

# 지반주입재 종류별 주입특성 및 환경적 유해성에 관한 연구

## The Injection Characteristics and Environmental Effects for Grouting Materials

천병식\* · 이재영\*\* · 하광현\*\*\*

Chun, Byung-Sik · Lee, Jae-Young · Ha, Kwang-Hyun

### Abstract

In this study, it is performed that mix design of grouting materials which high strength, durability and environmentally safe materials for 2 types of suspension, solution grouting. The laboratory model tests such as permeation, solidification tests are performed to find injection effects by the injection pressure, soil condition. And environmental effects of the grouting materials is analyzed through the heavy-metal leaching tests.

From the results, micro cement of suspension grouting superior permeation, solidification injection to Portland cement, and phosphoric acid and sodium hydrogen carbonate in solution grouting were similar to micro cement of suspension grouting. When compare to strength of grouted soils, micro cement of suspension grouting showed high compression strength to Portland cement. While, solution grouting showed very low compression strength comparing suspension grouting. Also, in the heavy-metal leaching tests results were satisfied with the environmental regulation standard for raw grouting materials and grouted soil by 7, 14, 28days curing.

**Keywords** : Solidification, Permeation, Suspension, Solution, Leaching test

### 요 지

본 연구에서는 고강도·고내구성 및 환경에 대한 안정성이 높은 주입재료를 주입재 형태별로 즉 현탁액형, 용액형 주입재에 배합설계를 실시하여 주입압, 지반조건에 따른 주입효과와 환경적 유해성을 분석·검토하고자 한다. 주입재 특성 및 주입효과에 대한 연구결과, 현탁액형 주입재에서는 초미립자시멘트가 보통시멘트에 비하여 상당히 높은 침투성 및 고결율을 나타냄을 알 수 있었고 용액형 주입재에 사용된 인산과 탄산수소나트륨의 경우 초미립자시멘트와 유사한 경향을 나타내었다. 주입된 고결체의 압축강도 시험결과, 현탁액형 주입재의 초미립자시멘트가 상당한 고강도를 나타냈으나 용액형 주입재의 경우 현탁액형 주입재에 비하여 매우 낮은 강도를 나타내었다. 또한 주입재가 가지고 있는 환경적 유해성 여부를 평가하기 위해 대상시료를 주입재의 원재료 및 주입재의 고결시편의 양생일수에 따라 중금속 용출시험을 실시한 결과, 선정된 약액조합 및 고결체의 중금속 함량은 규제기준을 만족하였다.

**주요어** : 고결성, 침투성, 현탁액형, 용액형, 용출시험

\* 정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 정회원 · 서울시립대학교 공과대학 환경공학부 교수

\*\*\* 정회원 · 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

## 1. 서론

1970년대부터 약액에 의한 지하수 오염이 사회적으로 문제화되면서 환경적으로 안전한 약액의 필요성이 제기되었고, 1980년대부터 전세계적으로 대형댐, 지하철, 고속철도 등의 건설 붐에 따라 약액의 내구성과 고침투성이 요구됨에 따라 그 동안 범용적으로 사용되던 보통시멘트와 물유리계 약액의 한계성을 극복하기 위한 새로운 주입재와 공법이 개발되어 실용화되었지만 국내에서는 아직도 종래의 재료와 공법에 의존하고 있는 실정이다(천병식, 1998). 기존 물유리계 약액의 경우 고결된 후 용탈현상에 의해서 내구한도는 일반적으로 1년 정도로 시간의 흐름에 따라 차수효과가 현저히 저하되고, 보통시멘트는 입자가 크기 때문에 굵은모래층까지만 침투주입이 가능하다. 국내 지하철 건설과 같이 최소한 수년동안 지하수의 심각한 변동을 억제할 수 있을 정도로 내구성이 우수하고, 도심지의 실트질 사질층 정도까지도 침투되어 지반보강의 효과를 발휘할 수 있는 고내구성·고침투성·고강도형 주입재를 이용한 지반보강공법이 필요한 실정이다(島田 外, 1989; 米倉 外, 2000; 천병식 등, 2001).

따라서, 본 연구에서는 재료분야에서 최근의 기술동향인 고강도·고내구성 및 환경에 대한 안정성이 높은 주입재료를 주입재 형태별로 현탁액형 및 용액형 주입재의 배합설계를 실시하여 주입목적, 지반조건에 따른 주입효과와 환경적 유해성을 분석·검토함으로써 현장적용시 주입설계 기초자료로 제안하고자 한다.

현탁액형 주입재의 경우 시멘트주입재료의 미분말화를 통하여 침투성이 높여 고강도의 주입효과와 용액형의 경우 침투성은 우수하나 내구성이 떨어지므로 내구성 향상에 초점을 두었다. 실내모형시험을 통한 특성평가를 중심으로 높은 고결율 및 침투성, 내구성 주입재를 이용한 주입공법에 대한 연구를 수행한다. 이를 위하여 각 주입재의 물리·역학적 특성과 화학적 특성 및 입자형상을 파악하고, 작업성과 침투범위 조정에 필수적인 겔타임을 조절한다. 그리고 각 주입재 시험항목별 실험계획안을 도출하고, 이의 효과적인 적용성을 파악하기 위해 강도시험, 침투성시험, 내구성평가, 지반개량시 고결체로부터 약액성분의 용탈로 인한 주변 토양 및 지하수오염에 대한 환경영향평가를 실시한다.

## 2. 주입재의 특성

### 2.1 시멘트계 주입재 특성

본 절에서는 주입재로서 사용하고 있는 초미립자시멘트와 보통시멘트의 물리·화학적 특성과 입도분포 및 형상을 분석하였다.

#### 2.1.1 물리적 특성

표 1에서 보는 바와 같이 초미립자시멘트는 보통시멘트에 비해서 유동성이 뛰어나고, 장기강도는 물론 초기강도도 매우 우수한 특성을 나타내고 있다. 따라서 기존의 보통시멘트에 비해서 주입성이 좋고 고강도가 발현되며 내구성도 향상될 것으로 판단된다.

표 1. 시멘트계 주입재의 물리적 특성치

		KS 규정값	초미립자시멘트	보통시멘트
비 중		-	2.93	3.15
분말도(cm <sup>2</sup> /g)		2800 이상	8070	3250
응결	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
압축 강도	W/C(%)	-	43.5	49.7
	1일(kg/cm <sup>2</sup> )	-	177	61
	3일(kg/cm <sup>2</sup> )	110 이상	315	202
	7일(kg/cm <sup>2</sup> )	190 이상	509	264
	28일(kg/cm <sup>2</sup> )	290 이상	655	405

#### 2.1.2 화학적 특성

표 2는 초미립자시멘트와 보통시멘트의 화학성분을 나타낸 것으로서 무기질로 구성되어 있으며, 화학성분의 차이가 있다. 시멘트계 주입재의 염기도는 수화활성도를 나타내는 지표로서 염기도가 클수록 수화활성이 크기 때문에 주입경화재로서 유리하다. 본 시험에서 사용된 시멘트계 주입재는 염기도가 규정치 1.4보다 매우 큰 염기도를 갖기 때문에 주입경화재로서 적합하다고 판단된다.

표 2. 시멘트계 주입재의 화학성분 비교(단위:%)

	초미립자시멘트	보통시멘트
SiO <sub>2</sub>	28.5	20.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +CaO	66.8	69.5
SO <sub>3</sub>	1.9	1.5
염기도*	2.3	3.4

### 2.1.3 현탁액형 주입재의 입도분포 및 입자형상

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. 본 연구에 사용된 현탁액형 주입재의 입도분석결과는 그림 1과 같다.

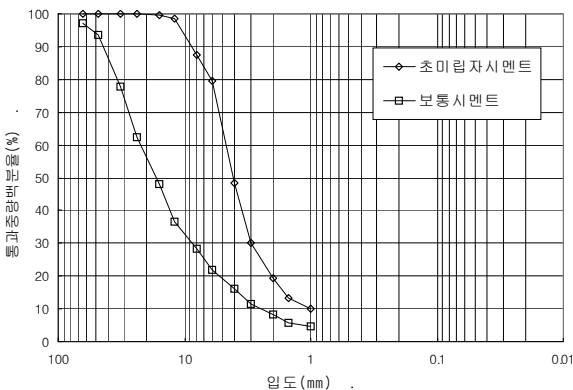


그림 1. 시멘트계 그라우트의 입도분포곡선

보통시멘트의 구상화율은 보통 0.65~0.68정도로 알려져 있으며, 초미립자시멘트의 구상화율은 이보다 크다. 분체공학에서는 입자의 형상을 판정하는 것이 중요한 변수이며, 구상화율이 주입재의 형상판정계수로서 활용된다. 주입재가 초미립화 될수록 입자의 구상화율이 커지며, 이로 인해 주입재의 전단응력이 작아지기 때문에 주입압의 손실이 줄어들 수 있으므로 침투력이 향상되고, 주입반경을 넓히는 데 유리하다.

## 2.2 용액형 주입재 특성

본 연구에서 사용된 용액형 주입재는 물유리와 산성반응제이다. 물유리는 국내 현장에서 사용되고 있는 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 몰비로 n=0.5~4의 범위의 것이 공업적으로 생산되고 있다. n이 1이하인 것은 결정상의 분말형 물유리, n이 1이상인 것은 비결정구조가 되어 약상형 물유리다.

규산소다는 몰비에 따라서 1호, 2호, 3호, 4호가 있으며 각각의 특징은 표 3과 같다. 일반적으로 약액주입에 사용되는 것은 규산소다 3호로 본 연구에서는 사질토 토조를 이용한 공법별 침투한계시험 등에 사용하였다.

표 3. 규산소다의 특성

종 류 항 목	1호	2호	3호	메타규산나트륨	
				1종	2종
외관	물엿형의 무색 내지 다소 착색된 상태			백색분말 및 과립형	백색결정
이산화규소	35~38	34~36	28~38	27.5~29	19~22
산화나트륨	17~19	14~15	9~10	28.5~30	20~22

## 3. 시험

### 3.1 주입재의 겔타임 조정

본 절에서는 현탁액형(규산소다 3호 + 초미립자시멘트, 보통시멘트), 용액형 주입재에 대한 겔타임을 조정하였다. 겔타임을 A액과 B액을 1:1로 교반할 때 고결시간을 측정하는 것으로써 주입재의 작업성 및 침투범위 조정에 필수적인 물리적 특성이다.

겔타임을 측정하는 방법은 현장에서 수시로 할 수 있는 간이적인 방법으로는 약 200cc의 종이컵에 A액과 B액을 각각 70cc씩 계량하고 약 1초 간격으로 교반하면서 고결할 때까지의 시간을 측정한다.

표 4. 현탁액형 주입제 배합

a. 초미립자시멘트									
배합 번호	A(g)		B(g)				Gel-time(sec)	점도(cps)	비 고
	규산소다3호	물	물	초미립자시멘트					
				급결	중결	완결			
No.1	28	30	43	21.5			9~12	측정불능	*급결,중결 -규산:물=4:6 *완결 -규산:물=3:7
No.2	(20%)		43		21.5		50~70		
No.3	21(15%)	35	45.3			15.1	300분~360	6.5~7	

b. 보통시멘트									
배합 번호	A(g)		B(g)		Gel-time(sec)	점도(cps)	비 고		
	규산소다3호	물	물	초미립자시멘트					
				중결					
No.4	35(25%)	25	43	21.5	50~70	7	규산:물=4:6		

표 5. 용액형 주입제 배합

배합 번호	A(g)		B(g)			Gel-time(sec)	점도(cps)	비 고
	규산소다3호	물	물	반응제				
				인 산	탄산수소나트륨			
No.5	35	25	48.3		3.6	50~70	9~10	
No.6			44	10		50~70	8~9	
No.7			30.8(22%)	28	45	8		

### 3.2 호모겔 강도측정

호모겔 압축강도는 A액과 B액을 1:1로 교반할 때 겔화 후 재령별로 강도발현특성이다. 주입제가 지반에 침투주입된 후에는 샌드겔이 되지만, 주입대상토질의 대표성을 정하기가 어렵기 때문에 샌드겔 강도로 평가하기가 어렵다. 따라서, 주입제의 강도특성을 평가하는 경우 주로 호모겔 강도를 이용한다.

각 주입제의 배합은 위의 비중을 기준으로 계산하였으

며, 100cc를 기준으로 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 될 수 있으면 정확하게 계량한다.

표 6. 호모겔 압축강도(kg/cm<sup>2</sup>) 측정결과

재령일 시료명	1일	3일	7일	28일	비 고
No.2	1.36	5.44	19.89	21.66	초미립자시멘트(중결)
No.3	0.50	0.82	11.08	21.54	초미립자시멘트(완결)
No.4	0.82	0.88	3.43	8.59	보통시멘트
No.5	0.22	0.71	0.89	1.00	시료형상변화
No.6	1.04	1.51	1.63	1.20	인산 10g
No.7	1.07	1.24	1.29	1.19	인산 8g

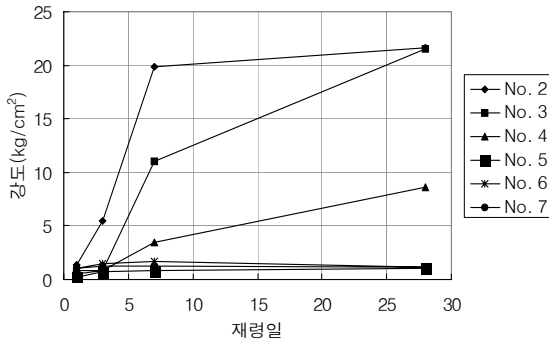


그림 2. 주입재별 호모겔 강도변화

### 3.3 주입효과 판정시험

#### 3.3.1 대상시료토

약액을 주입하는데 있어 주입대상이 되는 지반의 성질을 파악하는 것은 공법의 선정 및 주입재, 주입량 결정 등에 큰 영향을 미친다. 대상지반토질의 비중, 입도분포, 단위중량(공극율) 및 투수계수 등을 조사하여 약액주입시험의 기본 자료로 사용한다. 대상 토질의 종류 및 공극율은 약액을 지중에 주입하는데 있어 매우 중요한 요소이므로 정확히 파악하여야 한다.

표 7. 주입대상시료토의 입도분포 특성

대상시료토	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)	C <sub>u</sub>	C <sub>g</sub>	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

#### 3.3.1.1 대상시료토의 입도분포

대상시료토에 대한 입도분석을 수행한 결과, 표 7과 같은 입도분포로 나타났으며 입도조성이 균등함을 알 수 있다.

#### 3.3.1.2 대상시료토의 비중 및 공극율

대상시료토의 비중과 공극율은 표 8과 같다. 공극율은 건조단위중량과 비중으로부터 구해진다. 공극율은 시료의 다짐정도에 따라 달라진다. 아래 식에 나타난 바와 같이 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 건조 단위중량을 사용한다.

$$D_r(\%) = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 \quad (1)$$

$$= \frac{\gamma_{d\max}}{\gamma_d} \times \frac{\gamma_d - \gamma_{d\min}}{\gamma_{d\max} - \gamma_{d\min}} \times 100$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1 + w} \quad (2)$$

$$\gamma_t = \frac{W}{V} \quad (3)$$

$$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} \quad (4)$$

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (5)$$

위의 식 (1)~(5)을 이용해 다짐할 흙의 양을 결정하고 시험진행시 동일한 다짐도를 가질 수 있도록 간극비를 유지하면서 실험을 하였다. 첫째, 대상 시료토의 함수비를 측정하는 다음, 목표로 하는 상대다짐도를 식 (1)에 넣어 건조 단위중량( $\gamma_d$ )을 구한다. 앞에서 구한 함수비와 건조단위중량을 식 (2)에 대입하여 습윤단위중량을 구하면 식 (3)에서 토조에 넣을 체적과 시료의 비중을 알기 때문에 다짐량을 구하고, 식 (4), (5)에서 간극비와 간극율을 구할 수 있다.

위의 식 (1)~(5)을 이용해 다짐할 흙의 양을 결정하고 시험진행시 동일한 다짐도를 가질 수 있도록 간극비를 유지하면서 실험을 하였다. 첫째, 대상 시료토의 함수비를 측정하는 다음, 목표로 하는 상대다짐도를 식 (1)에 넣어 건조 단위중량( $\gamma_d$ )을 구한다. 앞에서 구한 함수비와 건조단위중량을 식 (2)에 대입하여 습윤단위중량을 구하면 식 (3)에서 토조에 넣을 체적과 시료의 비중을 알기 때문에 다짐량을 구하고, 식 (4), (5)에서 간극비와 간극율을 구할 수 있다.

표 8. 주입대상시료의 비중 및 공극율

대상시료토		비 중	건조단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	상대밀도 (D <sub>r</sub> , %)	공극율 (%)
굵은 모래	느슨한 상태	2.62	1.49	25	43.2
	중간 상태		1.60	56	39.0
	조밀한 상태		1.74	97	33.6
중간 모래	느슨한 상태	2.69	1.50	25	44.3
	중간 상태		1.63	56	39.7
	조밀한 상태		1.75	97	35.1

### 3.3.2 침투성 시험

#### 3.3.2.1 개요

주입에 있어서 가장 큰 문제는 약액의 대상지반에 대한 침투성이다. 즉, 대상지반의 공극이나 주입채의 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 약액주입공사 현장에서 사용되고 있는 보통시멘트를 이용하여 사질토의 입도 및 다짐상태에 따라 침투성을 비교평가 하고자 한다. 또한 대상시료토, 배합비, 주입압, 투수계수 등 주입조건에 따른 침투거리를 관찰하여 그 관계를 고찰하고 나아가 주입메커니즘을 이해하는 것을 목적으로 한다.

#### 3.3.2.2 시험기구 및 장치

- ① 교반기 : 블리딩이 발생하지 않도록 충분히 교반할 수 있어야 한다.
- ② 주입펌프 : 주입압이 일정한 상태로 유지될 수 있도록 한다.
- ③ 압력계 : 주입시의 압력을 육안으로 관찰할 수 있도록 한다.
- ④ 바이브레이터 또는 다짐봉
- ⑤ 토조 : ø110mm×H 550mm인 몰드를 사용한다

#### 3.3.2.3 시험 방법

각 대상시료토의 조건별로 몰드체적에 대한 중량을 산정

하여 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.



사진 1. 침투성 시험장치

### 3.3.3 고결성 시험

#### 3.3.3.1 개요

고결성 시험은 실내주입시 널리 사용되는 방법으로 약액 주입에 의하여 주입대상 시료토가 어느 정도의 고결성을 가지는가에 대한 평가를 할 수 있다.

일반적으로 고결성 시험은 표준사, 일정한 공극율을 가진 대상시료토를 대형 또는 소형몰드에 넣어서 일정한 압력으로 약액을 주입하여 대상지반에서의 약액주입효과를 판정한다. 주입조건에 따라 약액의 침투효과가 달라지므로 대상시료토의 입도, 주입압, 포화정도, 공극율, 주입채의 배합, 주입구의 거리 등 주입조건에 따라 주입효과는 변화한다. 본 고결성 시험에서는 주입조건을 변화시켜가며 실시하였으며, 조건은 다음과 같다.

#### ① 대상토의 입도

주입대상토는 굵은모래, 중간모래, 가는모래를 선정하였으며, 현재 수행중인 주입대상토는 굵은모래로서 입도분포 및 기본 물성시험은 표 7, 8에 나타난 바와 같다.

#### ② 주입압

주입압은 주입되는 약액을 주입할 때 가하는 압력으로

1.0, 1.5, 2kg/cm<sup>2</sup>로 가하였다.

③ 대상토의 포화정도

고결성 시험의 대상토는 건조상태에서 시행하였으며 포화도는 0%이다.

④ 공극율

대상토인 굵은모래의 다짐정도를 변화시켜 느슨한 상태, 중간 상태, 조밀한 상태의 세 조건으로 구분하여 시험하였다. 느슨 또는 조밀한 정도는 건조단위중량을 측정하여 결정하였다.

⑤ 주입재의 배합

현탁액형 주입재의 경우, 강도강화 또는 켈타임의 조정을 위해 시멘트를 사용할 때는 시멘트와 물의 배합비인 물-시멘트비(W/C)도 침투효과에 영향을 미친다.

⑥ 주입구 거리

주입구 거리는 A액과 B액의 혼합 직후부터 고결할 때까지 켈타임과 관계된다. 켈타임은 규산소다 3호를 사용하여 50~70초를 표준으로 하였다.

3.3.3.2 시험기구 및 장치

본 연구에서는 대형 주입몰드를 만들어 현장조건과 유사하게 시험할 수 있도록 하였다. 몰드의 내경은 480mm, 높이 500mm로서 주입 후 고결체의 형상을 정확히 파악할 수 있다.

- ① 약액 탱크(A, B액) : 블리딩이 발생하지 않도록 충분히 교반할 수 있는 것
- ② 주입펌프 : 주입압이 일정한 상태로 유지될 수 있도록 한다.
- ③ 압력계 : 주입시의 압력을 육안으로 관찰할 수 있도록 한다.
- ④ 토조 : ø480mm×H 500mm인 중형정도의 몰드를 사용한다.
- ⑤ 주입관 : 주입관 및 주입홀의 크기가 상호 다른 여러 종류이어야 한다. 또한 스트레이너의 구멍보다 대상토의 입자크기가 작을 경우에는 토사가 스트레이너 내로 유입되어 주입에 지장을 줄 우려가 있다. 이런 경우에는 약액주입에 지장이 되지 않는 크기의 망을 스트레이너 주위를 둘러싸준다.
- ⑥ 줄자, 버어니어 캘리퍼스 : 유효고결율을 측정하기 위해 사용한다.
- ⑦ 저울 : 몰드와 몰드 내의 흙 무게를 동시에 잴 수 있는

것으로 주입재의 배합 및 대상토의 단위중량 측정시 사용한다.

3.3.3.3 시험방법

- ① 토조 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.

$$\text{유효고결율}(\%) = \frac{\text{실제 고결된 흙의 체적}}{\text{주입대상 흙의 체적}} \times 100 \quad (6)$$

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.



사진 2. 고결성 시험장치

3.3.4 고결체 강도시험

3.3.4.1 고결시료의 채취

본 시험에서는 튜브샘플 방법을 응용한 얇은 관에 의한 흙의 시료채취방법으로써, 고결체의 코어를 채취하기 위해 고결성 시험을 수행한 아크릴 몰드에 튜브를 박아서 일정시

간이 지난 후 튜브를 빼어 코어를 채취하여 시험을 하였다.

### 3.3.4.2 시험방법

물과 물유리의 배합비가 1:1인 A액과 물/시멘트비가 200%인 B액을 부피비로 1:1로 혼합하여 2액 1공정으로 주입하여 고결된 시료토인 고결체의 일축압축강도시험을 수행하였다.

채취된 고결체는 원형몰드 직경 5cm×높이 10cm으로 써, 재령 7일, 28일에 대하여 일축압축시험(KS F 2314)을 통해 일축압축강도를 구하였으며, 전단파괴속도는 0.5mm/min으로 하였다.

## 3.4 환경영향평가 시험

### 3.4.1 개요

최근 약액의 사용범위가 확대되면서, 인구가 밀집된 도심구간에서의 지하철건설과 같이 장기간에 걸친 대형공사 뿐 아니라 매립지와 같은 오염원의 차단을 목적으로 하는 이용 등 여러 분야에서 응용되고 사용되어지고 있지만 지하수나 주변 토양에 미치는 영향이나 오염물질과의 반응으로 인한 추가적인 오염의 발생은 전혀 고려되어지고 있지 않은 실정이다. 그러므로, 지반 중으로의 침투성이 크고 강도발현성과 내구성이 뛰어나며 환경오염성이 없는 무공해성 주입재를 개발하고, 지반주입공법을 실시하는 목적과 지질조건에 따른 적절한 주입재를 선정할 수 있는 기준이 마련된다면 주입공법의 시공에 많은 도움이 되리라 판단된다.

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 용출실험만으로는 생태적 독성의 관점에서의 영향을 모두 고려할 수 없으므로 어류 급성독성 시험을 통한 주입재의 유해성을 평가하고자 한다.

### 3.4.2 폐기물공정시험법에 의한 용출시험

#### 3.4.2.1 실험방법

표준용출시험법인 폐기물 공정시험방법에 의한 용출시

험(KSLT: Korea Standard Leaching Test)을 다음과 같이 실시하였다.

#### ① 시료의 조제

시료의 조제는 고결시편의 경우 2mm 체(8 mesh)에 통과할 수 있을 정도로 파쇄를 하였다. 물유리계 고결시편의 경우 고결 이후에도 자체가 가지고 있는 수분으로 인하여, 105°C에서 1시간 건조한 후 체분리를 하였다.

#### ② 시료의 전처리

시료의 조제방법에 따라 조제한 시료 100g이상을 정밀히 달아 정제수에 염산을 넣어 pH를 5.8~6.3으로 한 용매(ml)를 1:10(W:V)의 비율로 200ml 삼각플라스크에 넣어 혼합한다.

시료의 조제가 끝난 혼합액을 상온, 상압에서 진탕 횟수가 매분당 약 200회, 진폭이 약 4~5cm의 진탕기를 사용하여 6시간 연속 진탕한 다음 1.0 $\mu$ m의 유리섬유 여지로 여과하고 여과액을 전처리하여 중금속 검출 시험용 검액으로 한다.

#### ③ 시료의 분석

KSLT에 의해 전처리한 용출액은 Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy를 이용하여 분석한다. 본 연구에서 사용된 ICP는 일본 SHIMADZU사의 ICPs 1000IV모델로 아르곤 가스를 플라즈마 가스로 사용하여 수정발진식 고주파 발생기로부터 발생된 주파수 27.13MHz 영역에서 유도코일에 의하여 플라즈마를 발생시켜 시료를 분석한다.

ICP는 시료 도입부, 고주파 전원부, 광원부, 분광부, 연산처리부 및 기록부로 구성되어 있으며, 시료주입은 Auto Sampler를 통해 이루어진다. Cr, Cu, Pb, Cd등의 일반중금속은 일반중금속용 챔버로 시료를 분사하여 분석하고, Hg, As는 HGV를 이용하여 수소이온을 발생시켜 수은, 비소용 챔버를 사용하여 분석한다. 분석치는 컴퓨터 자동처리장치를 통하여 얻을 수 있다. 분석시 중금속 항목에 따른 선택 파장 및 유효측정농도는 기기의 상태 및 측정조건에 따라 다르지만 폐기물 공정시험법상에서 권장하는 값은 다음 표 9와 같다.



표 9. 중금속 항목별 측정 파장 및 유효측정농도

항 목	측정 파장	유효측정농도
Cr <sup>+6</sup>	267.72nm	0.007-50 $\mu$ g/g
Cu	324.75nm	0.006-50 $\mu$ g/g
Cd	226.50nm	0.004-50 $\mu$ g/g
Pb	220.35nm	0.04-100 $\mu$ g/g
As	193.70nm	0.05-100 $\mu$ g/g
Hg	-	-

검량선은 각각의 중금속 표준액(0.05mg/ml) 0, 2, 10, 20ml를 정확히 취하여 100ml 용량 플라스크에 넣고 질산(1+1) 2ml, 염산(1+1) 10ml 및 증류수를 넣어 표선까지 채운 다음 ICP로 정량분석하여 각 중금속의 농도와 발광광도의 관계에 따라 자동으로 계산된 값을 얻는다.

### 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, 1996).

#### 3.5.2 시험방법

본 시험목적은 지반주입재의 환경적 영향을 평가하기 위한 것이므로 실제 자연환경조건을 모사하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 고결체로부터 약액의 용탈에 미칠 수 있는 영향인자로는 양생기간, 양생환경, 수리전도도와 고결체와 접촉하는 수질 등을 들 수 있다. 또한 실험조건에서는 용출시간 및 용출액량 등이 결정적인 영향을 미칠 것으로 보인다. 그러나 현재 주입재에 대한 실험조건에 기준이 없기 때문에 폐기물 성분의 자연조건에서 용출을 모사한 폐기물

용출시험 방법을 응용하여 적용하였다. 독성시험은 용출시험을 통한 용출액을 희석하여 사용하였다.

#### 3.5.2.1 예비시험

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

#### 3.5.2.2 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)로 하고 시험기간 중에 먹이를 공급하지 않았다. 어류는 온도변화에 민감함으로 적정온도에서  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 로 온도를 유지하였다.

## 4. 시험결과 및 분석

### 4.1 침투성 시험

주입은 하향주입으로써 주입시 상향부분에 초기의 주입압에 대해 시료의 파괴를 방지하기 위해 철망을 씌워 침투성 시험을 수행하였다.

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, 보통시멘트는 굵은모래에서조차 원활히 침투주입이 잘 되지 않았으며 중간모래에서는 거의 침투주입이 일어나지 않고 overflow현상이 발생하였다. 또한 용액형 주입재에서는 초미립자시멘트 주입재의 침투주입보다 약간 크거나 유사한 경향을 나타냈다.

### 4.2 고결성 시험

본 시험에서는 대상시료토는 굵은모래, 중간모래를 사용하여, 공극율에 따른 3가지 조건에 대해서 수행하였다. 각각 조건에서 일정한 공극율을 맞추기 위해 오차의 범위 1~2% 사이로 하였다.

시험결과, 주입재의 이동거리의 차이가 나타났으며, 대 상시료토가 느슨한 상태일수록 주입압의 변화에 따라 이동 거리, 고결율이 민감하게 변화하였다. 주입형상의 경우, 주 입관 주위로 구 모양의 고결체가 형성되었다. 시험시 주입 구는 바닥으로부터 15cm정도의 높이에 위치하는 데, 주입 구 아래의 고결율은 높지 않았다.

초미립자시멘트 주입재의 경우 대부분 침투주입이 가능 하였다. 굵은모래에서는 공극율에 대한 영향이 적었으며 59~82%의 고결율을 나타내었다. 보통시멘트를 사용한 경우에는 굵은모래에서 14~42%정도 고결율을 나타내었 고, 공극율이 작을 경우 고결율이 낮게 나타났다. 또한 용 액형 주입재의 경우 초미립자시멘트 주입재와 유사한 경향 을 나타내었다.

표 10. 고결성 및 침투성 시험결과

현탁액형	주입재	주입재의 종류	공극율(%)	주입압(kg/cm <sup>2</sup> )	유효고결율(%)		침투거리(cm)	
					굵은모래	중간모래	굵은모래	중간모래
현탁액형 주입재	초미립자시멘트+물유리	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
	보통시멘트+물유리	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
용액형 주입재	물유리+인산	느슨한 상태		1.0	72.51	70.71	36	34
				1.5	78.69	72.64	40	38
				2.0	87.23	78.69	45	43
		중간상태		1.0	72.51	72.64	31	29
				1.5	78.69	68.75	35	33
				2.0	80.81	72.68	37	35
		조밀한 상태		1.0	68.80	61.52	27	25
				1.5	74.55	66.90	31	29
				2.0	78.73	68.71	36	34
	물유리+탄산수소나트륨	느슨한 상태		1.0	72.64	72.64	40	38
				1.5	78.69	74.64	44	42
				2.0	82.83	80.71	49	47
		중간상태		1.0	72.51	65.08	35	33
				1.5	76.66	64.69	37	35
				2.0	78.69	66.90	38	36
		조밀한 상태		1.0	70.72	54.10	31	29
				1.5	72.64	61.48	32	30
				2.0	80.71	68.80	35	33

### 4.3 고결체 강도시험

고결된 시료토에 대한 7일 및 28일 일축압축강도를 측정한 결과, 28일 재령에서 초미립자시멘트가 21.66kg/cm<sup>2</sup>, 보통시멘트가 8.59kg/cm<sup>2</sup>로 나타났다. 반면에 용액형 주입재의 경우 인산 1.20kg/cm<sup>2</sup>, 탄산수소나트륨 1.19kg/cm<sup>2</sup>로 현탁액형 주입재보다 낮게 나타났다. 그

러나 용액형 주입재는 지반보강보다 차수목적으로 많이 적용되기 때문에 1일 이상 재령에서 요구되는 압축강도 1kg/cm<sup>2</sup> 정도이다. 본 시험에서와 같이 20kg/cm<sup>2</sup> 이상 고강도가 얻어질 경우에는 차수목적과 지반보강 효과를 동시에 발휘할 수 있다. 특히 침투성이 좋은 초미립자시멘트를 이용한 LW공법이 종전의 LW공법보다 개선된 공법으로 발전할 수 있을 것으로 판단된다.

표 11. 고결체의 일축압축강도 시험결과

주입재		대상지반조건	주입압 (kg/cm <sup>2</sup> )	일축압축강도			
				7일		28일	
				굵은모래	중간모래	굵은모래	중간모래
현탁액형 주입재	초미립자시멘트+물유리	느슨한상태	1.5	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
	보통시멘트+물유리	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
용액형 주입재	물유리+인산	느슨한상태		1.41	2.09	4.52	2.39
		중간상태		1.36	1.93	1.45	2.08
		조밀한상태		0.70	1.20	0.97	1.54
	물유리+탄산수소나트륨	느슨한상태		1.03	1.08	0.46	1.22
		중간상태		0.61	0.65	0.69	0.74
		조밀한상태		0.46	0.48	0.492	0.52

### 4.4 환경영향평가 시험

#### 4.4.1 폐기물공정시험법에 의한 용출시험

##### ① 주입재 원재료의 중금속 용출실험결과

주입재의 원재료에 대한 KSLT법을 이용하여 중금속 용출시험을 수행한 결과를 표 12에 나타내었다. 본 연구에서 선정한 주입재 원료의 중금속 함량은 규제기준을 만족하고 있음을 알 수 있었다. 이는 주입재를 지반에 주입시 중금속 용출에 대한 안정성을 어느 정도 가지고 있다고 판단된다.

##### ② 고결시편의 양생일수에 따른 용출실험

고결시편의 양생일수별 강도시험이 완료된 시편에 대하여 각각의 중금속 용출시험을 실시하였다. 실험결과는 표 13에 나타내었다.

위의 실험결과를 보면 주입재 고결시편에서의 중금속의 용출량은 법적기준치를 만족하고 있다. 일정하지는 않지만 양생일수가 길어짐에 따라 중금속의 용출량은 약간 감소되어지는 경향이 있으며, 약액 자체가 중금속을 고정하는 부분으로 볼 수 있겠다.

그러나 현탁액형 주입재의 경우, 자체가 고알칼리성이므로 용출액의 pH가 중금속의 용출량에 영향을 줄 수 있기 때문에 향후 연구에서 자체의 pH의 변화를 고려하여 분석이 필요하겠다. 용출실험이 가지고 있는 제한사항으로서 환경조건을 최대한 고려하여 용출조건을 설정한다고 하지만 분석대상시료 및 주변환경에 대한 영향이 크고, 또한 폐기물의 유해성을 판단하기 위한 시험기준이므로 법적 기준을 만족시킬 수는 있어도 용출실험만으로 환경 유해성을 판단한다는 것은 무리가 있다고 본다.

표 12. 약액원료의 중금속 용출실험 결과

항 목	Cr	Cu	Cd	Pb	Hg	As
우레탄	0.0000	0.1200	0.1100	0.0120	N.D	N.D
1종정분	0.1799	0.4498	0.0937	0.3077	N.D	N.D
3종정분	1.1971	0.0148	0.0929	0.1434	0.0003	N.D
Slag	0.0000	0.0019	0.9183	0.0000	N.D	N.D
급결	0.0128	0.2130	0.0456	0.8958	N.D	N.D
중결	0.0311	0.1447	0.0321	0.5787	0.0020	N.D
완결	0.0552	0.0457	0.0877	0.2609	N.D	N.D
기준	1.5000	3.0000	0.3000	3.0000	0.0050	1.5000

표 13. 고결시편의 중금속 용출실험 결과

항목	Cr			Cu			Cd			Pb			Hg			As			
	1일	7일	28일	1일	7일	28일	1일	7일	28일	1일	7일	28일	1일	7일	28일	1일	7일	28일	
No.2	0.0788	N.D	N.D	0.0279	0.0049	0.3711	0.0847	0.8518	0.0831	1.0362	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
No.3	0.0481	N.D	N.D	0.0439	0.3389	0.0074	0.0751	0.8134	0.0831	N.D	N.D	N.D	0.0040	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
No.4	0.0868	N.D	N.D	0.0365	0.0003	0.0390	0.0856	0.0728	0.0717	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
No.5	N.D	N.D	N.D	0.0122	0.0024	0.0292	0.0768	0.0604	0.0896	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
No.6	N.D	N.D	N.D	0.0391	0.0327	0.0450	0.0796	0.0841	0.0735	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
No.7	N.D	N.D	N.D	0.0403	N.D	0.0365	0.0853	0.0404	0.0942	N.D	N.D	0.1922	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
기 준	1.5000			3.0000			0.3000			3.0000			0.0050			1.5000			

#### 4.4.2 어류급성독성시험

용출액 원액의 일반적인 수질은 표 14와 같다. 다른 항목에 비해서 현탁액 주입재(No. 1~4)는 고염기성을 나타내고 있었고, 용액형(No. 5~7)은 중성영역을 나타내고 있었다. 희석배수에 따른 공시어의 치사율은 표 15와 같았다. 대체적으로 현탁액에 비해 용액형 주입재의 독성이 작은 것으로 나타났다. 이는 표 14의 항목 중 pH의 영향이 공시어 치사에 가장 결정적인 역할을 한 것으로 판단되어진다.

표 14. 용출액의 수질

구 분	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
pH	12.44	12.14	12.06	12.77	6.03	6.34	7.11
COD	5.03	6.72	5.23	6.32	3.26	4.22	6.55
BOD <sub>5</sub>	10.32	11.22	10.75	12.03	7.26	8.99	9.23
TOC	10.06	47.52	39.95	25.67	6.72	11.30	25.39

표 15. 희석배수에 따른 공시어 치사율

희석배수	용출액	희석배수						
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
96H 치사율(%)	3	100	100	100	88	75	50	63
	5	88	88	75	75	50	50	63
	10	25	50	38	25	0	0	13

#### 5. 결론

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

1. 강도발현과 장기적인 내구성을 고려할 때 용액형 주입재보다 현탁액형 주입재가 우수함을 알 수 있었다. 현탁액형 주입재에서도 초미립자시멘트가 보통시멘트보다 우수함을 나타냄으로 고성능 주입재로서 적합하다고 판단된다.

2. 침투성 시험결과, 주입재별로는 현탁액형 주입재와 용액형 주입재가 높은 침투성을 발휘하였다. 사용재료에 따라서 초미립자시멘트가 보통시멘트보다 높은 침투성을 나타내었다.
3. 고결성 시험결과, 침투성이 높은 주입재에서 보다 높은 고결율을 나타냈으며 현탁액형과 용액형 주입재가 높은 고결성을 나타내었다. 초미립자시멘트가 고결율에서도 용액형주입재와 비슷한 결율을 나타내므로 주입재의 특성을 고려했을 때 초미립자시멘트가 고성능주입재로 적절한 것으로 판단된다.
4. 고결체의 일축압축강도시험결과 호모겔 강도에서 나타나는 경향과 거의 유사하였으며, 재령일이 지날수록 강도의 증가가 크지 않음을 알 수 있었다. 또한 압력이나 주입대상지반의 공극율과 관계를 보면 주입압이 높아질수록 침투주입보다는 맥상주입에 가까운 형상을 나타내었다. 따라서 주입목적 및 지반조건에 따라 적절한 겔타임과 주입압을 조절하여 실제 시공에 적용하여야 할 것이다.

5. 환경영향평가시험은 원재료와 고결시편에 대해 중금속 용출시험과 어류 급성독성 시험을 수행하였다. 용출시험결과 원재료에 대해서 규제기준을 만족하고 있으며, 고결시편에서의 중금속 용출량도 법적기준치를 만족하고 있어 중금속 용출에 대한 안정성을 가지고 있다고 판단된다. 어류 급성독성시험결과 대체적으로 현탁액에 비해 용액형 주입재의 독성이 작은 것으로 나타났으며, pH의 영향이 공시어 치사에 가장 결정적인 역할을 한 것으로 판단되어진다.

### 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.

(접수일자 : 2002. 10. 4)

### 참 고 문 헌

1. 천병식(1998), 최신 지반주입공법 -이론과 실제-, 건설연구사, pp. 313~334.
2. 천병식, 김진춘 외(2001), 마이크로 복합실리카 그라우트제의 공학적 특성에 관한 연구, 한국지반환경공학회논문집, 제 2권, 제 1호, 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, 廢棄物學會, 第 7 卷, 第 2 号, pp. 394~402.
8. EPA(1983), Development document for effluent limitations guidelines and standards for the metal finishing point source category, EPA 440/1-83-091.