

# 친환경적인 무기질계 주입재(NDS)의 내구성에 관한 연구

## The Durability of Environmentally Friendly Inorganic Grouting Material(NDS)

이 혜 진<sup>1)</sup> · 이 종 휘<sup>2)</sup> · 정 경 식<sup>2)</sup> · 천 병 식<sup>†</sup>

Lee, Hyejin · Lee, Jonghwi · Jung, kyongsik · Chun, Byungsik

**ABSTRACT** : Recently, the ground injection method using water glass as one of the components of the main resources and the products of the construction has some basic problems for permanent reinforcement of foundation and stopping leakage of water because it has some serious problems such as durability reduction, compression strength reduction and eluviation. This study was to evaluate the environmental impact and durability of the developed friendliness of Natural and Durable Stabilizer(NDS) of inorganic injection and Space Grouting Rokat(SGR) with typical water glass type material. Two materials, NDS and SGR, were compared with each other by unconfined compressive strength test, fish poison test, durability test and triaxial permeability test. The results of the durability test indicated that the 28-day strength of the NDS was 1.5 times higher than that of the SGR. The fish poison test proved that the survival rate in the SGR and NDS is 50~70%, and 100%, respectively. Therefore, the NDS has higher survival rate than that of the existing SGR. The NDS will be considered by an environmentally friendly product and moreover it has a few problems for soil and groundwater pollution.

**Keywords** : Water glass, Inorganic injection, Fish poison test, Durability test, Natural and Durable Stabilizer, Space Grouting Rokat

**요 지** : 현재 지반주입공법에 사용되는 약액으로는 물유리계가 주로 사용되고 있다. 그러나 물유리계를 사용한 약액주입공법은 현장적용에 있어서 내구성 저하, 강도 저하, 용탈 현상 등의 여러 가지 문제점을 가지는 바, 한시적인 차수용도로 사용될 수는 있으나 영구적인 지반보강 및 차수를 위해서는 본질적인 문제점을 가지고 있다. 본연구에서는 이러한 물유리계 지반주입재의 문제점을 해결할 수 있는 무기질계 지반주입재(NDS)의 환경영향평가 및 내구성을 규명하기 위하여 대표적인 물유리계 재료인 SGR 재료와 함께 일축압축강도시험, 어독성시험, 내구성시험, 침적 후 삼축투수시험을 실시하였다. 내구성시험 결과, 재령 28일 강도는 NDS가 SGR보다 1.5배 크게 나타났으며, 어독성시험 결과 SGR의 생존율은 50~70%, NDS는 100%로 나타났고 이는 NDS의 생존율이 SGR 보다 더 높다는 것을 보여주었다. 따라서 시험결과를 종합해 볼 때 전반적으로 NDS가 SGR에 비해 내구성면에서 우수하며 친환경적임을 확인할 수 있었다.

**주요어** : 물유리계, 무기질계 지반주입재, 어독성시험, 내구성시험, NDS, SGR

## 1. 서 론

우리나라에서의 약액주입공법은 1970년대 말 서울지하철공사에 도입되었으며(천병식 등, 2002a), 현재는 건설공사 뿐만 아니라 고속도로, 대규모 건물축조, 항만건설공사, 연약지반처리 등에서 차수 및 지반보강을 위해 폭넓게 사용되고 있다.

현재까지의 시공사례를 분석한 결과 약액주입공법의 가장 큰 문제점 중 하나는 내구성으로, 본 공사가 완료되기까지의 기간 동안에 약액주입의 효과가 유지되지 않으면 본 공사에 직접적인 영향이 미치므로 주의해야 한다. 그러나 우리나라의 경우 약액주입 후 시간경과에 따른 주입효과를 조

사한 사례가 많지 않고 약액의 내구성에 관한 개념이나 평가가 이루어지지 못하고 있는 실정이다(천병식, 1998). 특히 현재 국내외적으로 널리 사용되고 있는 물유리계 주입재는 장기적으로 볼 때 내구성의 문제가 있다고 알려져 있으며 물유리계를 사용한 대표적인 공법으로는 SGR(Space Grouting Rocket)공법과 LW(Labile Wasser)공법이 주종을 이루고 있다.

이러한 물유리계 지반주입재는 사용량에 따라 응결시간을 조절할 수 있는 장점이 있지만, 영구적으로 볼 때 내구성 저하, 강도저하, 용탈현상 등의 문제가 발생함으로 장기간의 내구성이 요구되는 공사 등에서는 사용하기 어려우며 약액의 사용에 있어 품질의 확인이 어렵고 시공속도에 대응할 수 없는 단점이 있다.

1) 학생회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정

2) 정회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

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

물유리체를 사용한 지반주입공법의 환경영향성에 관한 내용으로서 어독성시험결과 96시간 후 최종 알칼리 농도인 pH가 10.9에서 공시어는 모두 치사하였고 지하수를 오염시킬 수 있다는 시험적 평가를 한 바가 있다(천병식 등, 2000).

일본에서는 물유리를 화학적으로 변성하거나 개선함으로써 여러 공법을 개발하여 시공에 적용하고 있는 실정이며 국내에서도 최근 물유리계 주입재를 해결하기 위한 여러 공법들이 연구되어지고 있다(천병식 등, 2002b; 천병식 등, 2005; 박덕흠, 2010). 그 중 하나로 지반개량 재료로 무기질계 급결재와 시멘트계 초미립자를 주원료로 하는 NDS(Natural and Durable Stabilizer)공법이다. NDS는 물유리 대신에 시멘트계 급결제를 사용하는 방법으로 시멘트계 급결제와 무기질계 초미립자를 주원료로 하는 순수 무기질의 지반개량재료의 사용으로 기존 물유리계의 강도저하, 용탈현상과 같은 문제점을 해결할 수 있을 뿐만 아니라 시간이 경과할수록 강도발현이 우수하고 주입성이 탁월한 동시에 용탈현상도 발생하지 않아 환경오염 문제를 해결하는 영구적 차수 공법이다. 이에 천병식 등(2006)이 무기질계 재료(NDS)의 환경유해성시험, 용탈시험 등을 연구하였으나 실질적으로 극한상황에서의 강도, 투수성의 평가는 전무하다.

따라서 본 연구는 지반보강 목적으로 급결성 시멘트계 재료를 주원료로 하는 지반개량제의 효과를 규명하기 위한 연구로서 이러한 무기질계 주입재의 환경영향성 검토 및 내구특성을 상세히 규명하고자 일축압축강도시험, 어독성시험, 내구성시험, 내구성시험 중 일축압축강도시험 및 삼축투수시험을 수행하였다. 또한 이를 물유리계와 비교·분석하여 기존의 물유리계 약액을 대체할 수 있는 우수한 주입 약액임을 확인하고자 한다.

## 2. 주입재의 특성

### 2.1 시멘트광물계 무기질계 지반주입재의 특성

시멘트광물계 급결제는 시멘트 칼슘알루미네이트 광물을 이용한 재료로서 급결성이 뛰어나고 강도의 발현이 안정적이다. 시멘트광물계 급결제의 주성분은 칼슘알루미네이트 광물의 종류별 그 반응특성은 표 1과 같다.

본 연구에서 사용된 급결용 시멘트계를 주재료로 한 재료의 반응 메커니즘은 그림 1과 같으며 이러한 반응은 수초 내에 일어난다.

한편 본 연구에서 사용된 무기질계지반주입재(NDS)는 ES(무기질계 급결재)와 UF(초미립자 시멘트)의 두 가지 재료로 구성되어 있다. ES의 양을 많이 배합할수록 gel-time을

감소시킬 수 있고 gel-time에 따라 순결(5~7초), 급결(40~50초), 완결(80~100초)로 구분된다. ES는 석회석, 보크사이트 및 석고를 분쇄, 혼합하여 1,600°C 이상의 고온에서 제조된 용융 소성물을 급냉시킨 후, 분쇄 및 분급과정을 통하여 양질의 미립자 형태로 얻을 수 있으며 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)와 유사한 성분인 CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaSO<sub>4</sub> 등이 주성분이다(한양대학교, 2011). UF는 기존의 시멘트 생산방식에 비해 발전된 슈퍼 마이크론 분급기를 적용한 다단분급기를 통해 최적의 분말도(약 6,000~9,000cm<sup>2</sup>/g)와 입도로 제조된 초미립자 시멘트이다(강형남, 2011).

### 2.2 물유리계 지반주입재의 특성

현재 국내에서 사용되고 있는 물유리는 규사와 소다회 또는 규사와 가성소다를 혼합하여 만드는데, 무수규산(SiO<sub>2</sub>)과 알칼리(Na<sub>2</sub>O)를 결합시켜 만든 물유리는 단일 화합물은 아니고 산화소다와 무수규산을 여러 가지 비율로 결합시킨 것으로 반응식 Na<sub>2</sub>O·nSiO<sub>2</sub>로 나타낸다(그림 2 참조). n은 몰비로 n의 범위는 일반적으로 n=0.5~4이며, n=1 이하인 경우는 결정성 규산소다라고 하며, n=1 이상인 것은 비정질 구조로 액상형 물유리라 한다. 또한 규산소다는 크게 결정성 규산소다와 규산소다용액으로 나누어지는데 일반적으로 쓰이는 규산소다에는 1호, 2호, 3호, 4호가 있으며 국내 현

표 1. 칼슘알루미네이트 광물의 종류별 반응특성 및 용도

광물명	CA <sub>6</sub>	CA <sub>2</sub>	CA	결정질 C <sub>12</sub> A <sub>7</sub>	비정질 C <sub>12</sub> A <sub>7</sub>	C <sub>3</sub> A
응결 시간	미응결	24시간 이상	5~8시간	수초	수 십초	수초
OCP와 반응시 응결 시간	미응결	수 시간	10~60분	10~30분	5~10분	10~30분
응용	내화물의 최종조성	알루미나 시멘트 (고내화성)	알루미나 시멘트 (일반, 내화성) 특수시멘트	지수제, 제강용 FLUX, 특수시멘트	급결제, 특수시멘트	급결제, 포틀랜드 시멘트
제조 방법	소성	소성	소성, 용융	용융	용융	소성

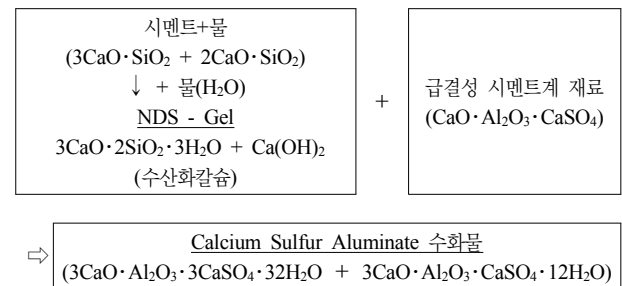


그림 1. 급결성 시멘트의 반응기구

장에서는 일반적으로 3호가, 특수한 경우에는 2호와 4호를 사용한다. 규산소다 각각의 특징을 표현하면 표 2와 같다.

한편, 물유리계의 겔화원리는 그림 3과 같다.

제 1단계는 규산모노머가 중합되어 콜로이드입자가 생성

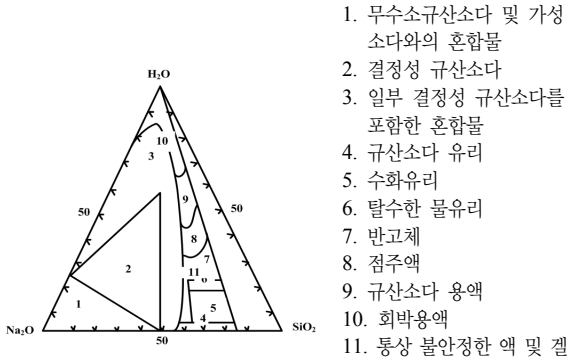


그림 2. Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 관계(島田俊介 등, 1977)

표 2. 규산소다의 특징(천병식, 1998)

항목	종류	1호	2호	3호	메타규산나트륨	
					1종	2종
외관		물엿형의 무색내지 착색된 액체	다소	백색분말 또는 과립형	백색 결정	
비중		-	54 이상	40 이상	-	-
이산화규소(SiO <sub>2</sub> )(%)		35~38	34~36	28~38	27.5~29	19~22
산화나트륨(Na <sub>2</sub> O)(%)		17~19	14~15	9~10	28.5~30	20~22
철(Fe)(%)		0.03 이하	0.03 이하	0.02 이하	-	-
불용분(%)		0.2 이하	0.2 이하	0.2 이하	-	-

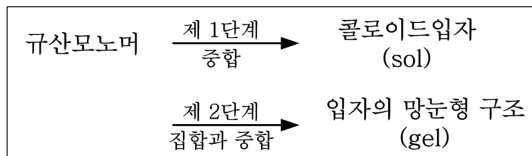


그림 3. 물유리의 겔화물유리의 겔화원리(島田俊介 등, 1977)

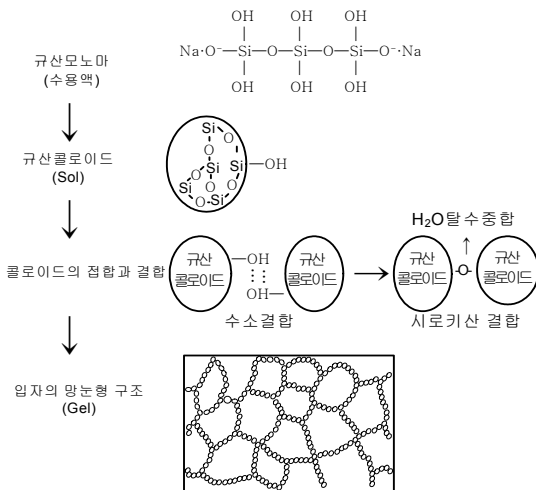
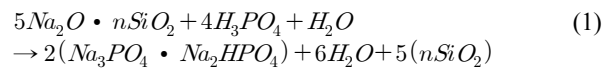


그림 4. 물유리의 겔화과정(島田俊介 등, 1977)

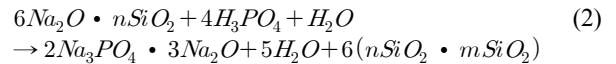
되며, 제 2단계에서는 콜로이드 입자들끼리 중합하여 용액 전체로 확장하여 망눈형 구조를 이루는데 즉, 겔이 형성된다. 1차 입자의 결합 조치단계에는 입자는 수소결합에 의해 약하게 연결되지만 규산콜로이드 표면의 시라노르기 사이에서 축합이 일어나 입자간에 시로키산 결합이 형성되어 입자끼리 견고하게 연결됨으로써 3차원적 망상형의 겔이 만들어진다. 그 반응 메커니즘을 요약하면 그림 4와 같다.

### 2.3 주입재의 강도열화 기구

所 武彦 등(1989)에 의하면 물유리계 약액의 일축압축강도는 재령 2~3년 내에 50% 전후로 감소하며, 투수계수는 주입률에 따라 1개월 전후로 10<sup>2</sup>~10<sup>3</sup>배 가까이 증가한다. 또한, 물유리계 약액의 용탈물질은 Ca(OH)<sub>2</sub>, NaOH, Na<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>가 대부분이며 양생조건에 따라 내구성이 크게 달라진다. 하지만, 약액의 표준양생방법은 명확히 정해져 있지 않아 시험결과의 비교평가에 문제가 있는 실정이며(천병식, 1998), 물유리계의 경우 경화제로써 인산을 사용할 시 용탈반응을 통한 강도열화 기구는 아래의 반응식과 같다.



여기서 5(nSiO<sub>2</sub>)가 불용탈 겔이 되고, 2(Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>·Na<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)가 용탈물질이다. 용액형 알칼리계 물유리의 경우 용탈 반응을 통한 강도열화 기구는 아래의 반응식과 같다.



여기서도 nSiO<sub>2</sub>가 불용성 겔이 되고, 소량의 미반응 SiO<sub>2</sub>와 반응생성물인 2Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>·3Na<sub>2</sub>O는 용탈물질이다.

## 3. 재료의 준비 및 시험방법

### 3.1 재료의 준비

본 연구에서 비교시험에 사용된 물유리계 약액의 재료는 국내에서 널리 시공되고 있는 물유리계 SGR 재료를 선택하였으며, SGR 급결, SGR 완결, NDS 순결, NDS 급결, NDS

표 3. SGR 배합비

	A액(200L)		B액(200L)		
	물유리(L)	물(L)	시멘트(kgf)	보조제(kgf)	물(L)
급결	100mL	100mL	60	23	167
완결				24	

표 4. NDS 배합비

	A액(200L)		B액(200L)	
	NDS ES(kgf)	물(L)	NDS UF(kgf)	물(L)
순결	60	179.3	160	147.5
급결	40	186.2	120	160.7
완결	20	193.1	100	167.2

완결 총 5가지로 배합하였다. 각 시료의 배합비는 표 3, 표 4와 같다.

NDS 및 SGR의 공시체는 A액과 B액을 1:1 비율로 배합하였으며, 배합의 시작과 동시에 양손으로 연속 좌우 혼합시켜 컵에서 유동성이 정지되는 시간을 측정하였으며 이를 혼합된 주입재의 고결시간으로 선정하였다.

### 3.2 일축압축시험

일축압축시험은 한국표준협회에서 규정한 KS F 2314에 준하여 실시하였으며 재하하중 용량이 3tonf인 변위제어 방식의 만능재료시험기를 이용하여 재하속도 1mm/min로 시험을 실시하였다. 배합비 별로  $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 의 공시체를 제작하여 고결시간에 따라 각각 순결, 급결, 완결(SGR의 경우 급결, 완결)로 나누어 시험을 실시하였으며, 완성된 공시체는 재령 3일, 7일, 14일, 28일로 일축압축강도시험을 실시하였다. 본 시험의 결과는 내구성시험 중 일축압축강도시험과 비교를 하여 내구성 저하를 정량적으로 파악하였다.

### 3.3 어독성시험

어독성시험은 한국표준협회에서 규정한 KS M 0111에 의거하여 실시하였다. 용량 50L의 수조에 물을 채우고 수온은  $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 유지하였으며 공시체가 급격한 환경변화에 순응할 수 있도록 7일간 방치하였다. 공시체는 생존에 적합한 6~8cm 크기의 금붕어를 사용하여 20마리를 1조로 하였다. 시간경과에 따른 pH를 측정하기 위해 pH 미터 부착과 산소 공급을 위한 브라우저를 설치하고 SGR과 NDS 공시체( $7\text{cm} \times 7\text{cm} \times 7\text{cm}$ ) 4개를 제작하여 각각의 수조에 넣어 시간경과에 따른 pH와 공시어수를 관찰하였다(천병식 등, 1998).

### 3.4 내구성시험

내구성시험은 주입 후 개량체가 가지게 되는 강도와 차수성 유지를 평가하기 위한 시험이다. 예를 들면, 연약지반이나 지하수 용출이 심한 지역에 약액을 주입하는 경우 약액의 시용 시간에 따른 강도 변화를 측정함으로써 강도 유지 정도를 판단하는데 그 목적이 있다. 본 실험에서는 내구성을 측정하기 위해 그림 5와 같은 내구성시험 장치를 준비

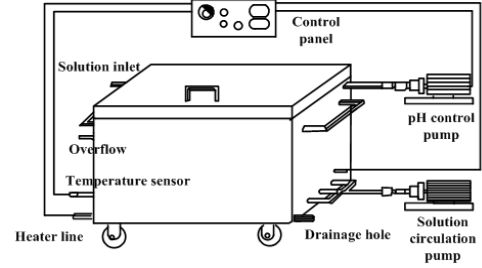
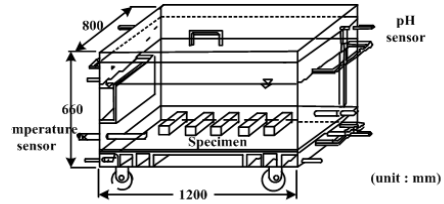


그림 5. 내구성시험장치 모식도

하였다.

내구성시험 장치에 자연해수의 6배(25gf/L)인  $\text{Cl}_2$ 용액 및 자연해수의 10배(25gf/L)인  $\text{SO}_4$ 용액에  $1'' \times 1'' \times 4''$  크기의 SGR과 NDS시료(재령 3일된 공시체)를 침적시켰으며 3일, 1주, 3주, 5주, 7주, 9주에 따른 길이변화를 및 일축압축강도를 측정(천병식, 1998)하여 시료의 내구성을 평가하였다. 길이변화는 재령별로 1방향 수축량을 길이변화측정기를 이용하여 측정하였다.

### 3.5 삼축투수시험

내구성시험 중 공시체를 이용하였으며 내구성시험 중 침적 후 9주(SGR의 경우 침적 후 5주)에서 삼축투수시험을 실시하여 극한 상황에서 차수효과를 파악하였다. 시험방법은 ASTM D 5084에 의거하여 실시하였으며, Flexible Wall 투수시험 방법 중에는 Constant Head 방법을 사용하였다. 삼축투수시험 방법은 공시체에 멤브레인을 끼운 뒤 두 개의 고무링으로 상부와 하부를 각각 cab으로 고정시킨 후 물을 주입해 구속압과 주입압을 가하여 동수정사를 조절하면서 실험을 실시하였다. 주입압을 가하기 전, 멤브레인의 팽창을 막기 위해 구속압을 먼저 가했으며 포화단계에서 공시체



그림 6. 삼축투수시험 광경

의 포화정도를 알기 위해 시험장비에 부착되어 있는 간극수 압계를 사용하였다. B계수가 0.95 이상이 되었을 때를 포화 상태로 가정하여 시험을 실시하였고 시험광경은 그림 6과 같다.

## 4. 시험 결과 및 분석

### 4.1 일축압축강도시험 결과

NDS와 SGR 공시체의 재령별 일축압축강도 결과는 그림 7과 같다. 전반적으로 NDS 재료가 SGR 재료에 비해 강도가 크게 발현되었으며, 재령 7일에는 NDS 순결, 급결, 완결, SGR 급결, 완결 순으로 강도발현이 일어났다. 그 이후, 전체적으로 강도변화는 적었으며 재령 28일에는 NDS가 약 3,000~3,500kPa, SGR은 약 1,900~2,000kPa의 범위로 NDS가 SGR에 비해 강도가 약 1.5배 크게 발현되었다.

### 4.2 어독성시험 결과

본 시험은 SGR 재료와 NDS 재료에 대해 각각 pH 상승에 따른 어독성을 측정함으로써 환경영향성을 평가하였으며, 주입재 조합별로 시간에 따른 pH 변화 및 치사된 공시어 수 측정결과는 그림 8~11과 같다. pH 변화에 있어서는 SGR 재료의 경우, 초기에 급격히 증가하다 약 pH 11로 최

대가 되었을 때 수렴하였으며 시간 경과에 따라 최대값을 지속적으로 유지하였다. 한편 NDS 재료의 경우, 초기에 약간 증가하다 이후에 pH가 점점 감소하는 경향을 보였다. 또한 고결시간에 따른 변화를 보면 급결형(short type)인 경우가 완결형(middle type)인 경우 보다 pH 증가율이 약 1.7배 크게 나타나는데, 이는 고결시간이 짧은 경우에 SGR 재료의 알칼리 성분이 다소 빠르게 용출된 것으로 사료된다. 각각의 재료에 대해 pH의 최대값은 SGR 재료의 경우 급결형은 pH 10.99, 완결형은 pH 10.33까지 증가하였으며, NDS 재료의 경우는 급결형 및 완결형 모두 pH 8을 전후로 소폭 변화하였다.

시간경과에 따른 공시어 수 변화는 SGR 재료의 경우 급결형은 50%, 완결형은 70%의 생존율을 보였으며, NDS 재료는 순결, 급결 및 완결 모두 초기 공시어 수 20마리를 유지한 것으로 보아 알칼리 용출에 의한 오염도가 적은 것으로

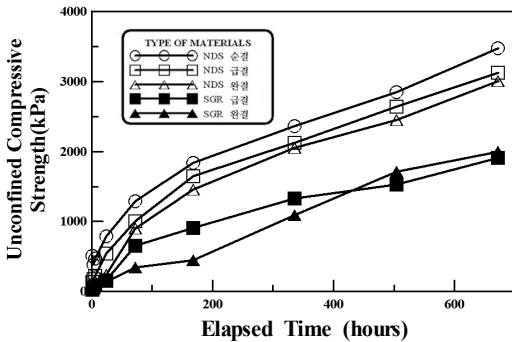


그림 7. 주입재료별 재령과 일축압축강도의 관계

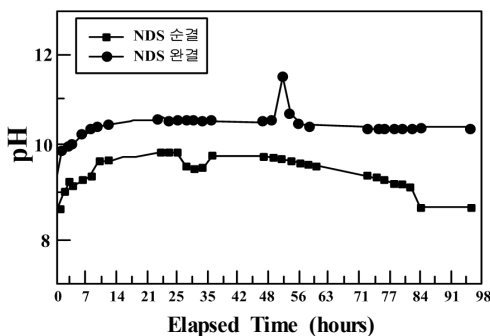


그림 8. 어독성시험 중 pH 변화 측정 결과(NDS 순결, 완결)

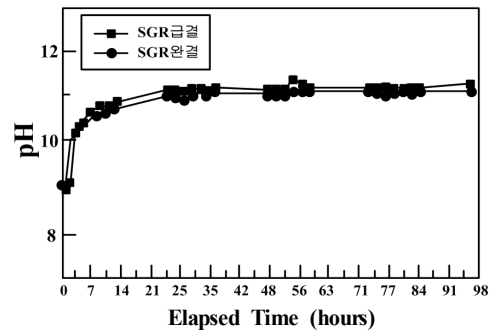


그림 9. 어독성시험 중 pH 변화 측정 결과(SGR 급결, 완결)

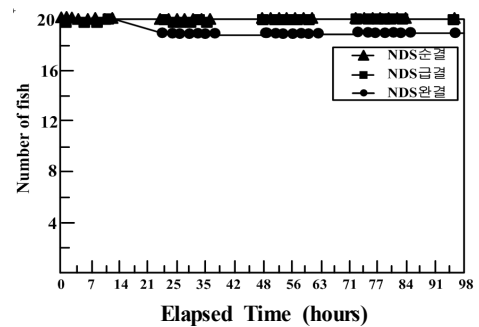


그림 10. 어독성시험 중 공시어 변화 측정 결과(NDS 순결, 급결, 완결)

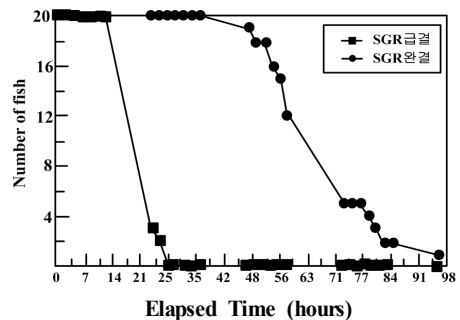


그림 11. 어독성시험 중 공시어 변화 측정 결과(SGR 급결, 완결)

판단되며 친환경적임을 알 수 있었다.

### 4.3 내구성시험 결과

NDS 시료와 SGR 시료의 수축정도를 비교하기 위하여 각각의 시료를 자연해수 6배  $Cl_2$ 와 자연해수 10배  $SO_4$ 에 넣어 시험을 실시하였으며 그 결과를 비교·분석 하였다.

내구성시험 중 길이변화 측정결과는 그림 12, 그림 13과

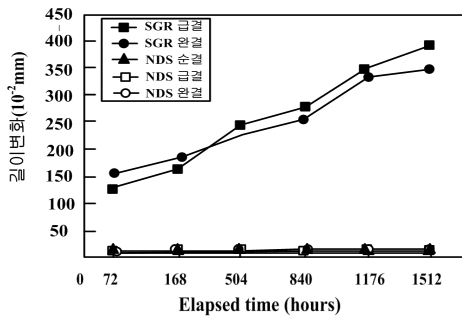


그림 12. 내구성시험 중 길이변화 측정 결과( $MgCl_2$  용액에 침적시)

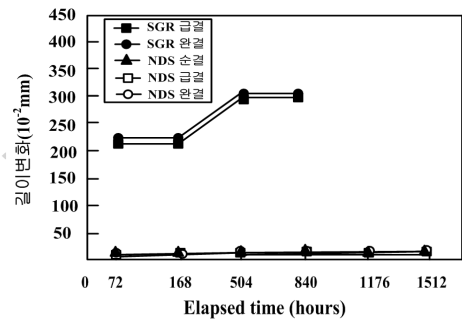
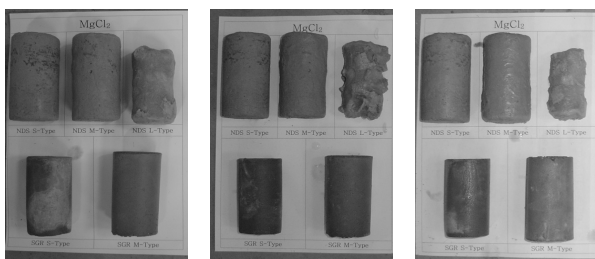


그림 13. 내구성시험 중 길이변화 측정 결과( $MgSO_4$  용액에 침적시)



(a) 침적 후 1일 (b) 침적 후 3일 (c) 침적 후 7주



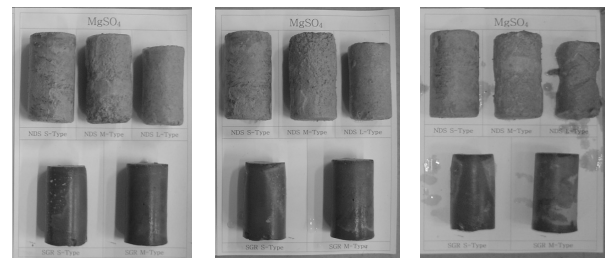
(d) 침적 후 3주 (e) 침적 후 7주 (f) 침적 후 9주

그림 14. 침적 일수에 따른 길이변화양상( $MgCl_2$  용액에 침적시)

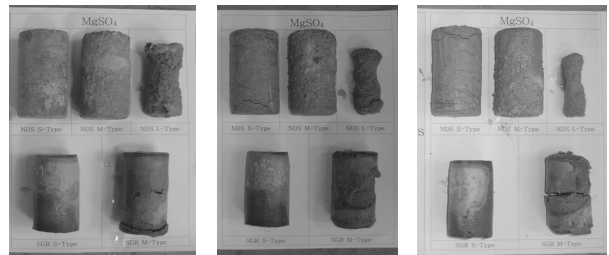
같으며 침적 일수에 따른 길이변화 양상은 그림 14, 15와 같다. 시험 결과 염화물 및 황산염 수용액에 침적시킨 경우 NDS 시료가 SGR 시료보다 수축량이 약 12~27배 정도 적게 발생하는 것으로 나타났으며 NDS 시료의 경우 재령일에 따른 길이변화가 증가폭이 작고 SGR 시료의 경우 재령일에 따른 길이변화는 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 단,  $MgSO_4$  용액에 침적시킨 SGR의 경우 1주에서 3주 사이의 길이변화율이 급격히 증가하였고 그 이후에는 증가폭이 크지 않았다.

고결시간에 따른 길이변화를 비교한 결과, 급결재료가 초기 수축량이 적었으며 침적 후 28일부터는 완결재료의 수축량이 적었다. SGR 시료의 경우 황산염 수용액에 침적시킨 결과 7주 이후에는 용탈로 인해 길이축경이 불가하였다.

내구성시험 중 일축압축강도 시험 결과는 그림 16, 17과 같다. 시험 결과 NDS 시료의 경우 침적 후 30일까지 급결재료의 강도가 우수하게 나타났지만 그 이후에는 완결재료의 강도가 우수하게 나타났다. SGR 시료의 경우 황산염 수



(a) 침적 후 1일 (b) 침적 후 3일 (c) 침적 후 1주



(d) 침적 후 3주 (e) 침적 후 7주 (f) 침적 후 9주

그림 15. 침적 일수에 따른 길이변화양상( $MgSO_4$  용액에 침적시)

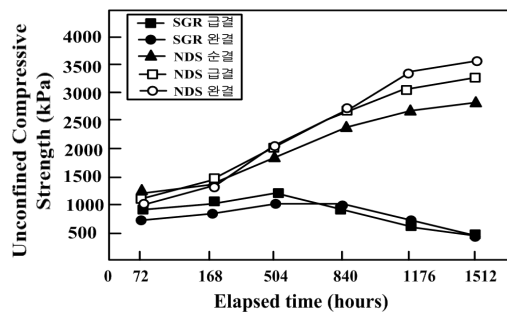


그림 16. 내구성시험 중 일축압축강도 측정 결과(25g/L  $MgSO_4$  용액에 침적시)

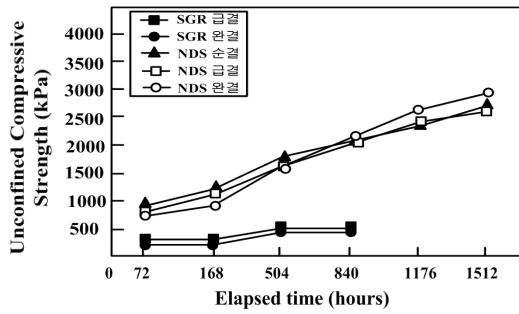


그림 17. 내구성시험 중 일축압축강도 측정 결과 (25gf/L MgSO<sub>4</sub> 용액에 침적시)

표 5. 삼축투수시험 결과

재료	고결시간	투수계수(cm/sec)
NDS (침적 후 9주)	순결	$5.723 \times 10^{-7}$
	급결	$6.543 \times 10^{-7}$
	완결	$8.557 \times 10^{-7}$
SGR (침적 후 5주)	급결	$3.503 \times 10^{-6}$
	완결	$5.640 \times 10^{-6}$

용액에 침적시킨 결과 7주 이후에는 공시체의 강도가 급격히 저하되어 강도측정이 불가하였다.

한편, SGR의 경우 약 침적 후 21일에서 최대강도를 나타내었고 이후에는 감소하는 경향을 보였다. NDS 시료와 SGR 시료의 침적시 강도를 비교한 결과, NDS 시료의 강도가 SGR 시료에 비해 초기 강도가 크게 발현되었고 침적 일수에 따른 NDS 시료와 SGR 시료의 강도차는 점차 커지는 것을 알 수 있었다.

#### 4.4 삼축투수시험 결과

SGR과 NDS 재료의 차수효과를 규명하기 위해 내구성시험 중 공시체를 이용하여 삼축투수시험을 실시하였으며, 결과는 표 5와 같다. 삼축투수시험 결과 재령 9주(SGR의 경우 5주)의 투수계수는 SGR과 NDS 모두 완결재료가 순결, 급결에 비해 작게 측정되었으며 한편, 침적 시간이 차이가 남에 불구하고 NDS 재료의 투수계수가 SGR 재료에 비해 약 10~24배 작게 나타났다. 이는 NDS 재료가 SGR 재료 보다 차수효과가 우수하며 효과적인 침투주입이 가능함을 알 수 있었다. 결론적으로 내구성시험과 더불어 NDS 시료가 SGR 시료에 비해 강도발현이 크며 내구성 면에서도 우수하다는 것을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 급결성 시멘트계 지반개량재료의 환경영

향성평가 및 내구성 평가를 위해 일축압축시험, 어독성시험, 내구성시험, 삼축투수시험을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 재령별 일축압축강도시험 결과, 전반적으로 NDS 재료가 SGR 재료에 비해 강도가 크게 발현되었으며, 재령 28일 기준으로 NDS가 SGR에 비해 강도가 약 1.5배 크게 발현됨을 알 수 있었다.
- (2) 어독성시험 결과, 고결시간에 따른 변화는 급결인 경우가 완결인 경우 보다 pH 증가율이 약 1.7배 크게 나타났으며, 각각의 재료에 대해 pH의 최대값은 SGR 재료의 경우 급결형은 pH 10.99, 완결형은 pH 10.33까지 증가하였고 NDS 재료의 경우는 급결형 및 완결형 모두 pH 8을 전후로 소폭 변화하였다. 시간경과에 따른 공시어 수 변화는 SGR 재료의 경우 50%~70%의 생존율을 보였으나, NDS 재료는 생존율 100% 유지하여 알칼리 용출에 의한 오염도가 적은 것으로 판단되며 친환경적임을 알 수 있었다.
- (3) 내구성시험 결과, NDS 시료와 SGR 시료를 염화물 및 황산염 수용액에 침적시켰을 때 NDS 시료가 SGR 시료에 비해 수축량이 약 12~27배 정도 적게 발생하는 것으로 나타났다. 내구성시험 중 일축압축강도 시험 결과, NDS 시료의 경우 침적 후 30일까지는 급결재료의 강도가 우수하게 나타났으며 그 이후에는 완결재료의 강도가 우수한 것으로 나타났다. 한편, SGR의 경우 약 21일에 최대강도를 나타내고 이후에는 감소하는 경향을 보여 NDS보다는 내구성이 떨어지는 것으로 판단된다.
- (4) 삼축투수시험 결과, 침적 후 9주 후의 투수계수는 SGR과 NDS 모두 완결재료가 순결, 급결에 비해 작게 측정되었으며 한편, NDS 재료의 투수계수가 SGR 재료에 비해 약 10~24배 작게 나타나 측정된 NDS 지반개량재는 건설현장에서 효과적인 침투주입이 가능하다면 뛰어난 차수효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에 이어 무기질계 지반안정재(NDS)와 물유리계 지반안정재(SGR) 각각 증류수, 경수, 약수 등 공학적 특성 비교, 분석이 추가적으로 연구되어야 할 것이며 이러한 결과를 바탕으로 실제시공 적용에 있어 적절한 시공 계획이 필요할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 강형남(2011), *다단분급기의 개발 및 지반개량효과 평가*, 박사

- 학위논문, 한양대학교, pp. 30~31.
2. 박덕흠(2010), 무기질계 보강재료의 친환경성 및 내구성, 박사 학위 논문, 한양대학교, pp. 1~3.
  3. 천병식(1998), 최신 지반주입 이론과 실제, 원기술, pp. 169~170.
  4. 천병식, 강형남, 도종남, 임주현(2006), 환경 친화적인 무기질계 지반주입재의 내구성 및 차수효과에 관한 연구, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol. 7, No. 6, pp. 113~119.
  5. 천병식, 김진춘(1998), 어독성 시험에 의한 지반주입재의 공해성 평가, *대한토목학회논문집*, Vol. 18, No. III-4, pp. 531~538.
  6. 천병식, 김진춘(2000), FPT시험에 의한 지반주입재의 공해성 평가에 관한 연구, *창립기념학술발표회 논문집*, 한국지반환경공학회, pp. 85~90.
  7. 천병식, 김진춘, 이준우(2002a), MSG 주입재의 침투특성, *대한토목학회논문집*, Vol. 22, No. 2, pp. 161~171.
  8. 천병식, 노종륜, 주태성, 도종남(2005), SCM 친환경주입공법에 의한 차수 효과에 관한 연구, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol. 6, No. 4, pp. 65~71.
  9. 천병식, 이재영, 하광현(2002b), 지반주입재 종류별 주입특성 및 환경적 유해성에 관한 연구, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol. 3, No. 4, pp. 37~49.
  10. 한양대학교(2011), NDS공법의 초미립자 시멘트를 사용한 친환경적이고 내구성이 뛰어난 무기질계 지반주입재의 적용성 연구, pp. 14~17.
  11. 島田俊介, 兼松 陽(1977), *最新の地盤注入工法*, 理工圓書, pp. 34~36.
  12. 所 武彦, 高橋則雄, 奥村英二(1989), 水ガラス系グラウトの耐久性について, *土質工學研究發表會*, 第24回, pp. 42~43.

(접수일: 2011. 4. 11 심사일: 2011. 4. 21 심사완료일: 2011. 6. 10)