

실리카졸 약액의 환경영향성 검토 및 내구증진방안

Environmental Impact Review and Improvement of Durability of Silicasol-cement Grout Material

이 병 호¹⁾ · 김 영 훈¹⁾ · 천 병 식[†]

Lee, Byungho · Kim, Younghun · Chun, Byungsik

ABSTRACT : This study was made on the fact that the environmental impact and durability of the recently developed alkali silicasol chemical grout material. The grout material used for this study was designed to understand its environmental impact and durability through the SEM, chemical resistance test, leaching test, permeability test. In order to compare with the engineering characteristics regarding alkali silicasol grout material and sodium silicate grout material. As a result of SEM, the surface and internal tissues of alkali silicasol grout material could be identified to be denser than those of sodium silicate. As a result of leaching test the adaptability was identified as grout material as it had proved to be an ecological material owing to the total amount of the element to be leached being extremely little. As a result of permeability test it is judged that it is possible to apply the silicasol to the site in the place requiring the water cut-off as the silicasol.

Keywords : Environmental impact, Silicasol, SEM, Chemical resistance test, Leaching test

요 지 : 본 연구는 최근 개발된 실리카졸 그라우팅제의 환경영향성 및 내구성을 규명한 것으로서 연구에 사용된 그라우트제는 3차원 겔 형성체인 실리카졸 그라우팅제와 규산나트륨 그라우팅제에 대한 공학적 특성을 비교하기 위하여 전자현미경 촬영, 내화학성시험, 용탈시험, 투수시험 등을 통해 친환경성과 내구성을 규명하고자 하였다. 전자현미경 촬영 결과 실리카졸 그라우팅제의 표면 및 내부조직이 규산나트륨보다 치밀함을 확인할 수 있었다. 용탈시험 결과 용탈되는 원소의 총량도 극히 작아 친환경적인 재료임을 입증되어 지반주입재로서 적용성을 확인하였다. 투수시험 결과 실리카졸이 차수성면에서 현장에 적용하는데 무리가 없다고 판단되어 차수성을 요구하는 현장에 적용이 가능하다고 판단된다.

주요어 : 환경영향성, 실리카졸, 전자현미경 촬영, 내화학성시험, 용탈시험

1. 연구배경 및 목적

최근 건설현장에서 물유리계 공법의 현장적용 시 고결체의 결과물은 내구성, 강도, 용탈에 대한 평가에 있어서 차수 목적으로는 적용이 가능하나 영구적인 지반보강 및 차수를 위한 공법으로는 그 한계성이 지적되는 바, 실리카졸을 주원료로 하는 재료를 사용하여 시공한 후 내구성 및 강도가 우수하고 주입성이 탁월한 동시에 주입재의 용탈현상이 발생하지 않아 친환경적이고 영구적인 차수 및 보강에 적합한 환경친화적 공법에 대한 연구를 수행하게 되었다.

현재까지 차수 및 지반안정을 위해 시행된 규산나트륨을 사용한 기존의 알칼리성 물유리계 약액주입공법은 주입 후 시간 경과에 따라 자유수 및 흡착수 등 지하수에 의해 주입고결체로부터 알칼리성분의 용탈이 진행되어 결국에는 주입재의 대부분이 유실·소멸되는 등 내구성이 약한 문제점이 있다. 이로

인한 지하수 오염가능성도 있어 공법의 안전성 및 환경공해성에 있어서 의문이 제기되어 왔다. 약액주입 공법의 주재료의 하나인 물유리를 사용하는 고결체는 그 내구성, 강도, 용탈등의 문제로 인하여 가시설 차수의 목적으로는 사용이 가능하나 영구적인 지반 보강 및 차수를 위한 공법으로는 본질적인 문제점을 가지고 있다는 선행 연구결과도 있다(천병식, 1997). 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 약액주입공법이 있다.

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 말한다. 이 실리카

1) 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

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

졸 용액은 일반 물유리 용액의 경화때와는 고결될 때 고결물의 구조가 보다 견고한 고분자성 연결구조가 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 오염 등 환경공해성을 야기하지 않는 큰 장점을 지닌다(천병식 등, 1996).

따라서 본 연구에서는 실리카졸계 약액주입공법의 효과를 규명하기 위한 연구로써 실리카졸계 약액의 환경영향성 검토 및 내구특성을 상세히 규명하고자 새로운 화학조성을 조사하고 이로부터 생성되는 주입고결체의 내화학성 시험, 용탈시험, 투수시험 등의 시험자료를 토대로 그라우팅용 실리카졸의 공학적 특성을 분석, 검토하였다.

2. 실리카졸 약액의 개발 및 겔화원리

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 유산 등의 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 산성영역으로 조정하면 실리카졸을 형성하며 그 자체가 늦겨

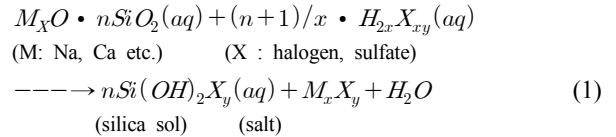
표 1. 규산나트륨(3호), 그라우팅용 실리카졸(SSL-30) 재료의 화학성분

구분	그라우팅용 실리카졸 (SSL-30)	그라우팅용 규산나트륨 (3호)
비 중	1.220	1.384
이산화규소(SiO ₂)(%)	31.5	27.2
산화나트륨(Na ₂ 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. B액 재료(보통 포틀랜드시멘트)의 화학성분 및 물리적 특성

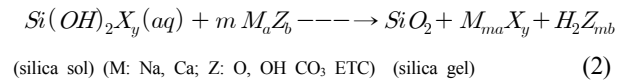
종 류	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ + CaO	SO ₃	비 중	분말도(cm ² /g)	응결(시분)	
						초결(분)	종결(분)
보통 포틀랜드시멘트 (OPC)	20.4	71.5	1.5	3.15	3170	250	410

나 빠르게 겔화되는 성질을 지니고 있다. 이것을 주입목적에 적합한 Gel-time으로 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 규산염기류 물질과 특정 무기산을 반응시켜 얻는다.



이때 생성되는 실리카졸 콜로이드 용액을 안정화하고 열반응에 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_aZ_b로 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 소듐 트리폴리포스페이트(Sodium Tripolyphosphate, STPP)를 사용하였다.

3.2 시험체 제작

실리카졸과 규산나트륨은 약액주입재로서 순수용액형 주

입재 및 시멘트를 공용하는 현탁액형 주입재가 가능하고 본 연구에서는 현탁액형 주입재를 제조하여 그의 특성을 검토하였고 또한 겔타임이 빠른 급결형과 겔타임이 늦은 완결형의 표준배합을 결정하였다. 2.0Shot 주입시스템(2액 2공정)에 적용 가능한 표준배합비를 선정하여 실리카졸과 규산나트륨의 공시체를 제작하였다(표 3, 4). 첨가제인 STPP는 시멘트의 수화지연제로써 과거 규산나트륨 그라우팅제 시공시 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, 양생온도는 상온 20 ± 5°C로 항온 수조에서 습윤 양생하였다.

3.3 시험방법

3.3.1 내화확성시험

내화확성평가시험은 내구성시험 장치에 자연해수의 6배(25g/L)의 Cl₂용액 및 자연해수의 10배(25g/L)의 SO₄ 용액에 직경 50mm × 높이 100mm의 공시체를 제작한 뒤 내구성시험장치에 침적시키고 3일, 1주, 2주, 3주, 4주의 길이변화율을 측정하였다(천병식, 2005).

3.3.2 용탈시험

용탈시험은 탈이온수 중에 체적비 1:10으로 하여 함침시킨 상태에서 시행하여 지하수를 오염시킬 수 있는 중금속류를 대상으로 환경유해성 평가를 실시(Johnson, 2003)하였다. 시료는 규산나트륨, 규산나트륨+STPP, 실리카졸로 구분하여

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	보통 포틀랜드시멘트(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	보통 포틀랜드시멘트(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

각각 제작한 뒤 대기 중에 양생시킨 후 탈이온수에 옮겨 회분 식 또는 연속식으로 시간변화에 따른 용탈양을 측정하였으며, 용탈액에 함유된 각종 금속성분의 농도를 측정하였다.

3.3.3 투수시험

각 시료의 투수계수를 비교하기 위하여 직경 50mm × 높이 100mm의 공시체를 제작하여 수중양생을 실시, 재령 28 일째 탈형하여 투수시험을 위한 시편을 제작하였다. 본 연구에 사용된 삼축투수시험기는 그림 2와 같으며 시험방법은 ASTM D 5084에 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

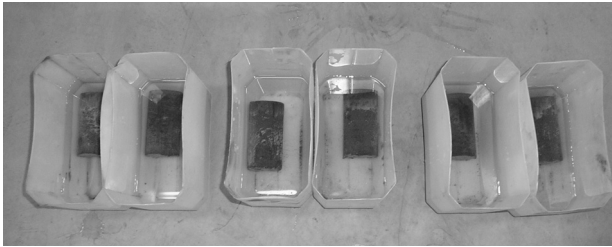


그림 1. 용탈시험 전경

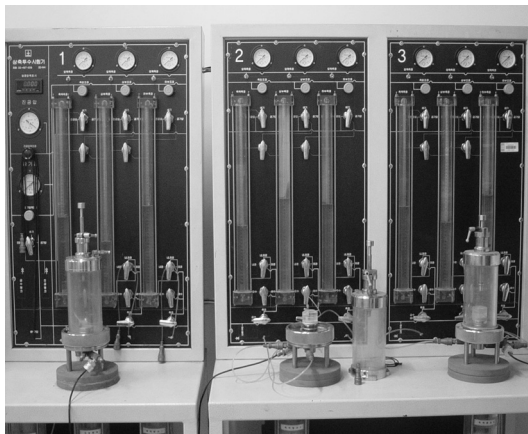


그림 2. 투수시험기 전경

산정할 수 있다.

4. 시험 결과 및 분석

4.1 SEM 촬영결과

SEM 시험결과는 준비된 시료의 질에 큰 영향을 받는다. 시험을 위한 시료를 준비하기 전에 간극수는 제거되어야 양질의 촬영결과를 얻을 수 있다. 그러나, 이 과정은 시료 구조의 교란 없이 처리하기란 매우 어렵다. 아직까지도 시료 종류에 따라 가장 적합한 시료 준비 방법이 무엇이나에 대한 논란도 계속되고 있다. Mitchell(1993)은 매우 단단한 흙의 경우, 공기건조 방법이 수축을 적게 일으키므로 적합한 방법이라고 하였다. 그러나, 공기건조의 경우 간극수를 전부 제거하는데 상당한 시간이 소요되기 때문에 입자의 재배열이 일어날 가능성이 있다. Shi 등(1999)은 함수비가 큰 시료의 경우 공기건조(air drying)나 노건조(oven drying)방법 모두 수축이 크게 발생하여 흙의 미세구조에 큰 변화가 일어날 수 있다고 하였다. 본 연구에서는 공시체를 24시간에 걸쳐 공기건조시킨 후 강도의 저하로 촬영 중 시료의 파괴를 방지하기 위해 은코팅으로 표면처리 후 촬영을 진행하였다.

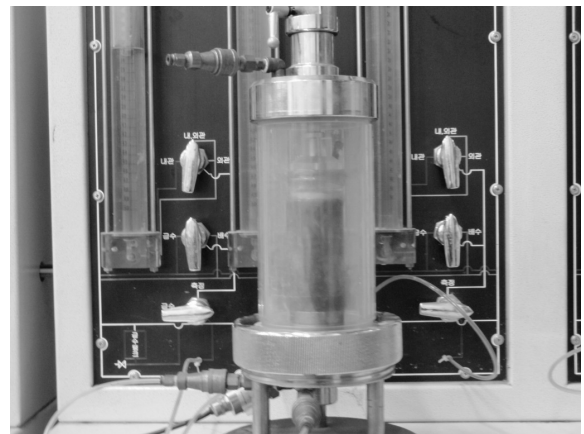
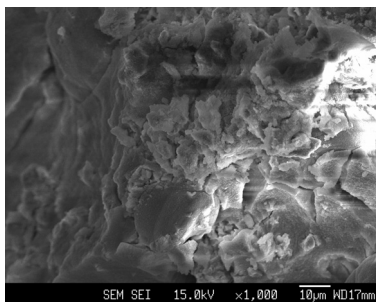
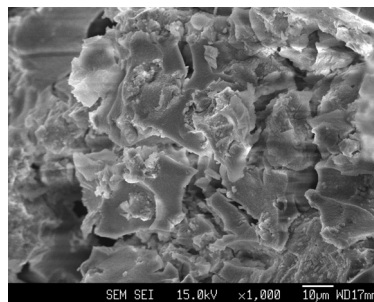


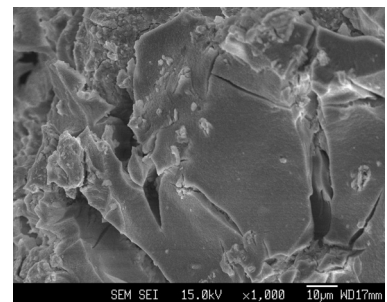
그림 3. 공시체 거치



(a) 규산나트륨



(b) 규산나트륨+STPP



(c) 그라우팅용 실리카졸

그림 4. SEM 촬영결과

규산나트륨 3호와 실리카졸의 Homo-gel의 형상을 파악하기 위해 전자현미경(SEM) 촬영결과 그림 4와 같다. 실리카졸+시멘트, 규산나트륨+시멘트로 혼합된 각각의 혼합액의 전자현미경 촬영을 시행한 결과 Homo-gel이 결정성의 구조를 가진 겔로 파악되었고 항구성 그라우팅재로서 적용될 수 있음을 확인하였다. 실리카졸 그라우팅제의 경우 입자간의 응집현상(flocculation)이 규산나트륨 그라우팅제보다 증가됨을 알 수 있었다. 그러나, 규산나트륨 그라우팅제와 STPP를 첨가한 그라우팅제의 경우 SEM 판독결과 표면조직의 차이를 구분하기 어려웠다.

4.2 내화학성 시험결과

내화학성 평가시험은 내구성시험 장치에 자연해수의 6배의 MgCl₂용액 및 자연해수의 10배의 MgSO₄용액에 지름 50mm × 높이 100mm 크기의 원통형 시편을 내구성 시험장치에 침적시키고 3일, 1주, 3주, 4주의 길이변화율을 측정하였다(천병식, 2005).

길이변화율 측정 시험결과는 표 5와 같으며 염화마그네슘 수용액(자연해수 6배)에 침적시킨 경우 경우 실리카졸의 수축량이 규산나트륨에 비해 최대 9배까지 작게 나오는 현상을

나타내고 있고, 황산마그네슘 수용액(자연해수 10배)의 경우에는 수축량이 최대 10배까지 작게 나오는 현상을 나타내며 규산나트륨 공시체의 경우 7일 이후에는 용탈로 인해 길이측정이 불가능했다. 이 결과들로부터 실리카졸 그라우팅제가 규산나트륨에 비해 내구성 면에서 우수하고 강도발현이 크기 때문에 길이변화량이 작다는 것을 알 수 있었다.

4.3 용탈 시험결과

용탈시험은 증류수에 35시간 동안 침적시킨 용탈액에 대해 화학성분분석을 실시하여 강도변화에 미칠 수 있는 주성분의 용탈 정도(Si 측정) 및 환경오염과 관련된 유해중금속(Cr⁶⁺, Cd, Pb 측정)의 용출 정도를 측정하였다. 본 실험에서와 같이 짧은 시간 동안에는 주로 표면상에서의 용탈정도만을 규명할 수 있을 것으로 판단(Krizek, 2000)하여 용탈액 중의 시간 변화에 따른 각 성분들의 용해정도를 공시체의 종류에 따라 구분하여 결과를 나타내었다.

표 6과 같이 화학성분 분석결과 카드뮴(Cd)은 검출되지 않았고, 납(Pb)은 환경부수질기준인 0.05mg/L에 비해 미소한 양이 검출되었다. 또한, 6가크롬(Cr⁶⁺)은 환경부 수질기준인 0.05mg/L을 넘지 않았고 규소(Si)는 실리카졸 용탈액

표 5. 내화학성시험결과(길이변화 측정)

침전용액		재령	길이변화(10 ⁻² mm)			
			3일	1주	2주	3주
25g/L MgCl ₂ (자연해수 6배)	그라우팅제용 실리카졸(완결용)		10	25	23	28
	그라우팅제용 실리카졸(급결용)		15	30	58	72
	규산나트륨(완결용)		102	152	145	187
	규산나트륨(급결용)		95	132	178	201
	규산나트륨+STPP(완결용)		50	51	87	120
	규산나트륨+STPP(급결용)		112	121	157	150
25g/L MgSO ₄ (자연해수 10배)	그라우팅제용 실리카졸(완결용)		18	30	32	32
	그라우팅제용 실리카졸(급결용)		25	55	78	90
	규산나트륨(완결용)		254	측정불가		
	규산나트륨(급결용)		327			
	규산나트륨+STPP(완결용)		128	150	278	350
	규산나트륨+STPP(급결용)		180	225	245	320

표 6. 화학성분분석 결과(용탈성분 및 유해중금속 성분)

시료명	분석항목	측정결과			
		6가 크롬(Cr ⁶⁺)	규소(Si)	카드뮴(Cd)	납(Pb)
규산나트륨(완결용)		0.0031	18.652	불검출	0.005
규산나트륨(급결용)		0.0065	14.526	불검출	0.006
규산나트륨+STPP(완결용)		0.0085	100.32	불검출	0.008
규산나트륨+STPP(급결용)		0.0054	25.65	불검출	0.003
그라우팅제용 실리카졸(완결용)		0.0041	1.035	불검출	0.003
그라우팅제용 실리카졸(급결용)		0.0025	5.254	불검출	0.002

표 7. 완결용 그라우팅재의 투수계수 (단위 : cm/sec)

시료	재령 7일	재령 28일
규산나트륨(3호)	5.54×10^{-6}	5.80×10^{-5}
규산나트륨(3호)+STPP	3.84×10^{-6}	2.58×10^{-6}
그라우팅용 실리카졸	6.02×10^{-6}	1.34×10^{-6}

표 8. 급결용 그라우팅재의 투수계수 (단위 : cm/sec)

시료	재령 7일	재령 28일
규산나트륨(3호)	1.59×10^{-5}	1.73×10^{-5}
규산나트륨(3호)+STPP	2.67×10^{-6}	1.32×10^{-5}
그라우팅용 실리카졸	5.48×10^{-5}	3.79×10^{-6}

에 비해 규산나트륨 용탈액에서 크게 검출되었는데, 이는 실리카졸 용탈액이 규산나트륨 용탈액보다 친환경적임을 알 수 있다. 납(Pb)의 경우에는 실리카졸이 규산나트륨에 비해 1.5~4배 가량 적게 검출된 결과를 볼 수 있다.

4.4 투수 시험결과

규산나트륨과 실리카졸의 투수계수를 비교하기 위해 삼축투수시험을 수행하여 동일한 방식으로 투수계수를 측정하였으며 그 결과는 표 7 및 8과 같다. 투수시험결과를 분석한 결과 28일 재령 시의 투수계수가 규산나트륨(3호)는 1.73×10^{-5} cm/sec, 규산나트륨(3호)+STPP는 1.32×10^{-5} cm/sec, 그라우팅용 실리카졸은 3.79×10^{-6} cm/sec로 실리카졸의 투수계수가 작게 나타나 차수성면에서 현장에 적용하는데 무리가 없다고 판단되어 차수성을 요구하는 곳에 적용이 가능하다고 판단된다. 공시체 조건별 압축강도와 투수계수를 상호비교 해본 결과 규산나트륨 그라우팅제보다 압축강도가 높게 산정된 실리카졸 그라우팅제의 투수계수가 2~4배 정도 낮게 평가되고 있어 투수계수가 공시체의 압축강도에도 상호연관성이 있음을 알 수 있었다.

5. 결론 및 제언

현탁액형 주입재의 주류를 이루고 있는 규산나트륨 3호는 시멘트와의 결화반응 후에 규산나트륨 3호에 포함되어 있는 알칼리와 지하수가 접촉하면서 실리카겔 및 시멘트 수와경화물 이외의 반응 및 미반응 생성물을 수중에 용탈되게 하는 성질이 있으며, 이로 인해 항구 그라우팅용으로 적용하는데에 문제점이 있는 것으로 밝혀졌다. 이러한 점을 개선하기 위해 그라우팅제용 실리카졸을 개발하여 공학적 특성을 파악하기 위해 일련의 실험들을 수행하여 규산나트륨 3호와 비교, 분석하였다.

- (1) 전자현미경(SEM) 촬영결과 실리카졸+시멘트, 규산나트륨+시멘트로 혼합된 각각의 혼탁액 모두 Homo-gel이 결정성의 구조를 가진 겔로 파악되었고 항구성 그라우팅재로써 적용될 수 있음을 확인하였다.
- (2) 내화학성시험(길이변화율시험)결과 실리카졸의 수축량이 규산나트륨에 비해 최대 10배까지 작게 나오는 현상을 나타내며 규산나트륨 공시체의 경우 7일 이후에는 용탈로 인해 길이측정이 불가능했다. 이 결과들로부터 실리카졸 그라우팅제가 규산나트륨에 비해 내구성 면에서 우수하고 강도발현이 크기 때문에 길이변화량이 작다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 환경오염과 관련된 유해중금속(Cr⁶⁺, Cd, Pb 측정)의 용출 정도를 측정하기 위해 용탈시험을 수행하였고, 화학 성분 분석결과 카드뮴(Cd)은 검출되지 않았으며, 납(Pb), 6가크롬(Cr⁶⁺), 규소(Si)는 실리카졸 용탈액이 규산나트륨에 비해 1.5~4배 가량 적게 검출된 결과를 볼 수 있다.
- (4) 투수시험 결과 28일 재령 시의 투수계수가 규산나트륨(3호)는 1.73×10^{-5} , 규산나트륨(3호)+STPP는 1.32×10^{-5} , 그라우팅용 실리카졸은 3.79×10^{-6} 로 실리카졸의 투수계수가 규산나트륨보다 작게 나타나 차수성면에서 현장에 적용하는데 무리가 없다고 판단되어 차수성을 요구하는 현장에 적용이 가능하다고 판단된다.

참고 문헌

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. 천병식(1997), *지반보강용 마이크로시멘트 및 실리카졸의 실용화 연구*, 95-0084, 건설교통부, pp. 152~186.
4. 천병식(2005), *최신 지반주입-이론과 실제*, 원기술, pp. 169~170.
5. ASTM(2003), Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter, ASTM D 5084, pp. 1~23.
6. Johnson, L. F.(2003), *Grouting and Ground Treatment*, ASCE, pp. 100~116.
7. Krizek, R. J.(2000), *Advances in Grouting and Ground Modification*, ASCE, pp. 155~172.
8. Mitchell, J. K. (1993). *Fundamentals of soil Behaviour*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 90~103.
9. 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. 11. 18)