

## 환경 친화적인 무기질계 지반주입재의 내구성 및 차수효과에 관한 연구

### A Study on Durability and Impermeability of Environmentally Friendly Inorganic Ground Injection Material

천병식\* · 강형남\*\* · 도종남† · 임주현\*\*\*

Chun, Byungsik\* · Kang, Hyoungnam\*\* · Do, Jongnam† · Lim, Jooheon\*\*\*

#### Abstract

Recently, the ground injection method using water glasses as one of the main resources and the products of these constructions have basic problems in terms of the method of constructions for the permanent foundation reinforcement and stopping leakage of water because they have some serious problems such as durability, compressive strength, injectant eluviation and so forth even though they are still used to stop leakage of water in the temporary structures. The purpose of this study is to demonstrate the strength characteristic and environment friendliness of NDS method by unconfined compressive strength test, permeability test, length change test, leaching test, and assessment of environmental impact in comparison water glass type material. The test results show that NDS method has significant improvement of strength, permeability, volume change, and leaching. An assessment of environmental impact also demonstrates that the NDS material is environmentally friendly.

**Keywords** : NDS, Impermeability, Ground improvement, Leaching, Environment friendliness, Inorganic injection

#### 요 지

최근 건설현장에서 물유리계 공법의 현장적용 시 고결체의 결과물은 내구성, 강도, 용탈에 대한 평가에 있어서 차수목적으로는 적용이 가능하나 영구적인 지반보강 및 차수를 위한 공법으로는 그 한계성이 지적되는 바, 시멘트계 급결재와 무기질계 초미립자를 주원료로 하는 순수 무기질 재료를 사용하여 시공한 후 내구성 및 강도가 우수하고 주입성이 탁월한 동시에 주입재의 용탈현상이 발생하지 않아 친환경적이고 영구적인 차수 및 보강에 적합한 환경 친화적 공법에 대한 연구를 수행하게 되었다. 본 연구는 지반보강 목적으로 무기질계 지반주입공법(NDS)을 적용할 경우에 사용되는 무기질계 고성능 지반안정재에 대하여 일축압축강도시험, 투수시험, 길이변화시험, 용탈시험, 환경유해성시험을 통해 물유리계 재료와 비교하여 NDS공법의 강도 특성과 친환경성을 규명하고자 하였다. 그 결과 강도 및 투수성이 향상되었고 길이변화율은 담수에서는 494,186배, 해수에서는 61,927배로 크게 개선되었으며, 용탈되는 원소의 총량도 극히 작았다. 또한 환경유해성평가 결과 Zn을 제외한 중금속 성분이 검출되지 않아 친환경적인 재료임을 입증하였다.

**주요어** : NDS, 차수, 지반보강, 용탈, 친환경, 무기질 재료

#### 1. 서 론

약액주입 공법의 주재료의 하나인 물유리를 사용하는 고결체의 결과물은 그 내구성, 강도, 용탈 등의 문제

로 인하여 가시적 차수의 목적으로는 사용(천병식 등, 1997 ; 천병식 등 1998)이 가능하나 영구적인 지반보강 및 차수를 위한 공법으로는 본질적인 문제점(천병식 등, 2002)을 가지고 있다. 반면에, NDS공법

\* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 한양대학교 대학원 박사과정 토목공학과

† 정회원, 한양대학교 대학원 석박사과정 토목공학과(E-mail : donamtech@empal.com)

\*\*\* 비회원, 한양대학교 대학원 석사과정 토목공학과

(Natural and Durable Stabilizer)은 지반개량 재료로 시멘트계 급결재와 무기질계 초미립자를 주원료로 하는 순수 무기질 재료를 사용하여, 기존의 물유리계 재료를 사용할 경우 발생하는 용탈현상 및 강도저하를 해결하여, 시공 후 내구성 및 강도가 우수하고 주입성이 탁월한 동시에 주입재의 용탈 현상이 발생하지 않아 환경오염 문제를 해결한 영구적인 차수 및 보강에 적합한 환경 친화적 공법이다. NDS공법의 특징은 무공해 주입성, 우수한 내구성, 강도 발현, 수밀성 및 투수계수 저하, Gel Time 조절용이, 장기강도 우수 등이다. 이에 본 연구는 지반보강 목적으로 NDS공법을 적용할 경우에 사용되는 무기질계 고성능 지반안정재에 대하여 일축압축강도 시험, 투수시험, 체적변화시험 및 각종 화학저항성 시험을 물유리계 재료와 비교하여 NDS공법의 강도 특성과 친환경성을 규명하고자 하였다.

## 2. 시료제작

본 실내시험에 사용된 NDS시료는 순결재(NDS ES60),

표 1. NDS 시료의 배합비

(단위 : kg)

구 분	A 액(200 ℓ)			B 액(200 ℓ)	
	NDS ES	물	NDS AC	NDS UF	물
순결재	60	179.3	2.1	160	147.5
급결재	40	186.2	2.1	120	160.7
완결재	20	193.1	-	100	167.2

표 2. 실내시험용 물유리계 L공법 시료 배합비

구 분	A 액(500 ℓ)		B 액(500 ℓ)		
	물유리(kg)	물(ℓ)	시멘트(kg)	벤토나이트(kg)	물(ℓ)
배합비	350	150	120	20	430

표 3. 실내시험용 물유리계 S공법 시료 배합비

구 분	A 액(200 ℓ)		B 액(200 ℓ)		
	물유리(kg)	물(ℓ)	시멘트(kg)	보조제(kg)	물(ℓ)
급결재	100	100	60	23	167
완결재	100	100	60	24	167

표 4. 담수를 사용한 NDS시료의 일축압축강도시험 결과

시료	사용수	재령별 압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )					
		12 hr	1 day	3 day	7 day	14 day	28 day
NDS ES 60	담수	12.40	16.36	20.44	23.46	26.26	27.03
NDS ES 40	담수	2.03	3.56	8.61	11.36	14.73	16.39
NDS ES 20	담수	0.91	2.23	3.15	5.23	6.20	8.32

급결재(NDS ES40), 완결재(NDS ES20)의 세가지로 구분하여 제작하였으며 각 시료의 배합비는 표 1과 같다(박춘식, 2002).

그리고, 비교시험에 사용된 물유리계 공법의 재료는 국내에서 널리 시공되고 있는 물유리계 L공법과 S공법을 선택하였으며 배합비는 표 2, 3과 같으며 표에서 알 수 있듯이 두 공법 모두 A액에 물유리성분이 포함되어있다.

## 3. 일축압축강도시험

「흙의 일축압축시험방법(KSF 2314)」의 규정(한국 표준협회, 2000)을 바탕으로 일축압축시험을 실시하였다. 일축압축강도시험의 공시체는 순결성(NDS ES60), 급결성(NDS ES40), 완결성(NDS ES20)으로 구분하여 제작하여 담수와 해수를 혼합하여 재령별로 일축압축강도시험을 실시하였으며 결과는 표 4와 같다. 또한 담수와 해수를 혼합한 시료의 일축압축강도 차이를 알아보기 위하여, 급결성 NDS ES40에 담수와 해수를 각각 혼합한 후 일축압축강도시험을 실시하였으며 결

표 5. 해수를 사용한 NDS시료의 일축압축강도시험 결과

시료	사용수	재령별 압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )					
		12 hr	1 day	3 day	7 day	14 day	28 day
NDS ES 40	해수	2.90	4.94	7.70	10.22	12.96	13.61

표 6. 담수를 사용한 NDS시료의 일축압축강도시험 결과

시료	사용수	재령별 압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )					
		12 hr	1 day	3 day	7 day	14 day	28 day
NDS ES 40	담수	2.03	3.56	8.61	11.36	14.73	16.39
물유리계 S공법	담수	2.01	3.62	7.48	11.03	12.31	13.75

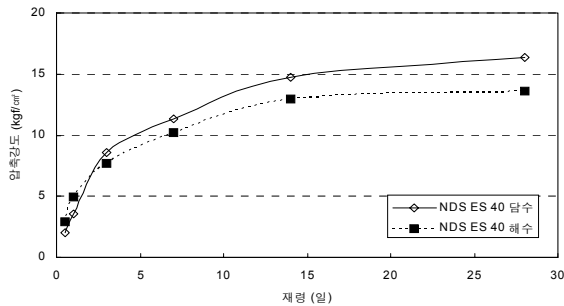


그림 1. 담수와 해수를 사용한 NDS ES40의 재령별 일축압축강도

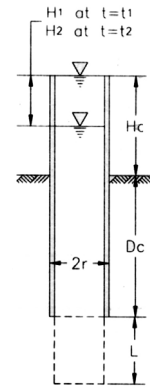


그림 2. 실내 변수위투수시험 모식도

과는 표 5와 같다.

그림 2에서 NDS ES 40을 담수와 해수를 혼합하여 양생한 결과 재령 28일에서의 일축압축강도는 담수의 경우 약 16.4kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났으며 해수는 14.6kgf/cm<sup>2</sup>으로 해수의 경우에 다소 일축압축강도가 감소하는 경향을 나타내었다.

각각의 배합별, 재령별 압축강도는 NDS ES20, NDS ES40, NDS ES60의 순서로 급결성일수록, 재령이 증가할수록, 해수보다는 담수에서 일축압축강도가 증가함을 알 수 있었다.

그리고 NDS공법과 물유리계 공법의 일축압축강도를 비교하기 위하여 같은 조건하에서 비교 실험을 실시하였다. NDS공법 및 물유리계 S공법에 담수를 사용하여 급결성 시료를 제작하여 재령별로 일축압축강도를 측정하였으며, 그 결과는 표 6과 같다. 표 6에서 NDS시료가 S공법시료보다 재령 28일강도가 16.39kgf/cm<sup>2</sup>으로 크다는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 투수시험

NDS공법의 시료와 물유리계 S공법 시료의 투수계수를 비교(日本藥液注入協會, 2002)하기 위하여 직경

10cm, 길이 12.74cm의 공시체를 제작한 후 수중양생을 실시, 재령 28일째 탈형하여 실내투수시험을 위한 시편을 제작 하였다. 그러나 물유리계 S공법과 L공법의 시편은 투수몰드로부터 탈형한 결과, 변형 및 수축이 현저하여 투수시험을 실시할 수 없었다. 따라서, 기존의 물유리계 L공법의 연구보고서(천병식 등, 2006)를 참고하여 NDS시료와 투수계수를 비교하였다.

참고 보고서에 의하면 변수위투수시험은  $\phi 5\text{cm}$ 의 casing을 원지반 및 LW고결토에 소량의 물을 공급하며 케이싱내의 흙을 제거하면서 회전천공하여 10cm관입한 뒤 케이싱 내에 물을 가득 채우고 수위변화량과 시간을 측정하는 방법으로 실시하였다.

그림 2는 실내 변수위투수시험 모식도이며 식 (1)에 의해 투수계수를 산정한다(천병식 등, 2001).

$$K = \frac{r^2}{2L(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{L}{r}\right) \ln\left(\frac{(H_c + D_c) - H_1}{(H_c + D_c) - H_2}\right) \quad (1)$$

여기서, K : 투수계수(cm/sec)  
L : 시험구간(cm)  
r : 케이싱 반경(cm)

- $H_c$  : 지표에 노출된 케이싱 길이(cm)
- $H$  : 정수두(cm)
- $D_c$  : 지중에 삽입된 케이싱 길이(cm)
- $H_1, H_2$  : 시간에 따른 수위강하 거리(cm)
- $D$  : 시추공경(cm)
- $t_1, t_2$  : 측정시간(cm)

따라서 물유리계 L공법과 투수계수를 비교 하기 위해서 동일한 방식으로 투수계수를 측정하였으며, 그 결과는 표 7과 같다.

투수시험결과 물유리계 L공법 시료의 투수계수는  $2.76 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 였고, NDS공법 시료의 투수계수는  $5.16 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 로 투수계수가 작게 나타났지만 아주 근소한 차이를 보였다. 하지만 참고보고서(천병식 등, 2006)에 의하면 L공법이 적용되지 않은 원지반의 투수계수가  $4.09 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 이었고 L공법이 적용된 지반의 투수계수가  $2.76 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 으로 개선되어 차수성면에서 현장에 적용하는데 무리가 없다고 판단 되어 실제로 현장에 적용하였다. 실제로 적용된 현장의

토층 구성 상태는 표 8과 같다. 이로 미루어 보아 NDS 공법이 L공법이 적용된 지반의 투수계수와 비슷한 값을 보이므로 차수성을 요구하는 곳에 적용이 가능하다고 판단된다.

## 5. 길이변화 시험

NDS공법과 물유리계 공법의 내구성을 알아보기 위하여 길이변화시험을 실시하였다. 본 시험은  $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 16\text{cm}$ 의 NDS시료와 물유리계 S시료의 양생방법에 의한 수축정도를 비교하기 위하여 각각 대기양생 및 수중양생(25°C)을 실시하여 길이변화를 측정하였다. 또한 담수와 해수를 혼합했을 때의 수축거동을 비교하기 위하여 담수와 해수를 각각의 시료에 혼합하여 시험을 실시하였다. 길이변화는 재령별로 1방향 수축량과 수축률을 모르타르 길이변화측정기를 이용하여 측정(천병식, 2005)하였다.

표 9는 담수를 사용하여 시료를 제작하여 대기 및

표 7. 투수시험 결과

(단위 : cm/sec)

구분		1회	2회	3회	평균	
NDS	ES60	$4.5 \times 10^{-6}$	$5.1 \times 10^{-6}$	-	$4.77 \times 10^{-6}$	$5.16 \times 10^{-6}$
	ES40	$6.0 \times 10^{-6}$	$5.4 \times 10^{-6}$	-	$5.71 \times 10^{-6}$	
	ES20	$4.4 \times 10^{-6}$	$5.6 \times 10^{-6}$	-	$5.01 \times 10^{-6}$	
물유리계 L공법		$2.68 \times 10^{-6}$	$2.35 \times 10^{-6}$	$3.26 \times 10^{-6}$	$2.76 \times 10^{-6}$	

표 8. L공법이 적용된 지층의 토질 구성상태

지 층	통 일 분 류	두 계(m)	N치(TCR/RQD)
매 립 층	점토질 또는 실트질모래	2.1~2.7	12/30~15/30
풍 화 토	실트질모래	4.7~5.1	25.30~50/11
풍 화 암	HW(높은풍화)	4.9~5.4	50/9~50/2
연 암	MW(보통풍화)		-
지하수위	G.L-1.8m		

표 9. NDS시료와 물유리 S시료의 양생조건별 수축량

(단위 : cm)

양생조건	시료	혼합수	1일	3일	5일	7일	14일	28일
대기양생	NDS 공법	담수	0	0.019	0.027	0.031	0.040	0.082
		해수	0	0.027	0.043	0.057	0.089	0.123
	물유리계 S공법	담수	0	0.745	1.760	2.540	4.540	5.730
		해수	0	0.705	1.355	2.115	4.190	6.870
수중양생	NDS 공법	담수	0	0.013	0.016	0.016	0.020	0.064
		해수	0	0.081	0.095	0.102	0.107	0.141
	물유리계 S공법	담수	0	0.165	0.827	1.654	2.811	7.772
		해수	0	1.356	2.877	3.505	4.465	9.922

수중 양생 시 재령 28에서 NDS시료와 물유리계 S공법의 수축량을 나타낸 것이다. 담수를 사용하여 시료를 제작하고 대기양생 시 NDS시료는 수축량이 81.75 $\mu$ m로 나타난 것에 반해 물유리계 S공법은 5.73cm로 나타나 NDS시료에 비해 약 700배의 수축량을 보였으며 이를 선형변형율로 환산할 경우 NDS시료는 0.03%, 물유리계 S공법은 14.46%로 NDS 시료의 약 480배의 변형율을 나타냈다. 그리고, 해수를 사용하여 시료를 제작한 후 대기양생 시에는 재령 28일에서 NDS는 122.3 $\mu$ m, 물유리계 S공법은 6.87cm의 수축량을 보여 약 560배의 차이를 보였고, 수축율은 각각 약 0.05%, 17.46%로 나타나 약 350배의 차이를 보였다.

수중양생 시 담수를 사용하여 시료를 제작한 NDS와 물유리계 S공법의 재령 28일 시편의 수축량은 각각 63.5 $\mu$ m와 2.35cm로 나타나 물유리계 S공법의 시료가 NDS시료보다 약 370배의 수축량을 보였다. 변형율은 NDS시료가 0.02%, 물유리계 S공법이 7.77%로 약 310배의 차이를 보였다. 해수를 사용하여 시료를 제작하여 수중양생 시에는 재령 28일 NDS시료의 수축량이 140.75 $\mu$ m로 나타났고 물유리계 S공법은 3.0cm로 나타나 약 210배의 수축량을 보였고 0.05%, 9.92%의 수축율을 각각 나타나 약 180배의 차이가 났다.

이 결과로부터 시료의 종류에 상관없이 해수를 사용한 시료가 수축량이 크고, 대기양생을 시킨 것이 수중양생을 시킨 시료보다 수축량이 크다는 것을 알 수 있었다. 또한 물유리계의 S공법시료가 NDS시료보다 수축량이 크기 때문에 NDS시료가 S시료보다 내구성면에서 우수하다는 것을 알 수 있었다.

## 6. 용탈시험

### 6.1 시험방법

용탈시험은 회분식과 연속식의 방법으로 행하였으며 시험은 탈이온수 중에 체적비 1:10으로 하여 함침시킨 상태에서 시행(Karol, 2003)하였다. 고상시료는 NDS, 물유리계 L공법, 물유리계 S공법으로 구분하여 각각 제작한 후 대기 중에 양생시킨 후 탈이온수에 옮겨 회분식 또는 연속식으로 시간변화에 따른 용탈량을 측정하였으며, 용탈액에 함유된 각종 금속성분의 농도와

pH를 측정하였다.

각 시험의 측정 항목은 다음과 같다.

- 용출시험 : 주요 5개 원소(Ca, Al, Si, Na, K)의 농도 분석, pH 측정
- 환경유해성시험 : 중금속(Cu, Pb, As, Hg, Cd, Cr<sup>6+</sup>, Zn) 측정

pH meter를 이용하여 아래와 같은 방법으로 용탈액의 원소를 분석하였다.

- 원자흡광분광 광도계의 흡광법 : Ca, Na, K, Cu, Cd, Cr<sup>6+</sup>, Zn
- 원자흡광분광 광도계를 이용한 환원기화법 : As, Hg
- ICP에 의한 정량 분석 : Si, Al, Pb

## 6.2 실험결과

본 실험에서와 같이 짧은 시간 동안에는 주로 표면 상에서의 용탈 정도만을 규명할 수 있을 것으로 판단(Krizek, 2000)하여 용탈액 중의 시간 변화에 따른 각 성분들의 용해정도를 시료의 종류에 따라 NDS, 물유리계(S, L)로 구분하여 결과를 나타내었다.

### 6.2.1 회분식 시험 결과

세 종류의 시료(NDS, 물유리계 S, 물유리계 L)를 30분에서 48시간까지 다양하게 대기 중에 양생시킨 후 탈이온수 체적비 1 : 10으로 2시간 또는 24시간 동안 회분식으로 용탈시켰다. 시험결과는 그림 3과 같이

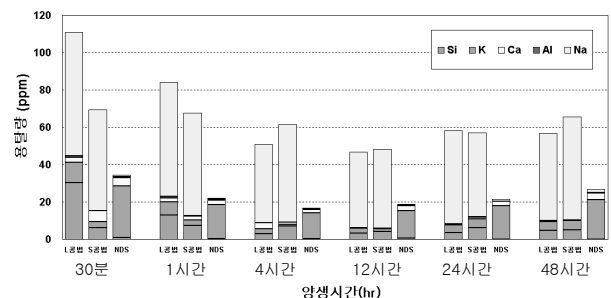


그림 3. 회분식 용탈시험 결과(24시간 용탈)

모든 시료는 양생시간이 경과할 수록 수증으로의 용탈 정도는 감소하는 경향을 보였다. 그 중에서도 NDS의 경우, 초기 경화속도가 현저하게 빠를 뿐만 아니라, 실험의 범위에서 용탈되는 원소의 총량도 가장 적은 양을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

### 6.2.2 연속식 시험결과

세 종류의 시료(NDS, 물유리계 S, 물유리계 L)에 대하여 30분에서 48시간 동안 각각 대기 중에 양생시킨 후, 회분식과 같은 조건으로 연속 용탈시험을 실시하였다. 용탈량을 확인하는 용액은 30분에서 48시간까지 적당한 간격으로 채취하였으며, 그 결과는 그림 4와 같다. 시험결과를 정리하면 NDS 시료의 경우 초기 경화속도가 극히 빠르며 총용탈량이 물유리계 시료에 비해 극히 적은 것을 알 수 있었다.

## 7. 환경유해성 시험

시멘트 함유성분 외의 성분이지만 지하수를 오염시킬 수 있는 중금속류를 대상으로 환경유해성 평가를 실시(Johnson, 2003)하였다. 환경부 ‘먹는물 수질공정시험방법’에서 중금속으로 분류된 Cu, Pb, As, Hg, Cd, Cr<sup>6+</sup>, Zn을 대상으로 분석을 실시하였으며 용탈액 중의 원소함량이 가장 높은 48시간의 용탈액을 시료로 이용하였다.

이들 중금속들은 용탈액의 pH가 알칼리 영역이기

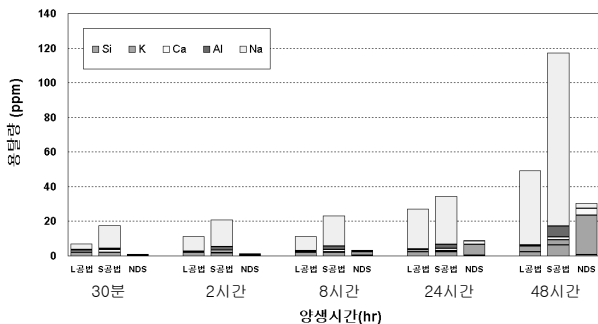


그림 4. 연속식 용탈결과(48시간 용탈)

표 10. 환경유해성 시험결과

(단위: ppm)

원 소	Cu	As	Hg	Cd	Pb	Cr <sup>6+</sup>	Zn
금속이온농도	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.01

때문에 수산화물 침전을 형성하여 검출되지 않을 수도 있으나, 용탈액에 함유될 가능성은 배제할 수 없다.

환경유해성 시험은 국가공인시험기관을 통해 실시하였으며, 그 결과는 표 10과 같이 용탈에 의한 중금속 성분은 Zn을 제외하고 모두 ND(Not Detected : 검출되지 않음)으로 나타나 환경오염 가능성은 거의 없다고 사료된다.

## 8. 결론

본 연구는 무기질계 고성능 지반안정재(NDS공법)의 강도특성 및 차수성을 규명하고자 물유리계 공법(S, L시료)과 시험을 통해 비교하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 재령 28일에서의 일축압축강도시험 결과 NDS 시료의 배합별, 재령별 압축강도는 급결성일수록, 재령이 증가할수록, 해수보다는 담수에서 일축압축강도가 증가함을 알 수 있었다. 그리고 NDS공법과 물유리계 공법의 일축압축강도를 비교하기 위하여 같은 조건하에서 비교 실험을 실시한 결과 NDS시료가 S공법시료보다 재령 28일강도가 16.39kgf/cm<sup>2</sup>으로 크다는 것을 알 수 있었다.
- (2) 변수위투수시험결과 물유리계 L공법 시료의 투수계수보다 NDS공법시료의 투수계수는 5.16×10<sup>-6</sup>cm/sec로 투수계수가 근소한 차이로 작게 나타났으며, 참고보고서에 의한 L공법은 실제로 현장에 적용되었고, L공법의 투수계수는 2.76×10<sup>-6</sup>cm/sec이고 NDS공법시료의 투수계수는 5.16×10<sup>-6</sup>cm/sec였다. 이로 미루어 보아 NDS공법이 L공법이 적용된 지반의 투수계수와 비슷한 값을 보이므로 차수성을 요구하는 곳에 적용이 가능하다고 판단된다.
- (3) 체적변화시험에서 NDS공법과 물유리계 S공법시료에 담수와 해수를 각각 혼합하여 제작하여 각각

의 시료를 수중양생 및 대기양생을 실시한 후 제령28일의 수축량을 비교한 결과는 담수를 혼합한 시료는 수중양생시의 수축량은 S시료가 NDS시료에 비해 700배의 수축량을 보였고, 대기양생시에는 370배의 수축량을 보였다. 또한 해수를 혼합한 시료는 수중양생시의 수축량은 S시료가 NDS시료에 비해 210배, 대기양생시에는 560배의 수축량을 보였다. 이 결과로부터 S시료가 NDS시료보다 수축량이 크기 때문에 내구성면에서 NDS시료가 S시료보다 우수하다는 것을 알 수 있다.

초기 경화속도가 현저하게 빠를 뿐만 아니라, 실험의 범위에서 용탈되는 원소의 총량도 극히 작은 양을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

(5) 환경부 ‘먹는물 수질공정시험방법’에서 중금속으로 분류된 Cu, Pb, As, Hg, Cd, Cr<sup>6+</sup>, Zn을 대상으로 국가공인시험기관을 통해 환경유해성시험을 실시하였으며, 그 결과는 용탈에 의한 중금속 성분은 Zn을 제외하고 모두 불검출되어 환경적으로 안전함을 알 수 있었다.

(4) 용탈시험결과 NDS시료는 물유리계 시료에 비해

(접수일 : 2006. 9. 19 심사일 : 2006. 10. 10 심사완료일 : 2006. 11. 15)

### 참 고 문 헌

1. 천병식 등(1997), *지반보강용 마이크로시멘트 및 실리카졸의 실용화 연구*, 연구보고서, 건설교통부, pp. 152~186.
2. 천병식, 김진춘(1998), *지반주입제의 공해성 평가에 관한 연구*, 1998년도 *봄학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, pp. 321~326.
3. 천병식, 유한규(2001), *토질실험 및 지반조사*, (주)건설연구사, pp. 37~39.
4. 박춘식 등(2002), *무기질계 고성능 지반안정제를 사용한 NDS공법의 특성에 관한 연구*, 연구보고서, 창원대학교 산업기술연구원, pp. 7~39.
5. 천병식 등(2002), *S.R.C 공법의 특성 및 현장 적용성에 관한 검토 연구*, 연구보고서, 한양대학교, pp. 1~5.
6. 천병식(2005), *최신 지반주입 -이론과 실제-*, 원기술, pp. 169~170.
7. 천병식 등(2006), *인천 논현 2지구 10단지 아파트 현장 LW주입공법의 현장적용에 따른 환경영향성 및 차수효과에 관한 연구*, 연구보고서, KGS06-48, 한국지반공학회, pp. 32~34.
8. 日本藥液注入協會(2002), *正しい藥液注入工法*, 日刊建設工業新聞社, 九州, pp. 315~355.
9. Johnson, L. F.(2003), *Grouting and Ground Treatment*, ASCE, Va., pp. 100~116.
10. Krizek, R. J.(2000), *Advances in Grouting and Ground Modification*, ASCE, Va., pp. 155~172.