

## 무기계 가소성 그라우트의 개발 및 공학적 특성

### Development of Thixotropic Inorganic-Type Grout and Its Engineering Characteristics

정경환<sup>1)</sup>, Gyeong-Hwan Jeong, 신민식<sup>2)</sup>, Min-Sik Shin, 김동해<sup>3)</sup>, Dong-Hae Kim  
노진택<sup>4)</sup>, Jin-Teck Noh, 정두희<sup>5)</sup>, Duhwoe Jung

<sup>1)</sup>(주)동아지질 대표이사, CEO/Ph.D., Dong-A Geological Engineering Co.,LTD.

<sup>2)</sup>(주)동아지질 설계부 부장, Director, Dong-A Geological Eng. Co.,LTD.

<sup>3)</sup>(주)동아지질 설계부 차장, Assistant Director, Dong-A Geological Eng. Co.,LTD.

<sup>4)</sup>(주)동아지질 설계부 대리, Assistant Manager, Dong-A Geological Eng. Co., LTD.

<sup>5)</sup>부경대학교 부교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Pukyong National University

**SYNOPSIS** : A thixotropic grout has been developed for the use of filling a tail void in the shield TBM and as well as various ground voids. The grout developed in this study is a mixture of inorganic substance, cement and some functional additives. Its engineering characteristics was investigated by measuring a viscosity and unconfined compressive strengths. The optimum mix proportion for an effective thixotropic grout was proposed through several repeated laboratory tests. The various physical properties such as thixotropy, unconfined compressive strengths, and durability of the thixotropic grout and the gels produced from the grout were compared with those of the well-known waterglass-type grout such as L.W.. The thixotropic grout developed in the study exhibited an excellent performance for back-filling of tail voids in the shield TBM based on experimental results compared to the existing waterglass grout.

**Key words** : Inorganic Grout, Thixotropic, Durability, Shield TBM, Filling

## 1. 서 론

셸드 TBM공법은 비교적 연약한 지반에 터널굴착을 할 때, 터널의 외경보다 조금 큰 단면의 셸드 TBM을 지중에 추진시켜 내부에 있는 토사의 붕괴나 유동을 방지하면서, 굴착 및 세그먼트라이닝의 조립작업을 통하여 터널을 시공하는 공법이다.

셸드 터널 굴진시 필연적으로 발생하는 세그먼트와 배면지반 사이의 공극(tail void)을 충전시킬 필요가 있으며, 공극을 최소화시키기 위해서는 동시주입방식이 바람직하고 이를 위해서는 기존의 규산계 그라우트재의 문제점을 보완할 수 있는 가소성 형태의 재료개발이 필수적이다. 또한 지반 내에서 자연적으로 생기거나 굴착 등으로 인한 공동은 상부지반의 침하원인이 될 수 있으므로 공동을 충전시킬 필요가 있다. 과거에는 이러한 공동 또는 배면 충전의 목적으로 주입되는 주입재로 시멘트 밀크나 규산계의 그라우트를 주입하는 것이 대부분이었으나, 근래에 들어서는 주입효과 및 품질을 향상시키기 위하여 가소성 그라우트재를 주입하는 추세이다.

## 2. 가소성 그라우트

### 2.1 가소성 그라우트의 종류 및 특성

가소성(혹은 요변성, Thixotropy) 그라우트란 지반주입제의 한 종류로서 종래의 단순한 1액성 시멘트 밀크 지반 주입제와는 달리 주입시 완전히 경화하기 전에 일정시간 동안 일정수준의 점도와 강도를 유지함으로써 지하수에 의해 쉽게 희석, 유실이 되지 않음과 동시에 일정시간 동안 가소성(요변특성)을 가져 일정수준의 가압에 의해 미세한 공간까지도 밀실하게 충전시킬 수 있고 그 이후에는 경화되기 시작하여 일정 수준이상의 강도를 발현하는 주입제를 말한다.

기존에 사용되어 온 가소성 그라우트 재료는 표 1과 같이 분류할 수 있다.

표 1. 기존 가소성 그라우트

구 분	규산계	알루미늄계	점토광물계	고분자계
가소제	규산소다	알루미늄 염	몰로릴로나이트	흡수성주지벤토나이트
자유수 고정물질	함수 규산겔	수산화 알루미늄겔	함수 점토겔	폴리머 흡수겔
주입방식	2액성	2액성	2액성	1액성
적용범위	샐드주입	기존 구조물 배면의 뒷채움 주입		

가소제로 규산소다를 사용한 그라우트의 경우 알칼리 용탈에 의해 시간경과에 따라 내구성이 저하되는 문제점이 발생할 우려가 있으며, 염기성 황산알루미늄 용액을 사용할 경우 소성 유지시간의 조절이 비교적 까다롭고 기타 특성에 있어서 전체적으로 원하는 수준에 이르지 못한다. 이러한 문제점들을 보완하기 위하여 실리카 콜로이드와 시멘트를 주재료로 하는 가소성 그라우트를 개발한 바 있으며, 본 연구는 무기계 재료를 이용한 가소성 그라우트 개발에 관한 것이다.

### 2.2 무기계 가소성 그라우트

가소제로 무기계6호를 사용하는 무기계 가소성 그라우트는 기존 규산계 그라우트와 달리 용탈현상이 없어 내구성이 우수할 뿐만 아니라 초기 겔 파괴 후에도 재형성에 의한 가소성 및 강도특성에 이상이 없는 것으로 나타났다. 무기계 그라우트의 재료 특성 및 표준 배합비는 표 2와 같다.

표 2. 무기계 가소성 그라우트의 재료특성 및 표준배합비

구 분	A 액		B 액	
	무기계(6호)	물	시멘트	물
역 할	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 그라우트 겔의 모체</li> <li>▪ 조기강도 및 장기 내구성 발현</li> <li>▪ 가소성 유지시간 조정</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 그라우트 겔의 모체</li> </ul>	
표준 배합비	50 g	50 g	50 g	50 g
배합비 (1m <sup>3</sup> )	386 kg	386 kg	386 kg	386 kg

무기계6호의 주재료인 스칼렛은 외국산 보크사이트에서 수산화알루미늄을 추출한 산업폐기물의 일종이며 여기에 초기 겔형성재와 강도 발현재를 함께 사용한다.

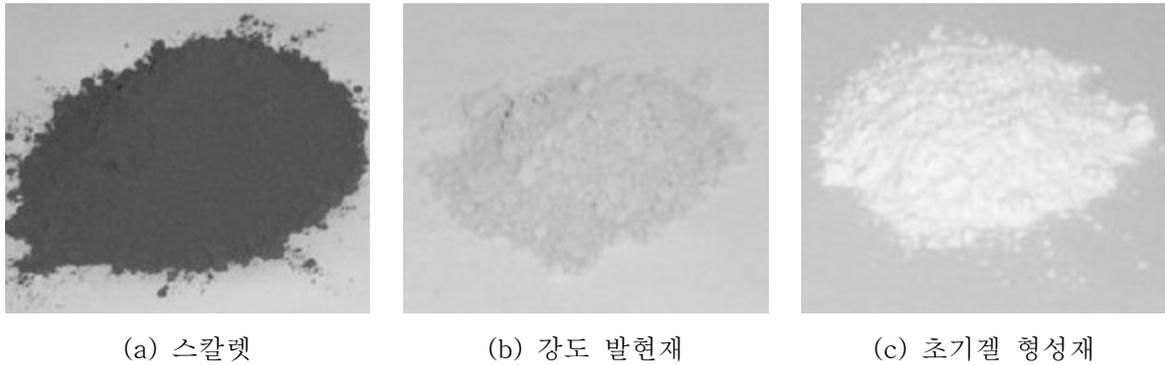


그림 1. 무기계(6호)의 혼합재료

### 3. 무기계 가소성 그라우트의 특성

#### 3.1 강도 특성

국내 및 국외(일본)의 쉘드TBM 터널 배면 충전용 그라우트의 강도기준은 표 3에서 나타나는 바와 같이 평균 초기(1시간)강도 1.0kgf/cm<sup>2</sup>, 장기(28일)강도 30.0kgf/cm<sup>2</sup>의 범위에 있다.

무기계 가소성 그라우트의 강도 특성을 평가하기 위하여 일축압축시험을 진행하였으며, 강도 시험을 위한 시험편 제작은 정량배합에 의한 제작방법과 모형 주입시스템을 통한 제작으로 나누었다. 모형 주입시스템을 통한 시험편 제작의 경우 현장의 강도 손실을 감안하였다고 볼 수 있다.

표 3과 그림 2에 나타난 바와 같이 정량배합 및 모형 주입시스템을 통한 실험결과, 모두 기존 국내·외 강도기준을 상회하는 것으로 나타났다.

기존 국내 쉘드TBM 터널에서 사용되고 있는 규산계 그라우트 뒷채움재의 강도 확인을 위하여 현재 시공 중인 A, B, C 3개 현장의 배합비(표 4)에 따른 시험편 제작 및 강도시험을 진행하였다. 시험 결과 그림 3에서 나타나는 바와 같이 C 현장을 제외한 타 현장의 경우 28일 강도 기준인 30.0kgf/cm<sup>2</sup>을 만족하지 못하는 것을 나타났다.

표 3. 국내·외 강도기준 및 무기계 가소성 그라우트 강도

구 분		일축압축 강도(kgf/cm <sup>2</sup> )		
		1시간	1일	28일
서울지하철 (00공구)		1.0~1.5	5.0	30.0
TAC (일본)		1.0~1.5	-	25.0
무기계 가소성 그라우트	정량 배합	2.96	15.04	51.58
	모형 주입	1.25	11.21	40.4

표 4. 국내(규산계 그라우트) 뒷채움재 배합비(1.0m<sup>3</sup>)

구 분		A 현장	B 현장	C 현장
A액	시멘트 (kg)	250	350	350
	벤토나이트 (kg)	50	52.5	52.5
	안정액 (kg)	2	3.5	3.5
	물 (kg)	818	859	750
B액	규산 (ℓ)	80	80	100



그림 2. 무기계 가소성 그라우트 강도시험 결과

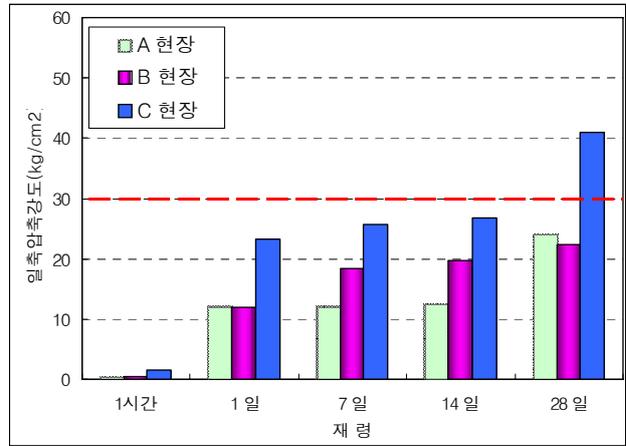


그림 3. 국내(규산계 그라우트) 뒷채움재 강도시험 결과

### 3.2 내구성 및 압축특성

지하공동 또는 쉘드TBM 터널 배면 충전에 사용되는 그라우트의 체적 감소는 지반침하를 유발하고 1차 차수기능 상실에 의한 터널의 누수를 증가시킬 가능성이 크다.

국내의 3개 현장에서 사용되고 있는 규산계 그라우트와 가소성 그라우트의 압축성 및 내구성 확인을 위해 표준압밀시험과 기중양생 및 노건조를 통한 체적 변형량을 측정하였다.

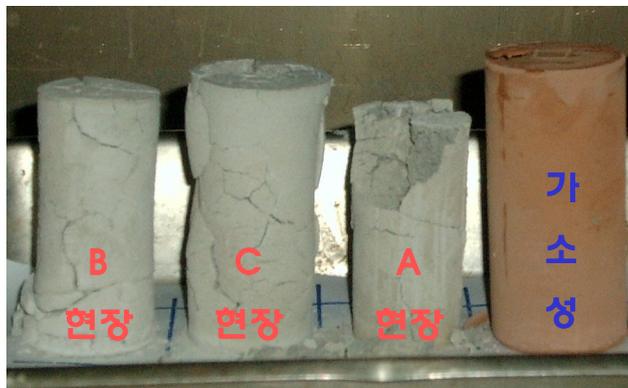
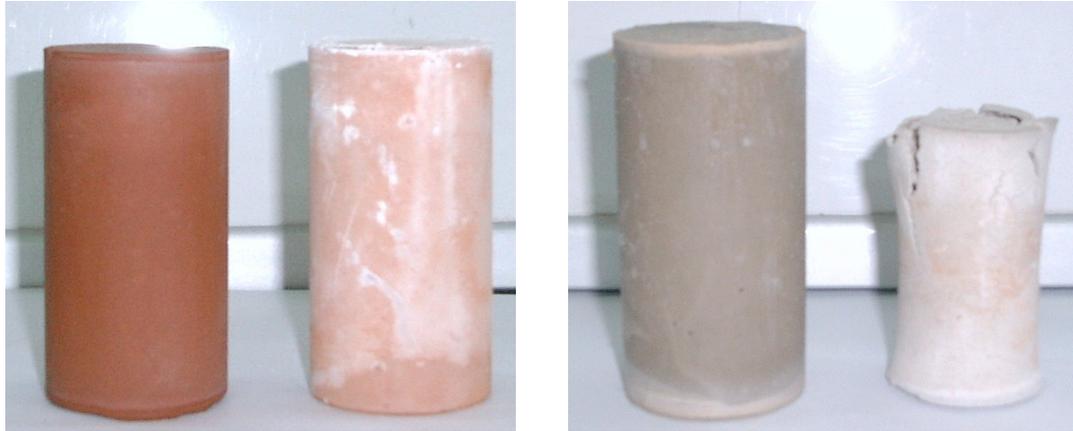


그림 4. 24시간 경과 후 체적 변화 (노건조)

내구성 확인 실험의 경우 가소성 그라우트와 3개 현장의 현장 배합비에 따른 시험편을 제작하였으며, 14일 동안의 노건조와 기중양생에 따른 체적 변형 측정 결과는 그림 6과 같다.

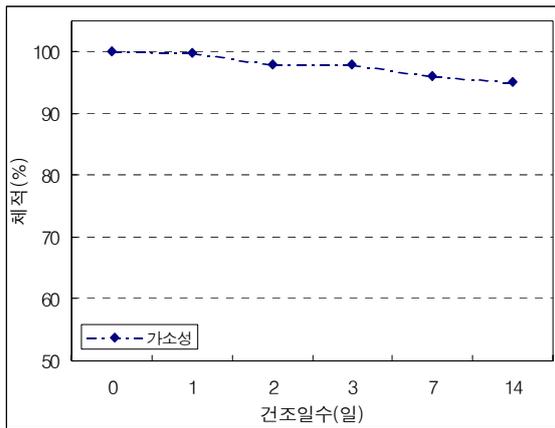
노건조에 의한 체적변화 측정의 경우 24시간 경과 후 가소성 그라우트를 제외한 기존 규산계 그라우트의 경우 파손이 심해 측정이 불가능한 상태가 되었으며(그림 4), 기중양생의 경우 7일 경과 후 규산계 그라우트의 측정이 불가능 하였다.(그림 5)



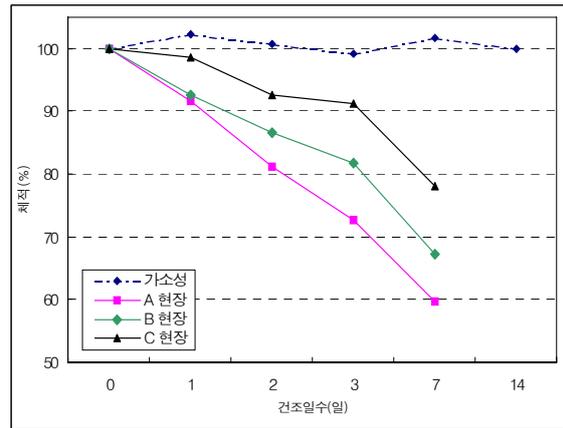
(a) 가소성 그라우트

(b) 규산계 그라우트

그림 5. 7일 경과 후 체적 변화 (기중)



(a) 노건조(무기계 가소성)



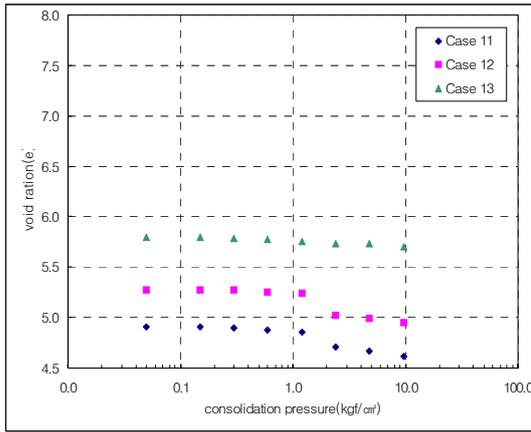
(b) 기중양생

그림 6. 체적변화

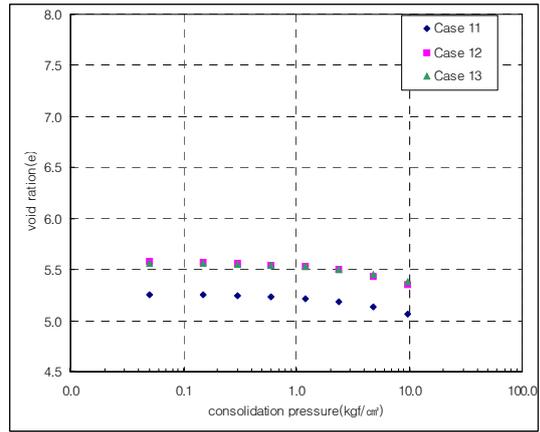
기중 건조한 가소성 그라우트의 경우 체적이 증가하였다가 감소하는 형상을 보이는데, 이는 측정오차에 의한 것으로 보여진다.

기중양생과 노건조를 통한 체적 변형량 측정결과, 가소성 그라우트는 기존 상용화되어 있는 규산계 그라우트와 비교할 때 아주 적은 체적 감소율을 나타내었다.

무기계 가소성 그라우트의 압축성 확인을 위하여 표준압밀시험을 수행하였다. 무기계 가소성 그라우트의 경우 표준배합비(표 2)에 의한 배합의 경우 강도는 국내의 기준을 상회하지만 경제성에서 다소 떨어진다. 강도기준과 경제성을 함께 확보하기 위한 최적 배합비 산정을 위해 여러 Case에 대해 배합 시험을 진행 중에 있으며, 압축성 확인을 위한 표준압밀시험은 이들 Case 중 가장 적합하다고 판단되는 Case11~13에 대하여 시험편을 제작하여 실험하였다.



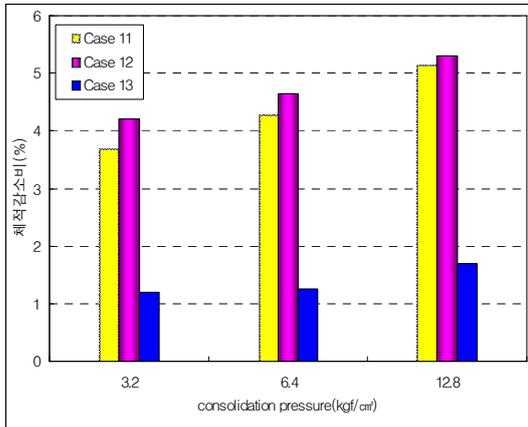
(a) 1시간 경과 후 실험



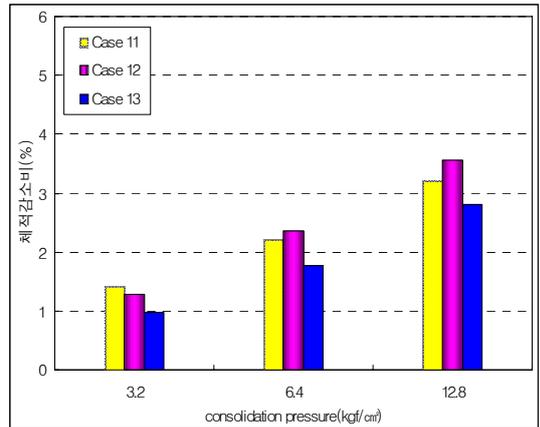
(b) 24시간 경과 후 실험

그림 7. 간극비의 변화(무기계 가소성)

Case 11~13의 경우 압밀링에서 겔을 형성하여 1시간 후 실험을 진행하는 방식과, 겔화된 시험편을 압밀링으로 성형하여 24시간의 포화를 거친 후 실험하는 방식으로 분류하여 진행하였다. 실험결과는 그림 8과 같으며 체적 감소비는 5% 내외로 나타났다.

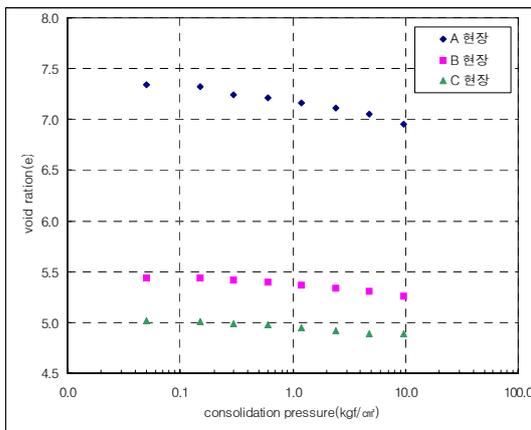


(a) 1시간 경과 후 실험

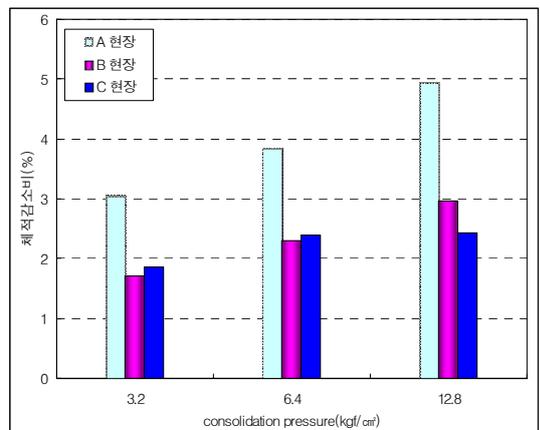


(b) 24시간 경과 후 실험

그림 8. 체적 감소비(무기계 가소성)



(a) 간극비의 변화



(b) 체적 감소비

그림 9. 압축시험 결과(A, B, C 현장)

기존그라우트의 경우 내구성 확인을 위한 시험과 동일한 배합비로 표준압밀시험용 시험편을 제작·성형하여 24시간 포화 후 실험하였다. 그림 9에서 나타나는 바와 같이 압축성의 경우 가소성 그라우트와 같이 5% 내외로 나타났지만, 내구성 확인 결과에서 나타난 바와 같이 기중 양생시 장기용탈에 의한 체적 변형의 우려가 높은 것으로 평가된다.

## 4. 모형 충전 시험

### 4.1 뒷채움 주입방법

셴드TBM 터널은 굴진 기계의 메카니즘 특성상 공극이 발생하며, 특히 사행 또는 곡선구간에서 공극의 발생은 더욱 크다. 이렇게 발생한 세그먼트와 배면지반 사이의 공극은 충전이 필요하며, 주입시기에 따라 다음과 같은 방식이 있다. 주입방식에는 동시주입방식(셴드TBM 후통의 철판에 관을 매립하여 굴착과 동시에 빈 공간에 주입하는 방식), 즉시주입방식(세그먼트에 미리 만들어 놓은 뒷채움 주입구로 세그먼트가 후통부에서 지반으로 나오는 즉시 주입하는 방식), 후방주입방식(즉시주입보다 후방에서 세그먼트의 주입구로 주입하는 방식)이 있으며, 공극을 최소화시키기 위해서는 동시주입이 바람직하다.

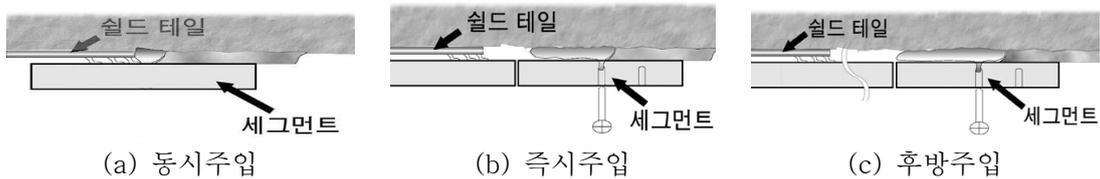


그림 10. 뒷채움 주입방법

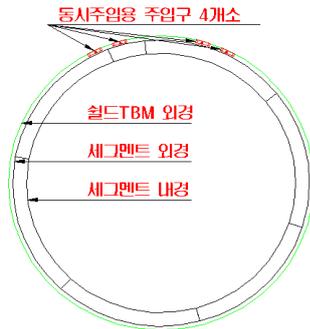


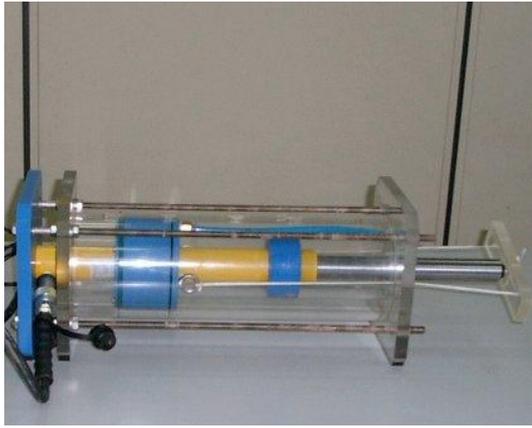
그림 11. 동시주입용 주입구 위치(909공구 적용 예)

최근에는 대형단면의 셴드TBM 터널에서는 공극에 의한 침하 등의 문제점을 최소화하기 위하여 가능한 동시주입을 권장하고 있으며, 국내도 적용사례가 있다.

### 4.2 뒷채움 모형 충전 실험

그림 12는 실제 셴드TBM 터널 굴진시의 충전성 확인을 위한 모형충전 시험체와 모형 믹서로서 2중 관 아크릴 사이에 있는 모형 셴드를 실제 셴드 이동과 동일한 유압피스톤으로 이동할 수 있도록 제작하였다. 유압피스톤에 의해 모형 셴드가 이동하고, 이동에 의해 발생된 공극을 모형믹서의 호스펌프에 의해 1.5 shot방식으로 충전 하였다.

모형 믹서는 2방향 밸브를 적용하여 충전이 완료된 후 주입관에 남아있는 그라우트를 물로 세척이 가능하게 제작되었다. 모형 시험체와 모형 믹서를 사용한 뒷채움 충전시험 단계는 그림 13과 같다.



(a) 모형 충전 시험체



(b) 모형 믹서

그림 12. 모형충전 시험체 및 모형 믹서



(a) 모형 충전 시험 준비



(b) 주입재 충전 및 주입관 세정



(c) 모형샐드 전진



(d) 전 구간 충전

그림 13. 모형충전 시험

모형충전 시험결과 정량적으로 충전성을 평가할 수는 없으나 육안관찰시 가소성 그라우트의 충전성은 확보되는 것으로 보여지며, 시험에 사용되어진 모형충전 시험체 및 모형 믹서를 「샐드공법의 뒷채움재 시험장치」로 특허출원 중에 있다.



그림 14. 충전성 확인

## 5. 결 론

본 연구에서는 쉘드TBM 터널 굴진시 발생하는 세그먼트와 배면지반 사이의 공극(tail void) 충전에 사용되고 있는 기존의 규산계 가소성 그라우트의 문제점을 보완할 수 있는 무기계 가소성 그라우트를 개발하였으며 공학적 특성을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 국내 및 국외(일본)의 쉘드터널 배면 충전용 그라우트의 강도기준은 평균 초기강도  $1.0\text{kgf/cm}^2$ , 장기강도  $30.0\text{kgf/cm}^2$ 의 범위에 있다. 그러나 현재 국내에서 시공되고 있는 규산계 가소성 그라우트의 경우 대체적으로 강도기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났으며, 무기계 가소성 그라우트의 경우 현장요건을 고려한 강도 시험에서도 강도기준을 상회하는 결과를 나타내었다.
- (2) 내구성 확인을 위한 실험 결과 규산계 가소성 그라우트의 경우 체적변화가 크게는 40%까지 감소하는 경향을 나타내는 반면, 무기계 가소성 그라우트의 경우 5% 내외로 내구성 및 장기안정성이 유리함을 확인할 수 있었다.
- (3) 상기의 결과 등을 통해 본 연구에 의해 개발된 무기계 가소성 그라우트제는 강도 및 내구성 등의 품질이 우수한 것으로 나타났다. 계속적인 배합시험을 통해 최적 배합비를 산정하여 경제성을 확보한다면 쉘드TBM 터널 공극의 동시주입용 충전재와, 지반의 공동충전재 등으로 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (과제명 : 시공장비(기계화시공) 국산화를 위한 핵심요소 기술개발. 과제번호 : C 014A10100 01-04A0201-00150)에 의한 것임을 밝히며 지면을 통해 감사의 말씀을 드립니다.

## 참고문헌

1. 米倉亮三, 島田俊介, 木下吉友(2000), “항구그라우트 주입공법”, 山海堂, pp. 103~114.
2. 류동성, 정경환, 이성국, 이준석(2004), “실리카 콜로이드를 기재(基材)로 한 항구 그라우트(PSG)의 개발과 공학적 특성”, 2004 한국지반공학회 학술발표회 논문집
3. 류동성, 정경환, 신민식, 김동해, 이준석 정두희(2005), “실리카 콜로이드를 이용한 가소성 그라우트의 개발 및 공학적 특성”, 2005 한국지반공학회 학술발표회 논문집