

## 지반주입재의 공해성 평가에 관한 연구

### A Study on the Evaluation of Toxic Effect of Grouting Materials

최병식<sup>1)</sup>, Byung-Sik Chun, 김진춘<sup>2)</sup>, Jin-Choon Kim

<sup>1)</sup> 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

<sup>2)</sup> 한양대학교 토목공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

**개요(SYNOPSIS)** : Water-glass chemical grouts are used worldwide for ground improvement. However they may pollute ground water. In this study fish poison test which estimates toxicity for fish is applied to evaluate the toxic effect of grouting materials such as LW, silica-sol, micro cement(MC) and ordinary portland cement(OPC). From the test result of the sample made of LW LC50(Median Lethal Concentration) reaches within 24 hours. In case of silica-sol, it does not even in 96 hours. Therefore we can conclude that the silica-sol grouting method is more free from the danger of underground water pollution than LW.

**주요어(Key words)** : Leaching, Pollution, LW, Micro Cement, Fish Poison Test, Water-glass Silica-sol, LC50

## 1. 서론

1970년대 말 약액주입공법이 서울지하철 건설공사에 도입된 이래 국내 현장에서는 LW, SGR, Cement Grouting과 같은 시멘트, 물유리계 주입재가 보편적으로 사용되어 왔다.

선진외국에서는 약액주입공법에 의한 지반개량시 고결체로 부터 약액의 성분이 용탈됨으로써 주변의 토양 및 지하수를 오염시킨 사례가 보고되고 있으며 환경오염을 고려하면서 불가피하게 주입공사를 수행하여야 할 경우 주변환경에의 영향을 고려하여 적절한 공법과 재료를 선택하도록 법적인 근거를 마련하고 있다. 그러나 국내에서는 지금까지 약액주입공법에 의한 피해사례가 보고된 적이 없고 외국의 사례를 통해 추정 만 할 뿐이다.

따라서, 본 연구에서는 약액주입공법의 본질적인 문제점 중의 하나인 환경오염정도를 평가하기 위하여 국내외적으로 사용빈도가 높은 LW공법의 규산소다 3호와 실리카졸공법의 실리카졸 주입재 및 시멘트계 주입재(MC, OPC)로 부터 용탈되는 수소이온 농도에 의한 이득성을 측정함으로써 수질오염에 미치는 영향을 간접적으로 평가하고자 한다.

본 연구에서 검토하고자 하는 규산소다 3호는 수질오염 정도가 적은 것으로 알려져 있지만, 주입 시 공후 주변의 수질기준은 pH치 8.60이하, 공사 직전의 측정치가 8.60을 초과할 때에는 해당 측정치 이하로 규정(일본건설성, 1974)하고 있기 때문에 기준을 만족한다 하더라도 항상 안전하다고 단정할 수는 없다.

본 연구에서는 LW와 실리카졸의 고결체 시편을 수조의 바닥 모래속에 설치하고 용탈되는 알칼리에 의한 공시어(연어과, 잉어과, 송사리과 등)의 LC50(Median Lethal Concentration)을 측정하고자 한다. 「KS M 0111」 규정에 의하면 LC50은 이류를 급성 독물질이 함유되어 있는 폐수의 희석액 중에 기르 고 그 사이에 공시어의 50%가 살아 남는 폐수의 농도를 나타낸다.



예비시험으로서 첫번째는 5cm×5cm×5cm cubic의 호모겔 고결체 5개를 제작하여 수조에 30ℓ의 물(호모겔 고결체 체적의 약 48배 수중에서 시험 실시)을 넣고 시험한 결과 24시간 동안에 치사된 공시어가 한마리도 없었으며, 96시간 후 2마리가 치사되었다. 따라서 24시간, 48시간은 물론이고 96시간에도 LC50을 호모겔 고결체로부터 알칼리 용탈량이 매우 작았다.

두 번째는 10cm×10cm×10cm cubic의 호모겔 고결체 5개를 제작하여 수조에 40ℓ의 물(호모겔 체적의 약 8배 수중에서 시험 실시)을 넣고 시험한 결과 5시간 이내에 모든 공시어가 치사되었다. 즉, 24시간의 LC50을 구할 수 없을 만큼 호모겔 고결체로부터 알칼리 용탈량이 많아서 어류가 도저히 생존할 수 없는 수질상태였다.

세 번째는 7cm×7cm×7cm cubic의 호모겔 고결체 5개를 제작하여 수조에 50ℓ의 물(호모겔 체적의 약 29배 수중에서 시험 실시)을 넣고 시험한 결과 24시간 후 공시어가 모두 치사되었다.

네 번째는 7cm×7cm×7cm cubic의 호모겔 고결체 4개를 제작하여 수조에 50ℓ의 물(호모겔 체적의 약 36배 수중에서 시험 실시)을 넣고 시험한 결과 24시간 후 공시어가 16마리 치사되어 적당한 시험조건으로 결정하였다.

### 2.3 시험방법

시험 전 적어도 1주일간 공시어를 순응수조에 두어 시험시에 수온 및 수질에 적응시킨다. 주입재로 만든 Homo-gel 또는 고결시험에서 고결된 시료를 채취한다(7cm×7cm×7cm cubic형 시편 4개). 시편을 골고루 배치하고 깨끗한 자갈 및 모래로 덮는다. 가능한한 빨리(30분 이내) 시험수조에 50ℓ의 물을 채우고 공시어를 방류한다. 수조내의 물은 순환되고 산소가 공급되도록 한다. 또한 온도 및 pH의 변화를 1분단위로 기록할 수 있도록 장치한다. 시험조작 후 일정 시간마다 공시어의 상태변화를 관찰 하면서 어독성 시험 일지에 기록한다. 공시어의 치사 유무를 수시로 관찰하고 치사한 공시어는 되도록 빨리 제거한다. 공시어가 모두 치사되지 않는다면 96시간까지 관찰한다.

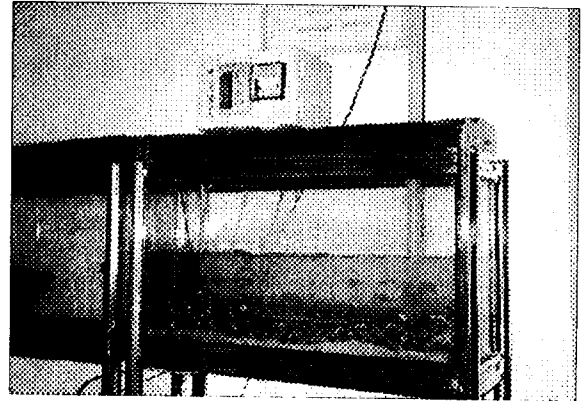


사진 1. 어독성 평가 시험(전경)

### 2.4 주입재 특성 및 조합별 배합

국내외에서 가장 많이 활용되고 있는 LW공법은 응결속도를 조절하는 A액과 경화재인 B액으로 구성되어 있다. A액은 규산소다 3호 또는 실리카졸과 일반 용수를 1:1 부피비로 혼합한 희석액이며, B액은 시멘트계 경화재와 물을 1:2 중량비로 혼합한 현탁액으로 A액에 사용되는 규산소다 3호는 국내 D화학에서 생산되는 제품이며, 실리카졸은 본 연구를 위한 시제품을 사용하였다.

실리카졸공법은 일본, 프랑스 등에서는 이미 실용화 되어 적용되고 있지만, 국내에서는 아직 현장에 적용된 사례가 보고된 바 없다. 그러나 본 연구자들은 실리카졸공법을 국내에 도입하기 위하여 이미 상당한 시험실적 연구성과를 올린 바 있으며 본 연구에서는 필자들이 시험실적으로 개발한 실리카졸 시제품을 사용하여 시험하였다. B액은 경화재로 국내 S사의 보통포틀랜드시멘트와 마이크로시멘트를 사용하였다.

주입재의 조합은 현장에서 실제로 적용되고 있는 배합을 중심으로 하였고 물유리계와 시멘트계 주입재에 의한 영향을 각각 검토하였다. 즉, 규산소다 3호+보통포틀랜드시멘트, 규산소다 3호+마이크로시멘트, 실리카졸+보통포틀랜드시멘트 실리카졸+마이크로시멘트의 조합이다.

본 시험에 적용된 주입재 조합별 배합비는 표 1과 같다.

표 1. 적용된 주입재 조합별 배합비

조합	주입재 종류				Gel-time(sec)
	A액 (1000ml)		B액 (1000ml)		
1	규산소다 3호(ml)	물(ml)	보통포틀랜드시멘트(g)	물(g)	약 60
	500	500	428	856	
2	규산소다 3호(ml)	물(ml)	마이크로시멘트(g)	물(g)	약 60
	500	500	428	856	
3	실리카졸(ml)	물(ml)	보통포틀랜드시멘트(g)	물(g)	약 5
	500	500	428	856	
4	실리카졸(ml)	물(ml)	마이크로시멘트(g)	물(g)	약 5
	500	500	428	856	

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1 어독성 실험 결과 및 분석

KS M 0111 규정의 경우, 회석폐수를 사용하여 시험하므로 폐수의 농도가 일반적으로 일정하게 유지되는 반면, 호모겔 고결체를 사용할 경우는 pH가 계속 변화하므로 시험방법이나 결과의 정리에서도 상당한 차이점이 발견된다.

후자의 경우인 호모겔 고결체를 사용한 본 연구에서는 각 시험으로 부터 24, 48 및 96시간의 pH와 치사율을 구하고 공시어가 50% 치사하는 pH를 결정하였다. 이 결과는 여러 주입약액의 알칼리 용탈로 인한 pH 변화를 확인하여 환경오염 정도를 확인할 수 있는 지표가 된다.

공시어는 다수 채집이 용이한 금방이를 사용하였으며, 평균 길이는 6cm~8cm 정도이고, 1회 에 20마리씩 시험을 실시하였다. 초기 pH는 공시어의 알칼리 용탈이 거의 없는 시점에서의 수조내의 물의 pH를 측정하며, pH는 7.4~7.8 정도였다.

표 1의 주입재 조합별로 시간에 따른 pH 변화 및 치사하는 공시어 수를 측정된 결과는 표 2와 같다.

표 2. 각 조합별 치사하는 공시어 수

조합	주입재 종류		Ph 및 죽은 공시어의 수	4시간	8시간	24시간	48시간	96시간
	A액	B액						
1	규산소다 3호	보통시멘트	Ph	10.3	10.6	10.8	10.8	10.8
			죽은 공시어수	0	0	17	20	20
2	규산소다 3호	마이크로시멘트	Ph	10.0	10.3	10.7	10.6	10.4
			죽은 공시어수	0	0	1	3	13
3	실리카졸	보통시멘트	Ph	8.6	8.6	8.4	8.4	8.4
			죽은 공시어수	0	0	0	0	0
4	실리카졸	마이크로시멘트	Ph	8.6	8.6	8.1	8.3	8.3
			죽은 공시어수	0	0	0	0	0

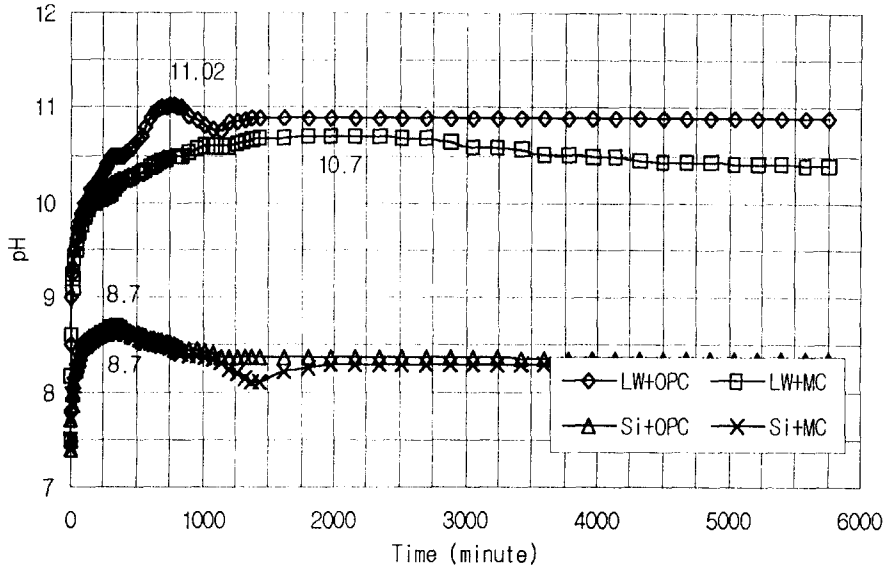
조합 1의 경우, 약 800분(13시간)경과 후 pH 11.1로 최대를 보였으며, 이후 약간 감소하여 pH 10.9로 수렴하였다. 약 900분(15시간; pH=11)경과 후 부터 공시어가 치사하기 시작하여 약 1700분(28시간; pH 10.9)경과후 공시어가 모두 치사하였다.

조합 2의 경우, 약 1300분(22시간)경과 후 pH 10.7로 최대를 보였으며, 이후 약간 감소하여 pH 10.4로 수렴하였다. 약 1400분(23시간; pH 10.7)경과 후 부터 공시어가 치사하기 시작하여 약 5760분(96시간; pH 10.4)경과 후 공시어가 13마리 치사하였다.

조합 3의 경우, 약 300분(5시간)경과 후 pH 8.7로 최대를 보였으며, 이후 약간 감소하여 pH 8.4로 수렴하였다. 시험대상기간(4일)동안 공시어는 한 마리도 치사하지 않았다.

조합 4의 경우, 약 300분(5시간)경과 후 pH 8.7로 최대를 나타내었으며, 이후 약간 감소하여 pH 8.3로

수렴하였다. 시험대상기간(4일)동안 공시어는 한 마리도 치사하지 않았다.



법례 Si : 실리카졸                      LW : 규산소다 3호  
 OPC : 보통포틀랜드시멘트      MC : 마이크로 시멘트

그림 2. 각 주입재의 조합별 pH 변화

한편 규산소다 3호를 적용한 주입재의 경우 13~22시간 경과 후에, 실리카졸을 사용한 주입재의 경우 5시간이내에 정점에 이르러 주로 주입초기에 용탈량이 많은 것으로 나타났다. 주입재의 알칼리 용탈량은 불유리계 주입재가 시멘트계 주입재보다 현저히 많고 보통포틀랜드시멘트가 마이크로시멘트보다 다소 많은 것으로 관찰되었다.

### 3.2 반수치사농도 LC50 검토 및 고찰

이독성 시험준비가 완료되고 시험이 시작되면 초기에는 pH가 급격히 증가하여 최대점에 다다른다. 이후 시간이 지남에 따라 pH는 약간 감소하여 일정하게 수렴하는 경향을 보여주고 있는데, 이와 같이 약간 pH가 감소하는 것은 이미 치사된 공시어 및 비어의 부패 등으로 발생된 유기산의 화학작용이 그 원인인 것으로 추정된다. 24시간, 48시간 및 96시간의 pH에 대한 치사율(%)의 관계는 LC50을 평가하기 위한 각 시험으로 부터 표 3과 같다.

표 3. 주입재 조합별 24, 48, 96 시간경과후의 pH 및 공시어 치사율

조합	주입재 종류		24시간		48시간		96시간	
	A액	B액	pH	치사율	pH	치사율	pH	치사율
표 1	규산소다 3호	보통시멘트	10.9	85%	10.9	100%	10.9	100%
표 2	규산소다 3호	마이크로시멘트	10.7	5%	10.6	15%	10.4	65%
표 3	실리카졸	보통시멘트	8.4	0	8.4	0	8.4	0
표 4	실리카졸	마이크로시멘트	8.4	0	8.3	0	8.3	0

표 3에서 실리카졸이 조합된 주입재의 경우 pH가 9이하이고 치사율이 0이기 때문에 LC50이 존재하지 않는다. 즉, 실리카졸을 사용하는 주입재는 약알칼리영역에서 pH가 형성되므로 지하수의 오염이 보다 적은 것으로 판단된다. 반면에 규산소다 3호+보통포틀랜드시멘트 조합의 경우 24시간 이내에 이미 LC50

이 존재한다. 즉, 규산소다 3호가 조합된 LW공법의 주입재의 경우 알칼리 용탈량이 매우 크기 때문에 지하수 흐름이 느리거나 정체된 곳에서는 주변 생태계에 나쁜 영향을 미칠 수도 있다고 판단된다.

#### 4. 결론

최근 약액주입공법의 활용이 점차 증가하고 있으며 이에 따른 환경오염 문제가 국내외적으로 대두되고 있는 바, 화학약액에 의한 환경오염이 생물에 미치는 영향을 검토코자 불유리계 약액(규산소다 3호, 실리카졸) 및 시멘트 그라우트재(보통포틀랜드시멘트, 마이크로시멘트)에 대하여 이독성 시험을 위주로 본 연구가 수행되었으며, 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 불유리계와 시멘트계를 병용하는 약액의 알칼리 용탈은 시멘트계 주입재보다 불유리계 주입재에 의해 크게 나타나며, 시멘트계에 있어서는 마이크로시멘트를 사용할 경우 알칼리 용탈이 다소 작은 것으로 관찰되었다.
- (2) 규산소다 3호+보통포틀랜드시멘트 조합의 경우 96시간 후의 최종 알칼리농도인 pH가 10.9로 어류가 생존할 수 없는 환경으로 오염되어 실험으로 방류된 공시어 20마리 모두 치사하였다.
- (3) 실리카졸+보통포틀랜드시멘트 조합의 경우 96시간 후 최종 알칼리농도인 pH가 8.4로 pH변화 없이 안정적으로 나타났으며, 실제로 방류된 공시어가 한 마리도 치사되지 않고 모두 살아남았다.
- (4) LW약액(규산소다 3호+보통포틀랜드시멘트의 조합)은 LC50이 24시간 이내에 존재하는 것으로 판정되었지만, 실리카졸의 경우는 96시간에서도 LC50에 이르지 않았다. 이와 같은 결과는 규산소다 3호를 응결조질재로 사용하는 LW약액이 실리카졸을 응결조질재로 사용하는 실리카졸공법에 비해서 주변의 지하수를 오염시킬 우려가 크다는 것을 시험적으로 평가할 수 있었다.
- (5) 본 연구를 통해서 향후 국내 현장에서도 약액주입공법에 의한 피해사례가 발생할 수 있다는 것을 확인할 수 있었는데 취수원과 같이 약액주입에 의한 피해가 예상되는 곳에서는 기존 공법에 대한 검토가 요망되며 약액주입공법을 사용할 때 실리카졸과 같은 무공해성 약액의 사용을 제안한다.

본 연구는 공장 폐수의 오염을 평가하는 화학산업규격에 의한 시험방법을 준용했기 때문에 상당한 개관성을 확보하고 있으며, 시험결과가 평소 예상할 수 있는 상황이 상당부분 재현되었다는데 문세의 삼각성이 있다. 따라서 약액주입공법의 공해성 주입재에 의한 지하수질 오염문제를 소홀히 할 수 없다고 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 건설교통부의 '95 연구개발사업인 "건설공사의 안전시공을 위한 지반보강 신기술 개발 및 실용화 연구(R&D/95-0084)"의 일환으로 수행된 것임을 밝히며, 건설교통부와 쌍용양회공업(주)의 연구비의 지원에 심심한 감사의 뜻을 표한다.

#### 참고문헌

- (1) 천병식(1995), "건설기술자를 위한 지반주입공법", 원기술, pp. 407~427
- (2) 한국표준협회(1993), "KS M 0111-1993 공장 폐수 시험방법", pp. 296~300
- (3) 건설교통부(1996), "건설공사의 안전시공을 위한 지반보강 신기술 개발 및 실용화 연구", (R&D/95-0084), pp. 83~89
- (4) 건설교통부(1997), "건설공사의 안전시공을 위한 지반보강 신기술 개발 및 실용화 연구", (R&D/95-0084), pp. 116~132
- (5) 野上明男(1977)外, "藥液注入工法の設計と施工", 山海堂, pp. 241~242.0