수 있도록 B액이 운반되는 노즐은 A액이 운반되는 노즐보다 큰 지름을 가진 노즐을 사용하여 제작하였다. 호모겔과 샌드겔의 공시체는 직경 5cm × 높이 10cm로 A액:B액=1:2의 주입비가 되도록 1:2의 주입비로 시공되고 있는 BGI공법의 표준배합인 표 13으로 배합하여 제작하였다. 또한 제작된 호모겔과 샌드겔의 공시체

를 동일하게 성형 후 3분이 경과된 후에 탈형하여 수중 양생을 실시하였다.

그림 5는 제작한 주입장치를 통하여 공시체를 제작하는 과정을 주입의 순서에 따라 나열한 것이고 이러한



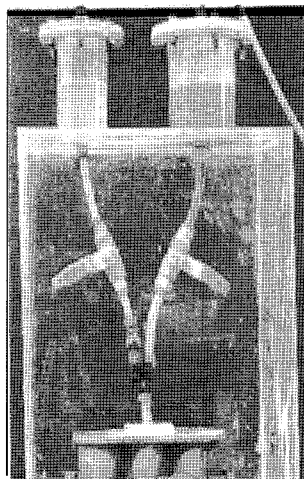
(a) 호모겔 공시체

(b) 샌드겔 공시체

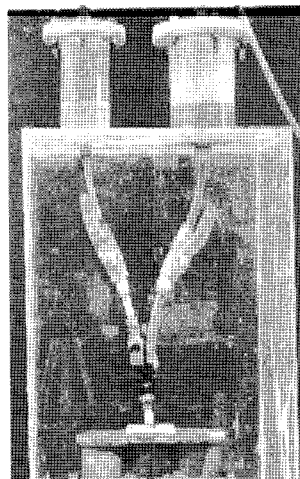
그림 6. 공시체

표 13. 주입재의 배합비

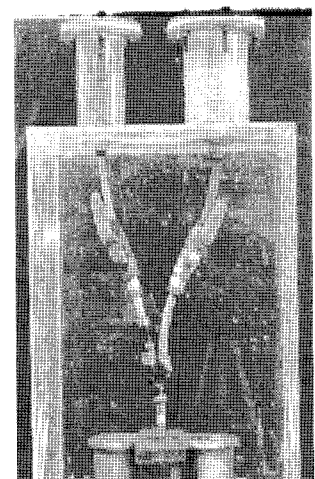
A액 : 100ℓ		B액(급결) : 200ℓ		B액(중결) : 200ℓ	
성분	표준배합	B액(급결)	표준배합	B액(중결)	표준배합
물유리	50ℓ	BGI-1호	15kg	BGI-2호	5kg
물	50ℓ	시멘트	100kg	시멘트	100kg
		물	15ℓ	물	167ℓ



(a) 주입전



(b) 주입중



(c) 주입후

그림 5. 공시체의 주입과정

과정을 통하여 제작된 호모겔과 샌드겔의 공시체는 그림 6과 같다.

4.2.2 실험 순서

최적 주입비로 제작된 호모겔과 샌드겔의 일축압축강도실험은 1일, 3일, 7일, 10일, 15일, 20일, 28일의 재령에 따라 수중 양생되고 있는 공시체를 일축압축강도 실험기를 통하여 강도를 측정하였다. 일축압축강도 실험장비의 전경은 그림 7과 같다. 또한 공극비의 변화에 따른 실험에서는 사질토의 느슨함, 중간, 조밀함을 표현하기 위하여 공극비 e 를 0.57, 0.65, 0.75로 산정하였다. 일반적으로 강도의 지표로 삼고 있는 1일, 3일, 7일의 재령에 따라 일축압축강도실험을 실시하였다. 실험의 Case를 정리한 것은 표 14와 같다.

4.3 최적 주입비와 타공법 강도 비교 결과

본 일축압축강도실험의 결과분석으로 최적 주입비인 1:2로 제작된 호모겔과 샌드겔의 일축압축강도를 재령

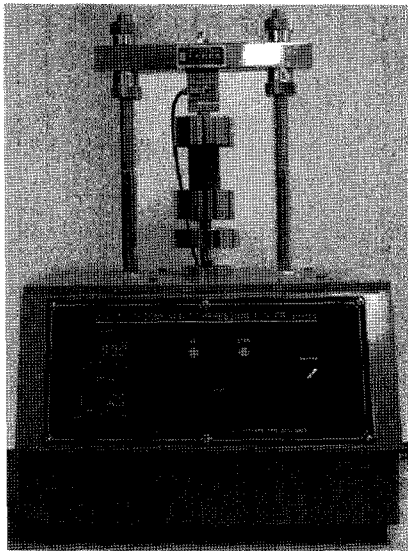


그림 7. 일축압축강도 실험기

표 14. 실험 Case

구분	재령	공극비(e)
호모겔의 강도 실험	1일, 3일, 7일, 10일, 15일, 20일, 28일	0.65
샌드겔의 강도 실험	1일, 3일, 7일, 10일, 15일, 20일, 28일	0.65
공극비의 변화에 따른 강도 실험	1일, 3일, 7일	0.57
		0.65
		0.75

의 변화에 따라 현재 시공되고 있는 LW공법과 SGR공법의 주입비인 1:1과 비교하기 위하여 그라우트재의 호모겔과 샌드겔의 강도증진 성상에 관한 연구(천병식 외 2, 2001)의 결과에서 LW공법과 SGR공법의 강도에 관한 내용을 이용하여 강도의 비교를 실시하였다. 또한 공극비의 변화에 따른 샌드겔의 강도에 대하여 최적 주입비인 1:2와 SGR공법의 주입비인 1:1을 비교하기 위하여 SGR공법 기술자료(한국 S.G.R공법협회, 1991)의 결과와 비교·분석하였다.

4.3.1 최적 주입비와 타공법의 재령에 따른 일축압축강도 비교

최적 주입비로 제작한 호모겔, 샌드겔의 재령의 변화에 따른 일축압축강도와 타공법의 호모겔, 샌드겔의 재령 변화에 따른 일축압축강도를 비교하면 그림 8과 같다.

그림 8에 나타난 바와 같이 타공법의 호모겔과 샌드겔의 강도는 1일에서부터 29일까지 선형으로 증가하여 최고 강도는 29일에서 호모겔은 1.6MPa, 샌드겔은 1.05MPa를 나타내는 것으로 연구된 바 있다. 최적 주입비로 제작된 호모겔과 샌드겔의 강도를 보면 호모겔의 최고강도는 급결의 경우 15일에서 최고 강도인 2.99MPa, 중결의 경우 10일에서 4.235MPa를 발현하고 서서히 감소하는 경향을 확인하였고, 샌드겔의 최고 강도는 급결의 경우 15일에서 3.418MPa, 중결의 경우 10일에서 4.434MPa를 발현하고 서서히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이처럼 최적 주입비로 제작된 공시체의 강도가 10~15일에서 최고의 강도의 발현한 후 감소하는 것은 알칼리성 용액인 물유리와 시멘트로 이루어진 공시체가 시간이 지남에 따라 알칼리성에서 중성으로 중화되어 페이스트의 결속력을 약화시키는 것으로 판단된다. 최적 주입비의 강도와 타공법의 강도를 비교하면 7일 강도에서 1:2의 주입비가 1:1의 주입비에 비하여 4~5배 높은 것

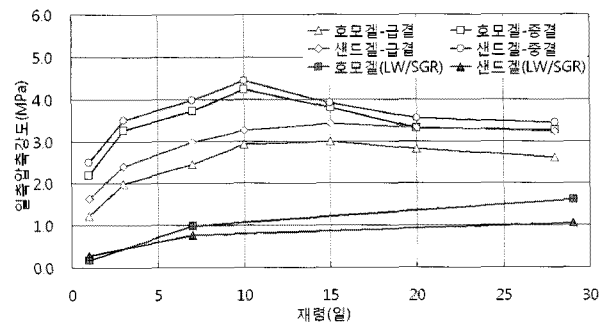


그림 8. 최적 주입비와 타공법의 재령에 따른 일축압축강도

으로 측정되어 최적 주입비의 강도가 타공법의 강도에 비하여 높은 강도를 발현하는 것으로 판단된다.

4.3.2 최적 주입비와 SGR공법의 샌드겔 강도 비교

최적 주입비로 산정된 1:2와 SGR공법의 주입비인 1:1을 비교하기 위하여 공극비와 내부마찰각의 변화에 따른 강도실험을 실시하였다. N치와 호모겔의 강도에 따른 샌드겔의 강도를 각각 표 15, 16에 나타내었다.

표 15에서 SGR공법의 경우 한국 SGR공법협회에 의해 호모겔의 강도는 0.1~0.7MPa의 범위에서, 샌드겔의 강도는 0.1~1.66MPa의 범위에서 강도의 발현을 하는 것으로 연구된 바 있다.

표 16의 최적 주입비로 제작된 호모겔의 강도는 2.194~3.724MPa의 범위에서, 샌드겔의 강도는 1.393~4.770MPa의 범위에서 강도를 발현하는 것으로 측정할 수 있었다.

그림 9는 최적 주입비인 1:2와 SGR공법의 주입비인 1:1의 N치 변화에 따른 호모겔과 샌드겔의 강도를 비교한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 최적 주입비와 SGR공법이 분포되어 있는 위치가 다르다는 것을 알 수 있다. 즉 SGR공법의 경우 호모겔과 샌드겔의 강도가 낮은 범위에서 발현되며 최적 배합비로 제작된 호모겔과

샌드겔의 강도가 높은 범위에서 발현하는 것을 볼 수 있다. 결과적으로 두가지 모두 N치의 증가에 따라 호모겔과 샌드겔의 강도가 증가하는 것을 확인할 수 있으나 최적 주입비로 산정된 1:2의 주입비가 SGR공법에 적용되는 1:1의 주입비에 비하여 더 높은 지반보강의 효과가 있는 것으로 판단되어 진다.

내부마찰각의 변화에 따른 샌드겔의 강도와 점착력의 비교를 위해서는 점착력의 산정이 필수적이다. 본 연구에서는 실내전단시험보다는 실질적인 현장 적용성을 감안하여 일축압축시험의 Mohr 응력원과 파괴포락선을 이용한 식 (9)에 일축압축강도와 내부마찰각($=22^\circ, 32^\circ, 43^\circ$)을 대입하여 샌드겔의 일축압축강도에 따른 점착력의 산정을 실시한다. 이렇게 산정된 일축압축강도와 점착력을 정리한 것은 표 17, 18과 같다.

$$C = \frac{q}{2} \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) \quad (9)$$

여기서, C : 점착력(MPa), q : 일축압축강도(MPa), ϕ : 내부마찰각($^\circ$)

표 17에서 SGR공법의 강도는 한국 SGR공법협회에 의해 샌드겔의 경우 0.40~1.60MPa의 범위이고, 점착력의 경우 0.092~0.50MPa의 범위에서 강도의 발현을 하는 것으로 연구된바있다.

표 18에서 최적 주입비로 제작한 샌드겔의 경우는 1.393~4.770MPa의 범위에서, 점착력의 경우 0.427~

표 15. SGR공법의 N치의 변화에 따른 샌드겔의 강도(한국 S.G.R공법협회, 1991)

호모겔의 강도(MPa)		0.1	0.70
샌드겔의 강도(MPa)	N ≤ 4	0.1	0.70
	N = 10~20	0.3	1.41
	N ≥ 30	0.4	1.66

표 16. 최적 주입비의 N치의 변화에 따른 샌드겔의 강도

호모겔의 강도(MPa)		2.194	3.265	3.724
샌드겔의 강도(MPa)	N ≤ 4	1.393	2.558	2.806
	N = 10~20	2.500	3.495	3.974
	N ≥ 30	3.240	4.260	4.770

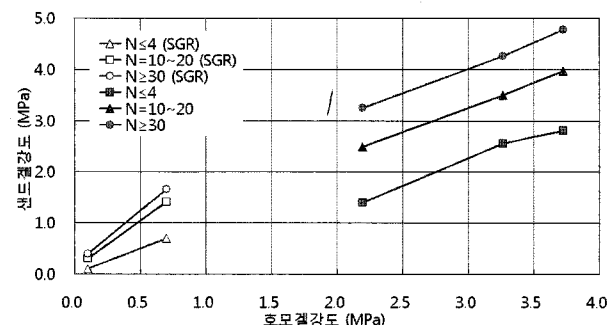


그림 9. 최적 주입비와 SGR공법의 N치 변화에 따른 강도 비교

표 17. SGR공법의 내부마찰각에 따른 샌드겔의 강도와 점착력(한국 S.G.R공법협회, 1991)

ϕ	샌드겔의 강도(MPa)		0.400	1.60
	$\phi = 40^\circ$	점착력(MPa)		0.092
$\phi = 35^\circ$	샌드겔의 강도(MPa)		0.400	1.60
	점착력(MPa)		0.100	0.40
$\phi = 30^\circ$	샌드겔의 강도(MPa)		0.400	1.60
	점착력(MPa)		0.116	0.45
$\phi = 25^\circ$	샌드겔의 강도(MPa)		0.400	1.60
	점착력(MPa)		0.131	0.50

표 18. 최적 주입비의 내부마찰각에 따른 샌드겔의 강도와 점착력

ϕ	샌드겔의 강도(MPa)			1.393	2.558	2.806
	$\phi = 22^\circ$	점착력(MPa)			0.427	0.785
$\phi = 32^\circ$	샌드겔의 강도(MPa)			2.500	3.495	3.974
	점착력(MPa)			0.708	0.990	1.125
$\phi = 42^\circ$	샌드겔의 강도(MPa)			3.240	4.260	4.770
	점착력(MPa)			0.773	1.017	1.138

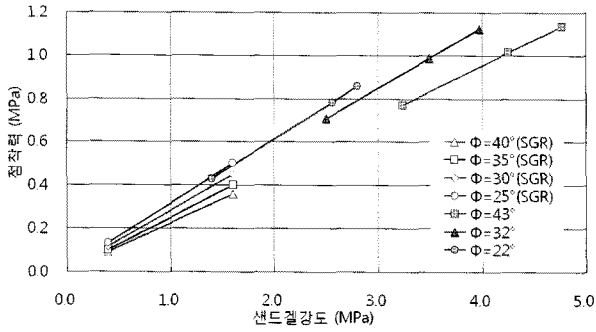


그림 10. 최적 주입비와 SGR공법의 내부마찰각 변화에 따른 강도비교

1.138MPa의 범위에서 강도의 발현을 하는 것으로 측정되었다. 이러한 자료를 정리하여 나타내면 그림 10과 같다.

그림 10은 최적 주입비와 SGR공법의 내부마찰각 변화에 따른 샌드겔의 강도와 점착력의 비교를 나타낸 것으로 SGR공법의 경우는 샌드겔의 강도와 점착력이 낮고, 최적 주입비로 제작한 샌드겔은 강도가 높고 점착력도 높기 때문에 서로 다른 구역으로 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 강도발현의 양상은 두가지 모두 내부마찰각의 감소에 따라 샌드겔의 강도와 점착력이 증가하는 거동을 나타내는 것으로 측정되었다. 최적 주입비와 SGR공법의 강도발현 양상을 비교한 결과 최적 주입비로 산정된 1:2가 SGR공법에 적용되는 1:1에 비하여 높은 범위에서 강도를 발현하는 것으로 나타났으며 이는 1:2 주입비가 1:1 주입비에 비하여 지반보강효과가 더 우수한 것으로 판단되어진다.

4.4 현장실험을 통한 실내실험의 검증

유체거동 지배방정식을 통하여 산정된 최적 주입비를 검증하기 위하여 주입시간의 측정과 일축압축실험을 실시하였다. 이에 실내실험을 통하여 측정된 자료를 ○○고속철도, ○○ 복선전철 현장에서 적용 실시한 현장실험자료와 비교 및 검토하여 실내실험에 대한 검증을 실시하였다. 모형실험에서의 시료의 분류는 $e=0.57$,

표 19. 실내실험과 현장실험의 N치의 비교

	분류	실험전의 N치(회)	실험후의 N치(회)
실내실험 결과	A($e=0.75$)	4	50
	B($e=0.65$)	25	50
	C($e=0.57$)	50	50
현장실험 결과	A(토사층)	3	50
	B(풍화암)	22	50
	C(연암)	50	50

0.65, 0.75의 3가지이며 현장실험에서 사용된 분류는 토사층, 풍화암, 연암으로 나누어진다.

현장실험을 통한 모형실험의 적용성을 검토하기 위하여 사용되는 자료는 모형실험의 경우 시공전의 수치로 공극비가 $e=0.57, 0.65, 0.75$ 일 때의 N치를 사용한다. 또한 시공후의 N치는 공극비 변화에 따라 실시한 실험의 일축압축강도를 Terzaghi와 Peck이 제안한 식 (10)을 이용하여 N치로 환산한 것과 현장실험자료를 정리하면 표 19와 같다.

$$q = \frac{N}{8} \quad (10)$$

여기서, q : 일축압축강도(MPa), N : 표준관입실험 타격치(회)

표 19는 실내실험과 현장실험의 N치를 비교하여 나타낸 것이며 이를 비교하면 그림 11과 같이 나타낼 수 있다.

실내실험의 경우 개량전의 SPT-N치는 4회, 25회, 50회로 계산되었고, 개량후의 N치는 계산한 결과 모두 50회 이상으로 예측되었다. 또한 현장실험의 경우 개량전의 N치는 토사층에서 3회, 풍화암에서 22회, 연암에서 50회로 측정되었고 개량후의 N치는 모두 50회 이상으로 나타는 것을 확인할 수 있다. 실내와 현장의 지반조건을 비교한 결과 그림 11과 같이 일치함을 알 수 있다. 따라서 현장에서도 1:2의 주입비로 주입할 경우 높은 지반보강효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

본 실험연구를 통해서 그라우팅 공법의 최적 주입비와 강도에 관하여 분석하였다. 분석결과 유체거동 지배방정식을 통하여 2.0 Shot 방식의 최적 주입비를 산정하였고, 모형실험을 통하여 최적 주입비에 대한 검증을 실시하였다. 또한 모형실험을 통하여 강도를 비교한 결과 최적 주입비로 산정된 1:2가 가장 높은 강도를 나타내는

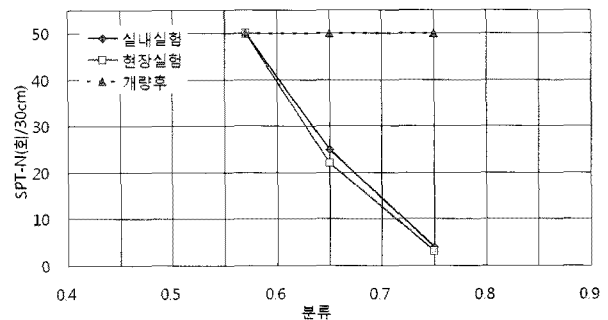


그림 11. 실내 및 현장의 개량효과 비교

것으로 나타났다. 본 실험에서 공시체의 강도 감소에 관하여 추가적인 실험이 시행된다면 그라우팅 공법에 대하여 보다 실질적인 연구결과를 거둘 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 약액주입공법에 관한 문헌 조사를 실시하였고 가장 범용성이 높은 2.0 Shot 방식의 최적 주입비 산정을 실시하였다. 산정된 최적 주입비를 검증하기 위하여 주입비의 변화에 따른 주입시간의 비교와 일축압축강도 실험을 실시하였다. 또한 현장실험을 통한 모형실험의 검증을 수행하였다. 이를 통하여 얻어진 주요결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- (1) 약액주입공법에 관하여 문헌조사를 실시한 결과 다양한 지반조건과 용수의 변화에 따른 조건에서도 적용이 가능하기에 2.0 Shot 방식이 가장 범용성이 높은 것으로 판단된다.
- (2) 2.0 Shot 방식의 최적 주입비를 유체저동 지배방정식을 통하여 산정한 결과 1:2의 비율인 것으로 산정되었다. 또한 1:1, 1:2, 1:3로 주입비의 변화에 따른 주입 실험을 실시한 결과 최적 주입비로 산정된 1:2에서 침투가 가장 효율적인 것으로 나타났다.
- (3) 최적 주입비로 산정된 1:2의 주입비로 제작한 호모겔과 샌드겔의 강도를 비교한 결과 1일 재령부터 지속적으로 증가하여 급결의 경우는 15일, 중결의 경우는 10일에서 각각 최고의 강도를 발현하고 서서히 감소하는 경향을 확인하였다.
- (4) 최적 주입비인 1:2와 타공법의 주입비인 1:1을 비교한 결과 1:2의 주입비로 제작한 공시체가 1:1의 주입비로 제작된 공시체에 비하여 우수한 강도를 발현하는 것으로 확인되었으며, 개량된 지반에서의 강도 예측을 위한 샌드겔의 실험에서 여러 가지 인자

의 변화를 통하여 강도 증가효과를 확인할 수 있었다. 결과로부터 실질적인 현장적용에 있어서도 1:2 주입비의 경우 지반개량효과를 상당히 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

- (5) 현장실험을 실시한 결과 실험값의 경우 개량후의 N치가 50회 이상으로 증가하였으며 현장의 자료도 개량 후에 N치가 50회 이상으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 실험과 현장조건이 잘 일치되는 결과를 얻었다. 따라서 1:2의 주입비로 주입할 경우 현장에서도 높은 지반개량효과가 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 김형원 (2004), 흙막이 차수공법의 선정 및 시공에 관한 현장 사례 연구, *서울산업대학원 산업대학원 석사학위 논문*.
2. 유남재, 서승오, 김동진 (2009), B.G.I 지반보강 공법에 관한 연구, *강원대학교 산업기술연구소 논문집*, 제29권, B호, pp.73-80.
3. 윤정섭 (2005), 하천 제방차수 공법에 관한 연구, *인제대학교 첨단산업기술대학원 석사학위 논문*.
4. 최춘식, 이학규, 김우철, 조양운 (2002), 모형실험을 통한 시멘트 그라우팅 지수기법의 주입특성에 관한 연구, *한국지반환경공학회 학술발표회논문집*, pp.167-172.
5. 천병식 (1997), 건설기술자를 위한 지반주입공법, *원기술*, pp.115-141.
6. 천병식, 김진춘, 장의웅 (2001), 그라우트재의 호모겔과 샌드겔의 강도증진 성상에 관한 연구, *한국지반환경공학회 학술발표회 논문집*, pp.167-172.
7. 천병식 (2005), 최신 지반주입 이론과 실제, *원기술*, pp.315-317.
8. 천병식, 도종남, 성화돈, 임주현 (2006), LW주입에 의한 지반보강 및 환경영향성에 관한 연구, *한국지반환경공학회 학술발표회 논문집*, pp.121-131.
9. 한국 S.G.R공법협회 (1991), S.G.R공법 기술자료.
10. A. M. Neville (1982), *Properties of Concrete*, Pitman, London, pp.1-2.
11. Miyasaka, G., Sasaki Y., Nagata, T., Shibazaki, M., Iji M., and Yoad, M. (1992), *Jet Grouting for a Self-standing Wall, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, ASCE, Geotechnical Special Publication, No.30, pp.144-155.
12. Braja M. Das. (2002), *principles of geotechnical engineering*, Thomson-Engineering.

(접수일자 2010. 7. 23, 심사완료일 2010. 9. 7)