

## 지반보강용 실리카졸 약액의 강도특성에 대한 연구

### Characteristics Strength of Silicasol-cement Grout Material for Ground Reinforcement

김 현 기<sup>1)</sup> · 김 영 훈<sup>1)</sup> · 천 병 식<sup>†</sup>

Kim, Hyunki · Kim, Younghun · Chun, Byungsik

**ABSTRACT** : This study was made on the fact that the compressive strength characteristic of the recently developed alkali silica-sol chemical grout material was examined, whose grout material used for this study was designed to understand its strength property through the uniaxial compressive strength test(homo-gel, sand-gel), permeability test, deflection strength test, etc. In order to compare with the engineering characteristics regarding alkali silica-sol grout material and sodium silicate grout material. The uniaxial compressive strength of silica-sol grout material was identified to be increased more than 3~5 times than sodium silicate grout material at the early stage(within 72 hours). When comparing with the uniaxial compressive strengths of Sand-gel and Homo-gel at the material age of 28 days in case of silica-sol grouting material the strength of Sand-gel was measured to be about 1.3 times higher than Homo-gel. In case of silica-sol, it is assumed to have the property to exert high strength when it is actually grouted into the ground. As a result of permeability test it is judged that it is possible to apply the silica-sol to the site in the place requiring the water cut-off as the silica-sol. As a result of testing the strength at the material age of 28 days of grouting-use silica-sol showed more than 3 times' difference than the sodium silicate grouting material..

**Keywords** : Compressive strength, Silica-sol, Permeability test, Deflection strength test

**요 지** : 본 연구는 최근 개발된 실리카졸 그라우트제의 압축강도 특성을 규명한 것으로써 연구에 사용된 그라우트제는 3차원 겔 형성체인 실리카졸 그라우트제와 규산나트륨 그라우트제에 대한 공학적 특성을 비교하기 위하여 일축압축강도시험(호모겔, 샌드 겔), 투수시험, 휨강도시험등을 통해 강도 특성과 친환경성을 규명하고자 하였다. 실리카졸 그라우트제가 규산나트륨 그라우트제보다 초기(72시간 이내)에 일축압축강도가 3~5배 이상의 고강도로 증진되고 있음을 확인하였다. 샌드겔과 호모겔의 재령 28일의 일축압축강도로 비교 시 실리카졸 그라우팅제의 경우 샌드겔이 호모겔에 비해 약 1.3배 정도 강도가 높게 측정되었고, 이는 실리카졸의 경우 실제로 지반에 주입되어 사용되었을 경우 고강도를 발휘하는 특성이 있기 때문으로 추정된다. 투수시험 결과 실리카졸이 차수성면에서 현장에 적용하는데 무리가 없다고 판단되어 차수성을 요구하는 현장에 적용이 가능하다고 판단된다. 휨강도시험결과 그라우팅제용 실리카졸은 최종 28일 강도의 경우 규산나트륨 그라우팅제에 비해 3배 이상의 차이를 보이고 있다.

**주요어** : 압축강도, 실리카졸, 투수시험, 휨강도시험

## 1. 연구배경 및 목적

1802년 프랑스의 기술자 Charles Berigny가 지반침하로 손상된 수문 기초의 공동부를 채우고 기초 아래에 석회와 점토의 불안정한 주입재를 주입하여 약액주입을 적용한 이래 약액주입에 의한 지반개량의 역사는 약 200년이 경과되었다. 현재까지 차수 및 지반안정을 위해 시행되어 온 규산나트륨을 사용한 기존의 알칼리성 물유리계 약액주입공법은 주입 후 시간경과에 따라 자유수 및 흡착수 등 지하수에 의해 주입고결체로부터 알칼리성분의 용탈이 진행되어 결국에는 주입재의 대부분이 유실·소멸되는 등 내구성이 약

한 문제점이 있다. 이로 인한 지하수 오염가능성도 있어 공법의 안전성 및 환경공해성에 있어서 의문이 제기되어 왔다. 따라서 이에 대한 대안으로써 내구성이 우수하고 환경오염의 가능성이 적은 새로운 주입재 및 그의 주입공법에 대한 개발이 요구되어 전술한 물유리계 약액주입공법의 단점을 보완하기 위해 개발된 공법 중의 하나가 실리카졸계 약액주입공법이다. 실리카졸(silica sol)이란 규산소다(sodium silicate) 또는 규산칼슘(sodium silicate)등의 규산염기계 물질을 특정한 무기산(inorganic acid) 또는 유기산(organic acid)과 반응시켜 성분 중에 함유되어 있는 알칼리성분을 중화하여 제거한 산성 내지 중성의 콜로이드성 실리카용액을 말한

1) 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

† 정희원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

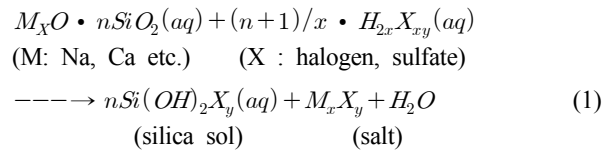
다. 이 실리카졸 용액은 일반 물유리 용액의 경화때와는 달리 고결될 때 고결물의 구조가 보다 견고한 고분자성 연결 구조가 된다. 실리카졸은 알칼리의 용탈이 거의 없을 뿐 아니라 경화진행 중이나 고결 후에도 다량의 유수에 의해서도 희석되거나 유실되지 않는 무공해성의 고결체가 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 실리카졸을 주입재료로 사용할 경우 주입효과는 반영구적으로 지속되어 타공법과 비교하여 높은 신뢰도를 나타낼 뿐 만 아니라 알칼리 성분의 용탈에 의한 지하수 오염등 환경공해성을 야기하지 않는 큰 장점을 지닌다(천병식 등, 1996).

따라서 본 연구에서는 실리카졸계 약액주입공법의 효과를 규명하기 위한 연구로서 실리카졸계 약액의 강도특성을 상세히 규명하고자 공시체를 제작하여 호모젤(Homo-gel)과 샌드젤(Sand-gel)의 압축강도 시험, 투수시험, 휨강도시험 등의 시험자료를 토대로 그라우팅용 실리카졸의 공학적 특성을 분석, 검토하였다.

## 2. 실리카졸 약액의 개요

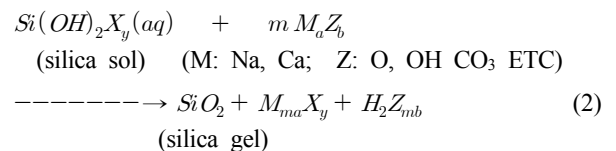
비알칼리성 실리카졸 약액은 1974년 일본건설성 약액주입관련규제로 개발된 이래 순결공법, 복합주입공법과 조합되어 크게 발전해 왔다. 공해문제를 계기로 개발된 이 그라우트의 기본은 공장폐액을 처리할 때, 알칼리성 폐액이 유산등의 산성제로 중화해서 배수되는 데에 착안하였다. 물유리를 일종의 알칼리성 폐액으로 보아 물유리 중의 알칼리를 산으로 중화해서 주입하면 공해면에서 안전하고, 더욱 그것이 겔화되는 것이라면 안전성 높은 지반고결법이 된다는 점에 착안한 것이다. 물유리 중의 알칼리를 제거해서 산성영

역으로 조정하면 실리카졸을 형성하여 그 자체가 늦거나 빠르게 겔화되는 성질을 지니고 있다. 이것을 주입목적에 적합한 겔타임(Gel-time)으로 조절하기 위하여 알칼리성 경화제를 더하면 거의 중성영역에서 겔화되는 특성을 주입공법에 응용하면 종래의 알칼리 영역인 물유리계 약액과는 매우 다른 효과를 발휘하는 주입재가 된다. 실리카졸의 생성은 아래의 식 (1)과 같이 규산소다 또는 규산칼슘등의 규산염 기류 물질과 특정 무기산을 반응시켜 얻는다.



이때 생성되는 실리카졸 콜로이드 용액을 안정화하고 발열반응에 의한 반응열 조절을 위해 반응온도의 조절 및 적절한 무기안정제의 첨가가 수반된다.

한편, 실리카졸 약액의 알칼리성 경화제에 의한 겔화반응은 다음의 식 (2)와 같다.



여기서  $M_a Z_b$ 로 표시한 알칼리성 경화제는 탄산나트륨, 가성소다, 산화칼륨, 수산화칼슘, 규산소다 등이며 종류 및 농도에 따라 겔타임, 고결체의 밀도 또는 강도 등 물성이 조절되므로 적절한 선택이 요구된다(천병식 등, 1996).

## 3. 재료 및 시험방법

### 3.1 사용재료

본 연구에 사용된 주입재 중 A액은 그라우팅용 실리카졸(SSL-30), 규산나트륨(3호) 등을 사용하였으며 화학성분은 표 1과 같다. B액은 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며 화학성분과 물리적 특성은 표 2와 같다. 규산나트륨(3호)의 첨가제로서는 소디움 트리폴리포스페이트(Sodium Tripolyphosphate, STPP)를 사용하였다.

표 1. 규산나트륨(3호), 그라우팅용 실리카졸(SSL-30) 재료의 화학성분

구분	그라우팅용 실리카졸 (SSL-30)	그라우팅용 규산나트륨 (3호)
비 중	1.220	1.384
이산화규소(SiO <sub>2</sub> ) (%)	31.5	27.2
산화나트륨(Na <sub>2</sub> O) (%)	0.7	9.14
철(Fe) (%)	-	0.0034
물불용분 (%)	1.5	0.0026
pH(25℃)	9.8	14
점도(25℃) (cp)	14	200

표 2. 보통포틀랜드시멘트의 화학성분 및 물리적 특성

종 류	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + CaO	SO <sub>3</sub>	비 중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	응결(시:분)	
						초결(분)	종결(분)
보통 포틀랜드시멘트 (OPC)	20.4	71.5	1.5	3.15	3170	250	410

표 3. 급결용 그라우트재의 표준배합비

		규산나트륨	규산나트륨+STPP	실리카졸
A액	규산나트륨(3호) (ℓ)	250	250	-
	그라우팅용 실리카졸(SSL-30) (ℓ)	-	-	250
	첨가제 (kg)	-	-	2.5
	STPP (kg)	-	7.5	-
	물 (ℓ)	250	250	250
	소 계 (ℓ)	500	500	500
B액	보통포틀랜드시멘트 (kg)	200	200	200
	분산제 (kg)	2	2	2
	첨가제 (kg)	-	-	-
	급결재 (kg)	50	50	-
	물 (ℓ)	411	411	437
	소 계 (ℓ)	500	500	500

\*혼합부피비율 ; (A액) : (B액) = 1 : 1

\*겔타임 ; 6~9초

표 4. 완결용 그라우트재의 표준배합비

		규산나트륨	규산나트륨+STPP	실리카졸
A액	규산나트륨(3호) (ℓ)	250	250	-
	그라우팅용 실리카졸(SSL-30) (ℓ)	-	-	250
	첨가제 (kg)	-	-	2.5
	STPP (kg)	-	7.5	-
	물 (ℓ)	250	250	250
	소 계 (ℓ)	500	500	500
B액	보통포틀랜드시멘트 (kg)	200	200	200
	분산제 (kg)	2	2	2
	첨가제 (kg)	-	-	2.5
	급결재 (kg)	-	-	-
	물 (ℓ)	437	437	436
	소 계 (ℓ)	500	500	500

\*혼합부피비율 ; (A액) : (B액) = 1 : 1

\*겔타임 ; 60~90초

### 3.2 시험체 제작

실리카졸과 규산나트륨은 약액주입재로서 순수용액형 주입재 및 시멘트를 공용하는 현탁액형 주입재가 가능하다. 본 연구에서는 현탁액형 주입재를 제조하여 그의 특성을 검토하였고 겔타임이 빠른 급결형과 겔타임이 늦은 완결형의 표준배합을 결정하였다. 2.0 Shot 주입시스템(2액 2공정)에 적용 가능한 표준배합비를 선정하여 실리카졸과 규산나트륨의 공시체를 제작하였다(표 3~표 4). 첨가제인 STPP는 시멘트의 수화지연제로써 과거 규산나트륨 그라우트재 시공 시 계면활성제 역할의 효과가 있다고 연구된 결과가 있다(양형철 등, 2006). 따라서 공시체의 종류는 실리카졸 공시체, 규산나트륨 공시체, STPP첨가제가 첨가된 규산나트륨 공시체로 각각 급결과 완결의 종류로 총 6종류의 공시체를 제작하여 실험을 수행하였다. 시험체의 크기는 직경 50mm×

높이 100mm로 제작되었으며, 양생일수는 28일이고, 양생 온도는 상온 20 ± 5°C로 항온 수조에서 습윤 양생하였다.

### 3.3 시험방법

#### 3.3.1 호모겔의 압축강도시험

호모겔이란 약액과 시멘트 현탁액만을 사용하여 제작한

표 5. 일축압축강도시험 상세표

분 류	내 용
공시체 크기	직경 50mm × 높이 100mm
측 정 회 수	최소 3회 이상
전 단 방 식	변형률 제어 방식
로드셀 정확도	0.5kg
변형률 게이지 정확도	0.01mm
재 하 속 도	1mm/min

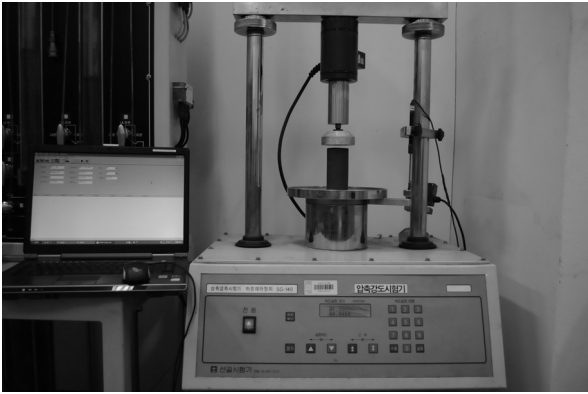


그림 1. 일축압축시험기 전경

공시체로써 일축압축강도시험은 디지털형 만능재료시험기를 이용하고 ASTM D2166에 의거하여 일축압축강도를 측정하였고 상세제원은 표 5와 같다(ASTM, 2006). 젤타임은 A액, B액을 각각 200cc 컵에 50cc씩 채운 후 연속 좌우 혼합시켜 컵에서 유동성이 정지되는 시간으로 하였다.

젤타임 직전에 공시체를 제작하여 수중양생 시킨 후 재령 1일, 3일, 7일, 14일, 28일별로 압축강도 시험을 실시하였다.

### 3.3.2 샌드겔의 압축강도시험

본 실험에서는 실리카졸과 규산나트륨의 각 공시체를 제작한 경우의 호모겔 및 샌드겔의 강도변화의 상관성을 검토함으로써 실제 지반개량 효과의 증진정도를 실험자료로 도출하여 설계 및 시공의 기초자료를 제시하는데 그 목적이 있다. 호모겔의 압축강도 시험은 실제지반주입시험이 아닌 실내시험으로써 재료의 종류별, 배합비별 평가를 목적으로 하고 있고, 샌드겔시험은 실제로 모형지반을 조성하여 주입하는 시험으로 현장시험의 목적으로 볼 수 있다. 호모겔 강도시험용 시편제작은 선행연구등을 통해 많은 경험을 축적하고 있기 때문에 큰 어려움이 없었으나 샌드겔의 경우 국

내 및 국외의 선행연구조사에서 적당한 사례를 찾기가 힘들었다. 따라서 본 연구를 위해서 주입장치를 제작하여 실험을 수행하였다. 샌드겔과 호모겔 시편은 성형 후 약 3분 후에 탈형하여 수중양생을 실시하여 28일 재령 시의 압축강도를 측정하여 그 평균치를 산정하였다.

### 3.3.3 투수시험

각 시료의 투수계수를 비교하기 위하여 직경 50mm, 높이 100mm의 공시체를 제작하여 수중양생을 실시, 재령 28일째 탈형하여 투수시험을 위한 시편을 제작하였다. 본 연구에 사용된 삼축투수시험기는 그림 2와 같으며 시험방법은 ASTM D5084에 의거하여 투수시험을 실시하였다(ASTM, 2003). 3연식의 시험장치로 3개의 시료를 동시에 시험이 가능하며 시험을 통해 얻은 결과의 분석은 시간에 대한 유량과 동수경사 그리고 시료의 단면적을 이용하여 투수계수를 산정할 수 있다.

### 3.3.4 휨강도시험

휨강도시험은 디지털형 만능재료시험기를 이용하여 ASTM C78에 의거하여 휨강도를 측정하였다(ASTM, 2008). 젤타임(Gel-time)은 A액, B액을 각각 200mL 컵에 50cc씩 채운 후 연속 좌우 혼합시켜 컵에서 유동성이 정지되는 시간으로 하였다. 젤타임 직전에 공시체를 제작하여 수중양생 시킨 후 재령 28일차의 휨강도 실험을 실시하였다.

## 4. 시험 결과 및 분석

### 4.1 일축압축강도 특성

#### 4.1.1 완결·급결용 그라우트재의 호모겔 압축강도 특성

각 종류별 그라우트재의 일축압축강도를 구하기 위해 흙

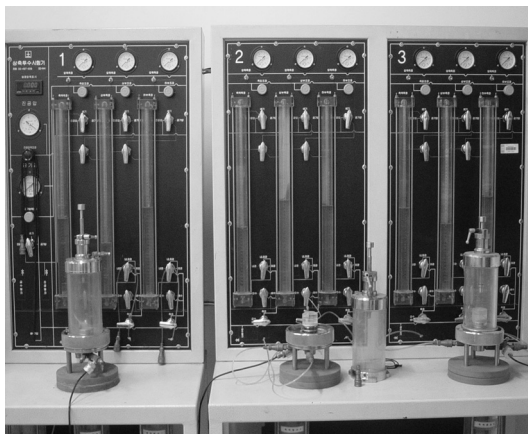


그림 2. 투수시험기 전경

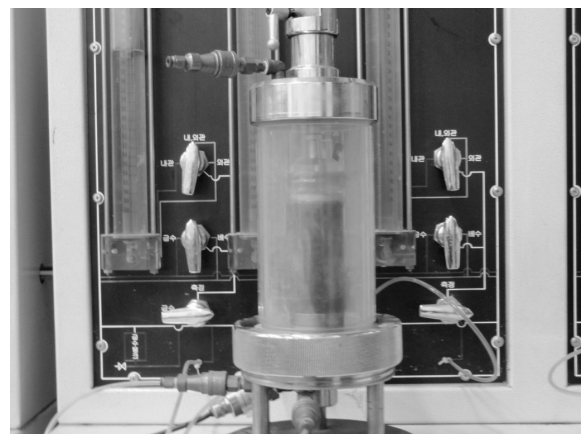


그림 3. 공시체 거치

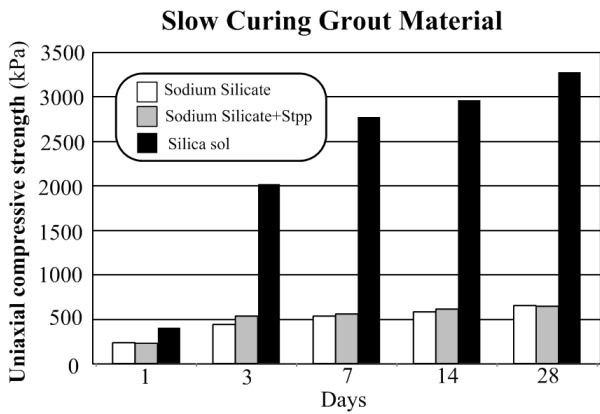


그림 4. 완결용 그라우트재의 호모겔 압축강도

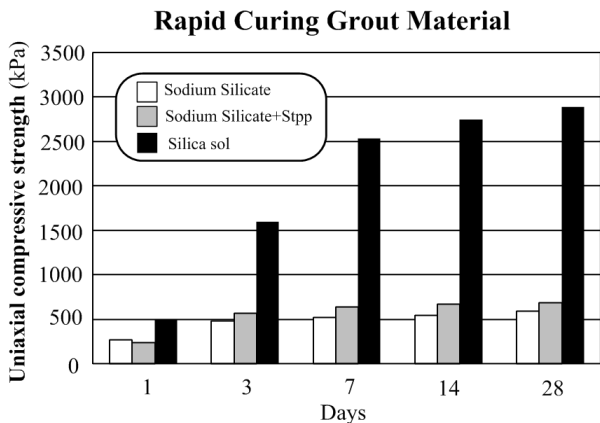


그림 5. 급결용 그라우트재의 호모겔 압축강도

의 일축압축시험방법(ASTM D2166)의 규정을 바탕으로 일축압축시험을 실시하였다(ASTM, 2006). 각 강도는 1일, 3일, 7일, 14일 및 28일 재령에서 재령별로 3개의 시편에 대한 일축압축강도를 측정하여 그 평균치를 측정강도로 결정하였으며 결과는 그림 4와 같다. 시험결과 완결용 그라우트재용 실리카졸은 재령 3일차 부터 강도 발현율이 급격히 커지는 것으로 나타났다. 규산나트륨의 재령 1일과 3일의 초기강도 발현율이 약 2배로 나타났지만 실리카졸의 경우 약 5배 정도 증가하는 현상이 나타났고, 최종 28일 강도의 경우 규산나트륨 그라우트재에 비해 5배 이상의 차이를 보이고 있다. 급결용 그라우트재용 실리카졸은 그림 5와 같이 재령 3일차 부터 강도 발현율이 급격히 커지는 것으로 나타

났다. 규산나트륨의 재령 1일과 3일의 초기강도 발현율이 약 2배로 나타났지만 실리카졸의 경우 3배 이상 나타나는 현상이 나타났고, 최종 28일 강도의 경우 규산나트륨 그라우트재에 비해 4~5배 정도의 차이를 보이고 있어 차수공사 뿐만 아니라 고강도를 요구하는 건설공사의 지반보강을 위해서 적용가능할 것으로 판단된다.

#### 4.1.2 그라우트재의 샌드겔 압축강도 특성

본 실험에서는 실리카졸과 보통포틀랜드시멘트를 사용하여 공시체를 제작한 경우의 호모겔 및 샌드겔의 강도변화의 상관성을 검토함으로써 실제 지반개량의 효과의 증진 정도를 실험실적인 자료로 도출하여 설계 및 시공의 기초자료를 제시하는데 그 목적이 있다. 표 6과 같이 재령 28일의 일축압축강도로 비교 시 실리카졸 그라우트재의 경우 샌드겔이 호모겔에 비해 약 1.3배 정도 강도가 높게 측정되었고, 규산나트륨 그라우트재의 경우 샌드겔이 호모겔에 비해 약 0.82배 정도 작게 측정되었다. 실리카졸의 경우 실제로 지반에 주입되어 사용되었을 경우 고강도를 발휘하는 특성이 있기 때문으로 추정되고, 규산나트륨의 경우는 표준사로 모사된 지반에 주입되었을 경우 고결 전까지 혼탁액 내부의 혼합수가 배수되어 실험실적인 강도비와는 차이가 있을 것으로 판단된다.

#### 4.2 투수시험결과

규산나트륨과 실리카졸의 투수계수를 비교하기 위해 삼축투수시험을 수행하여 동일한 방식으로 투수계수를 측정하였으며 그 결과는 표 7, 8과 같다. 투수시험결과를 분석한 결과 28일 재령 시의 투수계수가 규산나트륨(3호)는  $1.73 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ , 규산나트륨(3호)+STPP는  $1.32 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ , 그라우팅용 실리카졸은  $3.79 \times 10^{-8} \text{m/sec}$ 로 실리카졸의 투수계수가 작게 나타나 차수성면에서 현장에 적용하는데 무리가 없다고 판단되어 차수성을 요구하는 곳에 적용이 가능하다고 판단된다. 공시체 조건별 압축강도와 투수계수를 상호 비교 해본 결과 규산나트륨 그라우트재보다 압축강도가 높게 산정된 실리카졸 그라우트재의 투수계수가 2~4배 정도 낮게 평가되고

표 6. 각 종류별 고결체의 28일차 일축압축강도 특성

구분		공시체의 제원		재령 28일 일축압축강도 (kPa)
		높이(mm)	평균직경(mm)	
실리카졸	호모겔	100	50	3319.5
	샌드겔	100	50	4159.0
규산나트륨	호모겔	100	50	662.9
	샌드겔	100	50	547.2

표 7. 완결용 그라우트재의 투수계수 (단위 : m/sec)

시 료	재령 7일	재령 28일
재 령		
규산나트륨(3호)	$5.54 \times 10^{-8}$	$5.80 \times 10^{-7}$
규산나트륨(3호)+STPP	$3.84 \times 10^{-8}$	$2.58 \times 10^{-8}$
그라우팅용 실리카졸	$6.02 \times 10^{-8}$	$1.34 \times 10^{-8}$

표 8. 급결용 그라우트재의 투수계수 (단위 : m/sec)

시 료	재령 7일	재령 28일
재 령		
규산나트륨(3호)	$1.59 \times 10^{-7}$	$1.73 \times 10^{-7}$
규산나트륨(3호)+STPP	$2.67 \times 10^{-8}$	$1.32 \times 10^{-7}$
그라우팅용 실리카졸	$5.48 \times 10^{-7}$	$3.79 \times 10^{-8}$

표 9. 완·급결용 그라우트재의 휨강도시험결과 (단위 : kPa)

구분	재령	재령 28일
완결용 규산나트륨(3호)		172
완결용 규산나트륨(3호)+STPP		180
완결용 그라우팅용 실리카졸		523
급결용 규산나트륨(3호)		181
완결용 규산나트륨(3호)+STPP		180
완결용 그라우팅용 실리카졸		440

있어 투수계수가 공시체의 압축강도에도 상호연관성이 있음을 알 수 있었다.

### 4.3 휨강도시험결과

각 종류별 완결용 그라우트재의 휨강도를 구하기 위해 콘 크리트의 휨강도시험방법(ASTM C78)의 규정을 바탕으로 휨강도시험을 실시하였다(ASTM, 2008). 각 공시체의 강도는 28일 재령에서 3개의 시편에 대한 휨강도를 측정하여 그 평균치를 측정강도로 결정하였으며 결과는 표 9와 같다. 시험 결과 그라우트재용 실리카졸은 최종 28일 강도로 경우 규산나트륨 그라우트재에 비해 3배 이상의 차이를 보이고 있다. SEM촬영결과와 비교 시 입자간의 응집현상(flocculation)이 큰 실리카졸의 휨강도가 우수하게 평가되고 있고, 압축강도 시험결과와 비교할 경우 완결용과 급결용 모두 압축강도가 높게 평가된 실리카졸 그라우트재의 휨강도가 가장 높게 평가되고 있어 기존의 규산나트륨 그라우트재보다 우수한 재료로 판단할 수 있다.

## 5. 결 론

현탁액형 주입재의 주류를 이루고 있는 규산나트륨 3호는 시멘트와의 결화반응 후에 규산나트륨 3호에 포함되어

있는 알칼리와 지하수가 접촉하면서 실리카겔 및 시멘트 수와정화물 이외의 반응 및 미반응 생성물을 수중에 용탈되게 하는 성질이 있으며, 이로 인해 항구 그라우팅용으로 적용 시 문제점이 있는 것으로 밝혀졌다. 이러한 점을 개선하기 위해 그라우트재용 실리카졸을 개발하여 공학적 특성을 파악하기 위해 일련의 실험들을 수행하여 규산나트륨 3호와 비교, 분석한 결론은 다음과 같다.

- (1) 호모젤의 압축강도 시험결과 그라우트재용 실리카졸은 재령 3일차 부터 강도 발현율이 급격히 커지는 것으로 나타났다. 규산나트륨의 재령 1일과 3일의 초기강도 발현율이 약 두배로 나타났지만 실리카졸의 경우 약 5배 정도 증가하는 현상이 나타났고, 최종 28일 강도로 경우 규산나트륨 그라우트재에 비해 4배에서 최대 5배 이상의 차이를 보이고 있어 차수공사 뿐만 아니라 고강도를 요구하는 건설공사의 지반보강을 위해서 적용 가능할 것이다.
- (2) 샌드젤과 호모젤의 재령 28일의 일축압축강도로 비교 시 실리카졸 그라우트재의 경우 샌드젤이 호모젤에 비해 약 1.3배 정도 강도가 높게 측정되었고, 규산나트륨 그라우트재의 경우 샌드젤이 호모젤에 비해 약 0.82배 정도 작게 측정되었다. 실리카졸의 경우 실제로 지반에 주입되어 사용되었을 경우 고강도를 발휘하는 특성이 있기 때문으로 추정된다.
- (3) 투수시험 결과 28일 재령 시의 투수계수가 규산나트륨(3호)는  $1.73 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ , 규산나트륨(3호)+STPP는  $1.32 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ , 그라우팅용 실리카졸은  $3.79 \times 10^{-8} \text{m/sec}$ 로 실리카졸의 투수계수가 규산나트륨보다 작게 나타나 차수성 면에서 효과적이므로 차수성을 요구하는 현장에 적용이 가능하다고 판단된다.
- (4) 휨강도시험결과 각 공시체의 강도는 28일 재령에서 3개의 시편에 대한 휨강도를 측정하여 그 평균치를 측정강도로 결정하였으며 시험결과 그라우트재용 실리카졸은 최종 28일 강도로 경우 규산나트륨 그라우트재에 비해 3배 이상 우수한 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. 양형철, 천병식(2006), STPP가 규산계 시멘트 주입재의 강도에 미치는 영향, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol. 7, No. 4, pp. 25~34.
2. 천병식, 정덕교, 류동성(1996), 지반개량용 실리카졸계 약액의 성질 및 내구특성에 관한 연구, *연약지반처리위원회 봄 학술세미나*, 한국지반공학회, pp. 30~37.
3. ASTM C 78(2008), Standard Test Method for Flexural Strength

- of Concrete(Using Simple Beam with Third-Point Loading), pp. 1~4.
4. ASTM D 2166(2006), *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, pp. 1~6.
  5. ASTM D 5084(2003), *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials using a Flexible Wall Permeameter*, pp. 1~23.
  6. Mitchell, J. K.(1993), *Fundamentals of Soil Behaviour*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 90~103.
  7. Shi, B., Wu, Z, Inyang, H., Chen, J. and Wang, B.(1999), Preparation of Soil Specimens for SEM Analysis using Freeze-cut-drying, *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, Vol. 58, No. 1, pp. 1~7.

(접수일: 2010. 6. 16 심사일: 2010. 7. 19 심사완료일: 2010. 8. 16)