

알칼리성 실리카졸 지반주입재의 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Alkali Silica Sol Grouting Material

조 영 훈¹⁾ · 김 찬 기²⁾ · 천 병 식[†]

Cho, Younghun · Kim, Chanki · Chun, Byungsik

ABSTRACT : For the purpose of cut off and ground stabilization, water glass chemical grouting method using sodium silicate has problems of weakening durability and ground water pollution because leaching was conducted when the homogel is exposed to the ground water as time elapses. The purpose of this study is to identify the effect of alkali silica sol ground injection materials, it was compared with the sodium silicate ground injection materials using water glasses. For sodium silicate and alkali silica sol by mixing each case is divided into four different specimens were made and tested. The characteristic of alkali silica sol ground injection material was analyzed by unconfined compression test and environmental impact statement of ordinary portland cement and blast furnace slag cement. Alkali silica sol specimens were made mixing A-solution and B-solution in the proportion of one on one. Through this study, alkali silica sol ground injection mixing blast furnace slag cement has excellent strength and environment-friendly.

Keywords : Alkali silica sol, Environmental impact test, pH test, Sodium silicate, Unconfined compression strength test

요 지 : 차수 및 지반안정을 목적으로 규산나트륨을 사용한 기존의 알칼리성 물유리계 약액주입공법은 주입 후 시간경과에 따라 지하수에 의해 주입고결체로부터 알칼리성분의 용탈이 진행되어 내구성이 약해지고 지하수를 오염시키는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 규산나트륨 주입재의 문제점을 보완하기 위해 개발된 알칼리성 실리카졸 지반주입재의 효과를 규명하는 데에 그 목적이 있다. 연구비교대상으로는 규산나트륨 주입재와 알칼리성 실리카졸 주입재로 하였다. 규산나트륨과 알칼리성 실리카졸 용액에 대하여 보통 포틀랜드 시멘트와 고로 슬래그 시멘트를 각각 배합하여 총 4가지의 Case로 나누어 공시체를 제작하여 시험을 실시하였다. 재령에 따른 일축압축강도 시험을 실시하였고, 환경영향성평가를 위하여 어독성시험과 pH시험을 실시하여 비교 및 분석을 하였다. 본 연구를 통해 고로 슬래그 시멘트를 배합한 알칼리성 실리카졸 지반주입재가 우수한 강도와 친환경성을 가지고 있는 것으로 나타났다.

주요어 : 알칼리성 실리카졸, 어독성 시험, pH 시험, 규산나트륨, 일축압축강도 시험

1. 서 론

현재 고속철도, 지하철, 고속도로, 항만, 공항, 수력·화력·원자력 발전소, 공업단지 조성 등 수많은 대규모 국가 산업 시설물 건설공사가 진행되고 있으나 공사가 진행되고 있는 동안에도 연약지반에 대한 안전사고가 빈번히 발생하고 있다. 또한, 구조물이 완성된 후에 발생하는 구조물의 부등침하, 균열, 누수 등의 원인도 기초지반의 부등 침하가 직접적 원인인 경우가 많다(천병식, 1994). 이와 같은 건설공사 자체의 안전시공과 주변지반침하 및 인접 구조물의 균열, 부등침하, 붕괴 등으로부터의 안전을 위해 차수 및 지반강도 증대를 위해 주입공법을 적용하였다(한국지반공학회, 2005).

차수 및 지반안정을 목적으로 규산나트륨을 사용한 기존의 물유리계 약액주입공법은 주입 후 시간경과에 따라 자유수 및 흡착수 등 지하수에 의해 주입고결체로부터 알칼리성

분의 용탈이 진행되어 결국에는 주입재의 대부분이 유실·소멸되는 등 내구성이 약한 문제점이 있다(양형철 등, 2006; 정종주, 1993). 이로 인한 지하수 오염의 가능성도 있어 공법의 안전성 및 환경공해성에 있어서 의문이 제기되어 왔다(島田 등, 1989; 천병식, 1998; 米倉 등, 2000; 천병식 등, 2001).

이와 같은 물유리계 약액주입공법의 단점을 보완하기 위해 개발된 공법 중의 하나로서 최근 알칼리성 실리카졸 약액주입공법을 개발하였다. 알칼리성 실리카졸 용액은 일반 물유리 용액의 경화 때와는 달리, 고결 시 고결물의 구조가 보다 견고한 고분자성 연결구조가 된다. 실리카졸은 알칼리의 용탈이 거의 없을 뿐 아니라 경화가 진행 중이거나 고결 후에도 다량의 유수에 의해서도 희석되거나 유실되지 않는 무공해성의 고결체가 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 실리카졸을 주입재료로 사용할 경우 주입효과는 반영구적으로 지속되

1) 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정

2) 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

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

어 타공법과 비교하여 높은 신뢰도를 나타낼 뿐 만 아니라 알칼리 성분의 용탈에 의한 지하수 오염과 같은 환경공해성을 야기하지 않는 큰 장점을 지닌다(천병식 등, 1996).

본 연구에서는 최근 개발된 알칼리성 실리카졸 약액주입 공법의 효과를 규명하기 위한 목적으로 보통 포트랜드 시멘트와 고로 슬래그 시멘트를 사용하여 규산나트륨 주입재를 대상으로 비교·분석하였다. 이를 위해 주입고결체에 대한 일축압축강도 시험과 환경영향성평가를 실시하여 알칼리성 실리카졸 약액주입재의 특성을 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 알칼리성 실리카졸 주입재의 정의 및 특성

알칼리성 실리카졸(silica sol) 또는 콜로이드실리카(colloid silica)란 음(-)전하를 띠는 무정질 실리카(SiO_2) 미립자가 수중에서 콜로이드 상태를 이룬 것을 말한다. 외관상 투명하거나 유백색을 띄고 있고, 그림 1과 같이 실리카졸의 실리카 미립자는 일반적으로 구형의 구조를 이루고 있다.

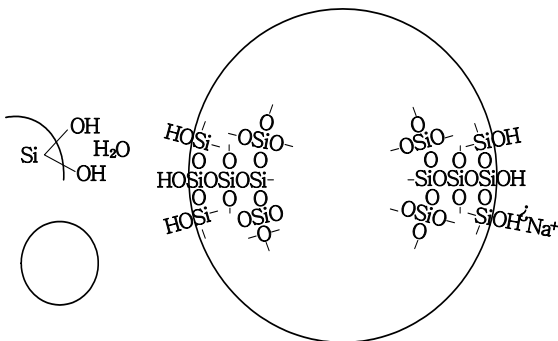


그림 1. 실리카졸 콜로이드 과립의 구조(영일화성, 2010)

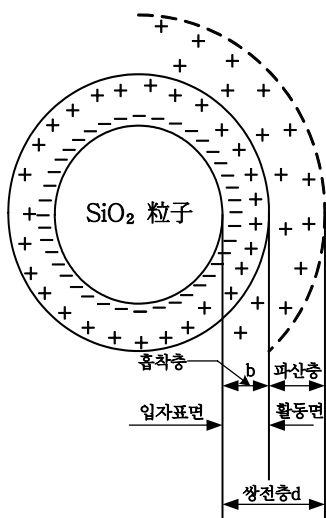


그림 2. 실리카졸의 이중전기층(쌍전층) 구조(영일화성, 2010)

실리카졸의 실리카 입자는 그림 2와 같이 구형이고 $-SiOH$ 그룹과 $-OH$ 이온이 입자표면에 존재하며, 알칼리 이온에 의해 이중전기층 구조를 갖게 된다. 같은 음전하를 띤 입자들 사이의 반발력 때문에 실리카졸은 안정된 상태를 유지할 수 있다. 만약 이러한 전기화학적 균형이 깨어지면 입자들이 서로 얽히게 되고 점도가 상승하여 겔화, 응집 등의 반응이 일어날 것이다.

일반적인 실리카졸은 그림 3과 같은 pH에 대한 안정성 특성을 보인다. 실리카졸의 농도가 높을수록 입자크기가 작을수록 pH 변화에 따른 효과가 더욱 크게 나타난다.

실리카졸에 소듐클로라이드나 소듐설페이트와 같은 금속염을 첨가하면 실리카 입자 표면전하의 전기적 균형을 깨뜨려 입자끼리 응집이 일어나며 겔이 된다. 이러한 겔화의 정도는 일정하지 않고 실리카졸의 종류, 농도, 온도 등에 따라 다르다. 일가의 염은 천천히 반응하지만 알루미늄 염과 같은 다가의 염은 pH 9 이상에서 빨리 반응하게 되고 pH를 낮추면 알루미늄설페이트나 마그네슘설페이트의 효과도 감소한다. 알코올과 아세톤, 기타 극성 솔벤트는 실리카졸과 혼합이 가능하나 그 한계가 있고, 그 한계를 넘으면 겔화가 일어난다. 일반적으로 실리카졸은 양이온과 음이온 계면활성제와 모두 상용성이 있다. 그러나 계면활성제의 불순물과 활성제의 성분에 따라 상용성이 없을 수도 있다.

실리카졸은 같은 pH와 전자를 갖는 에멀전 수지와 수용해성 수지와 상용성이 있으나 때때로 사용된 유화제에 따라 겔화되거나 분리가 될 수 있다. 수성 실리카졸은 입자크기, 알칼리 함량, pH, 안정제의 종류 등에 따라 분류될 수 있다.

현재 알칼리성 실리카졸의 주요용도로는 제지 및 코팅의 첨가제, 섬유산업의 조제, 유리섬유가공, 요업재료, 내화 제품 및 절연물질, 단열재의 결합제, 촉매제조의 원료, 반도체 웨이퍼 연마제, 토양경화를 위한 화학적 그라우팅 주입약제

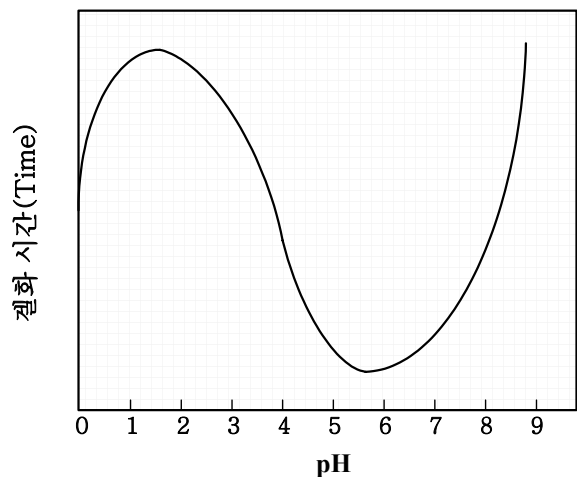


그림 3. 실리카졸의 pH와 안정성의 관계(영일화성, 2010)

등이 있다(영일화성, 2010).

2.2 고로 슬래그 시멘트

2.2.1 고로 슬래그 시멘트의 특성

고로 슬래그 시멘트는 포틀랜드 시멘트 클링커에 제철소의 용광로에서 선철을 제조할 때 부산물로 얻어지는 슬래그(slag)를 섞어서 적당량의 석고를 넣어 미분쇄한 것이다. 고로에서 선철을 제조할 때 생기는 슬래그는 서서히 냉각하면 결정질의 단단한 괴(塊)상으로 되어 수경성을 나타내지만, 수증 또는 공기 중에서 급랭하면 유리질의 가벼운 다공질의 입(粒)상으로 되어 잠재수경성(潛在水硬性)을 가지게 된다. 이 급랭 슬래그를 수재(水滓)라고 한다(박승범, 2005).

고로 슬래그 시멘트에 이용되는 고로 슬래그는 수재이고, 그 화학성분으로서 염기도[鹽基度, $(CaO + MgO + Al_2O_3 / SiO_2)$]가 크며 유리질량이 높을수록 잠재수경성이 우수하다. 현재 한국산업표준(2006)에서는 화학 성분, 물리 성능에 따라 다음의 표 1, 표 2와 같이 분류하고 있다(KS L 5210).

슬래그가 많이 함유됨에 따라 조기강도 및 수화발열량이 적은 반면, 장기강도는 약간 커서 매스 콘크리트에 사용된다. 또한 고로 슬래그 시멘트 경화체는 유리석회 및 C_3A 의 수화물이 적기 때문에 해수 및 공장폐하수 등에 대한 내화학적 저항성이 크고 건조수축은 약간 크나 내열성과 수밀성이 좋아서 주로 댐, 하천, 항만 등의 공사에 널리 사용되고 있다.

고로 슬래그 시멘트와 보통 포틀랜드 시멘트의 재령에 따른 압축강도의 예는 그림 4와 같다.

2.2.2 고로 슬래그 시멘트의 수화메카니즘

고로 슬래그를 pH 12 이상의 수산화칼슘 포화 수용액에 놓아두면 알루미늄 규산염의 쇠상 결합이 절단되어 수화가 시작되고, 천천히 칼슘이온이 소비된다. 그러나 $Ca(OH)_2$ 의 보급이 중단되고 어느 농도 이하의 알칼리량이 되면 반응은 정지한다. 슬래그가 물과 접촉하면 입자표면에 치밀한 불투성의 산성피막이 생기기 때문에 반응을 이어가기 위해서는 강알칼리에 의한 피막의 파괴가 필요하다. 이와 같은 자극작용에는 NaOH, Na_2SiO_3 , KOH나 $Ca(OH)_2 + CaSO_4$ 의 첨가도 유효하다. 자극작용에 의해 슬래그 표면으로부터 용해반

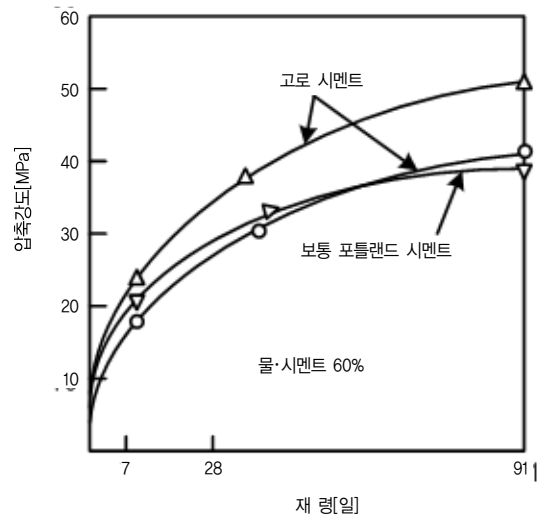


그림 4. 고로 슬래그 시멘트 콘크리트의 재령과 압축강도의 관계(박승범, 2005)

표 1. 고로 슬래그 시멘트의 화학 성분(KS L 5210)

항목	종류	1종	2종	3종
고로 슬래그의 함유량 질량 %		5 초과 30 이하	30 초과 60 이하	60 초과 70 이하
삼산화황(SO_3) %		3.5 이하	4.0 이하	4.5 이하
산화마그네슘(MgO) %		5.0 이하	6.0 이하	6.0 이하
강열감량 %		3.0 이하	3.0 이하	3.0 이하

표 2. 고로 슬래그 시멘트의 물리 성능(KS L 5210)

항목	종류	1종	2종	3종	
분말도	비표면적(blaine) cm^2/g	3000 이상	3000 이상	3300 이상	
안정도	오토클레이브 팽창도 %	0.2 이하	0.2 이하	0.2 이하	
	르샤틀리에(Lechatelier) mm	10 이하	10 이하	10 이하	
응결시간	비카시험	초결 분	45	60	60
		종결 시간	7	10	10
압축강도 MPa(N/mm ²)	3일	12.5 이상	10.0 이상	7.5 이상	
	7일	22.5 이상	17.5 이상	15.0 이상	
	28일	42.5 이상	42.5 이상	40.0 이상	

응이 일어나면, 다음으로 그 용액 중에 불용성 물질이 석출되어 경화되기 시작한다(유창달, 2007).

슬래그의 수화물은 자극물질에 의해 다소 차이는 있지만 어떤 경우에도 tobermorite와 유사한 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H, 대표조성 $C_3S_2H_3$)을 포함한다. NaOH 등의 알칼리 자극제에서는 C-S-H, 6각 판상의 칼슘 알루미늄이 수화물 C_4AH_{13} 및 gehlenite 수화물 C_2ASH_8 이 생성되고, $Ca(OH)_2$ 자극제의 경우에는 C-S-H와 C_4AH_{13} 이 생성되고 C_2ASH_8 은 생성되지 않으며, 유산염 자극제에서는 C-S-H, ettringite와 유사한 $C_3A \cdot CS \cdot H_{32}$ 와 수산화 알루미늄 $Al(OH)_3$ 가 생성된다. 자극물질이 황산염과 알칼리 또는 석회와 함께 이루어졌을 경우 $Al(OH)_3$ 는 ettringite로 변화한다. 경화체 중에서는 유리 $Mg(OH)_2$ 는 나타나지 않으며 슬래그의 C-S-H 겔 수화물에는 free MgO가 고용되어 있다(변근주, 1990).

고로 슬래그의 잠재수경성을 촉진시켜 초기강도를 개선시키는 알칼리 자극조건으로서 수산화칼슘, 수산화나트륨, 물유리, 석고 등이 알칼리 자극제로 사용되고 그 중 시멘트 생산 시에 가장 일반적으로 사용되고 있는 것은 석고 첨가에 의한 SO_3 의 함량 조절이다.

3. 시험개요

본 연구의 최종목적은 친환경적인 완결성 약액주입재를 개발하고 이에 대하여 각종 일축압축강도시험, 환경영향성

평가를 실시하여 지반보강용으로 사용될 경우 토질공학적 특성을 검토하고자 한다.

3.1 시험재료

본 연구에 사용된 시멘트는 국내 S사에 생산되고 있는 보통 포틀랜드 시멘트와 고로 슬래그 시멘트(2종)을 사용하였으며 화학성분조성과 물리적 특성은 표 3, 표 4와 같다. 주입재는 그라우팅용 실리카졸, 규산나트륨(3호)를 사용하였으며 화학성분은 표 5와 같다.

3.2 공시체 제작

본 실내시험에서는 규산나트륨과 알칼리성 실리카졸 용액에 대하여 보통 포틀랜드 시멘트와 고로 슬래그 시멘트를 각각 배합하여 총 4가지의 Case로 나누어 공시체를 제작하여 시험을 실시하였다. Case 1은 규산나트륨 용액과 보통 포틀랜드 시멘트, Case 2는 규산나트륨 용액과 고로 슬래그 시멘트, Case 3는 알칼리성 실리카졸 용액과 보통 포틀랜드 시멘트, Case 4는 알칼리성 실리카졸 용액과 고로 슬래그 시멘트의 배합이다. 각 재료에 대한 기준 배합비는 CGM공법협의회에서 사용 중인 배합비로서 표 6과 같다. 규산나트륨과 알칼리성 실리카졸 공시체는 A액과 B액을 1:1 비율로 배합하여 제작하였다.

Gel-time은 A액, B액을 각각 200cc 컵에 50cc를 채운 후 연속 좌우 혼합시켜 유동성에 정지되는 시간을 측정하여 이

표 3. B액 재료(시멘트)의 화학성분조성(%)

종 류	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ +CaO	SO ₃
보통 포틀랜드 시멘트	20.4	71.5	1.5
고로 슬래그 시멘트(2종)	34	58.6	3.17

표 4. B액 재료(시멘트)의 물리적 특성

종 류	비 중	분말도 (cm ² /g)	응결(시:분)	
			초결(분)	종결(시:분)
보통 포틀랜드 시멘트	3.15	3170	250	6:50
고로 슬래그 시멘트(2종)	3.05	4064	295	6:55

표 5. 규산나트륨(3호), 그라우팅용 실리카졸 재료의 화학성분

구분	그라우팅용 실리카졸	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	9.8	14
점도	14	200

표 6. 완결용 그라우트재의 표준배합비

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
A액	규산나트륨(3호)	150cc	150cc	-	-
	그라우팅용 실리카졸(SSL-30)	-	-	150cc	150cc
	첨가제 SSL-1호	-	-	1.5g	1.5g
	물	150cc	150cc	150cc	150cc
	소 계	300cc	300cc	300cc	300cc
B액	보통 포틀랜드 시멘트	120g	-	120g	-
	고로 슬래그 시멘트	-	120g	-	120g
	분산제 SSL-0호	1.2g	1.2g	1.2g	1.2g
	첨가제 SSL-2호	-	-	1.5g	1.5g
	물	262.2cc	262.2cc	261.6cc	261.6cc
	소 계	300cc	300cc	300cc	300cc

것을 주입재(A액+B액)의 Gel-time으로 선정하였다.

3.3 일축압축강도 시험

일축압축강도는 알칼리성 실리카졸을 평가하는데 가장 중요한 공학적 특성으로 지반보강용으로 사용할 수 있는지 판단할 수 있는 중요한 기준이 된다. 시험방법으로는 일축

압축강도 시험법을 사용하였으며 디지털형 만능 재료시험기를 이용하여 KS F 2405의 방법에 의거하여 측정하였다. 고결체의 일축압축강도시험은 $\varnothing 5cm \times 10cm$ 원형시편으로 제작하여 재령 1일, 3일, 7일, 14일, 28일별로 공시체를 제작한 후, 소정의 양생기간을 거친 공시체 3개씩을 재하시 편심이 작용하지 않도록 capping하여 받침대와 공시체가 수직이 되는지 확인 후 1.0mm/min의 속도로 변위를 제어하여 그림 5와 같이 일축압축강도시험을 실시하였다.

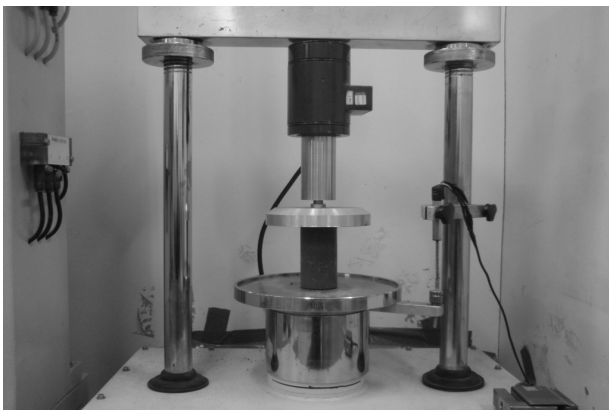
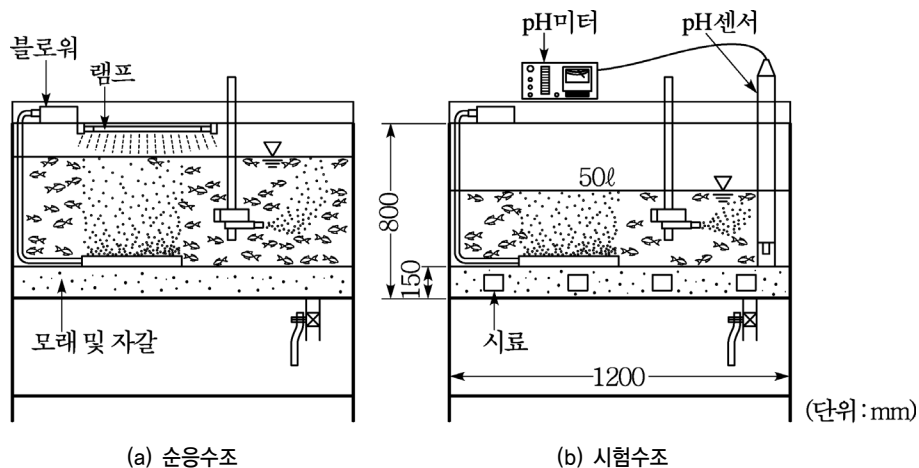


그림 5. 일축압축강도시험 전경

3.4 환경영향성평가

본 시험에서는 약액주입에 의한 환경오염의 정도를 파악하기 위해 규산나트륨과 알칼리성 실리카졸 시료를 대상으로 그림 6의 어독성시험장치를 이용하여 어독성시험(environmental impact(fish poison) test, KS I 3217)을 실시하여 환경영향성을 평가하였다.

시험수조는 깨끗한 유리제 또는 스테인레스제로 용량이 약 50L 이상이 되도록 설계하고, 공기송풍이 가능하고 수온은 12~18°C의 적정온도를 $\pm 2^\circ\text{C}$ 로 유지할 수 있도록 자동



(a) 순응수조

(b) 시험수조

그림 6. 어독성 시험장치(천병식, 1998)

온도조절장치를 부착하였다. 또한, 공시어의 급격한 환경변화에 대한 대책으로 수조에서 순응할 수 있도록 7일간 방치하였다(그림 6 참조). 공시어는 수온, 먹이, 취급 등 시험실내의 생존조건에 적합한 것으로 크기가 고르고 건강하며 구입하기 쉬운 금붕어로 하였다. 길이 6~8cm의 금붕어 20마리를 1조로 하였으며 충분한 산소를 공급하기 위해 blower를 부착하였다.

본 시험의 시험조건을 결정하기 위해서 규산나트륨 시편과 알칼리성 실리카졸 공시체를 표면적이 일정하게 유지되도록 물로 채워진 수조에 넣고 시험하였다.

3.5 pH시험

본 연구에서 시험한 알칼리성 실리카졸 공시체는 시멘트, 물, 알칼리성 실리카졸, 첨가제, 분산제가 혼합되어 있으며 이들이 지반에서 차수 및 지반보강의 목적으로 사용될 경우 물과의 접촉에 의해 배출되는 용출수에 의한 오염정도를 측정하는데 그 목적이 있다. pH의 경우 환경기준(수질)에 의하면 5.8~8.5를 만족하여야 한다.

pH의 정의는 수소이온의 활동도에 따른 음의 상용지수이다. pH는 눈금상으로 0에서 14까지 측정되며, 용액의 산성 및 염기성 정도를 나타내는 측정단위이다. pH측정방법에는 물붓기에 의한 방법, 페이스트 분쇄에 의한 방법, 고상 및 반고상 폐기물에 대한 방법, 수침에 의한 측정방법이 있다. 이러한 방법들 중 물붓기에 의한 pH측정과 물속에 담그기에 의한 pH 측정법은 기존의 발표된 여러 연구에 의하면 그 측정값의 차이가 미미한 것으로 나타난다. 그리고 페이스트 분쇄에 의한 pH측정은 그 시료의 얇은 판상을 따로 제작

표 7. 지하수의 수질 기준(환경부훈령 제140호, 2003)

이용목적별 항목	생활용수	농어업 용수	공업용수
수소이온농도(pH)	5.8~8.5	6.0~8.5	5.0~9.0



그림 7. pH시험 전경

한다는 것이 실제로 많은 어려움이 있다. 그리고 고체상 및 반고체상 폐기물에 대한 pH측정시험은 고결체에 정확한 pH 측정값을 얻어내기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 그림 7과 같이 시료의 재령별 공시체를 물(비율 5~10g : 200mL)에 한 시간 동안 수침 시킨 후 pH를 측정하는 수침 방법으로 시험을 실시하였다.

4. 시험 결과 및 분석

4.1 일축압축강도시험 결과 및 분석

보통 포틀랜드 시멘트와 고로 슬래그 시멘트를 사용하여 제작한 각각의 규산나트륨과 알칼리성 실리카졸 공시체에 대해서 재하속도 1.0mm/min로 일축압축강도시험을 실시하였고, 그 결과는 그림 8과 표 8에 나타내었다.

재령별 일축압축강도시험 결과 규산나트륨 공시체의 경우, Case 1은 재령 14일에 최대강도 1,779kPa이 발현되었으나 수중양생 중 용탈현상에 의해 재령 28일에서는 강도가 감소되는 경향을 보였다. 반면, 알칼리성 실리카졸 공시체 Case 4는 재령 28일에 3,635kPa의 일축압축강도가 발현되었다. 일축압축강도 시험결과 알칼리성 실리카졸 공시체의 일축압축강도가 규산나트륨 공시체의 일축압축강도보다 약 2배 크게 나타났다.

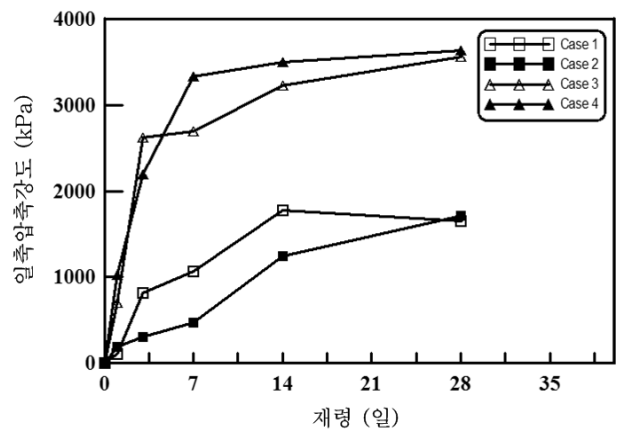


그림 8. 일축압축강도시험 결과

표 8. 일축압축강도시험 결과(단위 : kPa)

재령	1일	3일	7일	14일	28일
Case 1	99	816	1,070	1,779	1,654
Case 2	192	301	474	1,240	1,711
Case 3	704	2,623	2,696	3,225	3,568
Case 4	1,026	2,198	3,338	3,496	3,635

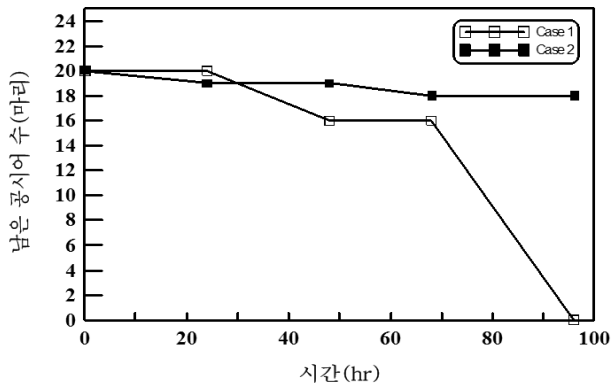


그림 9. 규산나트륨 공시체에 대한 어독성시험 결과

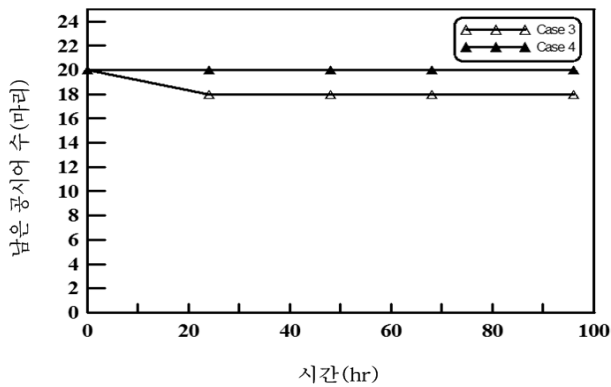


그림 10. 알칼리성 실리카졸 공시체에 대한 어독성시험 결과

4.2 환경영향성평가 결과 및 분석

공시어 생존율에 관한 시험결과는 그림 9, 그림 10과 같이 규산나트륨은 Case 1의 경우 0%, Case 2의 경우 90%, 알칼리성 실리카졸의 경우 Case 3는 90%의 생존율을 보였으나, Case 4의 경우 초기 숫자인 20마리를 유지하였다. 이를 통해 고로 슬래그 시멘트를 배합한 알칼리성 실리카졸 지반주입재로부터 용탈현상이 발생하지 않았으며 친환경적임을 알 수 있었다.

4.3 pH시험 결과 및 분석

pH시험 결과 그림 11과 같이 규산나트륨의 경우 시험 시작 초기에 급격하게 pH가 증가하여 최대점에 이르고, 이후 시간이 지남에 따라 pH가 수렴하는 경향을 보였다. 규산나트륨의 경우 Case 1은 pH 10.53까지 증가하였고, Case 2는 재령 7일까지 Case 1보다 작은 pH값을 보였으나 시간이 지남에 따라 용탈현상이 급격히 진행되어 pH 11.25 까지 증가하였다. 알칼리성 실리카졸의 경우 Case 3는 pH 8.92 를 나타내었으나, Case 4의 경우 pH 8.41로 지하수 수질기준인 8.5 이하를 나타내었다. 이는 알칼리성 실리카졸의 견고한 구조로 인해 용탈현상이 적은 이유와 고로 슬래그 시멘트가 보통 포틀랜드 시멘트보다 작은 투수계수를 가지고 있어 물

표 9. pH시험 결과

재령	1일	3일	7일	14일	28일
Case 1	9.77	10.00	10.21	10.53	10.31
Case 2	9.62	9.70	10.22	11.21	11.25
Case 3	8.73	8.71	8.75	8.88	8.92
Case 4	8.32	8.29	8.38	8.41	8.33

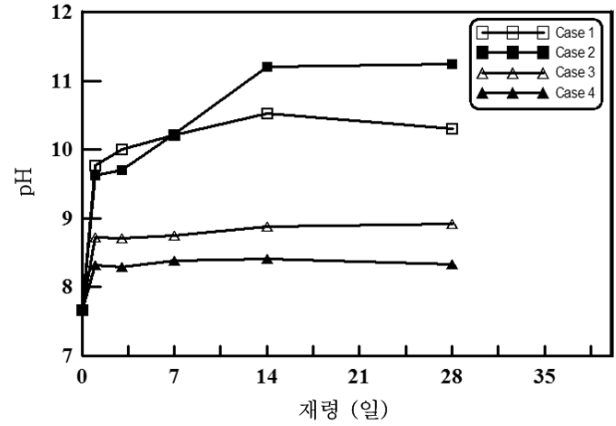


그림 11. pH시험 결과

에 용해되는 정도의 차이가 있기 때문으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 고로 슬래그 시멘트를 사용한 알칼리성 실리카졸 주입재의 강도특성과 환경성을 평가하고자 하였다. 이에 대하여 일축압축강도시험, 어독성시험, pH변화시험을 실시하여 지반주입재로서의 특성을 검토하고자 하였으며, 그 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

- (1) 재령별 일축압축강도시험 결과 규산나트륨 공시체는 보통 포틀랜드 시멘트를 배합한 경우 재령 14일에 최대 강도 1,779kPa이 발현되었으나 시간이 경과함에 따라 공시체의 수중양생 중 용탈현상에 의해 강도가 감소되는 경향을 보였다. 반면, 알칼리성 실리카졸 공시체의 일축압축강도시험결과 규산나트륨 공시체와는 달리 지속적으로 증가하는 경향이 나타났으며, 재령 28일 일축압축강도는 보통 포틀랜드 시멘트를 배합한 공시체의 경우 3,568kPa, 고로 슬래그 시멘트를 배합한 공시체의 경우 3,635kPa으로 고로 슬래그 시멘트를 배합한 경우의 일축압축강도가 더 우수하게 나타났다. 일축압축강도 시험 결과 알칼리성 실리카졸 공시체의 일축압축강도가 규산나트륨 공시체의 일축압축강도보다 약 2배 크게 나타났다.

- (2) 어독성시험결과 규산나트륨 공시체의 경우 보통 포틀랜드 시멘트 적용 시 0%, 고로 슬래그시멘트 적용 시 90%, 보통 포틀랜드 시멘트를 배합한 알칼리성 실리카졸 공시체의 경우 90% 생존율을 보였으나, 고로 슬래그 시멘트를 배합한 알칼리성 실리카졸 공시체의 경우 100% 생존율로 초기 숫자인 20마리를 유지하여 알칼리 용탈에 의한 오염도가 적은 것으로 보여 친환경적임을 알 수 있었다.
- (3) pH시험 결과 고로 슬래그 시멘트를 배합한 알칼리성 실리카졸 고결체의 pH는 초기에 pH 8.41까지 증가하였으나 시간이 경과함에 따라 pH가 지하수 수질 기준인 pH 8.5 이하로 수렴하는 경향을 나타냈다. 한편 규산나트륨은 보통 포틀랜드 시멘트를 배합한 경우 pH 10.53, 고로 슬래그 시멘트를 배합한 경우 pH 11.25의 최대점으로 나타났다. 알칼리성 실리카졸은 견고한 구조로 인하여 용탈현상이 비교적 적으며, 고로 슬래그 시멘트의 투수 계수가 보통 포틀랜드 시멘트보다 작아 물에 용해되는 정도의 차이가 있는 것을 알 수 있으며, 이를 통해 친환경적인 지반주입재임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 박승범(2005), *최신 건설재료학*, 문운당, p. 90.
2. 변근주(1990), *혼화재료*, 한국레미콘공업협회, pp. 1~226.
3. 양형철, 천병식(2006), STPP가 규산계 시멘트 주입재의 강도에 미치는 영향, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol. 7, No. 4, pp. 25~34.
4. 영일화성(2010), *실리카 졸(GREENSOL)*, 영일화성 연구개발팀, pp. 1~16.
5. 유창달(2007), *초미분말 고로슬래그를 혼합한 슬래그 시멘트 페이스트의 유동특성*, 석사학위논문, 단국대학교, pp. 13~18.
6. 정종주(1993), *물유리계 지반주입재의 내구성에 관한 연구*, 석사학위 논문, 한양대학교, pp. 60~65.
7. 천병식(1994), *기초지반개량공법*, 건설연구사, pp. 86~144.
8. 천병식(1998), *최신 지반주입 이론과 실제*, 원기술, pp. 39~334.
9. 천병식, 김진춘, 이영근(2001), 마이크로 복합실리카 그라우트재의 공학적 특성에 관한 연구, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol. 2, No. 1, pp. 101~113.
10. 천병식, 정덕교, 류동성(1996), 지반개량용 실리카졸계 약액의 성질 및 내구특성에 관한 연구, *연약지반처리위원회 봄 학술세미나*, 한국지반공학회, pp. 30~37.
11. 한국산업표준(2006), *고로슬래그 시멘트 KS L 5210*, 한국표준협회, pp. 1~10.
12. 한국지반공학회(2005), *지반공학시리즈 연약지반*, 구미서관, pp. 356~370.
13. 환경부(2010), *지하수의 수질보전 등에 관한 규칙*, 환경부령제 362호.
14. 島田 俊介, 佐藤 武, 多久 實(1989), *最先端技術の 薬液注入工法*, 理工圖書, pp. 57~82.
15. 米倉亮三外(2000), *恒久グラウト注入工法*, 山海堂, pp. 103~114.

(접수일: 2010. 11. 26 심사일: 2010. 12. 7 심사완료일: 2011. 3. 10)