

## 공동부 충전재로써 페이스트형 유동화토의 환경 안정성 평가에 관한 실험적 연구 Experimental Study on Application of Paste-like Grouting Material to Void

김진춘<sup>1)</sup>, Kim, Jin-Chun, 강희진<sup>2)</sup>, Kang, Hee-Jin, 임유진<sup>3)</sup>, Lim, Yu-Jin

<sup>1)</sup>(주)한국지오테크 대표이사, President., Korea Institute of Geo Technology Inc.

<sup>2)</sup>(주)한국지오테크 과장, Manager., Korea Institute of Geo Technology Inc.

<sup>3)</sup>배재대학교 건설환경공학과, 부교수, Associate Prof., Dept. of Civil Eng., PaiChai Univ.

**SYNOPSIS** : When construction of high pressure jet-grouting is to be performed, it has been reported that applied cement slurry which hasn't got dried out can cause severe environmental pollution, and can flow into near streams and fish farms. Several laboratory tests were performed in this study in order to verify safety of paste-like grouting material that was developed newly to be applied to void in the ground. According to experimental test results, it is proved to be so safe that application of the newly developed flowable grouting material can prevent the materials from spilling into surrounding areas and is not harmful to fishes.

**Key words** : 유동화토, 유동성, 어독성, 페이스트

### 1. 서 론

지하 공동이나 연약지반으로 인한 지반침하 우려 지역의 보강방법은 보강 지역의 지반조사를 통해 경계성, 시공성, 공동의 상태 및 지반의 상태 등을 종합적으로 검토하여 보강을 실시한다.

지하 공동지역에서 일반적으로 적용되는 보강공법은 침하억제를 위한 충전공법과 국부보강공법으로 대별된다. 침하 억제를 위한 충전공법은 지하공동을 충전 또는 보강함으로써 구조물의 안정성을 확보하는 방법이며, 국부보강공법은 선택적 지보법으로서 지하공동의 거동에 의해 영향을 받는 구조물을 보강하는 방법이다. 이러한 공법들 중 현장에서 많이 적용되는 것으로는 충전공법의 고압분사주입공법과 콤팩션 그라우팅이 있으며, 국부보강공법에는 상부 그라우팅과 말뚝기초공법 등이 있다(박남서, 2001).

충전공법 및 국부보강공법에서 사용되고 있는 slurry형 주입재는 연속공극이 발달된 석회암 지역에서 기초를 보강하는 경우 주입된 시멘트 slurry가 경화되기 전 수 km 떨어진 주변의 샘물이나 양어장 등에 유입되어 심각한 환경오염을 유발시키는 경우가 발생하는 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 공동부 채움용으로 사용되고 있는 slurry형 주입재의 원거리 유출현상을 방지하기 위해서 페이스트형 유동화토를 개발하였으며, 유동성 및 환경안정성 등 공학적 특성을 평가하여 공동부 충전재로서의 적합성을 검증하고자 한다.

### 2. 시 험

#### 2.1 개 요

본 시험은 페이스트형 유동화토(이하 ASEM ; Aerated Soil Eco Mixture grouting)를 이용하여 석회암지역 공동부 보강 시 지중에 주입된 주입재가 계획된 범위를 벗어나지 않고 소정의 강도를 유지하며, 친환경재료로 주변지역에 서식하는 어류의 폐사 및 지하수오염에 대한 우려를 사전에 불식시키고 환경

안정성을 확보하는지를 검증하기 위해 실시하였다.

지하 공동부 보강공사로 초고압수를 이용하여 지중에 인위적으로 시멘트 slurry를 충전하는 치환공법은 충전재가 고결시까지 낮은 압축강도를 가지고 소성적으로 거동하여 불규칙하게 발달한 석회공동 또는 파쇄대를 따라 채워짐으로 보강범위 이외로 확산될 가능성이 있고, 주변 샘물이나 양식장등 지하수 오염 등 생태환경 훼손이 우려된다. 이에, 원거리 유출현상을 방지하고 구조물기초 지반의 지내력 확보 및 충전재의 강성이 우수하며, 무독성 및 pH(산성도)가 낮은 친환경 ASEM을 이용하여 실내시험을 통해 주입재에 대한 생태환경 및 물성을 평가하였다.

## 2.2 주입재 특성 및 배합조건

페이스트형 유동화 충전재인 ASEM 주입재는 소일크리트(CLSM : Controlled Low Strength Material : ASTM D 4832, 6023, 6024, 6103) 및 filler재(F/A, 광미, 흙 등)를 기본으로 사용하며, 필요 시 기포를 혼합하여 사용할 수 있다. 또한, 일반 시멘트에 비해 무독성 및 PH(산성도)가 낮은 주입재를 사용하며, 유동성이 상대적으로 시멘트 slurry보다 낮아(Low Slump) 계획범위 이외로 크게 주입재가 벗어나지 않는다. ASEM의 물리적 성능은 고유동성과 치수안정성을 기본적인 특성으로 하고 경량성, 압축강도 및 투수성은 공사 목적에 따라 조정 할 수 있다. ASEM의 물리적 성능을 요약하면 <표-1>과 같다.

표-1. ASEM의 물리적 성능

항 목	물리적 성능	시험규격
유동성(flow)	200mm 이상	JHS 313-1992
단위용적중량	0.5~1.8 kg/m <sup>3</sup>	KS F 2459
길이변화	1% 이하	KS F 2460
압축강도	5~100 kgf/cm <sup>2</sup>	KS F 2314
투수계수(K)	$\alpha \times 10^{-3} \sim 10^{-8}$ cm/sec	KS F 2322

ASEM주입재의 시험배합은 실제 현장에서 적용되고 있는 배합조건으로 선정하였으며 <표-2>와 같다.

표-2. ASEM공법 시험배합

W/C (%)	잔토량 (kg)	고화재 (kg)	투입물량 (kg)	flow
176.7	970	300	470	210~220

## 2.3 시험방법

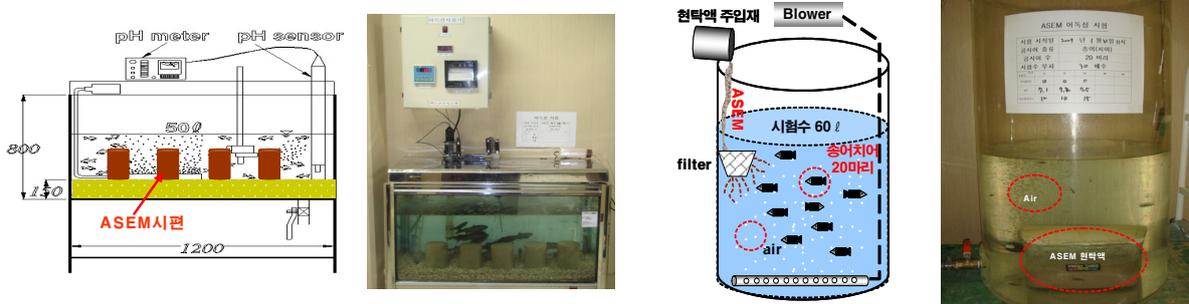
ASEM의 환경안정성 평가 시험은 「KS M 0111」에 규정된 「어류에 의한 급성 독성시험」(한국표준협회, 1993)법과 어류에 대한 주입재 영향 평가 시험방법(柴崎光弘, 1985) 등에 근거하여 시험 장치를 구성하였으며<그림-3, 4 참조>, ASEM 시료의 환경안정성 평가 시험계획은 <표-1>와 같은 방법으로 시험을 실시하였다(천병식, 김진춘, 1998a).

표-3. 환경안정성 평가 시험

구분	시험방법	평가항목
어독성 시험	고결된 공시체를 이용한 어독성 시험	치사율, pH 측정
	현탁액(슬러리)을 이용한 어독성 시험	
수질 시험	흐르는 물 상태에서 수질 분석(흙채움상태)	탁도, pH 측정
	흐르는 물 상태에서 수질 분석(수중상태)	수중불분리도, 탁도, pH

## 2.4 ASEM 주입재를 이용한 어독성 시험

어독성 시험은 <그림-3>와 같이 (a)고결된 공시체(1일 재령) 상태로 투입하는 것과 (b)현탁액(페이스트형) 상태로 투입하는 방법, 두 방법으로 시험을 실시하였으며 환경안정성 평가는 공시어 치사율, pH, 온도 등을 0, 12, 24, 48, 96 hrs로 시간별로 측정하여 기록하였다.



(a) 고결된 공시체 상태 투입

(b) 현탁액 상태 투입

그림-3. ASEM 주입재를 이용한 어독성 시험(천병식, 김진춘, 1998b).

ASEM 주입재를 이용한 어독성 시험조건 및 방법은 다음과 같다.

- ① 시험수조는 유리 및 스테인레스재로 용량이 약 150ℓ 이상 되도록 설계하고, 수온은 12~18℃의 지정온도를 유지하도록 한다.
- ② pH meter는 경과시간에 따라 pH를 측정하기 위해 sensor를 시험수조 내에 설치하고, 충분한 산소를 공급하기 위해 blower를 부착한다.
- ③ 공시어는 1급수에서만 서식하는 송어 치어를 구입하여 시험을 실시하였으며, 고결된 공시체 조건에서는 10cm이하 송어치어, 현탁액(페이스트형)상태에서는 5cm이하의 송어치어를 이용하여 본 시험을 실시하였다.
- ④ 1급수에서 생활하는 송어의 경우 일반 수돗물을 이용하여 시험하게 되면 수돗물에 함유되어 있는 염소물질에 의해 송어들이 생존할 수 없기 때문에 시중에서 판매하는 음용 생수를 이용하여 시험을 실시하였으며, 공시체 제작은  $\Phi=100\text{mm}$ ,  $h=120\text{mm}$ ,  $V\approx 1\text{ℓ}$ 의 원형공시체를 5개 제작하였다.
- ⑤ 고결된 공시체 조건에서는 시험수조에 100ℓ의 물을 채워 공시체 부피의 20배수 조건으로 시험을 실시하였으며, 현탁액(페이스트형)상태로 투입하는 조건에서는 공시어 상태가 고결된 조건에 비해 작은 공시어를 사용하기 때문에 시험수조에 60ℓ의 물을 채워 공시체 부피의 30배수 조건으로 시험을 실시하였다.
- ⑥ 고결된 공시체 조건에서 시편 1개의 부피는 약 1ℓ로, 5개의 공시체를 시험수조에 투입하였고, 시험수조에 시편의 20배수인 100ℓ의 생수를 투입하여 공시어의 활동공간을 충분히 확보함으로써 공시어가 스트레스를 받지 않고 생활할 수 있도록 배려했다.
- ⑦ 현탁액 상태의 조건에서는 시험수조 물량을 60ℓ로 채운 후 현탁액 상태의 ASEM 주입재를 시험수조 물량의 30배수인 2ℓ를 계량하고, 투과성이 있는 부직포계 filter를 이용하여 현탁액에서 불순물이 수조안으로 배출되지 않도록 packing하였다.
- ⑧ 준비 완료 후 측정 종료시점인 96시간 동안 용출된 알칼리 총량을 유지하기 위해서 처음 투입된 물을 시험 중 교체하거나 추가로 투입하지 않았다.

## 2.5 ASEM 주입재를 이용한 수질시험

ASEM 주입재가 수질(지하수)에 미치는 영향비교 분석 시험방법은 상부로부터 물을 흘려보내 주입재를 투과시킬 수 있는 시험 장치를 <그림-4>와 같이 구성하고 시간별(청정수, 투입즉시, 1, 3, 6, 12, 24, 48, 72hr)로 배출된 침출수를 용기에 담아 pH 및 탁도를 측정한다.

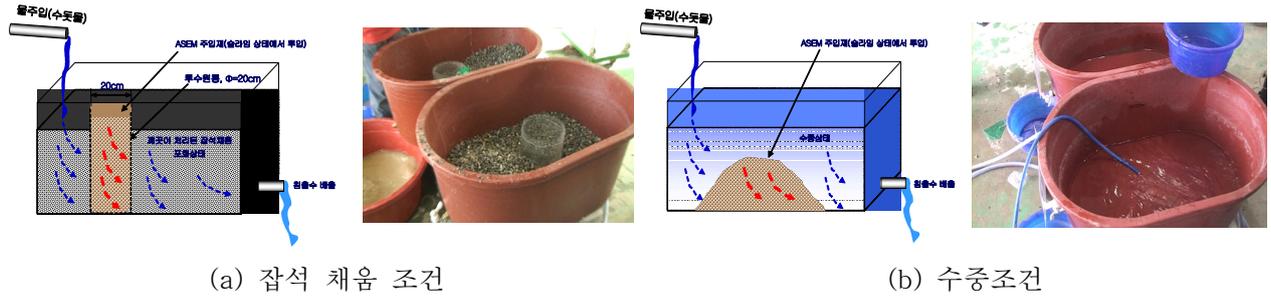


그림-4. 수질 및 탁도시험

ASEM 주입재를 이용한 수질시험 조건 및 방법은 다음과 같다.

- ① 시험수조 설치 후 상부에서 균일하게 물을 흘려보내 하부로 침출수를 받을 수 있는 장치로 구성한다(그림-4 참조).
- ② 잡석 채움 조건에서는 시험수조에 채움 잡석을 깨끗이 세척하여 불순물을 제거한 상태에서 잡석을 채우고, 상부로부터 물을 흘려보내 잡석으로 채운 시험수조를 일정 수위까지 포화시킨다. 수중상태의 조건에서는 일정 높이까지 물을 채운 후 시험을 실시한다.
- ④ 주입재가 투입되기 직전 흘러나오는 청정수를 채취하고, 주입재 투입 후 시간별(1, 3, 6, 12, 24, 48, 72hr)로 배출되는 침출수를 채취하여 pH를 측정한다.

### 3. 시험결과

#### 3.1 어독성 시험결과

공시어인 송어치어를 이용하여 고결된 공시체와 현탁액(페이스트형)상태 주입재를 투입한 환경에서 치사율과 pH농도를 측정한 결과 <표-4>, <그림-5, 6>와 같은 결과를 얻었다.

표-4 어독성 시험결과

항 목 \ 시간	구 분	0	12	24	48	96
치사율(%)	고결체	0	0	0	0	0
	현탁액	0	0	0	0	0
pH 농도	고결체	7.0	7.6	7.4	7.6	8.0
	현탁액	7.1	7.2	7.5	8.0	8.3
온도변화(°C)	고결체	13	14	14	14	15
	현탁액	12	14	15	16.7	16.5

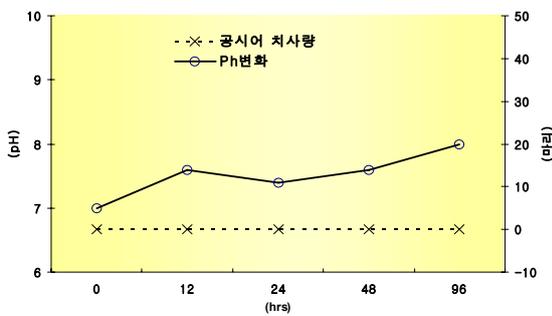


그림-5. pH변화와 공시어 치사량 경향(고결체)

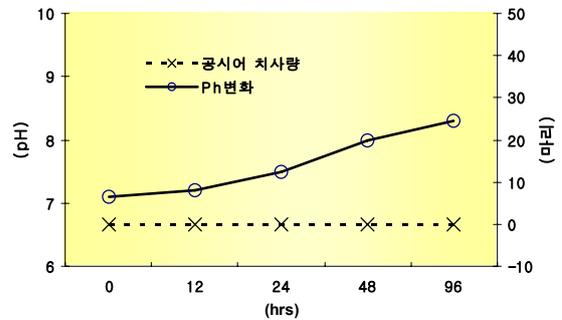


그림-6. pH변화와 공시어 치사량 경향(현탁액)

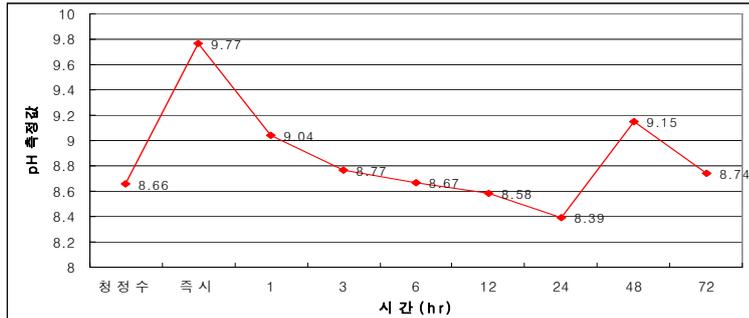
### 3.2 수질시험결과

1) 흐르는 물 상태에서의 수질분석(압석채움) 결과

압석을 채운상태에서 ASEM 주입재를 투입 후 배출된 침출수 채취하여 pH농도 및 탁도를 육안 관찰한 결과 다음 <표-5>와 같은 결과를 도출하였다.

표-5. 압석채운 상태에서 배출된 pH 및 탁도결과

구분 \ 시간	청정수	즉시	1hr	3hr	6hr	12hr	24hr	48hr	72hr
ASEM	8.66	9.77	9.04	8.77	8.67	8.58	8.39	9.15	8.74



시간별 pH측정 결과



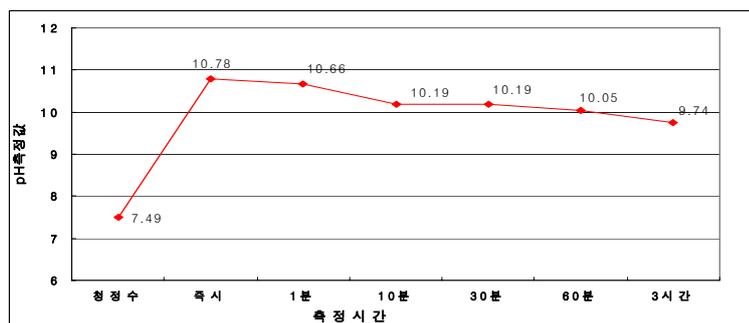
탁도확인(양호)

2) 흐르는 물 상태에서의 수질분석(수중) 결과

수중상태에서 ASEM 주입재를 투입 후 배출된 침출수 채취하여 pH농도 및 탁도를 육안 관찰한 결과 다음 <표-6>와 같은 결과를 도출하였다.

표-6. 수중상태에서 배출된 pH 및 탁도결과

구분 \ 시간	청정수	즉시	1분	10분	30분	1hr	3hr
ASEM	7.49	10.78	10.66	10.19	10.19	10.05	9.74



시간별 pH측정 결과



탁도확인 (약간혼탁)

### 4. 결론

페이스트형 혼합토인 ASEM 주입재를 이용하여 어독성 시험 및 수질시험을 실시한 결과 다음과 같은

결론을 도출하였다.

- 1) 어독성 시험 결과 시료 부피의 20배수인 엄격한 수조에서 ASEM 혼합물에 의한 pH 상승은 종료 시점까지 8.5이하를 유지하여 송어의 생존환경에 적합한 1급수 상태를 유지하였다.
- 2) 시험 종료 96시간 후 치사된 공시어가 없었으며, ASEM 혼합물에 의한 송어의 생존환경에 큰 영향이 없음을 확인할 수 있었다.
- 3) ASEM 혼합물이 굳지 않은 상태로 수조에 투입되더라도 약 1일 후에는 경화된 고결체로 변하였으며, 송어치어의 생존환경에 미치는 영향은 경화된 공시체를 투입한 경우와 유의차가 없음을 확인하였다.
- 4) 수질시험 결과 침출수를 시간별로 채취 후 pH 및 탁도를 측정된 결과 pH는 점점 감소하는 추세를 보였으며, 탁도 역시 미약한 것으로 측정됐다.

상기 결론에 의해서 페이스트형 혼합토를 공동부에 사용하였을 경우, 혼합물이 주변 지하수 및 양식장에 유입된다 하더라도 이동과정에서 단기간에 수화가 진행되고 흐름이 지속되는 상황에서는 pH상승과 현탁물의 탁도 상승이 미약하기 때문에 환경오염을 최소화 시킬 수 있을 것으로 판단된다. 본 실험적 평가를 통해 페이스트형 혼합토(ASEM)의 우수성을 확인할 수 있었으며, 향후 페이스트형 혼합토의 내구성 및 경화특성, 시공방법 등 추가연구가 계속될 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 2008년 '스마트하이웨이 사업단 핵심 1연구 분야 3세부과제(스마트 pavement 설계기술개발)'에 의해서 연구가 수행된 것으로 본 연구를 가능케 한 해당 기관에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 천병식(2005), “최신 지반주입-이론과 실제-”, 원기술.
2. 박남서 외 1인(2001), “석회 공동 및 석탄 채굴적의 복합적 용인에 의한 지반침하와 대책사례”. 지질재해 관측 및 방지기술 심포지엄, pp59~78.
3. 한국표준협회(1996), “KS M 0111-1993”, 어류에 의한 급성 독성시험, pp. 296~300.
4. 천병식, 김진춘(1998a), “어독성 시험에 의한 지반주입재의 공해성 평가“, 대한토목학회 논문집, 제 18권, 제 III-4호, pp. 531~538.
5. 천병식, 김진춘(1998b), “지반주입재의 공해성 평가에 관한 연구“, 1998년 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp. 321~326.
6. Rens B.M(2001), "Use of paste technology for tailings disposal", Golder Associates.
7. James F(2007), "Beneficial Impacts of Paste Tailings on Environmental Hazard Mitigation and Engineering Performance Improvement", Queen's University at Kingston.