

쉴드 TBM 뒤채움용 무기계 가소성 그라우트의 공학적 특성 및 현장적용성 평가

김대현¹, 정두희^{2*}, 정경환³

Evaluation of engineering characteristics and field applicability of inorganic thixotropic-grout for backfilling of shield TBM tail voids

Dae-Hyeon Kim, Du-Hwoe Jung, Gyeong-Hwan Jeong

Abstract The focus of this study is to evaluate the field applicability of the newly developed inorganic thixotropic-grout in various ways. In order to do this, the volume stability and the permeability of the inorganic thixotropic-grout have been measured and compared to the existing silica type grouts. In addition, the filling capability of the grout into the tail void has been evaluated through both an experiment with a miniature tail-void filling equipment and a test filling at the shield TBM construction site. The volume loss of the inorganic thixotropic-grout after a 14 day-curing under the atmosphere condition was appeared to be minimal. The excellent waterproofing ability of the inorganic thixotropic-grout was confirmed through a permeability test. The toxicity of the inorganic thixotropic-grout has been evaluated through a toxicity test of aquatic fishes (KS M 0111) and the pH value of the liquid elutriated from inorganic thixotropic-grout was measured as an average of 8.0 and a fatality rate of goldfish after 96 hours was 10% or so. The existence of harmful heavy metals in the liquid elutriated from the inorganic thixotropic-grout has been also examined through an atomic absorption spectroscopy (AAS) test. Any of harmful heavy metals were not detected and the detected level of Cr⁶⁺ and Cd was far below the standard. Based on both an experiment with a miniature tail-void filling equipment and a test filling at the shield TBM construction site, the filling ability of inorganic thixotropic-grout into the tail void was proved to be excellent.

Keywords: Inorganic thixotropic-grout, volume stability, permeability, toxicity, filling ability

요지 본 연구는 새로 개발된 쉴드 TBM 테일 보이드 동시주입용 무기계 가소성 그라우트의 현장적용 가능성을 평가하기 위하여 체적변화성 및 투수계수를 측정하였으며, 환경영향성 평가를 실시하였다. 또한, 무기계 가소성 그라우트의 현장 시험 시공에 앞서, 쉴드 TBM 모형주입장치 및 후방주입 공동충전 시험체를 이용하여 실내실험을 실시하였으며, 실제 서울 전력구 쉴드 TBM 시공현장에 시험시공을 수행하였다. 기중에서 14일 양생시킨 공시체를 이용해서 무기계 가소성 그라우트의 체적변화성을 평가한 결과, 무기계 가소성 그라우트의 체적변화는 거의 발생하지 않았다. 그리고 투수계수를 측정하여 비교한 결과 무기계 가소성 그라우트의 우수한 차수효과를 확인 할 수 있었다. 어독성 시험과 용탈시험을 통한 환경영향성 평가를 수행한 결과, 무기계 가소성 그라우트의 경우 평균 pH가 8.0으로 측정되었으며, 96시간 경과 후 10%의 폐사율을 보였다. 용탈액에 대한 원자흡광분광 시험 결과 용탈에 의한 유해 중금속 성분은 수질관리 기준치 이하로 검출되었다. 가소성 그라우트의 현장 적용성 실험을 위하여 실내 모형실험을 수행한 결과 충전성은 확보되었으며, 실제 시공현장에 적용한 결과 우수한 주입성을 보였다.

주요어: 무기계 가소성 그라우트, 체적변화성, 투수계수, 어독성, 충전성

1. 서 론

쉴드터널 공사현장에서는 쉴드 TBM 굴진시 필연적으로 세그먼트와 배면지반 사이의 공극(tail void)이 발생하게 된다. 이런 경우 토사와 지하수의 유실 및 이에

따른 지반침하를 방지하기 위하여 공극을 충전해야 한다.

현재 쉴드 TBM 굴진시 발생하는 테일보이드의 충전을 위하여 사용하는 그라우트는 대부분 시멘트 밀크에 벤토나이트, 규산소다를 조합한 규산계 그라우트를 사용하고 있다. 그러나 규산계 그라우트의 경우 규산소다의 사용에서 비롯되는 일칼리 용탈로 인하여 시간이 경과함에 따라 체적변화성이 저하되는 문제점이 있는 것으로 알려져 있다(류동성 등, 2005). 이러한 문제점을

¹정회원, 부산교통공사, 부경대학교 토목공학과 박사수료

²정회원, 부경대학교 건설공학부 교수

³정회원, (주)동아지질 대표이사

*교신저자: 정두희 (E-mail: dhjung@pknu.ac.kr)

해결하기 위하여 무기계 가소성 그라우트를 개발하였다(김대현 등, 2009). 새로 개발된 무기계 가소성 그라우트의 적합성을 평가하기 위하여 일축압축강도실험을 통한 초기 및 장기강도를 측정하였으며, 지하수가 존재하는 지반에서 적용가능성을 평가하기 위하여 수중에서 공시체를 제작하여 초기 및 장기강도를 평가하였다. 또한, 수중제작에 따른 재료분리 현상을 관찰하여 지하수가 존재하는 지반의 적합성을 평가하였다. 그리고 A액과 B액의 점도를 120분 동안 측정한 결과 이송가능한 점도 기준인 2,000 cp이하로 측정되었다.

본 연구에서는 새로 개발된 무기계 가소성 그라우트의 체적변화성 및 투수계수를 기준 규산계 그라우트와 비교·평가하였으며, 어독성 시험을 통한 환경영향성 평가를 수행하였다. 그리고 쉴드 TBM 모형주입시험장치 및 주입성 실험을 통하여 현장적용 가능성을 검토하였으며, 실제 서울에 위치한 전력구 공사현장인 ○○현장에서 시험시공을 통하여 현장 적용성을 검증하였다.

2. 무기계 가소성 그라우트의 특성

새로 개발된 무기계 가소성 그라우트의 재료특성, 강도 및 점도특성은 김대현(2009)의 연구를 통하여 검증하였으며, 간략하게 요약하면 다음과 같다.

2.1 재료특성

무기계 그라우트는 2액성 주입방식이며, A액과 B액으로 구성되어 있다. A액은 경화보조제, 시멘트, 물로 구성되어 있으며, B액은 경화촉진제, 초기강도 발현제 및 물로 구성되어 있다.

A액에 첨가된 경화보조제(MG-A)는 무수석고(CaSO_4)와 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$), C-S-H(Calcium Silicate Hydrate)계 칼슘복합화합물로서, 초기의 초속경성은 수화반응물 중 칼슘 알루미네이트 황산염계 수산화물과 수산화칼슘이 생성되어 나타나는 현상이며, 이 수화물들은 원래의 미수화 광물보다 부피가 크기 때문에 경화체가 물과 반응하여 굳고 난 후에도 수축하지 않는 효과를 나타내게 한다.

B액에 첨가된 경화촉진제(MG-B)는 알루미늄 규소화합물로(Aluminium Silicate)로써 $\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{SiO}_2\text{XH}_2\text{O}$ 를 주성분으로 하고 강도촉진제인 탄산칼륨(K_2CO_3)과

황산소다(Na_2SO_4)로 구성되어있다. 그리고 초기강도 발현제인 스칼렛은 보크사이트를 원광석으로 하여 베이어 공법(bayer process)을 이용하여 수산화알루미늄을 제조하는 과정에서 발생하는 부산물을 건조 및 분쇄 등 재가공 처리하여 제조한 제품으로써 주성분은 적철석(Fe_2O_3)이며, 이외에 Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Na_2O , CaO 로 이루어져 있는 붉은색 계열의 물질이다.

2.2 배합비

무기계 가소성 그라우트의 배합비는 표 1과 같이 A, B액의 이송가능 점도를 2,000 cp이하, 점도유지 시간을 120분을 만족하며, 표 2와 같이 국내 및 국외(일본)의 쉴드 TBM의 뒤채움 그라우트의 강도기준을 만족하는 최적 배합비를 표 3에 나타내었다. 표 3의 배합량은 1 m^3 당 필요한 표준배합비이다.

3. 무기계 가소성 그라우트의 체적변화성 및 투수계수

3.1 무기계 가소성 그라우트의 체적변화성 평가

쉴드 TBM 굴진시 발생하는 테일보이드의 충전에 사용되는 그라우트의 체적감소는 지반침하를 유발하고 1차 차수기능 상실에 의한 터널의 누수를 증가시킬 가능성이 크다. 따라서 현재 국내 3개 현장에 적용한 규산계

표 1. A, B액의 점도 기준(한국터널공학회, 2006)

구 분	점 도(cp)	유지시간(분)
A, B액	2,000 이하	120 이상

표 2. 국내·외 강도기준(일본토목학회, 1996, 서울특별시, 2006)

구 分	일축압축 강도(kN/m^2)		
	1시간	1일	28일
서울지하철 (00 공구)	100~150	500	3,000
TAC(일본)	100~150	-	2,500

표 3. 표준배합비(김대현, 2009)

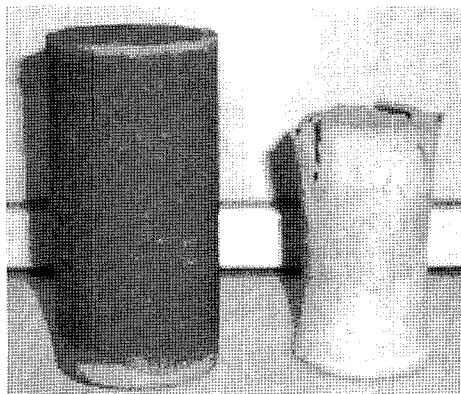
구분	A액			B액		
	시멘트	물	MG-A	스칼렛	물	MG-B
표준배합	258 kg	463 kg	232 kg	386 kg	437 kg	79 kg

그라우트와 본 연구에서 개발한 무기계 가소성 그라우트의 체적변화성을 비교하였다. 규산계 그라우트의 경우 표 4와 같이 각각의 현장에서 적용된 현장 배합비(1 m^3)를 이용하여 제작하였으며, 무기계 가소성 그라우트는 표 3에서 제시한 배합비를 이용하여 제작하였다.

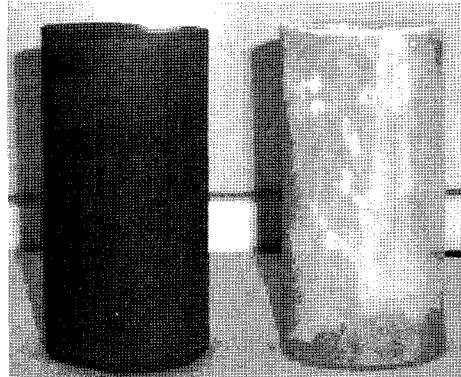
공시체 제작 후 14일 동안 기증 진조시키면서 공시체의 직경 및 높이의 변화를 측정하여 시간경과에 따른

표 4. 국내 설드 TBM 시공현장 규산계 그라우트 배합비

구 분		A현장	B현장	C현장
A 액	시멘트(kg)	250	350	350
	벤토나이트(kg)	50	52.5	52.5
	안정액(kg)	2	3.5	3.5
	물(kg)	818	859	750
B 액	규산(l)	80	80	100



(a) 규산계 그라우트



(b) 무기계 가소성 그라우트

그림 1. 기증양생시 그라우트의 체적변화

공시체의 체적변화를 관찰하였다.

시간경과에 따른 공시체의 체적변화를 관찰한 결과 규산계 그라우트의 경우 기증 진조 7일 후 그림 1(a)와 같이 균열이 다수 발생하였으며, 공시체의 직경 및 높이를 측정할 수 없을 정도로 체적변화가 크게 발생하였다. 그러나 그림 1(b)와 같이 무기계 가소성 그라우트의 경우 14일 경과 후에도 균열 및 체적변화가 거의 발생하지 않았다.

규산계 그라우트의 경우 표 5와 그림 2와 같이 현장 배합비에 따라 체적변화량이 다르게 발생하였다. 이는 규산계 그라우트의 경우 배합비가 체적변화성에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 무기계 가소성 그라우트의 경우 표 5와 그림 2에서 처럼 체적이 약간 증가하였는데, 이러한 원인은 측정오차에 따른 결과라고 판단된다.

3.2 무기계 가소성 그라우트의 투수계수 측정

투수계수가 10^{-6} cm/sec 이하의 시료는 보통 압밀시험을 통하여 간접적으로 투수계수를 산정하는데, 이는 직접적인 투수시험을 실시하는 것이 아니라 압밀이론식에 의하여 유추되는 결과로 실제와 많은 차이를 보인다(김

표 5. 기증진조 경과시간에 따른 체적변화

구 분	기증진조 경과시간(day)						
	0	1	2	3	7	14	-
체적 변화 (%)	A	100	91.6	81.1	72.7	59.7	-
	B	100	92.6	86.5	81.7	67.3	-
	C	100	98.6	92.7	91.3	78.1	-
	무기계	100	102.4	100.7	99.1	101.7	99.9

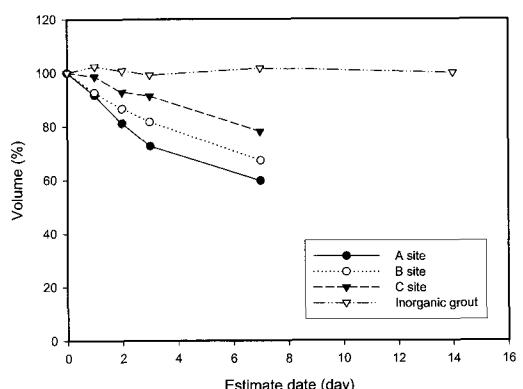


그림 2. 기증양생시 그라우트의 체적변화 비교

대만 등, 2006). 쉴드 TBM 뒤채움용 그라우트는 지반 침하를 억제하는 동시에 차수의 목적도 가지고 있다. 따라서 기본적으로 투수계수가 아주 작기 때문에 그림 3과 같이 배압(back pressure)를 가하여 투수계수를 측정할 수 있는 삼축압축시험기를 이용해서 투수시험을 실시하였다.

흐름을 유발하는 동수경사(i)는 시료 상하부의 압력차(Δp)를 이용하였으며, 시료에서 흘러나오는 유량(q)을 측정하여 식 (1)과 같이 Darcy 법칙을 이용하여 투수계수(k)를 산정하였다.

$$k = \frac{q}{Ai} \quad (1)$$

여기서, A : 시료의 단면적

i : 동수경사($=h/L$)

L : 시료의 길이

h : 수두차($=\Delta p/\gamma_w$)

투수시험에 필요한 공시체의 크기는 직경 5 cm, 높이 10 cm이며, 표 3의 배합조건을 이용하여 무기계 가소성 그라우트를 제작하였고, 표 4의 배합조건에서 국내 3개의 현장 중 체적변화성이 가장 뛰어난 C현장의 배합비

를 이용하여 규산계 그라우트를 제작하였다. 뒤채움 그라우트의 초기상태의 투수계수는 크게 중요하지 않기 때문에 공시체 제작 후 60일 동안 수중양생시킨 공시체를 이용하여 투수시험을 실시하였다. 수중양생시킨 공시체를 멤브레인으로 감싼 후 고무링으로 상부 및 하부를 고정시키고 공시체와 시험기 내벽 사이를 물로 채웠다. 물이 공시체의 하부에서 상부로 이동할 수 있도록 압력조절 장치에 연결시키고 물의 흐름을 유발시키는 동수경사는 공시체의 상부와 하부의 압력차(Δp)를 이용하였다. 동수경사를 발생시키기 위한 압력차(Δp)를 200 kPa으로 하여 수두차(h) 20 m를 발생시켰다. 이때, 공시체 하부에 압력을 가하기 전에 상부 구속압을 먼저 가하여 멤브레인의 팽창을 방지하였으며, 포화단계에서 공시체의 포화정도를 알기 위해 시험장비에 부착되어 있는 간극수압계를 이용하여 B계수가 0.95이상이 되었을 때 포화상태로 가정하고 시험을 실시하였다.

투수시험결과 표 6에서와 같이 규산계 그라우트의 경우 평균 2.42×10^{-6} cm/sec가 측정되었으며, 표 7의 무기계 가소성 그라우트의 경우 4.34×10^{-7} cm/sec가 측정되었다. 이러한 결과로 무기계 가소성 그라우트가 규산계 그라우트보다 차수효과가 뛰어남을 알 수 있다.

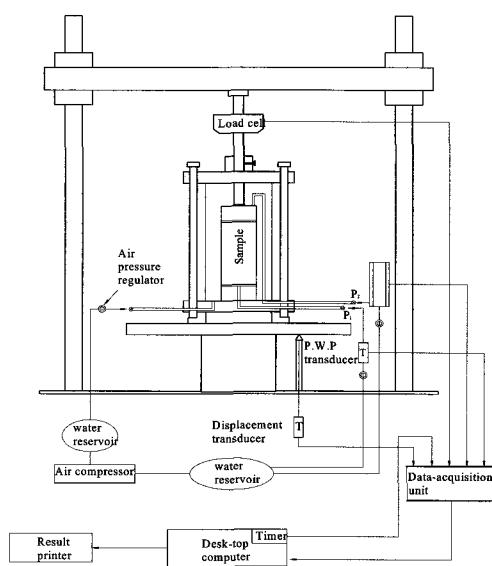


그림 3. 투수시험장치 모식도

표 6. 규산계 그라우트의 투수계수 측정 결과

sample number	1	2	3
$q(\text{cm}^3)$	820	858	788
$A(\text{cm}^2)$	19.58	19.62	19.46
i	200	200	200
$t(\text{sec})$	86,400	86,400	86,400
$k(\text{cm/sec})$	2.42×10^{-6}	2.53×10^{-6}	2.32×10^{-6}
average(cm/sec)	2.42×10^{-6}		

표 7. 무기계 가소성 그라우트의 투수계수 측정 결과

sample number	1	2	3
$q(\text{cm}^3)$	148.87	143.03	151.3
$A(\text{cm}^2)$	19.64	19.47	19.75
i	200	200	200
$t(\text{sec})$	86,400	86,400	86,400
$k(\text{cm/sec})$	4.38×10^{-7}	4.22×10^{-7}	4.43×10^{-7}
average(cm/sec)	4.34×10^{-7}		

4. 무기계 가소성 그라우트의 환경영향성 평가

4.1 시험개요

일본에서는 약액주입공법에 의한 지반개량시 고결체로부터 약액의 성분이 용탈됨으로써 주변의 토양 및 지하수를 오염시킨 사례가 종종 보고되고 있으므로, 주입공사를 수행해야 할 경우 주변 환경에의 영향을 고려하여 적절한 공법과 재료를 선택하도록 법적으로 규제하는 등 환경오염 방지를 위해서 노력하고 있다. 그리고 국내에서는 어독성 실험을 통해 LW주입재의 환경영향성 평가를 수행하였으며, 그 결과 규산소다가 포함되어 있는 LW의 환경오염에 관하여 보고된 바가 있다(천병식 등, 1998, 2000).

1974년 일본 건설성에서 제정한 ‘약액주입공법에 의한 건설공사 시공에 관한 잠정지침’에 의하면 주입 시공 후 주변의 수질기준인 pH를 8.60이하(공사 직전의 측정치가 8.60을 초과할 때에는 해당 측정치 이하)로 제한하고 있다(천병식 등, 2000).

본 연구에서는 쉴드 TBM 뒤채움용 규산계 그라우트와 무기계 가소성 그라우트를 대상으로 pH상승에 의한 어독성을 측정하였으며, 또한 용탈액의 성분을 분석하여 환경영향성을 평가하였다.

4.2 어독성 시험장치 및 조건

고결체로부터 용탈된 알칼리에 의한 어독성을 평가하기 위하여 ‘KS M 0111’에 규정된 ‘어류에 의한 급성 독성시험’(한국표준협회, 1933)법과 어류에 대한 주입재 영향 평가 시험방법 등에 근거하여 시험 장치를 그림

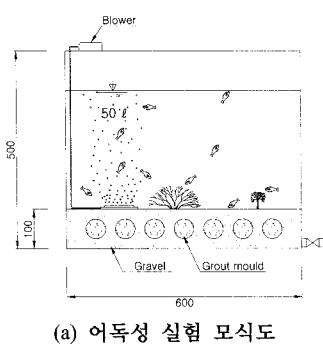
4와 같이 구성하였다. 실험에 사용된 규산계 그라우트는 표 4에서 C현장의 배합비를 적용하여 제작하였고, 무기계 가소성 그라우트는 표 3의 배합비를 적용하여 제작하였다. 제작 후 7일 동안 수중 양생시킨 공시체를 사용하였다.

4.3 어독성 시험방법

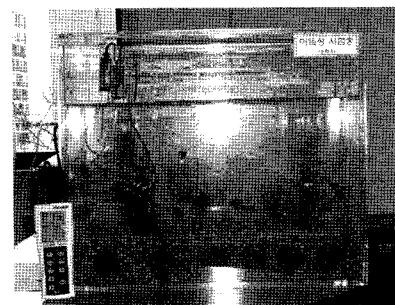
시험수조는 깨끗한 아크릴재로 용량이 50 ℓ이상 되도록 설계하고, 공기송풍이 가능하고 수온은 25°C로 지정온도를 유지할 수 있도록 자동온도조절장치를 부착하였다. 또한, 공시어의 급격한 환경변화에 대한 대책으로 수조에서 순응할 수 있도록 7일간 방치하였다. 공시어는 수온, 먹이, 취급 등 시험실 내의 생존조건에 적합한 것으로 크기가 고르고 건강하며 구입하기 쉬운 금붕어로 하였다.

pH meter는 경과시간에 따라 pH를 측정하기 위해 Portable pH meter을 사용하였으며, 충분한 산소를 공급하기 위해 blower를 부착하였다. 또한 본 시험의 시험 조건 결정을 위해 사용된 공시어는 길이 6~8 cm의 금붕어 20마리를 1조로 하였다.

본 시험의 시험조건을 결정하기 위해서 직경 5 cm, 높이 10 cm인 공시체 6개를 수조 바닥에 골고루 배치하고 깨끗한 자갈 및 모래로 덮었다. 수조에 50 ℓ의 물을 채우고 공시어를 방류하였다. 온도 및 pH의 변화를 측정할 수 있는 Portable pH meter를 설치하였다. 시험조작 후 일정 시간마다 공시어의 상태변화를 관찰하면서 어독성 시험 일지에 기록하였다. 공시어의 치사 유무를 수시로 관찰하고 치사한 공시어는 되도록 빨리 제거하고, 공시어가 모두 치사되지 않는다면 96시간까지 관찰하였다.



(a) 어독성 실험 모식도



(b) 어독성 실험사진

그림 4. 어독성 시험장치

4.4 어독성 시험 결과

시험결과는 표 8 및 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 표 8 및 그림 5와 같이 규산계 그라우트의 경우 시험시작 초기에 급격하게 pH가 증가하여 21시간 경과 후 pH 10.43으로 최대를 보였으며, 이후 약간 감소하여 10.1으로 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 이는 규산계 그라우트의 알칼리 성분의 용탈이 다소 빠르게 진행된 결과라고 판단되어 진다. 무기계 가소성 그라우트는 15시간 경과 후 pH 8.3으로 최대를 보였으며 그 후 pH 8.0을 전후로 수렴하는 경향을 보였다. 그림 6은 시간경과에 따른 공시어 수의 변화량을 나타낸 그래프이다. 규산계 그라우트의 경우 96시간 경과 후 40%의 생존율을 보였다. 이러한 원인은 규산계 그라우트의 알칼리 용탈에 의한 수질오염 때문인 것으로 판단된다. 무기계 그라우트의 경우 90%의 생존율을 보였으며, 치사한 공시어는 알칼리 용탈이 아닌 환경적인 원인에 의한 것이라고 판단되며, 무기계 가소성 그라우트의 경우 알칼리 용탈에 의한 오염도는 적은 것으로 판단된다.

표 8. 어독성 시험에 의한 pH 변화 및 죽은 공시어의 수

공시체 종류	pH 및 폐사한 공시어의 수	3hr	9hr	24hr	48hr	96hr
규산계 그라우트	pH	9.2	10.1	10.4	10.2	10.0
	폐사한 공시어	0	2	7	10	12
무기계 가소성 그라우트	pH	8.2	8.3	8.2	8.1	8.0
	폐사한 공시어	0	0	1	1	2

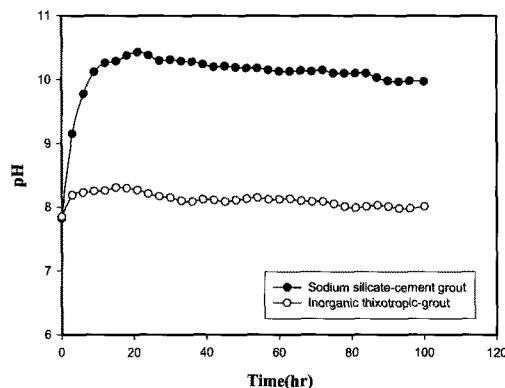


그림 5. 시간경과에 따른 pH의 변화량

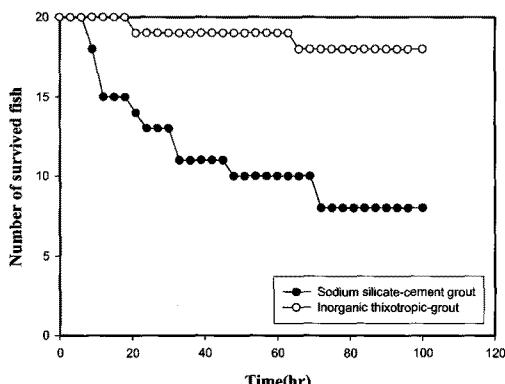


그림 6. 시간경과에 따른 공시어 수의 변화량

트의 알칼리 성분의 용탈이 다소 빠르게 진행된 결과라고 판단되어 진다. 무기계 가소성 그라우트는 15시간 경과 후 pH 8.3으로 최대를 보였으며 그 후 pH 8.0을 전후로 수렴하는 경향을 보였다. 그림 6은 시간경과에 따른 공시어 수의 변화량을 나타낸 그래프이다. 규산계 그라우트의 경우 96시간 경과 후 40%의 생존율을 보였다. 이러한 원인은 규산계 그라우트의 알칼리 용탈에 의한 수질오염 때문인 것으로 판단된다. 무기계 그라우트의 경우 90%의 생존율을 보였으며, 치사한 공시어는 알칼리 용탈이 아닌 환경적인 원인에 의한 것이라고 판단되며, 무기계 가소성 그라우트의 경우 알칼리 용탈에 의한 오염도는 적은 것으로 판단된다.

4.5 무기계 가소성 그라우트 용탈액의 성분 분석을 통한 환경영향성 평가

첨가제를 가하여 제조한 시료를 이용하여, 시멘트의 함유성분 이외의 성분이지만 지하수를 오염시킬 수 있는 유해중금속의 용출 정도를 조사하여 환경유해성 평가를 실시하였다. 용탈액 중 원소함량이 가장 높은 48시간 용탈액을 시료로 이용하여 환경부(한국표준협회, 1993)에서 제시한 유해 중금속을 대상으로 분석을 실시하였다.

이들 유해한 중금속들은 용탈액의 pH가 알칼리 영역이기 때문에 수산화물 침전을 형성하여 검출되지 않을 수도 있으나, 성분으로 함유될 가능성은 배제할 수 없다.

환경유해성 시험은 그림 7과 같이 원자흡광분광기 시험(AAS)을 통하여 실시하였다. 원자흡광분광기 시험은 금속원소는 물론 준금속과 일부의 비금속 원소들까지 약 70여 개의 원소들을 정량 할 수 있는 분석 방법으로서 기체상태의 중성원자가 복사선을 흡수하는 사실에 기초를 둔 방법이다. 원자흡광분광기 시험은 다른 방법에 비해 신속, 정확하고 간편하여 시료의 전처리 방법이 복잡하지 않다. 또한 간섭영향이 비교적 적고 선택성이 좋으며 극미량의 낮은 농도는 물론 높은 농도까지도 분

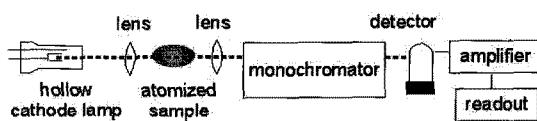


그림 7. AAS의 구조

석이 가능하므로 여러 분야의 화학분석에 이용되게 되었다.

원자흡광분광 시험의 결과에 의하면 시안, 수은, 유기인, 납 등은 검출되지 않았고, 표 9와 같이 6가 크롬과 카드뮴의 검출 농도는 수질기준치를 초과하지 않는 것으로 나타나 무기계 가소성 그라우트의 용출로 인한 수질오염 가능성은 없다고 판단된다.

5. 무기계 가소성 그라우트의 현장 적용성

5.1 쉴드 TBM 모형주입장치를 이용한 충전성 평가

무기계 가소성 그라우트의 주입성을 평가하기 위하여 그림 8과 그림 9과 같이 쉴드 TBM 모형주입장치(특허 등록 10-0877580-0000)를 개발하였다. 쉴드 TBM 모형

표 9. 화학성분 분석 결과

성분	Cr^{6+}	Cd
용출액의 농도	0.002 mg/l	0.002 mg/l
수질기준	0.05 mg/l 이하	0.01 mg/l 이하

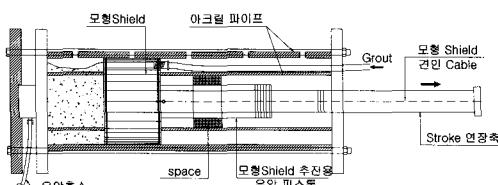


그림 8. 모형충전 시험체

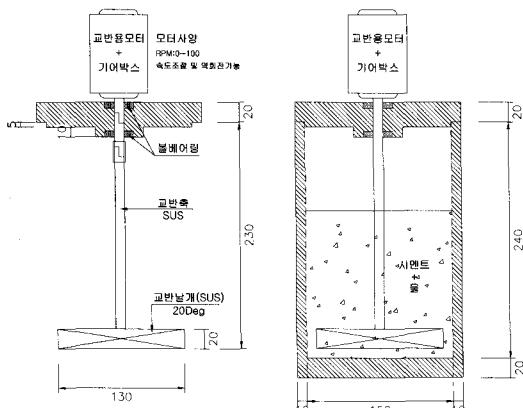


그림 9. 모형 막서

주입장치는 실제 쉴드 TBM 굴진시 충전성 확인을 위한 모형충전 시험체와 모형막서로 구성되어 있으며, 그림 8과 같이 모형충전 시험체는 2중관 아크릴 사이에 있는 모형 쉴드를 실제 쉴드 이동과 동일한 유압피스톤으로 이동할 수 있도록 제작되어 있다. 모형주입 장치에 의한 주입시험은 그라우트의 충전성을 확인하기 위한 시험이며, 실제 쉴드 TBM 굴진시 테일보이드 충전방식과는 차이가 있다고 볼 수 있다.

그림 9와 같이 모형 막서는 2방향 벨브를 적용하여 충전이 완료된 후 주입관에 남아있는 그라우트를 물로 세척이 가능하게 제작되었으며, 유압피스톤에 의해 모형 쉴드가 이동하고, 이동에 의해 발생된 테일보이드를 모형막서의 호스펌프에 의해 1.5 shot방식으로 충전한다.

그림 10은 모형충전 시험 완료 후 모습으로, 시험결과 정량적으로 충전성을 평가할 수는 없으나 육안관찰시 가소성 그라우트의 충전성은 확보되는 것으로 판단된다.

5.2 지하수가 존재하는 현장 적용 가능성 평가

쉴드터널 뒷채움 방식 중 하나인 후방주입과 테일보이드 충전성 확인을 위하여 그림 11과 같이 시험체를 제작하였다. 지하수가 존재하는 구간에서 그라우트 주입시 재료 분리 및 초기 겔형성을 확인하기 위하여 그림 12와 같이 충전 구간을 미리 물로 채운 후 무기계 가소성 그라우트를 주입하였다.

시험결과 그림 13과 같이 수중에서 그라우트를 주입하였으나 재료분리 없이 테일보이드의 배면과 내면 모두 충전이 원활한 것으로 나타났다.

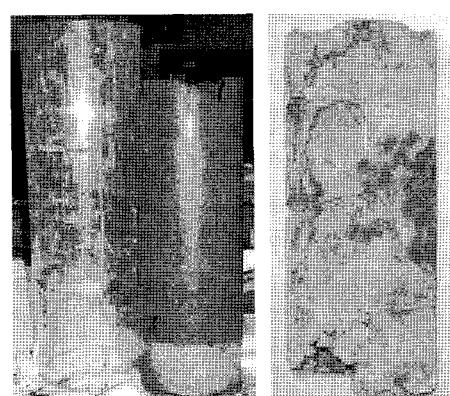


그림 10. 충전 완료 후 시험체 분해

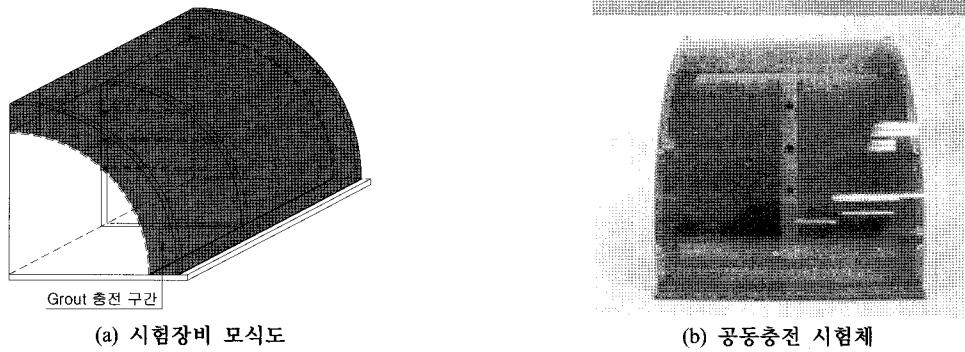


그림 11. 후방주입 및 공동충전 시험체

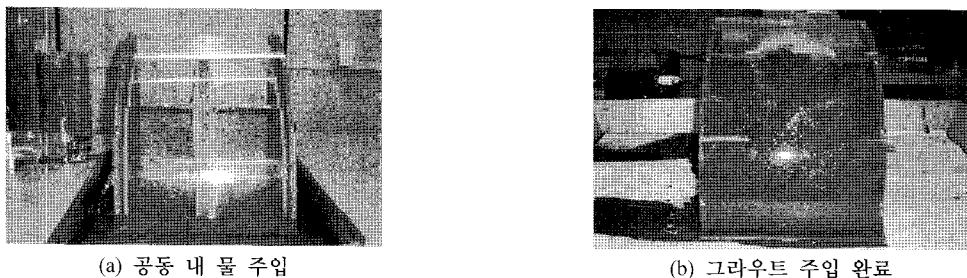


그림 12. 공동충전 시험 방법



그림 13. 그라우트 충전 완료 후 시험체 분해

5.3 무기계 가소성 그라우트의 현장 시험 시공

무기계 가소성 그라우트의 현장 적용성을 평가하기 위하여, 국내 현장에 시험 시공을 수행하였다. 시험 시공 현장은 서울 송파구 일원의 전력구로서 쉴드 TBM의 직경은 4,550 mm이며, 세그먼트의 외경은 4,300 mm, 세그먼트 폭은 1,200 mm이다. 총 길이는 2.4 km이며, 뒤채움 체적은 $2.085 \text{ m}^3/\text{ring}$ 이다.

시험시공 현장은 쉴드 굴진이 완료된 상태이며, 도달 작업구 일부지역을 제외한 부분은 기존 규산계 그라우

트로 뒤채움 주입이 완료된 상태이다. 그림 14는 시험시공 개요도로 주입방식은 후방주입이며, 도달구에서 후방으로 11번째 세그먼트(12.6 m) 천단부에서 주입하였다.

시험시공 물량은 약 10.0 m^3 이며, 배합비는 표 3의 표준배합비를 이용하였다. 시공방법은 그림 15의 믹싱기를 이용하여 스칼렛이 첨가된 B액을 믹싱 후 먼저 주입부 선단까지 약 2.4 km를 이송하고 B액의 재료 분리 및 자체 경화에 의한 관 폐색을 확인하기 위하여 주입관 속에 180분 동안 방치 후 A액과 같이 주입하였다.

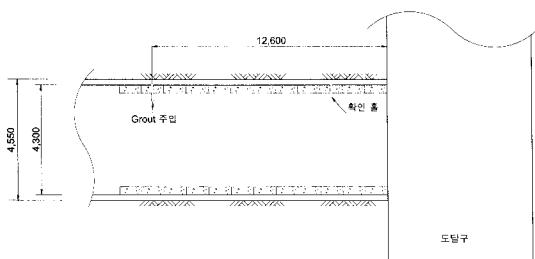


그림 14. 시험시공 개요도

그 결과 뒤채움 주입시 재료분리에 의한 고형분 침강이나 자체 경화에 의한 관 폐색 등의 문제는 발생하지 않았으며, 그림 16과 같이 뒤채움 주입을 시작하고 몇 분이 지나지 않아 세그먼트 하부에 있는 확인 홀(세그먼트 이동용)을 통해 무기계 가소성 그라우트의 유출을 확인 할 수 있었으며, 그림 17(a)와 같이 시험 시공 약 60분 후 도달구 측 세그먼트 천단부에 설치해 두었던 그라우트 도달 확인용 호스에서 그라우트가 유출되어 주입이 원활하게 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 또한 도달구 측 확인 홀의 그라우트 도달과 함께 그림 17(b)와

같이 주입 홀 하부의 확인 홀에서 그라우트의 유출이 멈추어 주입 후 경화반응이 잘 이루어 진 것으로 판단된다.

그림 18은 세그먼트와 세그먼트의 이음부로 지하수 차단을 위한 수팽창 고무 등이 일부분 차수 기능을 하지 못하여 주입되어진 그라우트가 유출되는 현상을 보여주고 있다. 그러나 유출이 시작되고 약 30분 경과 후 주입 그라우트의 유출이 중단되었으며, 이는 무기계 가소성 그라우트의 공극 충전 및 경화반응이 원활이 이루어진 것으로 판단된다.

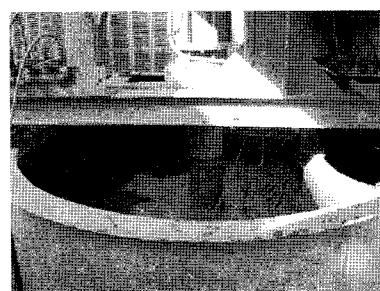
본 연구에서 실시한 시험시공은 연암과 경암으로 구성된 지반조건에 대해서 후방주입 방식으로 실시하였으므로 지반조건이나 주입방식이 상이한 현장에 대해서는 주입효과가 다르게 나타날 수 있으므로 별도의 주입성 평가가 필요할 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 새로 개발된 무기계 가소성 그라우트의 체적변화성 및 투수계수를 평가하였으며, 환경영향

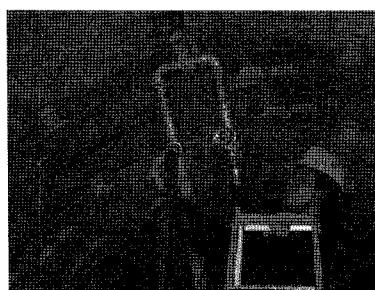


(a) 믹싱 장비

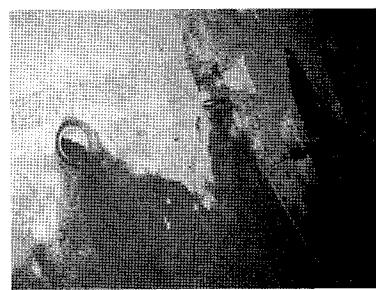


(b) B액 믹싱

그림 15. 현장 믹싱 장비 및 방법



(a) 주입 시작



(b) 주입부 하부 유출

그림 16. 그라우트 주입 및 충전 확인

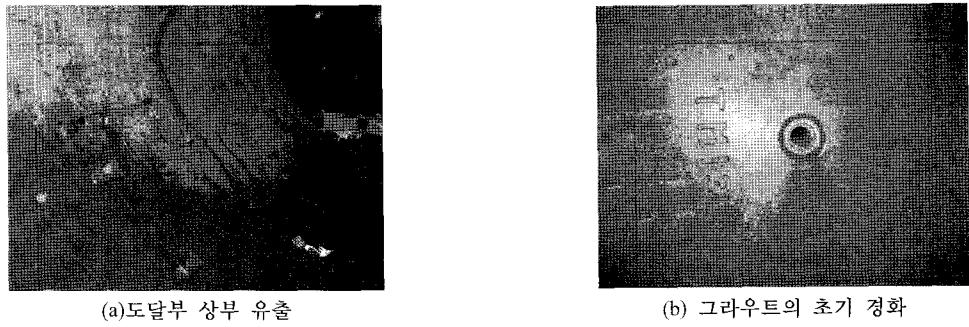


그림 17. 그라우트 충전 확인 및 초기 경화 확인

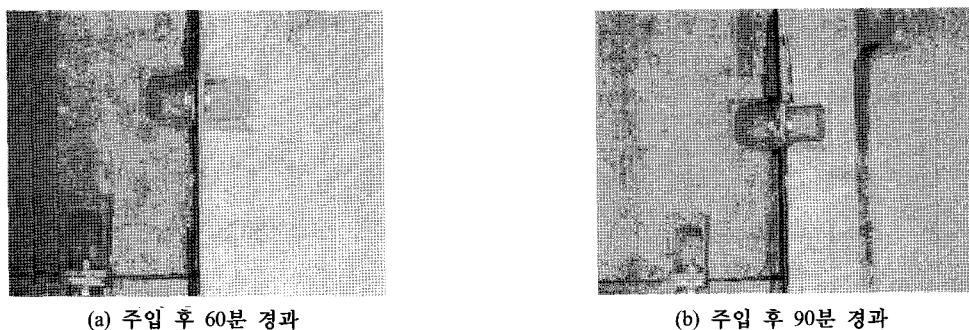


그림 18. 세그먼트 이음부 그라우트 유출

성 및 현장적용성을 평가하였다. 그 결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

- 국내 3곳의 쉴드 TBM 시공현장에서 사용하고 있는 규산계 그라우트와 무기계 가소성 그라우트를 14일 동안 기중건조 시킨 결과 규산계 그라우트의 경우 체적변화는 22~40%로 배합비에 큰 영향을 받고 있었으며, 무기계 가소성 그라우트의 경우 체적변화는 거의 발생하지 않았다.
- 국내 C현장에서 사용하고 있는 규산계 그라우트와 무기계 가소성 그라우트의 특수계수를 측정한 결과 규산계 그라우트의 경우 평균 2.42×10^6 cm/sec가 측정되었고, 무기계 가소성 그라우트의 경우 평균 4.34×10^7 cm/sec가 측정되었다. 이러한 결과로 보아 무기계 가소성 그라우트가 쉴드 TBM 시공시 지하수의 차수효과가 훨씬 뛰어남을 알 수 있다.
- 무기계 가소성 그라우트의 알칼리 용탈에 따른 환경 영향성을 평가하기 위하여 어독성 실험 및 용탈시험을 실시하였다. 규산계 그라우트의 경우 초기에 pH

가 급격하게 증가하여 21시간 경과 후 pH 10.43으로 최대값을 보였으며 96시간 후 공시어는 40%의 생존율을 보였다. 무기계 가소성 그라우트의 경우 15시간 경과 후 pH 8.3으로 최대를 보였으며, 96시간 경과 후 공시어는 90%의 생존율을 보였으며, 치사한 공시어의 경우 실험 환경에 의해 치사한 것으로 판단된다. 용탈시험의 경우 원자흡광분광 시험(AAS)의 결과 6가 크롬과 카드뮴을 제외하고는 모두 불검출되었으며, 6가 크롬과 카드뮴의 검출 농도도 수질기준치를 초과하지 않는 것으로 나타나 환경적으로 안전함을 알 수 있다.

- 무기계 가소성 그라우트의 현장적용성을 평가하기 위하여 현장실험에 앞서 실내 모형실험을 실시하였다. 쉴드 TBM 모형주입장치와 후방주입 및 공동충전 시험체를 이용하여 실험을 한 결과 양호한 충전상태를 보이고 있었으며, 특히 수중에서 그라우트를 주입한 결과 재료분리 없이 배면과 내면 모두 충전이 원활한 것으로 나타났다.
- 서울 송파구 일원의 전력구 공사현장에서 시험시공

을 실시한 결과 B액을 180분 동안 관속에 방치한 결과 관폐색은 발생하지 않았으며, 그 후 A액과 같이 주입하였다. 시험 시공 약 60분 후 그라우트 도달 확인용 호스에서 그라우트가 유출되어 주입이 원활하게 이루어 진 것을 확인할 수 있었다. 또한 주입 홀 하부의 확인 홀에서 그라우트의 유출이 멈추어 주입 후 경화반응이 잘 이루어 진 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 실시한 시험시공 현장의 지반조건과 주입방식이 상이할 경우 별도의 주입성 평가가 필요 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술 평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제명: 시공장비)(기계화시공) 국산화를 위한 핵심요소 기술개발. 과제번호: C 014A1010001-04A0201-00150)에 의한 것임을 밝히며 지면을 통해 감사의 말씀 을 드립니다.

참고문헌

1. 김대만, 김기영 (2006), “화강풍화토-벤토나이트 혼합토의 공학적 특성”, 한국지반환경공학회 논문집, 제7권, 제6호, pp. 45-56.
2. 김대현, 정두희, 정경환 (2009), “쉴드 TBM 뒤채움용 무기계 가소성 그라우트의 개발 및 적합성 평가”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제3호, pp. 277-286.
3. 류동성, 정경환, 신민식, 김동해, 이준석, 정두희(2005), “실리카 콜로이드를 이용한 가소성 그라우트의 개발 및 공학적 특성”, 한국지반공학회 학술발표회 논문집.
4. 서울특별시 (2006), “서울지하철 7호선연장(온수~부평 구청) 703공구 건설공사”.
5. 일본토목학회 (1996), “터널 표준시방서(쉴드공법편)·동해설”, pp.37-78.
6. 천병식, 김진춘 (1998), “지반주입재의 공해성 평가에 관한 연구”, 1998년도 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 321-326.
7. 천병식, 김진춘 (2000), “FPT 시험에 의한 지반주입재의 공해성 평가에 관한 연구”, 창립기념학술발표회 논문집, 한국지반환경공학회, pp. 85-90.
8. 한국표준협회 (1993), KS M 0111, 공장폐수 시험방법.

접수일(2009.10.27), 수정일(2009.11.27), 게재확정일(2009.12.2)