

실드 TBM 뒤택움용 무기계 가소성 그라우트의 개발 및 적합성 평가

김대현¹, 정두회^{2*}, 정경환³

Development of inorganic thixotropic-grout for backfilling of shield TBM tail voids and its compatibility

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

Abstract A suitability of a thixotropic grout developed in this study has been examined through laboratory tests on strength, segregation, and viscosity. The thixotropic grout is a mixture of two types of liquid components. The A-liquid component consists of cement, water, and MG-A and the B-liquid component consists of scarlet, water, and MG-B. Unconfined compressive strength of specimens prepared with a proper mix-proportion satisfied a design criteria for the backfilling of tail voids. A material segregation phenomenon under water condition was not observed in the thixotropic grout whereas it was observed in the existing silica-type grout. In addition, viscosity tests have been carried out on the thixotropic grout to verify the capability of a long-distance delivery in the field. Both the A-liquid component and the B-liquid component maintained a viscosity of below 2,000 cP for 120 minutes. This experimental result confirms that two liquid components guarantees a long-distance delivery in the field application.

Keywords: Shield TBM, tail voids, backfilling, thixotropic grout

요 지 본 연구는 실드 TBM 테일 보이드 동시주입용 가소성 그라우트의 적합성을 규명하기 위하여 강도특성, 수중 재료분리현상 및 점도특성 실험을 실시하였다. 무기계 가소성 그라우트는 실드 TBM 뒤택움 그라우트 주입 시 시멘트, 물, MG-A로 구성된 A액과 스칼렛, 물, MG-B로 구성된 B액을 주입하는 2액성 그라우트 주입공법이다. 적정 배합비로 제작된 무기계 가소성 그라우트의 일축압축강도는 초기강도 및 장기강도 기준을 만족하는 결과를 보였다. 지하수가 존재하는 현장에서 그라우트 주입 시 발생하는 재료분리현상을 관찰하기 위하여 기존 현장에서 적용된 규산계 그라우트와 무기계 가소성 그라우트를 비교하였으며, 그 결과 규산계 그라우트에서 발생하는 재료분리 현상이 무기계 가소성 그라우트에서는 관찰되지 않았다. 또한 무기계 가소성 그라우트의 장거리 이송에 대한 현장 적용성을 확인하기 위하여 A, B액의 점도를 측정하고 결과 A, B액 모두 120분 이상 2000 cP 이하가 측정되었다. 이러한 결과는 추후 현장적용 시 A, B액의 원활한 이송이 가능한 점도를 확보하고 있음을 확인하였다.

주요어: 실드TBM, 테일보이드, 뒤택움, 무기계 그라우트

1. 서 론

실드 TBM공법은 비교적 연약한 지반에 터널굴착을 할 때, 터널의 외경보다 조금 큰 단면의 실드 TBM을 지중에 추진시켜 내부에 있는 토사의 붕괴나 유동을 방지하면서, 굴착 및 세그먼트라이닝의 조립작업을 통하여 터널을 시공하는 공법이다. 이러한 실드 TBM 굴진 시 필연적으로 세그먼트와 배면지반 사이의 공극(tail void)이 발생하게 된다. 이런 경우 토사와 지하수의 유실 및 이에 따른 지반침하 등의 가능성을 없애기 위하여

공극을 충전해야 하는 문제가 발생한다.

테일보이드에 의해 발생하는 지반침하를 억제하기 위한 뒤택움 그라우트의 주입방법은 실드 TBM 측면에서 추진과 동시에 주입하는 동시주입방법, 그라우트홀이 실드 테일에서 이탈함과 동시에 뒤택움 주입 및 충전 처리를 시행하는 반동시주입방법, 1링의 굴진 완료마다 뒤택움 주입 및 충전처리를 시행하는 즉시주입방법, 몇 링의 후방에서 뒤택움 주입 및 충전처리를 시행하는 후방주입방법이 있다. 동시주입의 경우 침하 억제에 유리하나, 사질지반에서 추진저항이 크고, 경제적으로 고가인 단점이 있으며, 반동시주입방법은 뒤택움 주입 시 실드 내로 유출될 우려가 있다. 즉시주입방법은 시공은 편리하나, 주변 지반을 이완시키기 쉬운 단점이 있고, 후방

¹정회원, 부산교통공사, 부경대학교 토목공학과 박사수료

²정회원, 부경대학교 건설공학부 교수

³정회원, (주)동아지질 대표이사

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

주입방법은 시공이 간단하고 경제적으로 저가이나, 테일보이드 확보가 어렵다(한국터널공학회, 2008). 소형 단면에서는 쉘드 TBM의 특성과 적용 조건에 적합한 뒤채움 주입방식을 선정하되, 대형단면에서는 테일 보이드에 의한 지반침하를 억제하기 위하여 동시주입을 원칙으로 해야한다(건설교통부, 2007).

동시주입에 적합한 뒤채움 주입재는 유동성이 좋고 재료분리가 발생하지 않아야 하며, 주입시 지하수에 의한 희석이 적어야 한다. 그리고 재료분리 없이 장거리 압송이 가능해야 하며 그라우트 충전 후 초기에 균일하고 상당한 강도를 가지고 있어야 한다. 그리고 경화 후의 체적감소가 없고 투수성이 적어야 하며 무공해로 가격이 경제적이어야 한다.

과거에는 테일보이드 충전을 위해 주입되는 주입재로서 단지 시멘트 밀크나 규산계의 그라우트를 주입하는 1액성 그라우트가 대부분이었다. 그러나 1액성 그라우트는 주입 후 완전히 경화되기 전에 일정 수준 이상의 점도와 강도를 유지하지 못할 뿐만 아니라 지하수에 의하여 쉽게 희석, 유실된다는 문제가 있었다. 또한 연약지반에서 쉘드 TBM시공 및 대구경 쉘드 TBM의 사용실적이 증가함에 따라 필연적으로 동시주입방식을 적용해야 하나 1액성 그라우트는 겔화시간이 길고 초기강도가 작기 때문에 동시주입에 의한 지반침하 억제효과를 보기 어렵다.

근래에 들어서는 주입효과 및 품질을 향상시키기 위하여 가소성 그라우트를 주입하는 추세에 있다. 가소성(혹은 요변성, thixotropic) 그라우트란 지반 주입재의 한 종류로서 종래의 단순한 1액성 시멘트 밀크 지반주입재 등과는 달리 공동 등에 주입할 때에는 점도가 낮아 유동성을 갖지만, 일정한 시간이 경과하면 일정수준으로 점도가 점진적으로 상승하기 때문에 점도가 상승하는 일정시간 동안 가소성을 갖게 된다. 따라서 가압에 의해 미세한 공간까지 충전할 수 있을 뿐만 아니라, 일정시간 경과하여 점도가 상승한 후에는 일정 수준이상의 강도를 발현하기 때문에 충전한 후에도 지하수에 의해 쉽게 유실되지 않는 성질을 갖고 있다(정경환 등, 2008).

최근 쉘드 TBM 뒤채움 그라우트 재료로는 주로 시멘트 밀크에 벤토나이트, 규산소다를 조합하는 규산계 가소성 그라우트가 사용되고 있다. 그러나 규산계 가소성 그라우트의 경우 규산소다의 사용에서 비롯되는 알칼리

용탈에 의해 시간경과에 따라 내구성이 저하되는 문제점이 있는 것으로 알려져 있다(류동성 등, 2005). 이러한 규산계 그라우트의 단점인 내구성 문제를 해결하기 위하여 개발된 무기계 가소성 그라우트는 규산계 대신에 일반 시멘트와 같이 수화반응에 의해 고결이 이루어지고 시간이 경과할수록 강도발현이 이루어지는 시멘트계 급결제를 사용하는 것이 특징이다(류용선, 2008).

따라서, 본 연구에서는 쉘드 TBM 굴진시 발생하는 테일보이드의 그라우트 주입방식 중 동시주입방식에 적합한 무기계 가소성 그라우트의 강도 및 점도의 기준을 정의하고, 무기계 가소성 그라우트의 강도 및 점도특성을 파악하여 동시주입용 가소성 그라우트의 기준에 적합한 무기계 가소성 그라우트의 배합비를 도출하였다. 그리고 기존 현장에서 적용한 규산계 그라우트와 무기계 그라우트를 수중에서 제작하여 비교하고 수중제작시 재료분리현상을 파악하여 지하수가 존재하는 쉘드 TBM 굴진시 뒤채움 그라우트로써 적합성을 검증하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 무기계 가소성 그라우트를 구성하는 재료특성

본 연구에서 사용한 무기계 가소성 그라우트는 2액성 그라우트로서 A액은 시멘트, 물, 경화보조제로 구성되어 있으며, B액은 초기강도 발현제, 물, 경화촉진제로 구성되어 있다. 경화보조제, 경화촉진제, 초기강도 발현제는 가사시간 확보 및 초기강도를 증강시키기 위해서 사용되었으며, 재료의 특성은 다음과 같다.

2.1 경화보조제

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 알루미늄이 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.

이들 초기의 수화반응 후 1일정도 이후부터는 칼슘 실리케이트계 광물인 C_3S , C_2S , C_4AF 등의 수화반응이 계속적으로 일어나 겔 상태의 칼슘 실리케이트 수화물을

생성시켜 막대 및 판상의 칼슘 알루미늄에이트 황산염 수화물 구조에 치밀하게 충전되어 경화체가 에트링자이트(ettringite) 반응과 팽창작용으로 수축현상을 상쇄하게 한다. MG-A는 주로 Ca, Si, Al로 구성되어 있으며, 구성비는 표 1에 나타난 바와 같다.

2.2 경화촉진제

경화촉진제(MG-B)는 알루미늄 규소화합물류(Aluminium Silicate)로써 $Al_2(SiO_3)_3$, $Al_2O_3 \cdot 9SiO_2 \cdot XH_2O$ 를 주성분으로 하고 강도촉진제인 탄산칼륨(K_2CO_3)과 황산소다(Na_2SO_4)로 구성되어 있다.

상기의 첨가제로 조제된 무기계 가소성 그라우트는 초기강도와 장기강도가 우수하고 지반에 충전된 후 외력에 의해 초기 켈이 파괴된 후 다시 켈의 재형성이 가능하며, 켈의 재형성 후에도 강도특성이 안정적이다. MG-B는 주로 Fe, Al, Si로 구성되어 있으며, 구성비는 표 2에 나타난 바와 같다.

2.3 초기강도 발현제

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. 스칼렛의 평균입도는 10 μm 전후로 13.11 μm 이하의 크기가 90%를 차지하고 있으며, pH 11~12의 알칼리성의 물질이다(KC주식회사, <http://www.kccorp.kr>).

표 1. 경화보조제의 구성성분(중량비%)

성분	Ca	Si	Al	Fe	Mg	Ti	기타
함유율(%)	62.58	17.30	10.53	5.18	1.78	1.59	1.04

표 2. MG-B의 구성성분(중량비%)

성분	Fe	Al	Si	Na	Ti	S	기타
함유율(%)	41.66	20.17	10.32	8.22	7.91	5.86	5.86

표 3. 스칼렛의 구성성분(중량비%)

성분	Fe	Al	Na	Si	Ti	Ca	기타
함유율(%)	48.92	16.84	10.27	9.39	8.47	5.08	1.03

스칼렛의 구성비는 표 3에 나타난 바와 같이 주로 Fe, Al, Na로 이루어져 있다.

2.4 화학반응 메카니즘

본 연구의 무기계 가소성 그라우트는 산화철(Fe_2O_3)과 산화알루미나(Al_2O_3)의 성분비가 높은 스칼렛과 시멘트를 기반으로 하여 MG-A와 MG-B를 적정 배합비로 혼합하여 A액, B액을 각각 조제한 후 1대 1로 동시 혼합 주입한다. 즉, 지반의 보강이나 보수 및 누수방지를 위해서 상기 A액과 B액을 그라우팅 장비를 통해 지반의 공동이나 갈라진 틈 사이 등에 동시에 주입하는 그라우팅 작업을 행하면, 단기 재령 기간까지는 바로 경화되지 않고 적정 기간 동안 소성을 갖는 가소성 상태를 유지하는 응결단계를 거치게 된다.

상기 응결단계에서 그라우트와 지하수와의 화학 반응에 의해 그라우트의 표면에는 지하수를 흡수하는 초기 켈이 형성되면서 지반의 함수비가 떨어져 토질성상이 개선되게 된다. 이때 무기질계 부산물을 구성하는 스칼렛의 산화알루미나(Al_2O_3)와 MG-A의 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)와 석고의 황산칼슘($CaSO_4$)과 수분(H_2O)의 작용에 의하여 가소성을 유지하는 시간 조절이 용이할 뿐만 아니라 초기 켈의 형성 시간을 단축시킬 수 있게 된다.

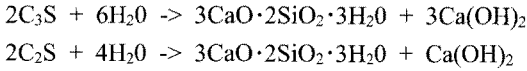
따라서 가소성의 유지 시간 조절이 용이하지 못하고 초기 켈의 형성 시간이 지연됨에 따라 지하수의 방해로 인해 재료분리 현상을 초래하여 초기 켈을 균질하게 형성하지 못하였던 종래의 가소성 그라우트의 문제점을 해소할 수 있게 된다.

그리고 외력에 의해 형성된 초기 켈이 파괴된 이후에도 상기한 스칼렛의 산화알루미나(Al_2O_3)와, MG-B의 알루미늄 규소화합물과 MG-A 혼합물의 작용에 의하여 가소성을 가지게 되므로 켈의 재형성이 가능하게 된다.

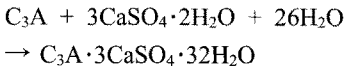
상기와 같이 응결단계를 거친 단기 재령기간부터 중장기 재령기간까지는 그라우트를 구성하는 화합물과 지하수 간의 수화반응에 의해 그라우트의 입자가 조밀하게 채워지면서 경화되어 강도가 증강됨으로써 지반의 공동이나 갈라진 틈 등에는 단단하게 굳어지는 경화체가 형성되는 경화단계를 거치게 된다.

이때 아래의 화학반응을 통하여 수화반응에 의한 수화물인 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)으로 부터 용출되는 칼슘이온(Ca^{+})에 의한 토양 입자의 응집화 및 단립화가 이

루어지게 된다.

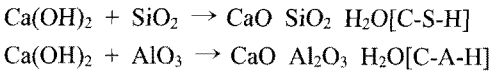


그리고 아래의 화학반응식과 같이 침상결정을 갖는 수화물인 에트링자이트의 생성으로부터 탈수효과가 증대되고, 토립자는 상호 치밀하게 결속되는 네트워크 구조를 가지게 된다.



이러한 과정을 통하여 그라우트에 의해 지반에 형성된 경화체는 1차적으로 조기강도를 발현할 수 있게 된다.

1차적으로 조기강도가 발현된 후 증장기 재령기간부터 장기 재령기간까지는 아래의 화학반응을 통하여 수화반응으로 생성된 수산화칼슘(Ca(OH)₂)과 실리카(SiO₂)와 산화알루미나(Al₂O₃)는 상온에서 서서히 반응하여 불용성 화합물인 C-S-H 겔을 생성하는 포졸란 반응을 함에 따라, C-S-H 겔이 경화체의 공극을 기밀하게 밀폐시킴으로써 경화체의 조직을 더욱 치밀하게 한다.



따라서 본 연구의 무기계 가소성 그라우트를 실드 TBM 굴진시 테일보이드가 발생함과 동시에 주입하여 1차적으로 강도가 증강된 경화체는 상기의 작용을 통해 다시 2차적으로 강도가 증강되게 되는 것이다. 또한, 제1액을

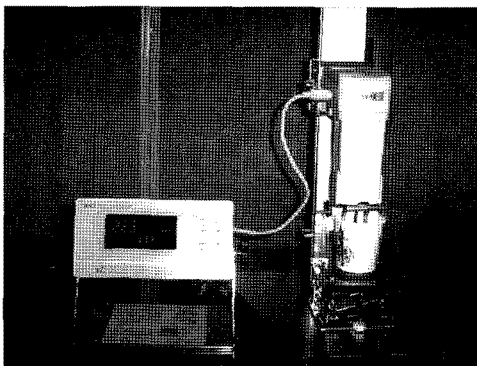


그림 1. 실험에 사용한 디지털 진동형 점도계

구성하는 무기계 부산물의 스칼렛에는 장기강도를 향상시키는 기능을 하는 산화철(Fe₂O₃)이 풍부하게 함유되어 있으므로 2차적으로 강도가 증강된 경화체의 강도를 더욱 증강시킬 수 있게 된다.

3. 무기계 가소성 그라우트의 배합비 산정

3.1 뒤채움 그라우트의 점도기준

실드 TBM 뒤채움을 위한 무기계 가소성 그라우트의 현장 적용성을 확보하기 위해서는 A, B액이 지상 플랜트에서 지하 세그먼트 주입공까지 장거리 이송시간 동안 가사시간이 확보되어야 한다. A, B액의 가사시간 평가를 위해 그림 1과 같은 디지털 진동형 점도계를 이용하여 A, B액의 점도를 측정하였다. 상온에서 물의 점도는 약 1 cP(centipoise) 정도이고, 물:시멘트비가 7:3인 시멘트 밀크 절대점도는 5~10 cP 정도이며, 조청이나 고분자 용액과 같이 점성이 큰 물질의 경우에는 수천~수십만 cP에 이른다(윤현돈 등, 2005). 디지털 진동형 점도계의 측정 가능한 상한 값이 12,000 cP이며, 12,000 cP는 현장에서 실드 TBM 뒤채주입 시 주입관을 폐색시켜 A, B액의 이송이 불가능한 상태의 점도이다.

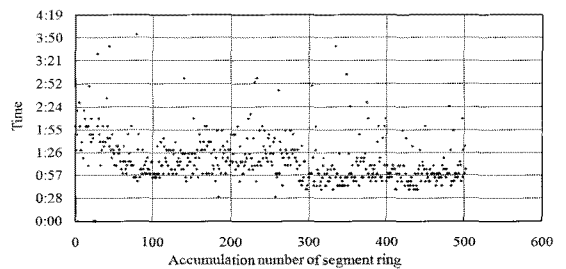


그림 2. 선행터널의 Ring당 조립시간

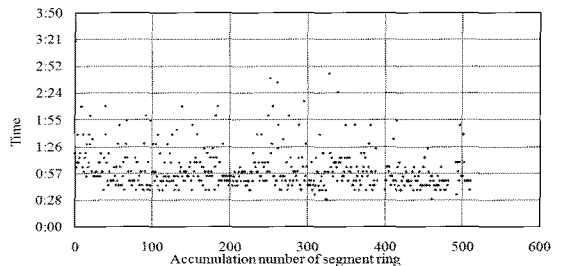


그림 3. 후행터널의 Ring당 조립시간

현재 국내에서 시공되고 있는 직경 7.8 m인 셴드 TBM 현장의 작업시간을 분석해 보면 그림 2와 같이 선행터널의 경우 조립시간의 평균시간과 표준편차의 합이 107.28 분, 그림 3과 같이 후행터널의 경우 세그먼트 조립에 숙련도가 높아져 83.70분으로 나타나고 있다. 세그먼트의 조립시간은 표 4에 나타내었다.

기존 현장의 규산계 가소성 그라우트의 점도특성과 충전시험을 통해 얻은 경험 및 점도측정 값을 참고하여 표 5와 같이 A, B액의 이송가능 점도를 2,000 cP이하로 선정하였으며, 시공현장의 작업시간을 분석하여 A, B액 이송을 위한 최소한의 점도유지 시간을 120분으로 선정하였다(한국터널공학회, 2006).

표 4. 선행터널과 후행터널의 세그먼트 조립시간

구 분	평균(min)	표준편차(min)	변동계수(%)
선행터널	77.79	29.49	37.9
후행터널	61.86	21.84	35.3

표 5. A, B액의 점도 기준(한국터널공학회, 2006)

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

3.2 뒤채움 그라우트의 강도기준

국내 및 국외(일본)의 셴드 TBM의 뒤채움 그라우트의 강도기준은 표 6에서 나타나는 바와 같이 평균 초기(1시간)강도 100 kN/m², 장기(28일)강도 3,000 kN/m²의 범위에 있다(일본터널공학회, 1996, 서울특별시, 2006).

3.3 최적 배합비 선정

본 연구에서는 무기계 가소성 그라우트의 점도 및 강도기준을 만족하는 물성을 확보하기 위하여 A액(시멘트+물)과 B액(스칼렛+물+첨가제)의 배합비 및 첨가제의

표 6. 국내·외 강도기준(일본터널공학회, 1996, 서울특별시, 2006)

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

종류 및 양을 변화시키면서 강도 및 점도를 측정하였다.

표 7과 표 8은 무기계 가소성 그라우트의 점도 및 강도특성을 만족하는 물성을 확보하기 위해 실험한 결과이다.

그라우트 물성은 크게 초기 겔형성, 압송에 용이한 점도(2,000 cP이하)유지, 초기(1시간)강도 발현(100 kPa

표 7. 점도측정 결과

구 분 (B 액 첨가물)	점도범위 (cP)	측정시간 (분)	비 고
DGA 3	1,200	30	• 재료분리 현상 심함
DGA 4	250	30	
SA 101	1,400	60	• 초기 또는 장기(28일) 강도 기준을 만족 못함
SA 331	145	60	
SA 358	12,000	60	• 점도 기준을 만족 하지 못함
SA 3582	8,700	30	
SA 3585	350	30	• 초기 또는 장기(28일) 강도 기준을 만족 못함
SA 3587	60	30	
DA 54	1,650	30	• 재료분리 현상 심함 • 수중에서 겔 형성이 어려움
DA 55	1,700	30	
DA 901	700	120	
DA 902	650	120	
DA 9256	1,800	120	• B액은 점도 및 강도를 만족하나, A액에서 시멘트의 침강현상이 발생

표 8. 강도측정 결과

구 분 (B 액 첨가물)	일축압축 시험 결과(kPa)			
	1 시간	1 일	7 일	28 일
DGA 3	288.0	433.6	7291.0	-
DGA 4	215.0	135.6	1342.0	-
SA 101	40.0	148.2	2134.0	-
SA 331	38.0	146.0	2099.0	-
SA 358	65.0	871.0	1269.0	-
SA 3582	30.0	953.0	1477.0	1766.0
SA 3585	30.0	943.0	1475.0	2139.0
SA 3587	20.0	942.0	1692.0	2102.0
DA 54	336.0	2250.	5962.0	-
DA 55	261.0	2667.0	5342.0	-
DA 901	312.0	2536.0	-	6304.0
DA 902	297.0	2483.0	-	6507.0
DA 9256	254.0	1399.0	6226.0	8152.0

이상) 및 장기(28일)강도 발현 (3,000 kPa이상) 등이 주요 내용이다.

A액에서 발생하는 시멘트의 침강현상을 억제하기 위하여 B액에 첨가된 DA 9256을 MG-A, MG-B로 분리하여 각 첨가제의 성능을 개선하여 최적 배합비를 산정하였다.

최적배합비는 표 9와 같으며, 이는 실험에 필요한 1개의 몰드를 제작하기 위한 표준배합비이다.

4. 무기계 가소성 그라우트의 특성

4.1 강도특성

무기계 가소성 그라우트의 강도 특성을 평가하기 위하여 표 9에서 제시한 표준배합비를 이용하여 공시체 제작방법을 믹서를 이용한 기중제작, 모형 주입장치를 통한 기중제작, 모형주입장치를 이용한 수중제작 등에 의해 공시체를 제작하였다.

(1) 믹서를 이용한 기중제작

표 9에서 제시한 배합비를 이용하여 A액과 B액을 각각 비커에 넣은 후 믹서를 이용하여 5분 동안 충분히 교반하였다. 교반된 A, B액을 비커에서 혼합한 후 사전 제작된 몰드를 이용하여 공시체를 제작하였다. 무기계

표 9. 표준배합비

구분	A액			B액		
	시멘트	물	MG-A	스칼렛	물	MG-B
표준 배합	50.6 g	91.0 g	45.6 g	75.8 g	85.8 g	15.6 g

표 10. 믹서를 이용하여 기중제작한 공시체의 일축압축강도

구분	일축압축강도(kPa)				
	1시간	1일	7일	14일	28일
NO.1	187.6	1136.1	2312.4	2591.1	3154.8
NO.2	193.1	992.7	2259.0	2546.2	3109.1
NO.3	251.1	1127.7	2232.3	2739.9	3188.0
NO.4	222.9	1142.6	2372.9	2558.5	3049.6
NO.5	241.9	1161.5	2325.0	2403.9	3126.8
표준편차	24.4	67.9	55.6	119.9	51.9
평균	219.3	1112.1	2300.3	2567.92	3125.66

가소성 그라우트는 초기 겔 형성 시간이 빠르기 때문에 1회 제작 시 한 개의 공시체를 제작하였다. 일축압축강도 측정은 표 10과 같이 재령 일에 따라 5개씩 제작하여 평균값을 적용하였으며, 일축압축강도 측정 결과, 표 10과 그림 4에 나타난 바와 같이 초기 및 장기강도 모두 표 6의 기준을 만족하였다.

(2) 모형주입장치를 이용한 기중제작

셴드 TBM 시공 현장에서 뒤채움 주입방식을 고려하기 위하여 모형주입장치를 이용하여 공시체를 기중제작하였다. 모형주입장치는 그림 5와 같이 구성되어 있으며 주입압력을 조절하여 A액과 B액의 주입량을 조절할 수 있다. 모형주입장치는 1회 배합시 18개의 공시체를 제작할 수 있으며 배합비는 표 9에서 제시한 표준배합비를 기준으로 18개를 제작할 수 있는 배합량을 적용하였다. 일축압축강도 측정을 위한 공시체 제작은 믹서를 이용한 기중제작 조건과 동일하게 각 재령일에 따라 5개씩

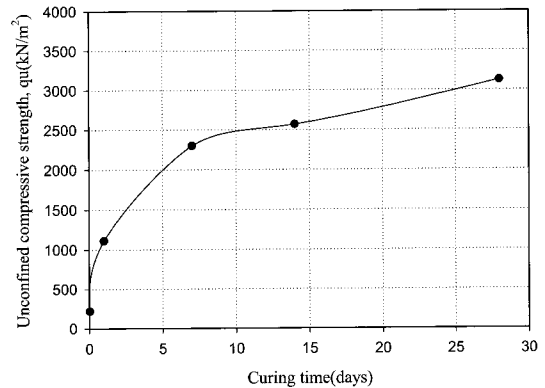


그림 4. 믹서를 이용하여 기중제작한 공시체의 일축압축강도

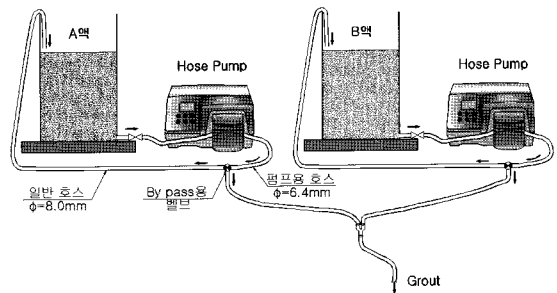


그림 5. 모형주입장치 모식도

제작하여 평균값을 적용하였다. 표 11에 모형주입장치를 이용하여 기중제작한 공시체의 일축압축강도를 나타내었다. 그림 6에서와 같이 모형주입장치를 이용하여 기중제작한 공시체의 일축압축강도가 믹서를 이용하여 기중제작한 공시체의 일축압축강도보다 다소 크게 측정되었다. 이는 모형주입장치에 의해 A액과 B액이 혼합되기 전 교반기에 의하여 충분히 교반되기 때문인 것으로 판단된다.

표 11. 모형주입장치를 이용하여 기중제작한 일축압축강도

구분	일축압축강도(kPa)				
	1시간	1일	7일	14일	28일
NO.1	218.5	1689.7	2994.7	3035.6	3745.7
NO.2	240.8	1795.4	3058.9	3258.9	3685.6
NO.3	242.3	1710.6	3250.3	3139.2	3717.2
NO.4	265.6	1683.5	3136.5	3137.3	3457.7
NO.5	244.6	1749.2	3219.6	3303.4	3438.0
표준편차	17.3	46.7	107.1	106.8	148.6
평균	242.4	1725.7	3132.0	3174.8	3608.84

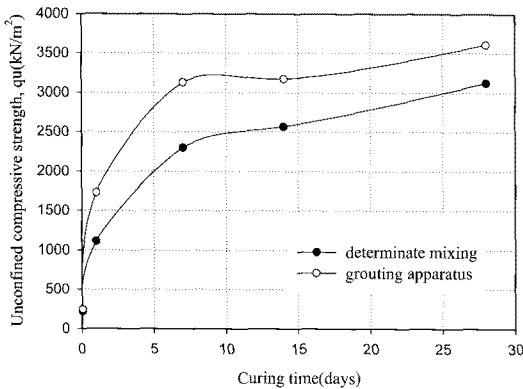


그림 6. 모형주입장치를 이용하여 기중제작한 공시체의 일축압축강도

4.2 수중제작시 규산계 그라우트와 비교

셸드 TBM은 지하수가 존재하는 지반에서 많이 적용되고 있으며 실제, 부산지하철 2호선의 셸드 TBM은 수영강 하부를 통과하기도 하였으며, 서울지하철 분당선의 경우도 한강하저터널에 셸드 TBM이 적용된 바 있다.

이와 같이 셸드 TBM 공법에서 뒤채움 주입시 그라우트의 시공성 및 품질에 대한 안정성을 확인할 필요가

있다.

따라서, 본 절에서는 모형주입장치를 이용하여 그림 7과 같이 무기계 그라우트를 수중에서 제작하였으며, 기존 셸드 TBM 현장에서 적용된 규산계 그라우트의 배합비를 고려하여 동일한 방식으로 수중 제작하여 비교하였다. 모형주입장치를 이용할 경우 1회 배합 시 18개의 공시체를 제작할 수 있으며, 이를 고려하여 실험에 적용된 규산계 그라우트의 배합비는 표 12와 같다.

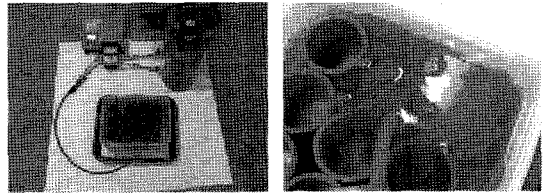


그림 7. 수중제작 방법

표 12. 규산계 그라우트의 배합비(공시체 18개 제작)

구분	A액				B액	
	시멘트	벤토나이트	안정액	물	규산	물
배합량	1575.0 g	236.3 g	15.8 g	2925.0 g	1364.4 g	281.2 g

(1) 강도비교

모형주입장치를 이용하여 동일한 방법으로 무기계 가소성 그라우트와 규산계 그라우트를 제작하였다. 재령 일에 따라 5개씩 제작하여 강도를 측정하였으며, 5개의 평균값을 재령 일에 따른 일축압축강도로 정의하였다. 모형주입장치를 이용하여 수중에서 제작할 경우 실험자의 숙련도가 공시체의 제작상태에 큰 영향을 미친다. 따라서 1회 제작 시 공시체 8개의 배합량으로 5개의 공시체를 제작하였으며, 약 120개의 공시체를 제작하여 제작 상태가 양호한 25개의 공시체를 이용하여 일축압축강도를 측정하였다. 표 13은 무기계 가소성 그라우트제의 일축압축강도를 나타내었으며, 표 14는 규산계 그라우트제의 일축압축강도를 나타내었다. 그림 8은 두 그라우트의 일축압축강도를 비교한 그래프이다.

무기계 가소성 그라우트의 경우 수중제작 하였을 때, 기중제작 한 경우보다 강도가 약간 떨어지는 결과를 보였으나, 뒤채움 그라우트의 강도기준은 만족하였다. 그리고 규산계 그라우트의 경우 무기계 가소성 그라우트

보다 강도는 다소 작게 나왔으나 역시 뒷채움 그라우트의 강도기준은 만족하고 있었다.

표 13. 수중제작한 무기계 가소성 그라우트

구분	일축압축강도(kN/m ²)				
	1시간	1일	7일	14일	28일
NO.1	162.4	1115.7	2610.5	2876.1	3120.3
NO.2	170.8	1373.6	2468.5	2658.6	3250.8
NO.3	135.0	1312.1	2594.4	2744.6	3230.3
NO.4	154.1	1330.0	2410.6	2607.4	3300.2
NO.5	142.8	1317.8	2654.2	2916.2	3150.5
표준편차	14.4	100.2	62.1	81.0	73.82
평균	153.02	1289.84	2547.6	2761.0	3210.42

표 14. 수중제작한 규산계 그라우트

구분	일축압축강도(kN/m ²)				
	1시간	1일	7일	14일	28일
NO.1	203.2	1041.3	2079.7	2553.5	3196.6
NO.2	182.4	1040.0	2097.7	2639.0	3211.7
NO.3	199.5	1056.2	2304.7	2412.1	3109.7
NO.4	206.4	1079.1	2016.4	2548.3	2001.6
NO.5	203.2	1049.4	2168.5	2495.8	2967.1
표준편차	9.5	15.8	65.4	83.4	165.79
평균	198.94	1053.2	2133.4	2529.74	3097.4

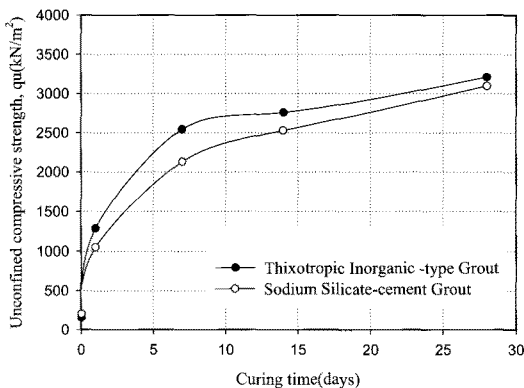
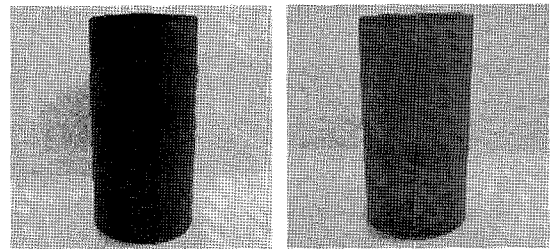


그림 8. 모형주입장치에 의한 일축압축강도

(2) 수중제작시 재료분리현상 비교

그림 9는 수중제작 시 재료분리 현상을 비교한 그림이

다. 그림 9(a)와 같이 무기계 가소성 그라우트의 경우 대부분의 공시체에서 육안으로 재료분리 현상을 관찰할 수 없었다. 그러나 그림 9(b)에 나타난 바와 같이 규산계 그라우트의 경우 대부분의 공시체에서 재료분리 현상이 발생하였다. 규산계 그라우트를 수중 제작할 경우 재료 분리가 발생하는 원인은 A, B액이 수중에서 혼합되는 과정에서 규산이 물과 먼저 반응하여 상부에 재료분리 현상이 크게 발생하는 것이라고 판단된다.



(a) 무기계 가소성 그라우트 (b) 규산계 그라우트

그림 9. 수중제작시 재료분리현상 관찰

4.3 A, B액의 가사시간 실험

A액은 시멘트, 물, MG-A를 혼합하여 만든 액체이다. 시멘트+물을 혼합하였을 경우 시멘트의 비중이 크기 때문에 쉽게 침강하는 경향이 있다. 이러한 문제는 A액이 주입호스안에 장시간 방치하거나, 장거리 이송할 경우 시멘트의 침강에 의하여 A액의 품질이 저하되거나 관 폐색현상을 유발할 수 있다. 따라서 무기계 가소성 그라우트에서 시멘트+물에 경화보조제인 MG-A를 첨가하

표 15. 침강시험 결과(시간 경과별 침강두께)

구분	5분	10분	15분	30분	1시간	2시간	3시간
물+시멘트	1 cm	2 cm	2.1 cm	2.4 cm	2.4 cm	2.4 cm	2.4 cm
B액	0.2 cm	0.5 cm	0.6 cm	0.7 cm	1.0 cm	1.0 cm	1.0 cm



(a) 시험 시작

(b) 180분 경과

그림 10. 침강시험 결과

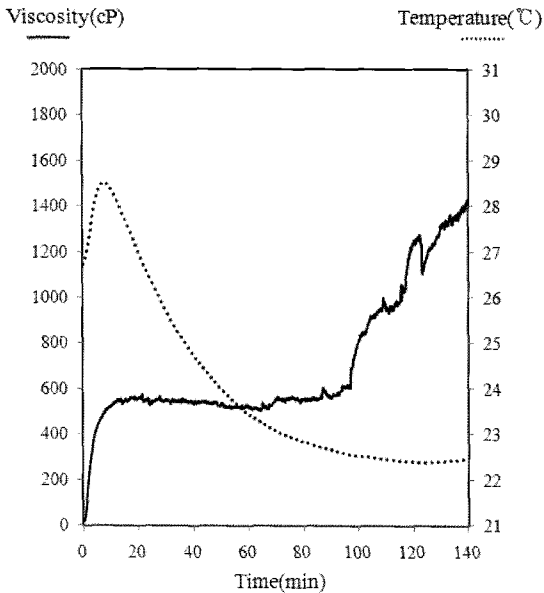


그림 11. A액의 점도 시험 결과

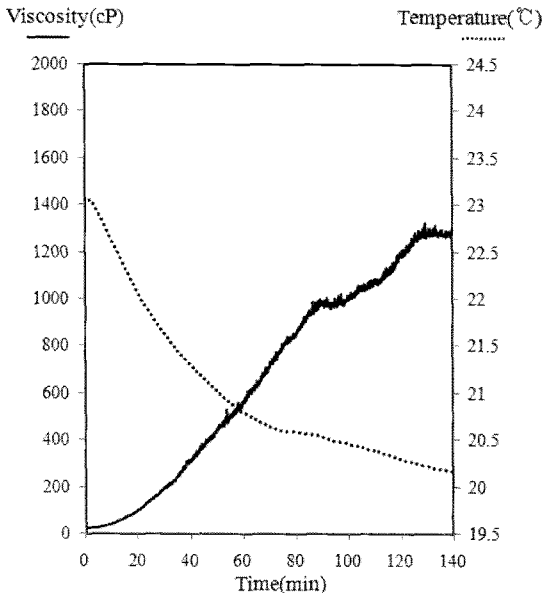


그림 12. B액의 점도 시험 결과

였을 경우 시멘트의 침강실험을 실시하였다.

표 15는 시멘트 밀크(시멘트:물=1:1)와 무기계 가소성 그라우트A액의 침강실험 결과이며, 그림 10에 나타나는 바와 같이 시멘트밀크 대비 60% 정도의 침강 억제

효과를 나타내었다.

A액 및 B액의 점도테스트 결과 그림 11 및 그림 12와 같이 120분의 테스트 시간 동안 2,000 cP 이하를 나타내고 있어 현장 적용성이 확보된 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 쉴드 TBM 뒤택음 주입재의 개선을 위하여 무기계 가소성 그라우트의 최적 배합비를 제시하였고, 그에 따른 강도 및 점도시험을 실시하였다. 그리고 수중제작을 하여 재료분리현상도 관찰하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 무기계 가소성 그라우트는 믹서를 이용해서 기중 제작한 경우와 모형주입장치를 이용한 경우 모두 기준 강도를 상회하였으며, 특히 모형주입장치를 이용한 경우 충분한 교반으로 인해 믹서를 이용해서 제작한 공시체에 비해서 강도가 더 크게 측정되었다.
2. 무기계 가소성 그라우트와 규산계 그라우트를 수중 제작하였을 경우 모두 기준강도를 만족하였다. 그러나 규산계 그라우트의 경우 규산이 물과 먼저 반응하여 재료분리 현상이 발생함을 알 수 있었다.
3. 쉴드 TBM 뒤택음 그라우트의 장거리 이송에 따른 적합성을 평가하기 위하여 A액의 침강시험 및 점도 시험을 실시하였다. 시멘트+물과 A액의 침강정도를 비교한 결과 2시간 경과 후 시멘트+물보다 A액의 침강정도가 60% 정도 감소함을 알 수 있었다.
4. A액과 B액의 점도시험을 실시한 결과 A, B액 모두 장거리 이송이 가능한 점도인 2000 cP이하를 120분 이상 유지하였다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 건설교통부 (2007), “터널설계기준”, 도서출판 씨아이알, pp. 120-121.
2. 류동성, 정경환, 신민식, 김동해, 이준석, 정두희 (2005), “실리카 콜로이드를 이용한 가소성 그라우트의 개발 및 공학적 특성”, 한국지반공학회 학술발표회 논문집.
3. 류용선 (2008), “무기질계 지반주입재의 내구성 및 환경성에 관한 연구”, 공학석사학위, 한양대학교.
4. 서울특별시 (2006), “서울지하철 7호선연장(온수~부평구청) 703공구 건설공사”.
5. 윤현돈, 강문구, 최기훈, 정경환, 경진문, 김동해 (2005), “대구경 쉴드터널의 시공 - 서울지하철 909공구 중심으로”, 한국터널공학회 제6차 터널 기계화 시공기술 심포지움 논문집, pp. 89-102.
6. 일본토목학회 (1996), “터널 표준시방서(쉴드공법편)·동해설”, pp. 37-78.
7. 정경환, 신민식, 김동해, 노진택, 정두희 (2008), “무기계 가소성 그라우트의 개발 및 공학적 특성”, 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집.
8. (사)한국터널공학회 (2006), “대형·대단면 지하공간 창출을 위한 지하공간 건설기술”, 2차년도 중간보고서, pp. 213-215.
9. (사)한국터널공학회 (2008), “터널공학시리즈3 터널 기계화시공 설계편”, 도서출판 씨아이알, pp. 472-482.

접수일(2009.6.22), 수정일(2009.7.6), 게재확정일(2009.7.4)