

시멘트계 주입재 종류별 주입 특성 및 환경적 영향 연구

The Injection Characteristics and Environmental Effects for Grouting Materials Based on Cement

천 병 식*¹ Chun, Byung-Sik

이 재 영*² Lee, Jai-Young

서 덕 동*³ Seo, Deok-Dong

Abstract

In this study, the mixed design of grout with high strength · high permeation · high durability and environmental stability as the state of the art in material field was performed. Also, the subjects of grouting, grouting effects for ground conditions, and environmental effects were analyzed. According to these results, the fundamental data will be suggested as a design of grouting in the field application. The physical, mechanical and chemical characteristics with particle shape of the grouts were analyzed. Then, the gel-time of grouts, which is essential for workability and permeation range, were controlled. Also, the laboratory model grouting tests were performed to find the characteristics of solidification, permeation and durability with grouts. The ordinary portland, slag and microcement which have been used in the construction field were evaluated for the environmental effects. To find the leaching of Cr^{6+} characteristics in cement grouts, Cr^{6+} leaching tests were performed for the raw materials. Also, the results of leaching test were shown by surrounding environment. Then, the unconfined compression strength tests were performed with the homo-gel samples, and the amount of changed Cr^{6+} was measured by curing solution.

요 지

본 연구에서는 재료분야에서 최근의 기술동향인 고강도 · 고침투성 · 고내구성 및 환경에 대한 안정성이 높은 주입 재료의 배합설계를 실시하여 주입목적, 지반조건에 따른 주입효과와 환경적 영향성을 분석 · 검토함으로써 현장적용 시 주입설계의 기초자료로 제안하고자 한다. 주입재의 물리, 역학 · 화학적 특성 및 입자형상을 파악하고 작업성과 침투범위 조정에 필수적인 겔타임을 조정하였다. 또한 실내모형시험을 통하여 고결성, 침투성 및 내구성 평가를 수행하였다. 환경적 영향평가를 위해 본 연구에서 사용된 재료는 현장에서 일반적으로 사용되는 보통포틀랜드시멘트, 고로슬래그시멘트와 초미립자시멘트를 사용하였다. 시멘트계 그라우트재에서의 6가 크롬의 용출특성을 판단하기 위해 원재료의 6가크롬 함유량 시험과 pH변화에 따른 6가크롬의 용출변화량 시험 그리고 그라우트가 적용되는 주변환경에 따른 특성파악을 위해 호모겔을 제작하여 양생수를 각각 초순수, 침출수로 하여, 양생수에 따른 그라우트 호모겔의 일축압축강도 및 6가크롬 용출량의 변화를 시험하였다.

Keywords : Cr^{6+} , Curing solution, Durability, Environmental effects, Permeation, Solidification

*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Institute of Technology, Hanyang Univ., hengdang@unitel.co.kr)

*2 정회원, 서울시립대학교 공과대학 환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Environmental Engrg., Institute of Technology, Univ. of Seoul)

*3 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

1. 서론

국내에서는 1970년대 중반부터 시작된 지하철전설 공사를 계기로 주입공법이 본격적으로 활용되기 시작하였으나, 본 공법에 대한 전문지식과 축적자료의 부족으로 인해 체계적이며 이론적인 토대 없이 주로 경험에 의존하여 설계·시공되었을 뿐만 아니라, 시공효과의 확인도 제대로 이루어지지 않는 사례가 많았고 이로 인하여 많은 문제점들이 야기되어 왔다. 종래, 주입공법은 응급대책 또는 보조공법으로서 주로 사용되어 왔으나, 점차 본격적·항구적 지반보강공법으로 되어가고 있으며 강도 및 내구성 증대, 차수성 증대 등 광범위하게 사용되고 있다(천병식, 1994). 이에 임의의 대상토의 물리적 특성에 맞춰 주입재의 선정과 침투성의 문제, 그리고 겔타임이나 점성에 따른 고결성의 변화 등에 대한 평가문제, 환경영향성 평가 문제 등에 대한 연구, 검토가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 재료분야에서 최근의 기술동향인 고강도·고내구성 주입재료와 환경에 대한 안정성이 높은 주입재료의 반응메커니즘을 규명하고 이들의 현장 적용성을 높일 수 있는 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 시멘트계 주입재의 특성

2.1 물리적 특성

표 1에서 보는 바와 같이 초미립자시멘트는 보통포틀랜드시멘트에 비해서 유동성이 뛰어나고, 장기강도는 물론 초기강도도 매우 우수한 특성을 나타내고 있다.

2.2 화학적 특성

초미립자시멘트와 보통포틀랜드시멘트의 화학성분을 나타낸 것으로서 무기질로 구성되어 있으며, 화학성분의 차이가 있다. 시멘트계 주입재의 염기도는 수화활성도를 나타내는 지표로서 염기도가 클수록 수화활성이 크기 때문에 주입경화재로서 유리하다.

2.3 현탁액형 주입재의 입도 특성

현탁액형 주입재의 입도분포 및 입자형상은 현탁액형 그라우트의 전단응력과 밀접한 관계가 있다. 즉, 입자가 미세할수록 입자형상의 장축직경에 대한 그 구체의 이상적인 구의 직경과의 비로써 표현되는 구상화율이 작을수록 현탁액형 그라우트의 점성은 증가하므로 전단응력이 커진다. 보통포틀랜드시멘트의 구상화율은 보통 0.65~0.68정도로 알려져 있고, 이보다 미세한 초미립자시멘트의 구상화율은 클 것이므로 주입재의 전단응력이 작아지기 때문에 주입압의 손실이 줄어들 수 있으므로 침투력이 향상될 것이다. 본 연구에 사용된 시멘트계 주입재의 입도분석결과는 그림 1과 같다.

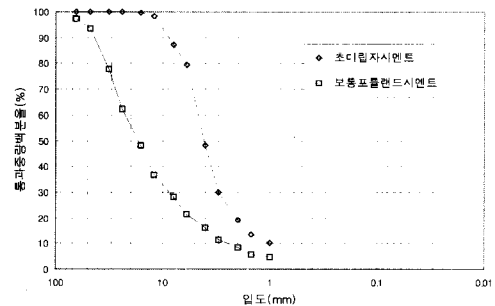


그림 1. 시멘트계 그라우트의 입도분포곡선

표 1. 시멘트계 주입재의 물리·화학적 특성

	KS 규정값	초미립자시멘트	보통포틀랜드시멘트	
비 중	-	2.93	3.15	
분말도(cm ² /g)	2800 이상	8070	3250	
이 용 결	W/C(%)	-	25.5	25.5
	초결(분)	60 이상	195	170
	종결(시:분)	7 이하	9:20	7:30
Flow(%)	110±5	112.4	113.3	
압 축 강 도	W/C(%)	-	43.5	49.7
	1일 (kg/cm ²)	-	177	61
	3일 (kg/cm ²)	110 이상	315	202
	7일 (kg/cm ²)	190 이상	509	264
	28일 (kg/cm ²)	290 이상	655	405
염기도 = (Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ + CaO)/SiO ₂	염기도 규격>1.4	2.3	3.4	

3. 시험

3.1 주입재의 겔타임 조정

본 절에서는 현탁액형(규산나트륨 3호 + 초미립자시멘트, 보통포틀랜드시멘트)에 대한 겔타임을 조정하였다. 겔타임은 A액과 B액을 1:1로 교반할 때 겔타임을 측정하는 것으로서 주입재의 작업성 및 침투범위 조정에 필수적인 물리적 특성이다.

겔타임은 현장에서 수시로 할 수 있는 간이적인 방법을 이용하여 약 200cc의 종이컵에 A액과 B액을 각각 70cc씩 계량하고 약 1초 간격으로 교반하면서 고결할 때까지의 시간을 측정한다.

3.2 호모겔 강도측정

호모겔 압축강도는 A액과 B액을 1:1로 교반할 때 겔화 후 재령별로 강도발현특성이다. 주입재가 지반에 침투주입된 후에는 샌드겔이 되지만, 주입대상토질의 대표성을 정하기가 어렵기 때문에 샌드겔 강도로 평가하기가 어렵다. 따라서, 주입재의 강도특성을 평가하는 경우 주로 호모겔 강도를 이용한다. 각 주입재의 배합은 위의 비중을 기준으로 계산하였으며, 100cc를 기준으로

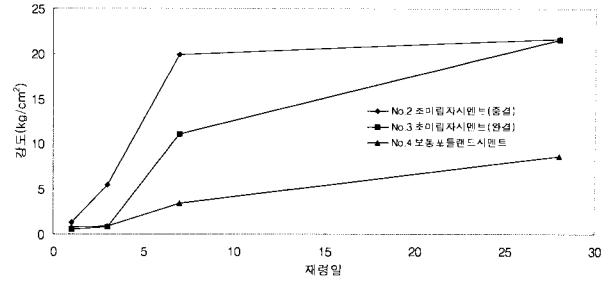


그림 2. 주입재별 호모겔 압축강도 변화

A액(50cc)+B액(50cc)=100cc가 되게 하여 종이컵을 이용해 혼합하여 겔타임을 측정하였고, 점도측정은 A액, B액 각각 5배로 하여(500cc) 혼합 시작 10초 후에 측정하였다. 특히, 여기서 주의할 것은 A액, B액 제조 후 각각 충분한 반응을 위해 5분 정도 정치하고 A액과 B액을 혼합한다. 또한, 용액형의 경우는 B액의 반응제의 첨가량에 민감하므로 1/10000자리까지 정밀하게 계량한다.

3.3 주입효과 판정시험

3.3.1 대상시료토

(1) 대상시료토의 입도분포

대상시료토에 대한 입도분석을 수행한 결과, 표 3과 같은 입도분포로 나타났으며 입도조성이 균등함을 알 수 있다.

표 2. 현탁액형 주입재 배합

a. 초미립자시멘트									
배합 번호	A(g)		B(g)			Gel-time(sec)	점도(cps)	비 고	
	규산소다 3호	물	물	초미립자시멘트					
				급결	중결				완결
No.1	28 (20%)	30	43	21.5		9~12	측정불능	*급결,중결 -규산:물=4:6 *완결 -규산:물=3:7	
No.2			43		21.5	50~70	6.5		
No.3	21(15%)	35	45.3		15.1	300분~360	6.5~7		

b. 보통포틀랜드시멘트								
배합 번호	A(g)		B(g)		Gel-time(sec)	점도(cps)	비 고	
	규산소다 3호	물	물	초미립자시멘트				
				중결				
No.4	35(25%)	25	43	21.5	50~70	7	규산:물=4:6	

표 3. 주입대상시료토의 입도분포 특성

대상시료토	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _g	통과량(%)				통일 분류
						No. 4	No.10	No.40	No.200	
굵은모래	0.4	0.6	1.05	2.63	0.86	99.30	85.41	10.24	0.70	SP
중간모래	0.12	0.35	0.48	4.00	2.127	98.07	98.29	37.44	6.68	SP

* D₁₀: 통과백분율 10%, D₃₀: 통과백분율 30%, D₆₀: 통과백분율 60%, C_u: 균등계수, C_g: 곡률계수

(2) 대상시료토의 비중 및 공극율

대상시료토의 비중과 공극율은 표 4와 같다. 공극율은 건조단위중량과 비중으로부터 구해진다. 공극율은 시료의 다짐정도에 따라 달라지므로 상대밀도를 구하여 공극율을 정하였다. 고결성 시험중 스트레이너를 설치하기 전에 고결몰드에 시료를 채우고 중량을 측정하여 단위중량을 구하고, 단위중량과 비중 및 함수비를 이용하여 공극율을 구한다. 시료토의 단위중량은 건조단위중량을 사용한다.

3.3.2 침투성 시험

(1) 개요

주입에 있어서 가장 큰 문제는 약액의 대상지반에 대한 침투성이다. 즉, 대상지반의 공극이나 주입재의 점성, 입경 등에 의해 주입이 되지 않는 경우가 발생하고, 주입성을 높이기 위해 주입조건에 대한 충분한 검토를 하지 않고 주입량만 증가시켜 오히려 지반의 할렬파괴 및 지반의 변형을 일으켜 시설 인접구조물에 영향을 미치는 등 역효과를 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 초미립자시멘트와 보통포틀랜드시멘트를 이용하여 사질토의 입도 및 다짐상태에 따라 침투성을 비교평가 하고자 한다.

(2) 시험 방법

각 대상시료토의 조건별로 몰드(φ110mm×H 550mm)

체적에 대한 중량을 산정하여 바이브레이터 또는 다짐봉으로 시료토를 다진다. 다짐효과에 편차가 생기지 않도록 시료토를 약 20cm씩 5층으로 나누어서 적절히 다짐하여, 각 층은 방사상의 원형으로 다짐한다. 시료는 가득 채워 주입시 주입압에 의해 위로 뜨지 않도록 한다. 주입관은 토조의 밑에 연결하고 일정한 압력으로 가압하여 주입한다.

3.3.3 고결성 시험

(1) 개요

본 고결성 시험에서는 주입조건을 변화시켜가며 실시하였는데 주입대상토는 건조상태(포화도 0%)의 굵은 모래, 중간모래를 선정하였으며, 입도분포 및 기본 물성 시험은 표 3, 4에 나타난 바와 같다. 주입압은 주입되는 약액을 주입할 때 가하는 압력으로 1.0, 1.5, 2kg/cm²로 가하였다. 또한 주입대상토의 다짐상태는 느슨한 상태, 중간 상태로 구분하여 시험하였다. 느슨 또는 조밀한 정도는 건조단위중량을 측정하여 결정하였다.

주입재의 배합에서 현탁액형 주입재의 경우, 강도강화 또는 겔타임의 조정을 위해 시멘트를 사용할 때는 물/시멘트비도 침투효과에 영향을 미친다. 본 시험에서의 배합비는 표 2에 나타난 바와 같다. 주입구 거리는 A액과 B액의 혼합 직후부터 고결할 때까지 겔타임과 관계되므로 겔타임은 규산소다3호를 사용하여 50~70 초를 표준으로 하였다.

표 4. 주입대상시료의 비중 및 공극율

대상시료토		비 중	건조단위중량(t/m ²)	상대밀도(Dr, %)	공극율(%)
굵은모래	느슨한 상태	2.62	1.49	25	43.2
	중간 상태		1.60	56	39.0
	조밀한 상태		1.74	97	33.6
중간모래	느슨한 상태	2.69	1.50	25	44.3
	중간 상태		1.63	56	39.7
	조밀한 상태		1.75	97	35.1

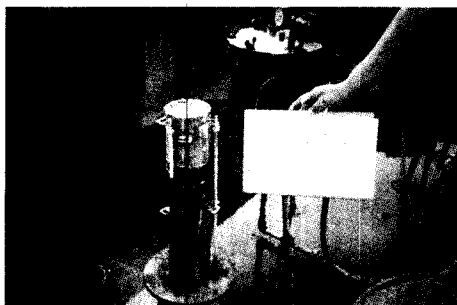


사진 1. 침투성 시험장치

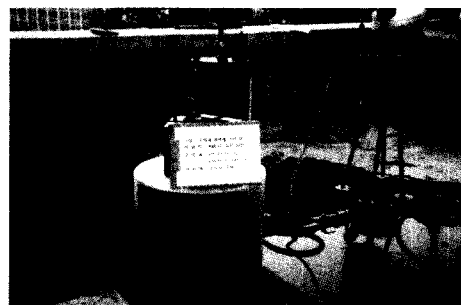


사진 2. 고결성 시험장치

(2) 시험방법

- ① 토조(ø480mm×H 500mm) 무게를 측정한다.
- ② 대상토를 준비하여 토조에 시료를 채우고 무게를 측정한다.
- ③ 대상토의 단위중량으로부터 공극율을 구한다.
- ④ 주입관을 일정 위치에 삽입하고 펌프에 연결한다.
- ⑤ A액과 B액을 배합하고, 압송하여 일정 주입압에서 주입한다.
- ⑥ 탈형하여 침투형상 및 고결체적을 기록한다.
- ⑦ 고결체의 체적과 대상시료의 체적비를 유효고결율이라 한다.

$$\text{유효고결율(\%)} = \frac{\text{실제 고결된 흙의 체적}}{\text{주입대상 흙의 체적}} \times 100 \quad (1)$$

고결체의 실제형상은 복잡하여 정확한 체적을 구하는 것이 어려우므로, 고결토의 높이를 5등분하여 각 부분의 반경을 측정하였다. 고결체의 모양을 단순화시켜 높이 10cm의 5개의 원통으로 나누어, 각 부분의 체적을 각각 구하여 합한 값을 실제 고결된 흙의 체적으로 사용한다. 주입대상 흙의 체적은 몰드 크기를 사용한다.

3.3.4 고결체 강도시험

(1) 고결시료의 채취

본 시험에서는 튜브샘플 방법을 응용한 얇은 관에 의한 흙의 시료채취방법으로써, 고결체의 코어를 채취하기 위해 고결성 시험을 수행한 아크릴 몰드에 튜브를 박아서 일정시간이 지난 후 튜브를 빼어 코어를 채취하여 시험을 하였다.

(2) 시험방법

물과 규산소다3호의 배합비가 1:1인 A액과 물/시멘트비가 200%인 B액을 부피비로 1:1로 혼합하여 2액 1공정으로 주입하여 고결된 시료토인 고결체의 일축압축

강도시험을 수행하였다. 채취된 고결체는 원형몰드 ø5cm×H10cm으로써, 재령 7일, 28일에 대하여 일축압축시험(KS F 2314)을 통해 일축압축강도를 구하였으며, 전단파괴속도는 0.5mm/min으로 하였다.

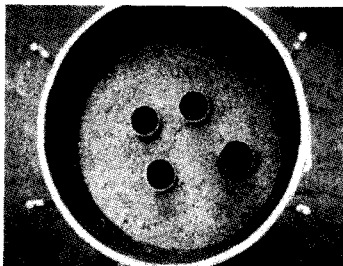
3.3.5 내구성 시험

(1) 개요

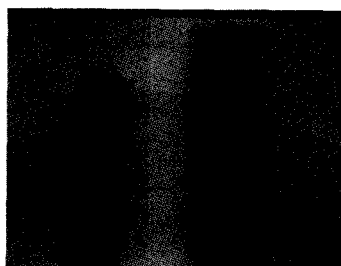
해안지역의 연약지반에서의 대규모 토목구조물 공사 시 기초지반을 보다 경제적으로 조기에 안정시키기 위한 지반개량공법에 시멘트계 주입재나 고화재가 많이 활용되고 있지만 해성점토의 염분, 유기물 또는 SO₄²⁻ 이온 등의 작용으로 인해서 시멘트계 수화물이 팽창 파괴되기 때문에 개량지반의 내구성이 내륙지방에 비해서 크게 저하된다(高田俊介, 1989 ; 檜垣 外, 1983). 최근에는 내화학적 시멘트로 고로슬래그시멘트나 플라이애쉬시멘트 등 혼합시멘트가 오히려 더 일반적으로 사용되는 경향이 있다. 그 이유는 혼합시멘트도 첨가되는 혼합재량의 첨가 비율만큼 C₃A를 감소시키는 효과를 발휘하면서 동시에 혼합시멘트가 갖는 장점을 살릴 수 있기 때문이다. 내구성을 평가하는 시험방법은 여러 가지가 있지만, 본 시험에서는 고결성 및 침투성 시험에서 채취한 시편을 이용하여 재령별 길이변화량과 일축압축강도를 비교하였다.

(2) 시험계획

해수에는 약 35g/l의 각종 염류가 용해되어 있으며 시멘트 수화물의 열화에 가장 큰 영향을 미치는 성분은 MgCl₂ 및 MgSO₄이기 때문에 자연해수의 약 10배 농도인 MgSO₄ 25g/l 부식성 용액을 시험장치에 채우고, 고결성 및 침투성 시험에 의해 제작된 시편을 ø5cm×H10cm로 성형하여 각각의 경우(주입재 2종, 상대밀도 3종류)에 대하여 6개씩을 제작하여 3일, 7일, 28일 재령동안 침전시켜 3개씩 길이변화량과 일축압축강도를 측정하였다(김진춘, 1999).



(a) 얇은 관을 일정한 타격을 가해 삽입한 광경



(b) 튜브에서 추출된 코어시료

사진 3. 고결시료의 코어채취

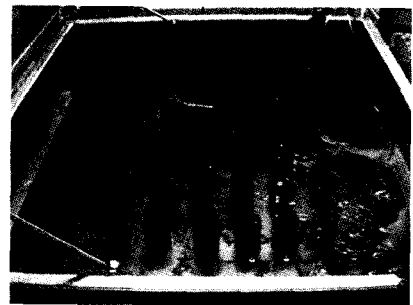


사진 4. 내구성 시험장치

3.4 환경영향성 시험

3.4.1 개요

본 연구에서는 주입재가 가지고 있는 유해성 여부를 평가하기 위해 용출실험을 실시하였다. 용출실험은 폐기물 공정시험법(환경부, 2000)에 준한 방법을 이용하였으며, 대상시료는 약액의 원재료 및 약액주입재의 고결시편의 양생일수에 따라 용출실험을 실시하였다. 그러나 용출실험 만으로는 생태적 독성의 관점에서의 영향을 모두 고려할 수 없으므로 어류 급성독성 시험을 통한 주입재의 유해성을 평가하고자 한다.

3.4.2 시멘트계 주입재의 원재료 및 호모겔, 샌드겔에 대한 6가크롬 용출시험

(1) 시험재료 및 방법

본 연구에서 사용된 재료는 현장에서 일반적으로 사용되어지는 시멘트종으로 A사의 보통포틀랜드시멘트, 고로슬래그시멘트와 초미립자시멘트를 사용하였다.

(2) 시험방법

본 연구에서는 시멘트계 그라우트제에서의 6가크롬 용출특성을 판단하기 위해 원재료의 6가크롬 함유량 시험과 pH변화에 따른 6가크롬 용출변화량 시험 그리고 그라우트가 적용되는 주변환경에 따른 특성파악을 위해 호모겔을 제작하여 침지액을 각각 초순수, 침출수로 하여, 침지액에 따른 그라우트 호모겔의 일축압축강도 및 6가크롬 용출량의 변화를 시험하였다.

① 6가크롬 함유량 시험

함유량 시험은 시료에 함유되어 있는 유기물을 분해하고 목적 성분을 측정 가능한 상태로 용출 시키는 전처리가 필요하다. 함유량 분석을 위한 전처리법의 선택은 대상 중금속에 따라서도 다르며 일반적으로 Cr, Fe 등은 질산·염산 분해법, 질산·염산 끓임법 등을 적용한다. 본 연구에서는 보편적으로 사용하는 질산·염산 끓임

법을 사용하여 시험하였으며 분석법은 아래와 같다.

- ① 시료 2~5g을 비이커에 넣어 질산 15ml와 염산 45ml를 가한다.
- ② 시계접시를 덮은 테프론 비이커를 이용한다.
- ③ 내용물이 5~10ml가 될 때까지 천천히 끓인 후 방냉한다.
- ④ 메스플라스크에 부은 후 100ml로 조정한다.
- ⑤ 곧바로 1.0 μ m 유리섬유여지로 여과한 후 그 여액을 사용하여 분석한다.

② pH의 변화에 따른 6가크롬 용출

중금속의 용출 경향에 영향을 주는 인자로서는 여러 가지가 있으나 그 중에서도 pH는 중금속의 용출에 가장 큰 인자라고 할 수 있다. 현재 폐기물 및 토양오염 공정시험법상에서는 중성범위의 pH를 기준으로 한 시험법을 규정하고 있으나, 자연환경에 따른 pH의 변화를 감안한다면 일률적인 적용은 문제가 있으며, 특히 매립지의 경우 초기 매립 시 pH의 범위가 4~5로서 약산성을 띠는 점을 감안한다면 실제 현장에서는 시험법상의 중금속 용출량보다 더 많은 중금속이 용출될 수 있는 가능성을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 pH에 따른 6가크롬의 용출특성을 파악하기 위해 시료의 진탕 과정에서 임의로 pH를 일정하게 조절하여 6가크롬의 용출경향을 시험하였다.

③ 호모겔의 침지액에 따른 시험

그라우트 공시체 양생수에 따른 영향을 시험하기 위한 호모겔의 제조 배합비는 일반적으로 주입공사 현장에서 사용되는 표준 배합비를 사용하였으며, 공시체 제작은 5cm×5cm×5cm 큐빅몰드를 사용하여 제작하였다. 몰드는 약 2시간이 경과한 후 탈형하였으며, 양생수에 따른 일축압축 강도의 영향 및 6가크롬의 용출특성을 알아보기 위하여, 초순수, 침출수에 각각 양생 시켰다. 양생수로 사용된 침출수의 성상은 표 5와 같으며, 호모겔의 제작을 위한 배합비는 다음의 표 6과 같다.

표 5. 침출수 성상

	pH	COD _{Cr}	Na	Mg	Ca	Fe	Alk ^{a)}	Cond ^{b)}	pHs
				(mg/l)				(mS/m)	
Fresh	5.2	9,219	2,740	450	2,300	3.5	7,268	26.3	5.4
Leachate									
		Cu	Cd	Pb		As	Hg		Cr ⁺⁶
		(mg/l)							
a : Alkalinity	0.092		0.008	0.07		N.D	0.0006		0.225
b : Conductivity									

표 6. 호모겔 배합비

물/시멘트비(%)	물(ml)			시멘트(g)		
	초미립자시멘트	고로슬래그 시멘트	보통포틀랜드 시멘트	초미립자시멘트	고로슬래그 시멘트	보통포틀랜드 시멘트
200	120	120	120	60	60	60
300	120	120	120	40	40	40
400	120	120	120	30	30	30

사용된 침출수는 S 매립지의 침출수로서 S 매립지는 일반 도시폐기물 매립지로서 매립이 시작된 지 1년이 된 매립지의 침출수를 본 연구에서 사용하였다. 시멘트 밀크주입은 물/시멘트비를 50~1,000% 범위 안에서 단계별로 주입하는 것이 일반적인 것으로 알려져 있으나, 지반에 주입시 주입압에 의해 지반내 공극을 통해 잉여수가 배수되고, 시멘트 밀크가 페이스트로 전환되어진다. 시멘트 밀크가 페이스트로 전환되어 지는 정확한 물/시멘트비는 알 수 없다.

3.5 어류급성독성시험

3.5.1 개요

본 연구에서는 OECD Test Guideline 및 국립환경연구원 화학물질 유해성 시험방법고시에 따라 약액의 환경영향을 평가하고자 한다(국립환경연구원, 1999). 그러나 어류 급성독성시험은 화학물질의 수생생물에 대한 영향을 평가하기 위한 방법으로 본 연구에서의 주제인 규산나트륨염, 시멘트 등은 화학물질 안전관련 문헌인 MSDS나 각국의 문헌정보에서 환경독성에 대한 보고가 없기 때문에 여기에 대한 독성을 정량적으로 규명하기는 어렵고 어류급성독성시험을 통해 약액의 환경적 영향을 간접적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다(EPA, 1983; 金子榮黃, 1996).

3.5.2 시험방법

(1) 예비시험

용출액의 적정 희석율을 결정하기 위해서 예비시험을 실시하였다. 예비시험을 통한 적정 희석배수범위를 3, 5, 10으로 결정하였다.

(2) 본시험

한 농도당 8마리를 처리하였고, 시험물질이 휘발성이 아니기 때문에 시험기간 중 시험용액을 교환하지 않는 지수식 시험(Static test)을 하였다. 광주기는 사육시와 마찬가지로 16시간(light), 8시간(dark)으로 하고 시험기

간 중에 먹이를 공급하지 않았다. 어류는 온도변화에 민감하므로 적정온도에서 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 로 온도를 유지하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 침투성 시험

침투성 시험 결과, 공극율에 따른 조건에 따라 느슨한 상태일 때, 주입압이 높을 때 침투주입이 비교적 양호하였으며, 주입형상은 상향부분은 대체적으로 균일하게 분포되어 시료전체에 퍼지며, 다소 깊어질수록 중심쪽으로 집중되는 형상을 나타내었다. 초미립자시멘트는 대부분의 사질층에서 침투주입이 가능한 반면, 보통포틀랜드시멘트는 굽은모래에서조차 원활히 침투주입이 잘 되지 않았으며 중간모래에서는 거의 침투주입이 일어나지 않고 월류현상이 발생하였다.

따라서, 주입하고자 하는 대상지반의 조건에 따라 특히, 액상화 방지 및 지반강화 등과 같이 주입재가 충분히 검토되어야 주입효과를 기대할 수 있는 약액주입에서는 침투성이 우수한 초미립자시멘트의 적용이 적합할 것으로 판단된다.

4.2 고결성 시험

고결성 시험결과, 주입재의 이동거리의 차이가 나타났으며, 대상시료토가 느슨한 상태일수록 주입압의 변화에 따라 이동거리, 고결율이 민감하게 변화하였다. 주입형상의 경우, 주입관 주위로 구 모양의 고결체가 형성되었다. 시험시 주입구는 바닥으로부터 15cm정도의 높이에 위치하는데, 주입구 아래의 고결율은 높지 않았다.

초미립자시멘트 주입재의 경우 대부분 침투주입이 가능하였다. 굽은모래에서는 공극율에 대한 영향이 적었으며 59~82%의 고결율을 나타내었다. 보통포틀랜드시멘트를 사용한 경우에는 굽은모래에서 14~42%정도 고결율을 나타내었고, 공극율이 작을 경우 고결율이 낮게 나타났다. 이는 주입관 끝부분에서 시멘트입자의 응집현상으로

표 7. 고결성 및 침투성 시험결과

주입재의 종류	공극율(%)	주입압(kg/cm ²)	유효고결율(%)		침투거리(cm)		
			굵은모래	중간모래	굵은모래	중간모래	
현탁액형 주입재	초미립자시멘트 + 규산소다3호	느슨한 상태	1.0	70.44	68.37	35	31
			1.5	76.38	74.43	38	36
			2.0	82.72	78.57	44	40
		중간상태	1.0	65.08	65.09	28	24
			1.5	72.64	70.66	30	27
			2.0	76.60	72.64	33	29
		조밀한 상태	1.0	59.77	53.04	20	17
			1.5	70.62	72.68	24	21
			2.0	72.64	70.72	29	27
	보통포틀랜드시멘트 + 규산소다3호	느슨한 상태	1.0	25.64	23.52	17	13
			1.5	34.47	31.87	19	15
			2.0	42.19	39.20	22	16
중간상태		1.0	20.37	18.55	14	11	
		1.5	21.46	19.54	15	13	
		2.0	21.95	19.99	16	13	
조밀한 상태		1.0	18.59	16.85	11	9	
		1.5	16.29	14.70	13	10	
		2.0	14.24	12.78	13	11	

인해 원활하게 침투주입이 되지 못한 것으로 판단된다.

4.3 고결체 강도시험

고결된 시료토에 대한 7일 및 28일 일축압축강도를 측정 한 결과, 28일 재령에서 초미립자시멘트가 21.66kg/cm², 보통포틀랜드시멘트가 8.59kg/cm²로 나타났다. 본 시험에 서와 같이 20kg/cm² 이상 고강도가 얻어질 경우에는 차수 목적과 지반보강 효과를 동시에 발휘할 수 있다. 특히 침 투성이 좋은 초미립자시멘트를 이용한 LW공법이 종전의 LW공법보다 개선된 공법으로 발전할 수 있을 것으로 판 단된다.

4.4 내구성 시험

4.4.1 길이변화

본 연구에서는 내구성 저하양상을 촉진하기 위하여, 자연해수의 10배농도 MgSO₄ 수용액에 침전 후 길이변 화를 측정하였고 결과는 그림 3과 같으며, 디지털식 버 니어캘리퍼스(정도 1/100mm)를 사용하여, 전체길이에 대한 변화된 길이의 비를 길이변화율이라고 하였다.

그림 3에서와 같이 초미립자시멘트는 보통포틀랜드 시멘트보다 길이변화율이 매우 적게 발생하였다. 이와 같은 원인은 초미립자시멘트의 조성광물 중에는 C₃A량 이 적고, 강도발현이 크기 때문에 화학적 내구성이 다른 시멘트에 비해서 우수하기 때문으로 추정된다.

표 8. 고결체의 일축압축강도 시험결과

주입재	대상지반조건	주입압 (kg/cm ²)	일축압축강도				
			7일		28일		
			굵은모래	중간모래	굵은모래	중간모래	
현탁액형 주입재	초미립자시멘트 + 규산소다3호	1.5	느슨한상태	19.09	21.47	22.80	24.84
			중간상태	12.42	16.46	18.21	17.29
			조밀한상태	5.73	7.06	6.41	8.73
	보통포틀랜드시멘트 + 규산소다3호		느슨한상태	11.68	8.92	15.73	10.10
			중간상태	7.93	5.17	12.10	6.52
			조밀한상태	3.42	2.41	6.75	4.29

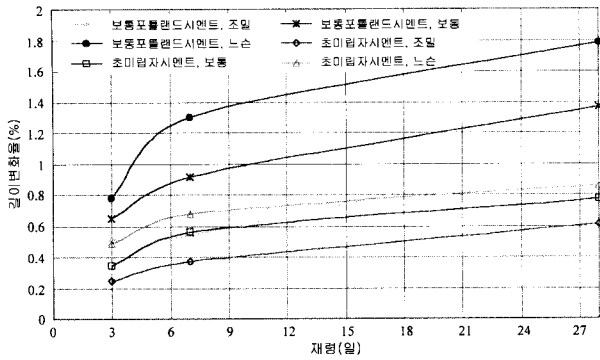


그림 3. 주입재 종류에 따른 재령별 길이변화율

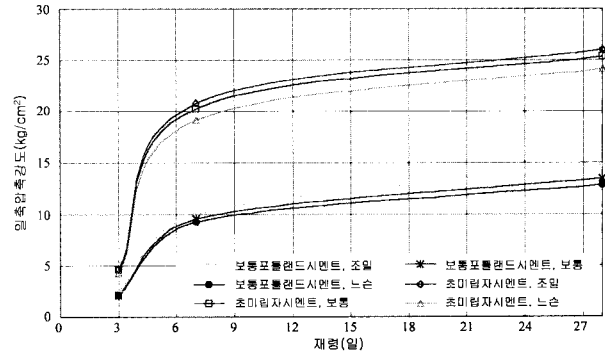


그림 4. 주입재 종류에 따른 재령별 일축압축강도

4.4.2 고결토의 압축강도

고결성 및 침투성 시험에서 채취한 고결토를 재령별 압축강도 시험결과는 그림 4와 같다.

상기의 결과에서 보통포틀랜드시멘트보다는 초미립자시멘트가 강도특성이 우수하므로 화학적 내구성도 우수하였으며, 보통포틀랜드시멘트의 경우는 초미립자시멘트에 비해서 C₃A량이 많기 때문에 해수와 같은 악조건에서는 강도열화에 대한 대책이 필요할 것으로 사료된다.

4.5 환경영향평가 시험

4.5.1 시멘트의 6가크롬 함유량 및 용출시험과 및 고찰

(1) 함유량 시험

시멘트 3종에 대한 6가크롬 함유량 시험 결과, 보통포틀랜드시멘트의 경우 A, B, C사의 제품을 고로슬래그시멘트는 D, E 사의 제품을 초미립자시멘트는 F사의 제품으로 총 3 종의 총 6개 시료를 분석하였다.

6가크롬 함유량 시험 결과, 보통포틀랜드시멘트(OPC)의 경우 최고 25.3mg/kg으로 고로슬래그시멘트(SC), 초미립자시멘트(MC)보다 상대적으로 많은 양을 함유하고 있었으며, 고로슬래그시멘트가 초미립자시멘트와 거

의 비슷한 양을 함유한 것으로 나타났다.

(2) 용출시험

6가크롬 용출시험은 함유량 시험에서 가장 많은 양을 함유하고 있는 시멘트를 선정하여 시험하였다. 각각의 호모겔 및 샌드겔을 제작하여, 분석한 6가크롬 용출시험 결과는 표 9에 나타낸 바와 같다.

호모겔의 폐기물 공정 시험법을 통한 6가크롬 용출시험 결과 규제기준인 1.5mg/l 보다 적은 양이 검출되었다. 토양오염 공정시험법을 통한 샌드겔의 6가크롬 용출시험 결과는 보통포틀랜드시멘트가 4.85mg/l 로 '가' 지역의 우려기준인 4mg/kg보다 높게 검출되었다. 시험 결과 6가크롬의 용출량은 보통포틀랜드시멘트 > 고로슬래그시멘트 > 초미립자시멘트의 순으로 나타났다.

4.5.2 pH에 따른 6가크롬 용출량

산성비 또는 침출수의 pH 변화에 따른 그라우트재의 6가크롬 용출량을 살펴보기 위하여, 3종의 시멘트에 대한 pH별 용출시험을 한 결과는 다음 그림 5와 같다.

그림 5에서 보는 바와 같이, pH 3 이하의 강산성에서 6가크롬의 용출량이 급격히 늘어나는 것을 알 수 있으며, pH 11 이상의 강염기에서도 증가하는 경향을 나타내었

표 9. 6가 크롬 함유량 및 용출 시험 결과

구 분		6가크롬함유량	폐기물 기준	토양 기준	
		Cr ⁶⁺ (mg/kg)	호모겔(mg/l)	샌드겔(mg/kg)	
보통포틀랜드시멘트	A	22.1	0.55	4.85	
	B	18.3			
	C	25.3			
고로슬래그시멘트	D	18.5	0.32	3.26	
	E	15.5		2.35	
초미립자시멘트	F	19.3	0.23	우려기준	대책기준
규제기준		-	1.5	4/12	10/30

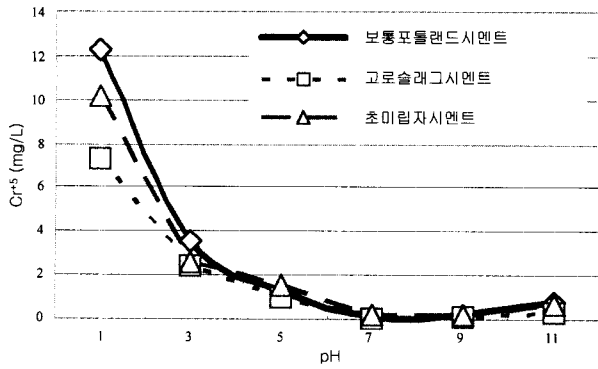


그림 5. 3종의 시멘트에 대한 pH별 용출 시험 결과

다. 이는 일반적인 중금속의 용출 경향과 비슷한 결과로서 pH가 6가크롬의 용출에 큰 영향을 줄 수 있다는 점을 알 수 있으며, 그라우트가 시공되어지는 지역이 매립장 또는 주변인 점을 감안할 경우 매립지 분해단계 중 산 생성 단계에서 침출수의 pH가 빈번히 pH 4 이하가 되는 점을 감안하였을 때, 실제 용출시험 결과 보다 더 많은 6가크롬이 용출되어질 수 있다는 것이 예상되어진다.

4.5.3 양생수에 따른 고결체의 특성변화

앞 절에서는 그라우트의 주재료인 시멘트에서의 중금

속 함유량 및 용출시험 그리고 pH별 용출시험을 통하여 6가크롬의 용출특성을 알아보았다. 본 절에서는 그라우트 공시체가 양생수에 따라 강도 및 6가크롬 용출량이 어떤 변화를 보이는지 알아보기 위해 초순수와 침출수 중에 양생 후 강도 및 6가크롬 용출량 변화를 시험하였다.

(1) 강도시험

그림 6과 그림 7은 물/시멘트 비에 따른 압축강도의 변화를 도식한 것이다. 각각에서 양생일수가 7일 일 때 보다는 28일 일 때가 더 크게 나타났으며, 시멘트의 함량이 증가할수록 강도가 증가함을 알 수 있었다. 또한 침출수 중에서 양생을 시켰을 경우, 초순수에 양생을 시켰을 때 보다 초기 강도발현이 현저히 낮았으며, 이는 물/시멘트 비가 증가할수록 더 강도발현이 낮게 나타났다. 시멘트의 종류에서는 보통포틀랜드시멘트가 침출수로 인해 초기강도 발현이 초순수 중에 양생시킨 경우와 비교하여 낮게 나타나 침출수로 인한 시멘트의 수화작용이 저해되었음을 알 수 있었다. 이에 비해 고로슬래그시멘트의 경우 초순수 중에 양생시킨 경우와 별 차이가 없었다. 이를 통해 양생수가 그라우트 공시체의 강도발현에 큰 영향을 미칠 수 있다는 점을 알 수 있었다.

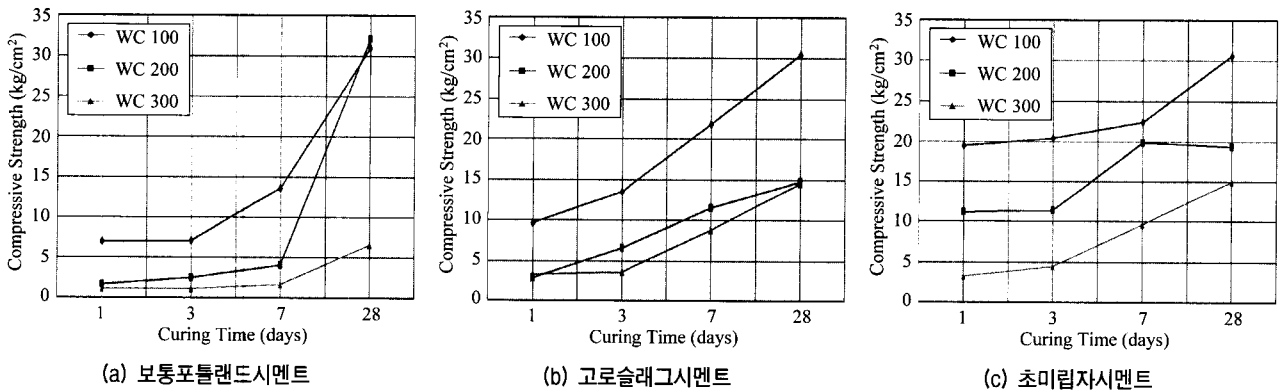


그림 6. 물/시멘트 비에 따른 압축강도의 변화 (초순수 양생)

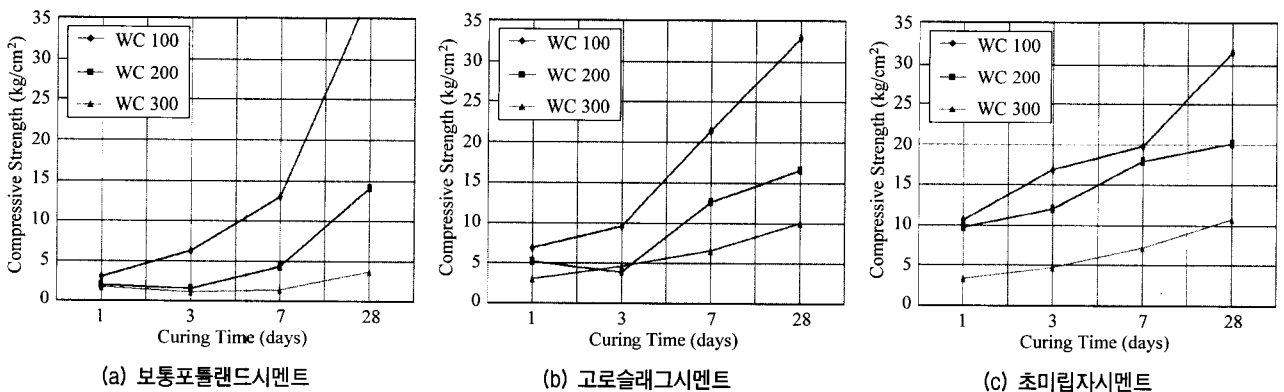


그림 7. 물/시멘트 비에 따른 압축강도의 변화 (침출수 양생)

(2) 양생수에 따른 6가크롬의 용출

그라우트 호모겔과 양생수를 부피비로 1:10으로 하여, 초순수와 침출수 중에 28일간 침출 시킨 후, 각각의 양생수를 수질오염공정시험법을 통하여 6가크롬을 분석한 결과는 다음 그림 8과 같다.

그림 8의 결과를 보면, 앞서 초순수가 아닌 침출수 중에 양생시켰을 경우 호모겔의 강도발현에 있어 차이를 보인 것처럼, 호모겔에서 양생수로 용출된 6가크롬의 양은 초순수 중에 양생시킨 경우 보다 침출수 중에 양생시켰을 경우에 최고 10배 이상 더 많이 검출되어 양생수가 강도 뿐 아니라 6가크롬의 용출량에 영향을 줄 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

현재 국내 수질환경보전법 상에서는 배출수 수질 기준으로 6가크롬을 0.5mg/l 로 규정하는데, 시험결과 측정값이 규제치 보다는 낮게 나타났으나, 지하수 보전법의 규제기준인 0.05mg/l 과 비교하였을 때, 침출수 중에 양생시킨 경우 W/C 300% 초미립자시멘트 호모겔을 제외하고는 규제값을 최고 7배 이상이 검출되었으며, 초순수 중에 양생시킨 W/C 100, 200% 보통포틀랜드시멘트 호모겔의 역시 지하수 보전법의 규제값 보다 최고 4배 이상 검출되었다. 이는 그라우트재가 주입초기에 지하수 등과의 접촉을 통해 6가크롬의 용출 가능성이 있다는

것을 알 수 있으며, 침출수 등은 이러한 6가크롬의 용출량을 증가시킬 가능성이 있다는 것을 짐작할 수 있다.

4.5.4 어류급성독성시험

고결체로부터 용탈된 알칼리에 의한 어독성을 평가하기 위하여 「KS M 0111」에 규정된 「어류에 의한 급성 독성시험」법과 어류에 대한 주입재 영향 평가 시험 방법(柴崎光弘 外, 1985) 등에 근거하여 시험을 실시하였다. 「KS M 0111」 규정의 경우 LC50(Median Lethal Concentration)을 측정하여 그때의 농도에 대한 안정계수를 곱한 값을 환경허용 기준치로 규정하는데 여기서, LC50이란 어류를 급성 독성물질이 함유되어 있는 폐수의 희석액 중에 일정시간동안 공시어를 넣어두었을 때 공시어의 50%가 치사하는 폐수의 농도를 의미한다. 24, 48 또는 96시간의 LC50을 구하는 것이 일반적이다. 본 시험에서는 96시간의 pH와 치사율을 구하였다.

현탁액형 주입재의 용출액은 고염기성(pH 12)을 나타내고 있었다. 희석배수에 따른 공시어의 치사율은 표 10과 같았다. 희석배수가 높을수록 공시어의 치사율이 낮아지는 것을 볼 수 있듯이 항목 중에서 pH의 영향이 공시어 치사에 결정적인 역할을 하는 것으로 판단된다.

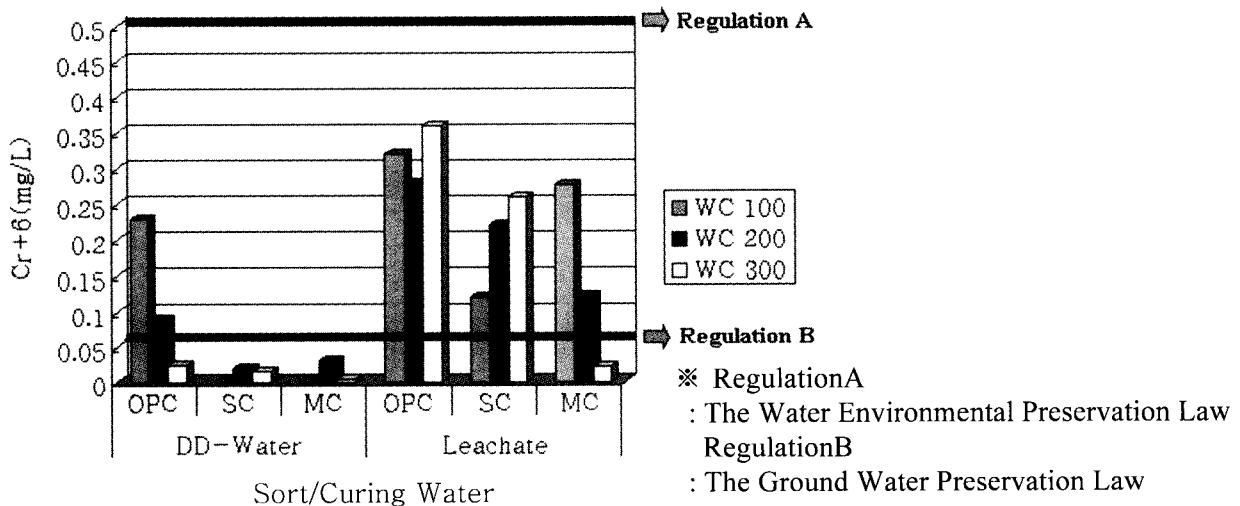


그림 8. 각 양생수별 수질오염공정시험법에 의한 6가 크롬 분석결과 (28일간 침출시킨 후)

표 10. 희석배수에 따른 공시어 치사율

희석배수	용출액	No. 1				No. 2				No. 3				No. 4			
96H 치사율(%)	3	100				100				100				88			
	5	88				88				75				75			
	10	25				50				38				25			

5. 결 론

주입재 형태, 배합설계별 주입특성 및 효과와 환경적 유해성평가를 통한 연약지반처리공법의 연구수행결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 주입재들에 대한 현탁액형 주입재의 호모젤 강도를 측정할 결과, 강도발현과 장기적인 내구성을 고려할 때 초미립자시멘트가 보통포틀랜드시멘트보다 우수함을 나타냄으로 고성능 주입재로서 적합하다고 판단된다.
- (2) 침투성 및 고결성 시험결과, 초미립자시멘트가 보통포틀랜드시멘트보다 높은 침투성과 고결성을 나타내어 초미립자시멘트가 고성능주입재로 적절한 것으로 판단된다.
- (3) 고결체의 일축압축강도시험결과, 호모젤 강도에서 나타나는 경향과 거의 유사하였으며, 재령일이 지날수록 강도의 증가율이 크지 않음을 알 수 있었다. 또한 압력이나 주입대상지반의 공극율과 관계를 보면 주입압이 높아질수록 침투주입보다는 맥상주입에 가까운 형상을 나타내었다. 따라서 주입목적 및 지반조건에 따라 적절한 겔타입과 주입압을 조절하여 실제 시공에 적용하여야 할 것이다.
- (4) 내구성 시험결과, 보통포틀랜드시멘트보다는 초미립자시멘트가 강도특성이 우수하므로 화학적 내구성도 우수하였으며, 보통포틀랜드시멘트의 경우는 초미립자시멘트에 비해서 C₃A량이 많기 때문에 해수와 같은 악조건에서는 강도열화에 대한 대책이 필요할 것으로 사료된다.
- (5) 그라우트 원재료 및 호모젤의 폐기물 용출시험에 의한 시험결과, 폐기물 관리 기준인 1.5 mg/l 보다 적었으나, 샌드겔의 토양오염 공정 시험법에 의한 시험결과, 보통포틀랜드시멘트로 만든 샌드겔의 경우 토양오염기준 중 '가' 지역 우려기준 4.0mg/kg보다 높은 4.85mg/kg으로 나타났으며, 고로슬래그시멘트 및 초미립자시멘트 샌드겔 역시 기준치에 가까운 값으로 용출되어 주입재로 인한 토양오염의 가능성이 있음을 확인하였다.
- (6) pH에 따른 6가크롬 용출시험 결과, pH 3 이하의 강산성에서 6가크롬의 용출량이 급격히 늘어나는 것을 알 수 있으며, pH 11 이상의 강염기에서도 증가하는 경향을 보였다. 특히 매립장 또는 주변인 지역에 주입시공할 경우 매립지 분해단계 중 산의 생성

단계에서 침출수의 pH가 빈번히 pH 4 이하가 되는 점을 감안하였을 때, 실제 용출시험 조건에서 보다 더 많은 6가크롬이 용출될 수 있을 것으로 사료된다.

- (7) 양생조건에 따른 그라우트 공시체의 영향을 살펴보기 위한 강도 및 6가크롬 용출량 변화 시험결과, 침출수 중에 양생시킨 공시체의 강도발현이 초순수 중에 양생시킨 경우 보다 초기강도가 현저히 낮았으며, 이는 물/시멘트 비가 증가할수록 강도가 감소되었으며, 재료에 따라서는 보통포틀랜드시멘트>초미립자시멘트>고로슬래그시멘트 순으로 강도 감소율이 크게 나타났다. 6가크롬의 용출량 역시 침출수 중에 양생시킨 경우가 초순수 중에 양생시킨 경우 보다 많이 용출되었다.
- (8) 어류 급성독성 시험을 통해 용출액의 pH가 공시어 치사에 결정적인 역할을 하는 것으로 판단되었으며, 약액의 환경적 영향을 간접적으로 평가할 수 있었다.

향후, 점성토 지반의 주입시 주입형태, 주변지반 거동 특성 및 압밀특성 등에 관한 연구가 뒤따라야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 2000년도 한국과학재단의 “고성능 주입재에 의한 연약지반처리공법 연구(과제번호 R01-2000-00366-4009-0400-6262-9000)” 연구비 지원에 의한 연구성과의 일부임을 밝히며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 천병식(1998), 최신 지반주입공법 -이론과 실제, 건설연구사, pp. 313-334.
2. 천병식, 김진춘 외(2001), “마이크로 복합실리카 그라우트재의 공학적 특성에 관한 연구”, 한국지반환경공학회논문집, 제2권, 제1호, pp.101-113.
3. 환경부(2000), 폐기물 공정시험법, 환경부 폐기물 관리법 11조.
4. 국립환경연구원(1999), 유해물질의 유해성 심사 등에 관한 규정, 고시 제 1999-36호.
5. 島田俊介, 佐藤 武, 多久 實(1989), 最先端技術の 藥液注入工法, 理工圖書, pp.57-82.
6. 米倉亮三外(2000), 恒久グラウト注入工法, 山海堂, pp.103-114.
7. 金子榮黃(1996), “急性毒性試験による廢棄物有害性の評價”, 日本廢棄物學會, 第7卷, 第2号, 1996, pp.394-402.
8. 柴崎光弘, 下田一雄(1985), 最新・藥液注入工法の設計と施工, 山海堂, pp.205-209.
9. EPA(1983), *Development Document for Effluent Limitations Guidelines and Standards for the Metal Finishing Point Source Category*, EPA 440/1-83-091.

(접수일자 2002. 12. 2, 심사완료일 2003. 3. 5)