

## 시멘트 그라우트재에서 Cr<sup>6+</sup> 용출특성에 관한 연구

김동우<sup>1\*</sup> · 이재영<sup>2</sup> · 천병식<sup>3</sup>

<sup>1</sup>수도권매립지관리공사, <sup>2</sup>서울시립대학교 환경공학부, <sup>3</sup>한양대학교 토목공학과

## A Study on Leaching Characteristics of Cr<sup>6+</sup> in Cement Grout Materials

Dong-Woo Kim<sup>1\*</sup> · Jai-Young Lee<sup>2</sup> · Byung-Sik Chun<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sudokwon Landfill Site Management Corp.

<sup>2</sup>Dept. of Environmental Eng., University of Seoul

<sup>3</sup>Dept. of Civil Eng., Hanyang University

### ABSTRACT

The aim of research is the evaluation of the Cr<sup>6+</sup> emission features of the liquid injection through emission experiments in varying conditions, based on a field-mixing ratio. The results showed that the content of Cr<sup>6+</sup> content in cement measured had an Ordinary Potland Cement (OPC) of 25.3 mg/kg, which constitute the largest portion among the other materials. Likewise, the emission experiment of homo-gel and sand-gel generally satisfied the standard of KSLT (Korea Standard Leaching Test) in waste of 1.5 mg/L, but in case of the standard of KSLT in soil the emission of OPC Cr<sup>6+</sup> of 4.85 mg/kg. These conditions is a little exceeded the criteria in the 'Ga' area in terms of Korea Soil Environmental Preservation Law. In addition, results generated by the mock-up injection facilities revealed that Cr<sup>6+</sup> emission increased as Water/Cement and injection pressure increased. At injection pressure higher than 4 kg/cm<sup>3</sup>, Cr<sup>6+</sup> emission exceeded the water preservation standard of 0.5 mg/L. Similarly, a pattern experiment of Cr<sup>6+</sup> emission according to pH was conducted, in order to evaluate the Cr<sup>6+</sup> emission features of grout materials in leachate below pH 5 such as pH 4 acid rain or landfill. Results show that Cr<sup>6+</sup> emission dramatically increased in high acidic or basic state. It indicates that Cr<sup>6+</sup> emission will probably increase in an environment where grout materials are injected. On the other hand, concentration of leachate was determined in areas where grout materials are used. The results show that the concentration of emission in an ultra purity condition does not manifest intensity, and is affected in the OPC>MC>SC order. It means that the pollutants or Cr<sup>6+</sup> emission increases with decreasing concentration. As such, Cr<sup>6+</sup> emission will probably exceed the countermeasure criteria according to the types of gout materials. Similarly, high pressure or injection will cause increased Cr<sup>6+</sup> emission. Therefore, the selection of materials or mixing ratio should be considered in general as well as according to specific industries, based on the strength and pH of Cr<sup>6+</sup> emission.

**Key words :** Cr<sup>6+</sup>, cement, KSLT, leachate

### 요 약 문

그동안 고분자계열 약액에 비하여 상대적으로 독성이 약한 시멘트 계열 약액이 환경에 미치는 영향을 경미하게 다루어졌으나 최근 일본에서 시멘트계열 약액을 사용한 공사현장에서 발암물질인 6가 크롬의 용출로 일본 건설성에서는 이에 대한 규정을 발효하고 시행하여 엄격히 관리하고 있으나 우리나라에서는 상대적으로 이에 대한 연구가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 다양한 현장조건에서의 시멘트계 그라우트재에서의 6가 크롬 용출특성을 파악하기 위해, 현장 배합비를 기초로 하여 다양한 현장조건에 따른 용출실험을 통하여, 시멘트계 그라우트재의 6가 크롬 용출 특성을 파악하였다. 먼저 원재료인 시멘트의 6가 크롬 함유량 실험을 한 결과 보통포틀랜드 시멘트에서 22.1 mg/kg 으로 다른 재료에 비해 가장 많이 함유되어 있었으며, 호모겔 그리고 샌드겔에서의 용출실험 결과 폐기물 공정시험

\*Corresponding author : dwkim@slc.or.kr

원고접수일 : 2003. 5. 9 게재승인일 : 2003. 6. 21

질의 및 토의 : 2003. 9. 30 까지

법에 의한 경우 규제기준인 1.5 mg/L를 대체적으로 만족하였으나, 토양오염공정시험법에 의한 경우 특히 보통포틀랜드 시멘트가 4.85 mg/kg으로 '가' 지역의 우려기준인 4 mg/kg 보다 높은 값을 나타내었다. 모의 주입장치를 이용한 실험결과 물시멘트 비와 주입압이 증가함에 따라 몰드 밖으로 나오는 배출액 중의 6가 크롬의 용출량이 커지는 경향을 나타내었으며, 주입압이 4 이상일 경우 수질오염보전법상의 규정인 0.5 mg/L를 초과하여 검출되었다. 최근 pH4의 산성비 및 매립지의 산생성 단계에서 pH 5이하의 침출수에 의한 그라우트제에서의 6가 크롬의 용출특성을 알아보기 위한 pH에 따른 6가 크롬의 용출경향을 실험한 결과 강산성 및 강염기 상태에서 6가 크롬의 용출량이 급격히 증가하는 경향을 보여 그라우트제가 주입되는 환경에 따라 6가 크롬의 용출량이 증가할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 그라우트제가 해안 또는 매립지에 적용될 경우 해수와 침출수에 의한 강도의 변화를 살펴보기 위해 실험한 결과 초순수 중에서 양생 시켰을 때 보다 강도발현 현저히 저하되었으며, 시멘트 중에 따라서는 '보통포틀랜드 시멘트>마이크로 시멘트>슬래그' 시멘트의 순으로 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 강도의 저하로 인한 오염물질의 누출 및 6가 크롬의 용출을 증가시킬 수 있다는 것을 짐작할 수 있다. 이와 같은 결과를 통하여, 그라우트제의 종류에 따라 6가 크롬의 용출량은 현재 규제치를 초과하여 용출되어 질 수 있는 가능성이 있으며, 과압 또는 과량의 주입이 6가 크롬의 용출량을 증가시킬 수 있다고 할 수 있었다. 또한 일반 현장과 다른 특수한 현장에서는 강도 및 pH에 따른 6가 크롬의 용출량을 고려한 재료 선택 및 배합비가 마련되어야 할 것으로 판단되어진다.

**주제어** : 폐기물 공정시험법, 6가크롬, 시멘트, 침출수

### 1. 서 론

지반주입공법(또는 약액주입공법, 이하 지반주입공법)이 우리나라에 처음 도입된 것은 1970년대 중반 서울지하철 공사 현장에 시공된 것이 그 시초이다. 주입공법은 대상 지반을 교란시키지 않고, 약액(또는 그라우트)을 토질내의 공극에 충분히 주입하여 안정 처리함으로써, 지반을 개량시키는 공법으로 현재 각종 건설공사 현장에서 사용되고 있으며, 적용범위 및 시공 사례가 확대되어 가고 있다. 그동안 주입공법에 대한 연구는 주입기술 또는 장비 및 약액의 개발에 편중되어 왔으며, 주입공법으로 인한 토양 및 지하수 오염에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

지반주입공법으로 인한 최초의 오염사례는 1970년 전, 후 고분자 계열인 아크릴아미드계 약액이 고결 전에 갖는 독성으로 인해 미국에서 제조금지가 된 것과 일본에서의 약액주입으로 인한 지하수 오염사건으로, 이에 해당 국가에서는 사용가능한 약액을 극물 또는 불소 화합물을 포함하지 않는 시멘트 또는 물유리계 약액으로 한정하여 규제하게 되었다. 그동안 고분자계열 약액에 비하여 상대적으로 독성이 약한 시멘트 계열 약액이 환경에 미치는 영향을 경미하게 다루어 졌으나 최근 일본에서 시멘트 계열 약액을 사용한 공사현장에서 발암물질인 6가 크롬의 용출로 인하여 이에 대한 문제가 대두되어 일본 건설성에서는 이에 대한 규정이 발효되고 바로 본격적인 법적 조치에 들어감으로서 도처에 이로 인한 공사중단 사태가 야기되는 등 엄격한 규제가 되고 있는 실정이다.

특히 종래의 지반 주입공법이 응급대책 또는 보조공법

의 개념에서 점차 본격적이고 반영구적인 공법으로 사용되고, 적용범위가 확대되어 인구가 밀집된 도심구간에서의 지하철건설과 같이 장기간에 걸친 대형공사 뿐 아니라 매립지와 같은 오염원의 차단 및 지반보강 공사, 호완 보강공사, 수원지 차수벽 공사 등 여러 분야에서 응용되어 사용되어지고 있는 실정으로, 시멘트계 지반개량제로 인한 오염발생특성 및 해안 또는 매립지와 같은 특수한 환경에서의 오염특성에 관한 연구가 필요할 것으로 사료되어진다. 따라서 본 연구에서는 시멘트계 그라우트제의 적용조건 및 환경에 따른 6가크롬의 용출특성을 파악하기 위해 모의실험장치 및 침출액의 종류에 따른 실험을 실시하였다.

### 2. 실험재료 및 방법

#### 2.1. 실험재료

##### 1) 시멘트

현장에서 일반적으로 사용되는 시멘트종으로 A사의 보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement; 이하 OPC) 슬래그 시멘트(Slag Cement; 이하 SC)와 B사의 마이크로시멘트(Micro-cement; 이하 MC)를 사용하였다.

**Table 1.** Chemical proportion of cement grout materials

Chemical components	Micro-cement	Slag cement	Ordinary portland cement
SiO <sub>2</sub>	29.0	22.5	20.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +CaO	63.3	65.5	71.7
SO <sub>3</sub>	1.9	2.5	2.3

**Table 2.** The characteristics of sodium silicate (KSM 1415)

Items	Sort	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
	Appearance	Colorless Starch Syrup Type or a Little Colored State			
Silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> ) (%)	35~38	34~36	28~38	23~25	
Sodium peroxide (Na <sub>2</sub> O) (%)	17~19	14~15	9~10	6~7	

XRF(Pw-1480, Philips, Netherland)로 분석한 사용된 3종의 시멘트 화학성분은 다음 Table 1과 같다.

2) 물유리

본 연구에 사용된 물유리는 국내 현장에서 사용되고 있는 물유리 3호를 사용하였다. 물유리는 규사와 소다회 또는 규사와 가성소다를 원료로 해서 만들어지는 규산(SiO<sub>2</sub>) 과 알칼리(Na<sub>2</sub>O)가 결합된 유리로서 Na<sub>2</sub>O · nSiO<sub>2</sub>로 나타낸다. 여기서 n은 몰비(mole ratio)로 n=0.5~4의 범위의 것이 공업적으로 생산되고 있다. n이 1 이하의 것은 결정상의 분말형 물유리, n이 1 이상인 것은 비결정 구조가 되어 액상형 물유리다. 물유리는 몰비에 따라서 1호, 2호, 3호, 4호가 있으며 각각의 특징은 Table 2와 같다. 일반적으로 현장에 사용되는 물유리는 3호로서 본 연구에서도 물유리 3호를 사용하였다.

3) 침출수

그라우트 호모제의 양생조건에 따른 실험을 위해 사용된 침출수는 S 매립지의 침출수로서 S 매립지는 일반 도시폐기물 매립지로서 매립이 시작된 지 1년이 된 매립지의 침출수를 본 연구에서 사용하였다. 침출수의 일반특성은 Table 3과 같다.

4) 시멘트 밀크

본 실험에 사용된 시멘트 밀크주입은 물시멘트 비를 50~1,000% 범위 안에서 단계별로 주입하는 것이 일반적인 것으로 알려져 있으나, 지반에 주입시 주입압에 의해 지반 내 공극을 통해 잉여수가 배수되고, 시멘트 밀크가 페이스트로 전환되어 진다. 시멘트 밀크가 페이스트로 전

**Table 3.** The characteristics of fresh leachate

pH	COD <sub>cr</sub>	Na	Mg	Ca	Fe	Alk <sup>a</sup>	Cond <sup>b</sup>	pHs	
	(mg/l)						(mS/m)		
5.2	9,219	2,740	450	2,300	3.5	7,268	26.3	5.4	
		Cu	Cd	Pb	As	Hg	Cr <sup>6+</sup>		
		(mg/l)							
		0.092	0.008	0.07	N.D	0.0006	0.225		

\*a : Alkalinity b : Conductivity

**Table 4.** The mixing ratio of cement milk

W/C (%)	Water (ml)			Cement (g)		
	MC	SC	OPC	MC	SC	OPC
100	120	120	120	120	120	120
200	120	120	120	60	60	60
300	120	120	120	40	40	40

**Table 5.** The mixing ratio of LW liquid medicine

A (140 ml)		B (140 ml)						W/C (%)
Sodium silicate (ml)	Water (ml)	Water (ml)			Cement (g)			
		MC	SC	OPC	MC	SC	OPC	
70	70	120	120	120	120	120	120	100
70	70	120	120	120	60	60	60	200
70	70	120	120	120	40	40	40	300

환되어 지는 정확한 물시멘트비는 알 수 없다. 본 연구에서는 연구 목적상 LW 약액의 시멘트 현탁액의 물시멘트 비와 같은 물시멘트비를 적용하였으며, 배합비는 다음의 Table 4와 같다.

5) LW 약액

LW 약액은 Lables Wasser Glass 약액의 약자로서, 규산소다 수용액과 시멘트 현탁액을 1:1로 혼합하여 Table 5와 같은 배합으로 시험을 한다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 6가크롬 함유량 시험 및 용출시험

1) 6가크롬 함유량 시험

함유량 시험은 시료에 함유되어 있는 유기물을 분해하고 목적 성분을 측정 가능한 상태로 용출시키는 전처리가 필요하다. 함유량 분석을 위한 전처리법의 선택은 대상 중금속에 따라서도 다르며 일반적으로 Cu, Zn, Cd, Mn, Ca, Mg, Ni 등은 (A) 질산 · 과염소산법 (B) 질산 · 염산 분해법 등을 적용한다. Cr, Fe 등은 (B) 질산 · 염산 분해법 (C) 질산 · 염산 끓임법 등을 적용하고, Pb, Al 등은 (C) 질산 · 염산 끓임법 등을 적용한다. 상기 함유량 시험법 중 (C) 질산 · 염산 끓임법이 보편적으로 많이 사용된다. 본 연구에서는 (C) 질산 · 염산 끓임법을 사용하여 시험하였으며 분석법은 아래와 같다.

① 시료 2~5 g을 비이커에 넣어 질산 15 ml와 염산 45 ml를 가한다.

② 시계접시를 덮은 테프론 비이커를 이용한다.

③ 내용물이 5~10 ml가 될 때까지 천천히 끓인 후 방

냉한다.

④ 메스플라스크에 부은 후 100 ml로 조정한다.

⑤ 곧바로 1.0 μm 유리섬유여지로 여과한 후 그 여액을 사용하여 분석한다.

2) 용출시험

시멘트 원재료 및 호모겔 시편은 표준용출시험법인 폐기물 공정시험방법에 의한 용출시험을 모의주입장치에 의해 얻어진 샌드겔과 배출수는 각각 토양오염 공정시험법 및 수질오염 공정시험법에 의해 6가크롬 용출시험을 실시하였다. 호모겔과 샌드겔의 경우에는 2mm 체(8 mesh, No. 10)에 통과할 수 있을 정도로 파쇄를 하여, 각각의 공정시험법 상에 시료전처리를 거쳐 얻어진 검액을 ICP (Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy; SHIMADZU Co. 1000IV Model)를 이용하여 분석하였다.

2.2.2. 그라우트제의 양생조건에 따른 시험

그라우트 공시체 양생조건에 의한 영향을 실험하기 위한 호모겔의 제조 배합비는 일반적으로 주입공사 현장에서 사용되는 표준 배합비를 사용하였으며, 공시체 제작은 5 cm×5 cm×5 cm 큐빅몰드를 사용하여 제작하였다. 몰드

는 약 2시간이 경과한 후 탈형하였으며, 양생수에 따른 일축압축 강도의 영향 및 6가크롬의 용출특성을 알아보기 위하여, 초순수, 침출수에 각각 양생을 시켰다. 호모겔의 제작을 위한 배합비는 다음의 Tables 4, 5와 같으며, 양생수로 사용된 침출수의 성상은 Table 3과 같다.

2.2.3 모의주입실험

시멘트 밀크 주입과 L.W 약액 주입에 의한 6가크롬의 용출을 실험하기 위해 다음의 Fig. 1과 같은 모의 실험장치를 이용하였다. 실험장치는 1.0과 1.5 Shot 방식으로 시멘트 밀크와 L.W 약액을 주입한다. 배합비는 앞서 Table 4의 배합비를 기준으로 하여 실시하였으며, 주입압은 사전주입실험을 통하여 적정 주입압을 2 kg/cm<sup>3</sup> 이상으로 보고, 그라우트 시방기준서 상에 적정 주입압이 최대허용압력의 1~1.5배로 규정된 점을 참고로 하여 본 연구에서는 주입압을 2, 3, 4 kg/cm<sup>3</sup>로 하여 실험을 하였다.

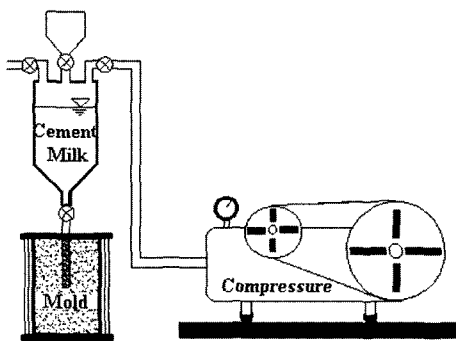
3. 연구결과 및 고찰

3.1. 시멘트의 6가크롬 함유량 및 용출실험

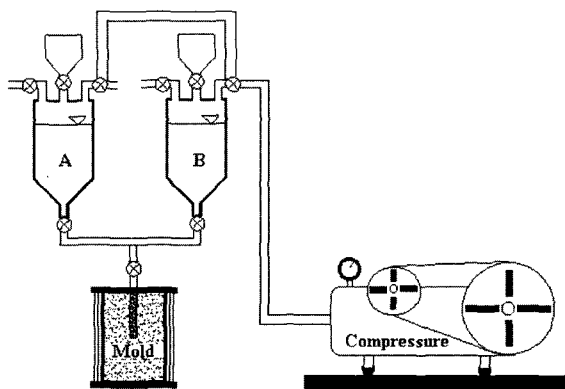
1) 함유량시험

Table 6. The content of Cr<sup>6+</sup> by amount

Kind	Products	Cr <sup>6+</sup> (mg/kg)
OPC	A	22.1
	B	18.3
	C	25.3
SC	D	18.5
	E	15.5
MC	F	19.3



(a) 1.0 Shot



(b) 1.5 Shot

Fig. 1. The schematic diagram of the injection tester.

시멘트 3종에 대한 6가크롬 함유량 시험 결과는 다음 Table 6과 같다. OPC의 경우 A, B, C 사의 제품을 SC는 D, E 사의 제품을 MC는 F 사의 제품으로 총 3종의 총 6개 시료를 분석하였다.

6가크롬 함유량 시험 결과, OPC의 경우 최고 25.3 mg/kg으로 SC, MC 보다 상대적으로 많은 양을 함유하고 있었으며, SC는 MC와 거의 비슷한 양을 함유한 것으로 나타났다.

2) Cr<sup>6+</sup> 용출시험

6가크롬 용출시험은 함유량 시험에서 가장 많은 양을 함유하고 있는 시멘트를 선정하여(OPC=C사, SC=D사) 실험하였다. 각각의 호모겔 및 샌드겔을 제작하여, 분석한 6

**Table 7.** The Concentration of Cr<sup>6+</sup> by KSLT of Waste & Soil

Method State Items	KSLT of Waste	KSLT of Soil	
	Homo-gel (mg/L)	Sand-gel (mg/kg)	
OPC	0.55	4.85	
SC	0.32	3.26	
MC	0.23	2.35	
Regulation concentration	1.5	A	B
		4/12	10/30

※Regulation A : Regulation of soil apprehension concentration  
Regulation B : Regulation of soil counterplan concentration

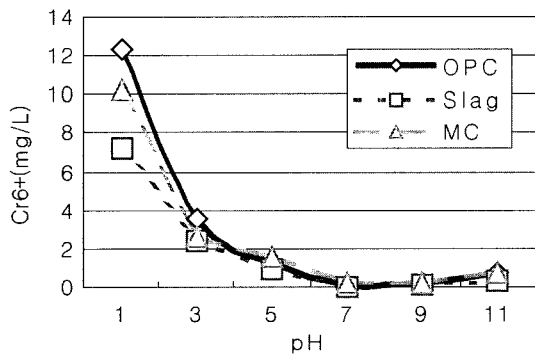
가크롬 용출실험 결과는 다음 Table 7과 같다.

호모겔의 KSLT에 의한 6가 크롬 용출시험 결과 폐기물 규제기준인 1.5 mg/L 보다 적은 양이 검출되었다. 토양오염공정시험법에 의한 용출실험 결과는 OPC가 4.85 mg/L로 '가' 지역의 우려기준인 4 mg/kg 보다 높게 검출되었다. 실험결과 6가 크롬의 용출량은 'OPC>SC >MC'의 순으로 나타났다.

**3.2. pH에 따른 6가크롬 용출**

산성비 또는 침출수의 pH 변화에 따른 그라우트재의 6가크롬 용출량을 살펴보기 위하여, 3종의 시멘트에 대한 pH별 용출실험을 한 결과는 다음 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이, pH 3 이하의 강산성에서 6가크롬의 용출량이 급격히 늘어나는 것을 알 수 있으며, pH 11 이상의 강염기에서도 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 일반적인 중금속의 용출 경향과 비슷한 결과로서 pH가 6가크롬의 용출에 큰 영향을 줄 수 있다는 점을 알



**Fig. 2.** The variation of Cr<sup>6+</sup> concentration by pH.

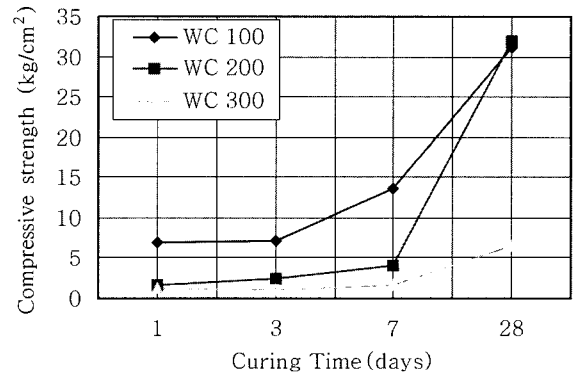
1) '가' 지역: 지적법 제5조 제1항의 규정에 의한 전답·과수원·목장용지·임야·학교용지·하천·수도용지·공원·체육용지(수목·잔디 식생지에 한한다)·유원지·종교용지 및 사적지

수 있으며, 매립지 분해단계 중 산 생성 단계에서 침출수의 pH가 빈번히 pH 4 이하가 되는 점을 감안하였을 때, 실제 용출실험 결과 보다 더 많은 6가크롬이 용출되어 질 수 있다는 것이 예상되어진다.

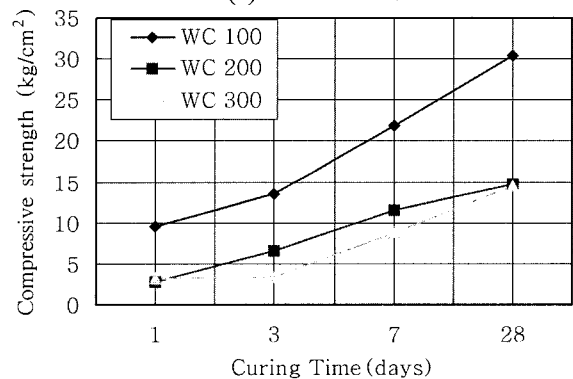
**3.3. 양생수에 따른 그라우트재의 특성변화**

1) 강도시험

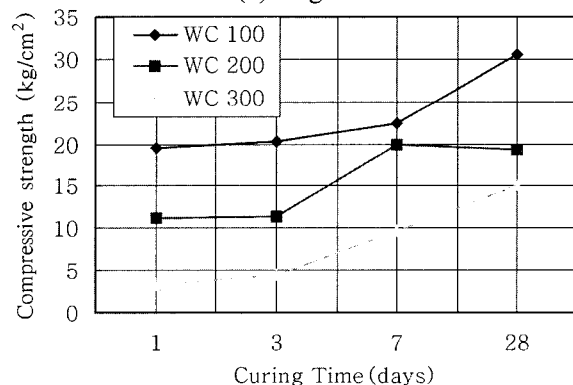
Fig. 3과 4는 시멘트 밀크 및 LW 약액의 물시멘트 비



(a) Potlant cement



(b) Slag cement



(c) Micro-cement

**Fig. 3.** The variation of the compressive strength of grout homo-gel in dissolved deionized water.

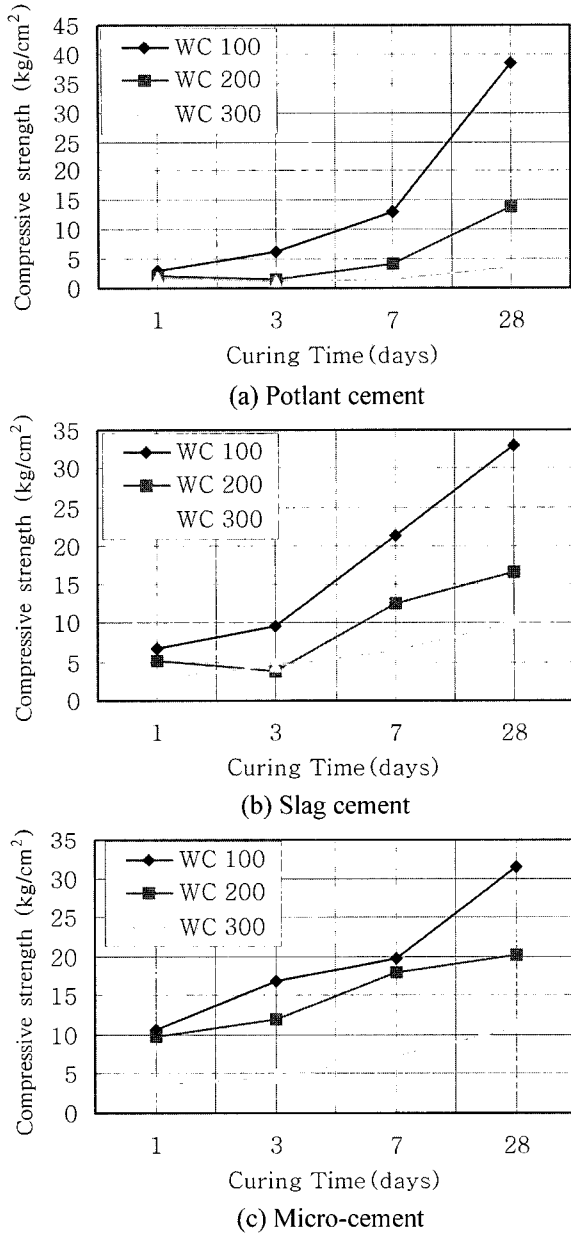


Fig. 4. The variation of the compressive strength of grout homogenized in leachate.

에 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 물시멘트 비가 증가할수록 더 강도발현이 낮게 나타났다. 시멘트의 종류에서는 OPC가 침출수로 인해 초기강도 발현이 초순수 중에 양생시킨 경우와 비교하여

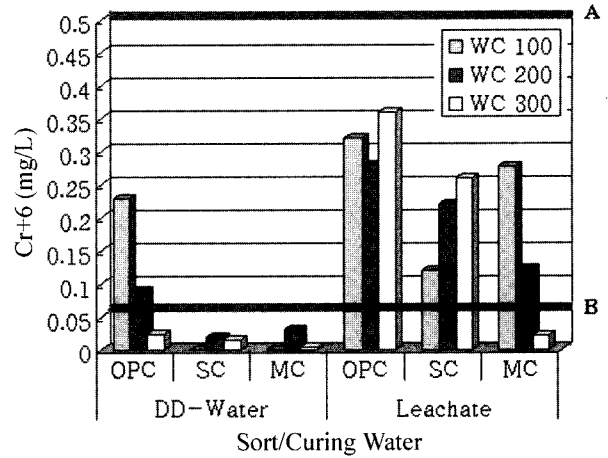


Fig. 5. The concentration of Cr<sup>6+</sup> depending on curing water (after 28 day).

낮게 나타나 침출수로 인한 시멘트의 수화작용이 저해되었음을 알 수 있었다. 이에 비해 SC의 경우 초순수 중에 양생시킨 경우와 별 차이가 없었다. 이를 통해 양생수가 그라우트 공시체의 강도발현에 큰 영향을 미칠 수 있다는 점을 알 수 있었다.

2) 6가크롬 용출특성

그라우트 호모겔과 양생수를 부피비로 1:10으로 하여, 초순수와 침출수 중에 28일간 침출시킨 후, 각각의 양생수를 수질오염공정시험법을 통하여 6가크롬을 분석한 결과는 다음 Fig. 5와 같다.

Fig. 5의 결과값을 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 강도뿐 아니라 6가크롬의 용출량에 영향을 줄 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

현재 국내 수질환경보전법 상에서는 배출수 수질 기준으로 6가크롬을 0.5 mg/L로 규정하는데, 실험결과 측정값이 규제치 보다는 낮게 나타났으나, 지하수 보전법의 규제기준인 0.05 mg/L와 비교하였을 때, 침출수 중에 양생시킨 경우 W/C 300% MC 호모겔을 제외하고는 규제값을 최고 7배 이상이 검출되었으며, 초순수 중에 양생시킨 W/C 100, 200% 포틀랜드 시멘트 호모겔의 역시 지하수 보전법의 규제값 보다 최고 4배 이상 검출되었다. 이는 그라우트제가 주입초기에 지하수 등과의 접촉을 통해 6가크롬의 용출 가능성이 있다는 것을 알 수 있으며, 침출수 등은 이러한 6가크롬의 용출량을 증가시킬 가능성이 있다

는 것을 짐작할 수 있다.

### 3.4. 모의주입 실험결과

1.0 Shot와 1.5 Shot 주입장치를 통해 Tables 4, 5와 같은 배합비로서 혼합한 시멘트 밀크 및 L.W약액을 시험 몰드에 주입한 후 생성된 배출수의 6가 크롬 용출실험 결과로서, 시멘트 종류별 물시멘트 비 및 주입압에 따라 다음과 같다. 실험결과 주입장치 시험에 있어서 6가크롬의 용출량에 가장 큰 영향을 주는 인자는 주입압력으로서, 주

**Table 8.** The concentration of Cr<sup>6+</sup> in percolated water from test mold by water cement ratio & injection pressure

Type		Cement milk (1.0 Shot)		L.W (1.5 Shot)	
Sort Kind	Injection pressure (kg/cm <sup>3</sup> )	W/C (%)	Cr <sup>6+</sup> (mg/L)	W/C (%)	Cr <sup>6+</sup> (mg/L)
OPC	2	200	0	200	0
		300	0	300	0
		400	0.012	400	0
	3	200	0.021	200	0
		300	0.062	300	0.025
		400	0.03	400	0.012
	4	200	0.132	200	0.002
		300	0.028	300	0.008
		400	0.1	400	0.094
SC	2	200	0	200	0
		300	0	300	0
		400	0	400	0
	3	200	0.021	200	0
		300	0.003	300	0
		400	0.052	400	0.002
	4	200	0.032	200	0.008
		300	0.045	300	0.024
		400	0.056	400	0.046
MC	2	200	0	200	0
		300	0	300	0
		400	0	400	0
	3	200	0	200	0
		300	0.013	300	0
		400	0.046	400	0.018
	4	200	0.132	200	0
		300	0.36	300	0.126
		400	0.486	400	0.265

입압력이 증가함에 따라 6가크롬의 용출량 역시 증가하는 경향을 보였으며, 겔타임이 빠른 1.5 Shot의 LW 약액이 시멘트 밀크를 주입하는 1.0 Shot에 비해서 6가 크롬의 양이 더 적게 용출되는 것을 알 수 있었다.

지반 내에서는 주입압력에 의해서 연속된 공극을 따라 잉여수가 배수되므로 빈배합의 현탁액 밀크가 부배합의 페이스트로 전환되어 지는 원리로 시공이 되는데, 실험결과 시멘트의 양보다는 과잉의 잉여수가 6가크롬의 용출에 더 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되어 진다. 이 결과를 통해서 필요이상의 과압주입과 물시멘트는 시공적인 측면에서는 유리할 수 있으나, 오염물질의 발생측면에서는 부작용이 생길 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 시멘트 밀크의 주입하는 1.0 Shot 보다는 L.W 약액을 이용하는 1.5 Shot가 6가크롬의 발생에 있어서 더 안정적이라고 할 수 있다.

## 4. 결 론

지반개량을 위한 그라우팅으로 인한 6가크롬의 발생특성을 알아보기 위해 원재료 및 공시체에 대한 분석 및 모의 시험장치를 통해 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 시멘트에서의 6가크롬은 클링커 생성시 킬른 내화벽돌로 사용되는 마그네시아 크롬질 내화벽돌에 의한 것으로 알려져 있는데, 함유량 실험을 통하여 OPC에 최고 25.3 mg/kg 함유된 것을 확인함으로써 그라우트 공법이 반현탁액 상태의 그라우트재를 지반에 주입하는 점을 감안했을 때, 6가 크롬으로 인한 지하수 및 토양 오염문제가 발생할 수 있을 것으로 판단되어진다.

2. 그라우트 원재료 및 호모겔의 폐기물 용출시험에 의한 실험결과, 폐기물 관리 기준인 1.5 mg/L 보다 적었으나, 샌드겔의 토양오염 공정 시험법에 의한 실험결과, OPC로 만든 샌드겔의 경우 토양오염기준 중 '가' 지역 우려기준 4.0 mg/kg 보다 높은 4.85 mg/kg이 나타났으며, SC 및 MC 샌드겔 역시 기준치에 가까운 값이 용출되어 그라우트로 인한 토양오염의 가능성이 있음을 확인하였다.

3. pH에 따른 6가크롬 용출실험 결과, pH 3 이하의 강산성에서 6가크롬의 용출량이 급격히 늘어나는 것을 알 수 있으며, pH 11 이상의 강염기에서도 증가하는 경향을 보여, 그라우트가 시공되는 지역이 매립장 또는 주변인 점을 감안할 경우 매립지 분해단계 중 산생성 단계에서 침출수의 pH가 빈번히 pH 4 이하가 되는 점을 감안하였을 때, 실제 용출실험 조건에서 보다 더 많은 6가 크롬이 용

출될 수 있을 것으로 사료되어진다.

4. 양생조건에 따른 그라우트 공시체의 영향을 살펴보기 위한 강도 및 6가크롬 용출량 변화 실험결과, 침출수 중에 양생시킨 공시체의 강도발현이 초순수 중에 양생시킨 경우 보다 초기강도가 현저히 낮았으며, 이는 물시멘트 비가 증가할수록 강도가 감소되었으며, 재료에 따라서는 'OPC>MC>SC' 순으로 강도 감소율이 크게 나타났다. 6가 크롬의 용출량 역시 침출수 중에 양생시킨 경우가 초순수 중에 양생시킨 경우 보다 많이 용출되었다. 이와 같은 결과에서 매립지와 같은 특수한 현장에서는 일반 현장과는 다른 시멘트 재료 선정 및 배합비산출이 필요할 것으로 사료되어 진다.

5. 양생수에 따른 강도변화 실험결과, 침출수와의 접촉을 통해 그라우트재의 강도가 현저히 저감될 수 있음을 알 수 있었으며, 특히 OPC의 경우 SC나 MC 보다 영향을 더 많이 받는다는 것을 알 수 있었다. 또한 물시멘트 비의 증가에 따라 침출수에 의해 강도가 저감되는 결과를 통해서 매립지 또는 주변에 시공시에는 일반 현장과는 차별화된 재료 및 배합비의 선정이 필요할 것으로 보인다.

6. 그라우트 공법이 빈번히 적용되어지는 일반적인 연약지반은 논이나 저습지로 되어 있는 경우가 많아서 지하수위는 매우 높고 지반은 거의 물로 포화되어 있다고 할 수 있다. 따라서, 연약지반을 대상으로 하는 지반 주입공법에서 약액을 주입 후 충분한 겔화가 이루어지기 전에 지하수나 포화수에 의해 희석이 될 경우, 주입효과는 감소되고 약액이 유실되어, 적용범위를 넘어서 주변 지반 및 지하수를 오염시킬 수 있을 것으로 판단되어진다.

7. 침출수 중에 양생시킨 호모겔이 초순수 중에 양생시킨 호모겔 보다 6가크롬의 용출량이 높아지는 것을 보아

그라우트를 시공하고자 하는 대상 지반이 해안이나 매립장일 경우, 해수나 침출수의 영향으로 겔화가 이루어진 이후에도 강도발현의 저감 등으로 인한 6가 크롬이 발생량이 증가될 가능성이 있으므로 이에 대한 주의가 필요할 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 2001~2002년도 한국과학재단 목적기초연구에 의하여 지원되었음을 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 천병식, "건설기술자를 위한 지반주입공법", 원기술 pp. 17-18 (1996).
2. 천병식, 2001, "지반개량 재료로서의 시멘트 사용에 의한 지반오염문제 및 대책", 한국지반공학회지, 17(8) (2001).
3. Qotaibi, Z. et al., "Analysis of Magnesia Chrome Refractories Weard in a Rotary Cement Kiln", *Ann. Chim. Sci. Mat.*, 23, 169-172 (1988).
4. Krishina, "Effect of Large Additions of Cd, Pb, Cr, Zn, to Cement Raw Metalon the Composition and Properties of the Clinker and Cement", *Cemet and Concrete Research*, 26(3), 377-385 (1993).
5. Frias, M., "Determination and Quantification of Total Chromium and Water Soluble Chromium Contents in Commercial Cements", *Cemet and Concrete Research*, 25(2), 433-439 (1995).
6. 森 麟, 田村 昌仁, 福井, 義弘, "指向性高壓注入における薬液の注入形態とその支配條件", 日本 第25回土質工學研究發表講演集, 1911-1914 (1990).