

실리카 콜로이드를 이용한 가소성 그라우트의 개발 및 공학적 특성 Development and Characteristics of Thixotropic Grout based on Colloidal Silica

류동성¹⁾, Dong-Sung Ryu, 정경환²⁾, Gyeong-Hwan Jeong, 신민식³⁾, Min-Sik Shin, 김동해⁴⁾, Dong-Hae Kim, 이준석⁵⁾, Jun-Seok Lee, 정두회⁶⁾, Duhwoe Jung

¹⁾뉴텍건설화학(주) 기술연구소 소장, Senior Researcher in Chief, Newtech Construction Chemical Co., LTD.

²⁾(주)동아지질 대표이사, President, Dong-A Geological Engineering Co.,LTD.

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

⁴⁾(주)동아지질 설계부 과장, Manager, Dong-A Geological Eng. Co., LTD.

⁵⁾뉴텍건설화학(주) 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, Newtech Construction Chemical Co., LTD.

⁶⁾부경대학교 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Pukyong National University

SYNOPSIS : A thixotropic grout has been newly developed for the use of back-filling a tail void in the shield tunnel and filling up ground voids. The grout developed in the study is a mixture of colloidal silica, cement and some functional additives. Its engineering characteristics was investigated by measuring a viscosity and unconfined compressive strengths. The optimum mixing 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 grout such as L.W.. The thixotropic grout developed in the study exhibited an excellent performance for back-filling of tail voids, based on experimental results compared to the existing waterglass grout.

Key words : Colloidal Silica, Thixotropic, Grout, Durability, Shield Tunnel, Back-Fill, Sodium Silicate

1. 서 론

지하구조물은 축조 시에 시스템상이나 시공 공정상 불가피하게 구조물과 지반의 배면 사이에 공극이 발생하는 경우가 있는데, 이런 경우 토사와 지하수의 유실 및 이에 따른 지반 침하 등의 가능성을 없애기 위하여 공극을 충전해야 하는 문제가 발생한다. 특히 최근 증가 추세에 있는 쉘드터널은 굴진 시 필연적으로 발생하는 세그먼트와 배면지반 사이의 공극(tail void)을 충전시킬 필요가 있으며, 공극을 최소화시키기 위해서는 동시주입이 바람직하

고 이를 위해서는 기존의 규산계 그라우트재의 문제점을 보완할 수 있는 가소성 형태의 재료개발이 필수적이다. 또한 지반 내에서 자연적으로 생기거나 굴착 등으로 인한 공동은 상부지반의 침하 원인이 될 수 있으므로 공동도 충전시킬 필요가 있다. 과거에는 이러한 공동 또는 배면 충전의 목적으로 주입되는 주입재로서 단지 시멘트 밀크나 규산계의 그라우트를 주입하는 것이 대부분이었으나 근래에 들어서는 주입효과 및 품질을 향상시키기 위하여 가소성 그라우트를 주입하는 추세에 있다. 가소성(혹은 요변성, Thixotropic) 그라우트란 지반 주입재의 한 종류로서 종래의 단순한 1액성의 시멘트 밀크 지반주입재 등과는 달리 주입시 완전히 경화하기 전에 일정시간 동안 일정수준의 점도와 강도를 유지하므로써 지하수에 의해 쉽게 희석, 유실이 되지 않음과 동시에 일정시간 동안 요변특성(가소성)을 가져 일정수준의 가압에 의해 미세한 공간까지도 밀실하게 충전시킬 수 있고 그 이후에는 경화되기 시작하여 일정 수준이상의 강도를 발현하는 주입재를 말한다.

가소성 그라우트 재료로서 기존에 사용되어 온 것은 시멘트 밀크에 벤토나이트 및 규산소다를 조합하는 것, 시멘트 밀크에 비규산소다계 급결제를 조합하는 것 등이 있는데, 시멘트 밀크, 벤토나이트 및 규산소다의 조합은 L.W.와 같은 통상의 지반주입방법에 사용되는 주입재의 일종으로 이미 잘 알려진 주입재이며, 다른 방법은 시멘트 밀크에 급결제로서 염기성 황산알루미나 용액을 조합하는 것 등이다. 그러나 기존의 방법인 시멘트, 벤토나이트, 규산소다를 조합한 주입재의 경우에 규산소다의 사용에서 비롯되는 알칼리 용탈에 의해 시간경과에 따라 내구성이 저하되는 문제점이 있는 것으로 알려져 있으며(류동성 등, 2004), 시멘트밀크에 염기성 황산 알루미나 용액을 조합하는 방법은 가소상의 유지시간의 조절이 비교적 까다롭고 기타 특성에 있어서 전체적으로 원하는 수준에 이르지 못하여 그 활용이 제한되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 공동충진 및 배면 충전의 목적에 적합하고 기존에 사용하는 그라우트재의 단점을 개선한, 새로운 가소성 그라우트로서 실리카 콜로이드와 시멘트를 주재로 하고 여기에 가소성 및 조기강도의 발현 등을 목적으로 α 제와 β 제 등의 특정한 첨가제를 배합한 가소성 그라우트를 개발하였으며, 이 가소성 재료의 가소성 특성과 압축강도 및 내구성 등의 공학적 특성에 관하여 조사하였다.

2. 가소성의 정의 및 변화 과정

2.1 가소성 점도 범위 및 유지시간

2.1.1 가소성 그라우트재의 절대점도

액체의 절대점도는 대개의 경우 Centi-poise(cp) 또는 $mPa\cdot s$ 의 단위로 표시한다. 절대점도의 측정방법은 회전 또는 진동하는 스피들(회전형 점도계)이나 진동관센서(진동형 점도계)의 회전이나 진동 시 센서에 감지되는, 교란에 대한 액체의 저항을 측정하여 산출하는 것으로 상온에서 물의 점도는 약 $1cp$ 정도이며, 물:시멘트비(7:3)의 시멘트 밀크 절대점도는 $5\sim 10cp$ 정도이며 조청이나 고분자 용액과 같이 점성이 큰 물질의 경우에는 수천~수십만 cp 에 이르는 것도 있다. 일반적으로 가소성의 절대점도영역은 $300\sim 1,500cp$ 으로 규정하는데, 이 범위에서는 일정수준의 가압에 의해 주입액이 유동할 수 있는 점도로서 그 영역 이하에서는 점성이 너무 낮아 지하수 등의 자유수와 접촉 시 희석·유실되기 쉬우며, 그 영역 이상에서는 가압에 의해서도 유동이 거의 불가능하며 또한 이후에는 급격히 경화가 이루어지기 시작하여 점도가 무한대에 이르게 된다. 한편, 가소성 그라우트의 경우 시간경과에

따라 그라우트의 점도가 계속 상승하므로 본 연구에서는 액에 대한 분산효과가 큰 진동형 점도계를 이용하여 시간경과에 따른 점도를 연속적으로 측정함으로써 그라우트의 가소성 유지시간을 조사하였다.

2.1.2 가소성의 점도 유지시간

주입목적과 조건을 감안하면 가소성의 유지시간은 15~40분이 적합한 것으로 알려져 있는데, 시공성을 고려한 충분한 충전을 위해서는 30~40분이 보다 유리하지만, 이보다 길어질 경우에는 조기강도의 발현이 늦어질 가능성이 있다.

2.2 가소성 그라우트의 겔화 과정

가소성 그라우트제를 배합한 후 경화에 이르는 과정은 아래의 3단계로 이루어지며, 각 단계의 특징은 표 1에 나타난 바와 같다.

표 1. 가소성 그라우트의 겔화과정 및 특징

구 분	1단계	2단계	3단계
변화과정	화학적 및 물리적 겔화	가소(요변)상 유지	강도발현
시 간	3~20초	15~40분	~ 이후
상 태	졸 → 겔	가소(요변)상 고결체	강도 발현

3. 가소성 그라우트의 배합 및 제조

3.1 배합재의 종류 및 역할

본 연구에서 제조한 가소성 그라우트에 사용된 배합재의 종류 및 역할은 아래의 표 2에 나타난 바와 같다.

표 2. 배합재의 종류 및 역할

	실리카 콜로이드	시멘트	α 제	β 제
역할	초기겔화 유도, 최종 겔의 장기강도 및 내구성발현	그라우트 겔의 기본 모체	가소성 유지시간 조정	조강성의 발현

3.2 배합조건

본 연구에서는 기존 그라우트의 경제성, 품질 등에 준한 결과를 얻기 위하여 기존의 가소성 그라우트의 표준배합을 고려함과 동시에 예비실험을 통하여 재료들의 배합비 및 양을 결

정한 결과 그 범위는 표 3과 같다.

표 3. 가소성 그라우트의 배합방법 및 범위

배합재	A 액		B 액		
	실리카콜로이드용액	시멘트(kg)	α제	β제	물
1m ³ 시 배합량	150 kg	250~350	0.5~2 kg	5~20 kg	나머지

상기 표 3에 나타낸 바와 같이 배합액은 A액과 B액으로 구분하여 1.5 shot 방식으로 주입하는 것을 전제로 하였다. 배합양에 있어서 시멘트의 경우에는 상기 범위 이하를 사용할 경우 최종강도가 낮아지기 때문에 적합하지 않고, 그 이상의 시멘트의 사용은 가소성 유지시간을 다소 단축시킴과 동시에 경제성에서 불리하여 바람직하지 않음을 알 수 있었다. β제의 경우는 상기 범위 내에서 조강성 발현에 유리하였으나 그 이상의 사용은 가소성 시간의 단축과 더불어 조강효과도 크지 않아 바람직하지 않았다. α제의 배합양은 상기 범위를 초과할 경우 가소성 유지시간이 너무 짧아서 최종 경화체가 수중에서 팽창, 파괴되는 현상이 나타나 바람직하지 않음을 알 수 있었다.

아래 표 4에 본 연구에서 실험한 가소성 그라우트의 배합 중 대표적인 배합사례를 나타내었고, 이들에 대한 공학적 특성은 다음 장에서 설명하였다.

표 4. 가소성 그라우트의 배합사례

배합 No.	A 액		B 액		
	실리카콜로이드용액	시멘트	α제	β제	물
#1	150 kg	300 kg	1 kg	10 kg	750L
#2	150 kg	300 kg	0.5 kg	10 kg	750L
#3	150 kg	300 kg	-	10 kg	750L
#4	150 kg	300 kg	1 kg	-	755L
#5	150 kg	250 kg	1 kg	10 kg	770L
#6	150 kg	350 kg	1 kg	10 kg	735L
#7	150 kg	350 kg	-	10 kg	735L

4. 가소성 그라우트재의 특성

4.1 가소성 측정 결과의 비교

본 연구에서 개발한 가소성 그라우트재의 시간경과에 따른 점도변화를 관찰하기 위하여 아래 그림 1의 진동형 점도계(일본 AND사 모델 SV-10)를 이용하여 시간대별 점도를 연속적으로 측정하였다. 앞의 3.2절의 배합 #1, 배합 #2 및 배합 #3에 대한 점도변화를 그림

2, 3 및 4에 각각 나타내었다. 아울러 비교를 위해서 기존의 규산계 가소성 그라우트의 시간대별 점도변화를 그림 5에 나타내었다.

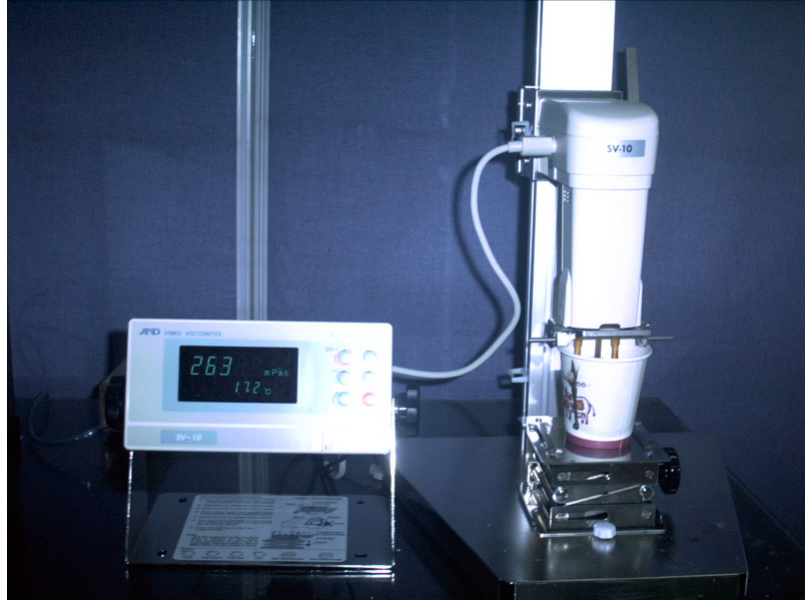


그림 1. 디지털 진동형 점도계에 의한 점도측정 장면

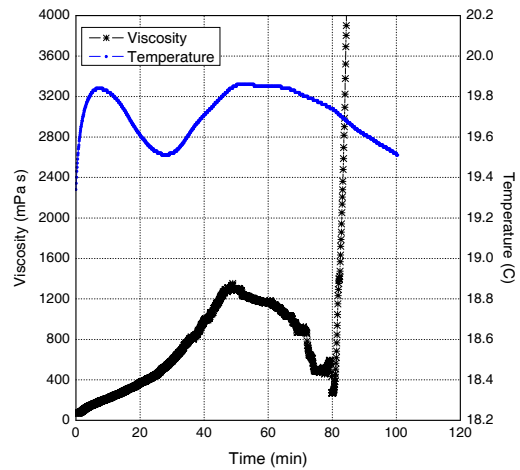
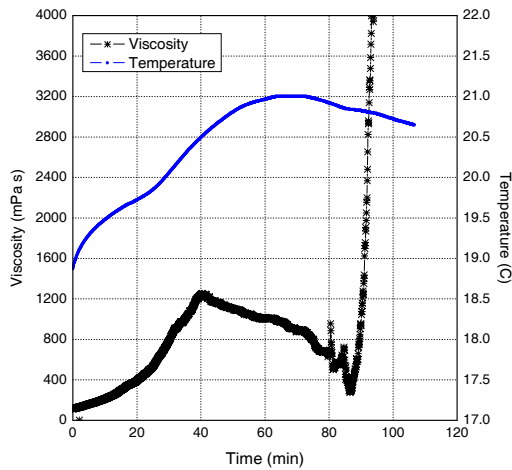


그림 2. 배합#1의 시간경과에 따른 점도변화 그림 3. 배합#2의 시간경과에 따른 점도변화

그림 2 - 그림 5에서 x축은 시간, 왼쪽 y축은 점도를, 오른쪽 y축은 온도를 표시하며, 그래프 곡선 중 아래의 곡선은 배합액의 시간경과에 따른 점도변화를 위의 곡선은 배합액의 온도변화를 표시한다. α 제의 첨가량을 제외한 나머지 배합은 동일한 조건의 배합 #1, #2 및 #3을 각각 비교하면 α 제의 첨가량이 제일 많은 #1의 경우(그림 2)에 가소성 유지시간이 약40분 정도로 적합한 수준임을 알 수 있으며, 이보다 절반의 양이 첨가된 #2(그림 3)의 경우에는 가소성 유지시간이 다소 지연됨을 알 수 있고, α 제가 전혀 첨가되지 않은 #3의 경우(그림 4) 가소성 유지시간이 과다하게 지연됨을 알 수 있었다. 그림 2와 그림 3의 경우

점도 1,200~1,300cp의 영역에서 상승곡선이 꺾여 하강하였다가 다시 상승하는 것을 볼 수 있는데 이는 이 영역에서 이미 전체적으로 겔화가 시작되어 점도가 급격히 상승하였음에도 점도계의 진동센서 부분에서는 진동에 의해 겔이 소성 파괴되어 배출된 현탁수를 감지한 점도를 측정하였기 때문인 것으로 육안관찰과 촉감을 통해 파악되었다. 따라서 실질적으로는 오히려 변곡점에서 가소성을 잃고 비가소성의 겔로 변화되는 점인 것을 확인할 수 있었다. 한편, 이상의 실험결과를 볼 때 α제의 적정량 첨가는 가소성 유지시간을 조절하는데 매우 유리함을 알 수 있었으며, 그 이유는 α제의 흡수 능력에 의한 것으로 사료된다.

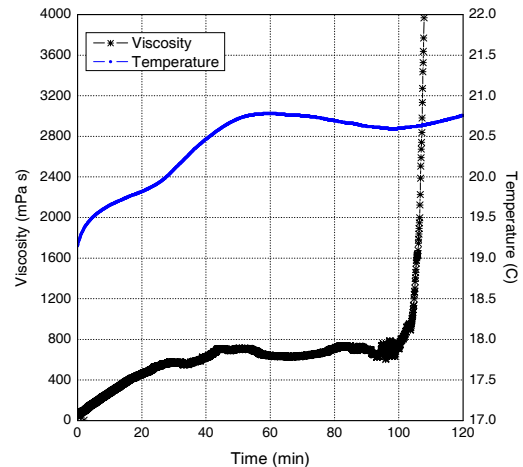
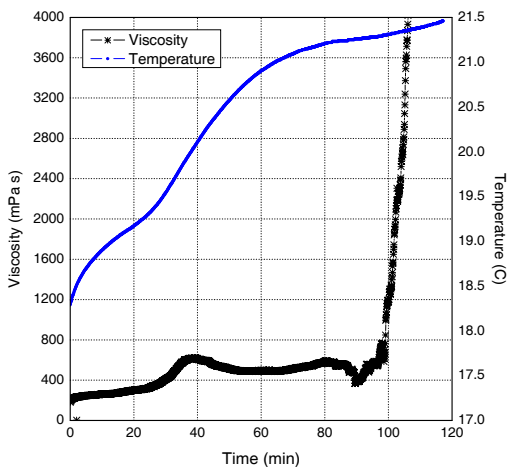


그림 4. 배합#3의 시간경과에 따른 점도변화 그림 5. 규산계 가소성 그라우트의 시간경과에 따른 점도변화

반면에, 그림 5에 나타난 바와 같이 규산계 가소성 그라우트의 점도 변화는 그림 4의 #3 보다는 가소성 점도가 전체적으로 높았으나 그 유지시간은 비슷한 수준으로 지연되고 있음을 알 수 있었으며, 이에 따라 현재 사용되고 있는 규산소다계 가소성 그라우트의 경우는 지하수가 많을 경우 유실가능성이 다소 있음을 확인할 수 있었다.

4.2 일축압축강도

표 4의 배합에 의한 가소성 그라우트 호모겔의 1일, 7일 및 28일 일축압축강도를 표 5에 나타내었다. 압축강도 측정결과를 볼 때 본 연구에서 배합한 가소성 그라우트 호모겔의 일축압축강도는 전반적으로 배면충전이나 공동채움의 목적에 적합한 수준의 강도(15kg/cm² 정도)를 가지고 있음을 알 수 있었다. 예상할 수 있는 바와 같이 시멘트의 배합량이 늘어남에 따라 최종강도는 증대되는 경향을 나타내었으며 한편, β제를 포함하고 있는 #1과 그렇지 않은 #4를 비교하면 초기강도에 있어서 β제를 포함하는 배합의 초기강도가 상대적으로 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 배합한 가소성 그라우트에 있어서 조강성의 발현을 위해서 β제의 적정량 사용은 유리한 것으로 판단되었다.

표 5. 신규 가소성 그라우트 겔의 일축압축강도

배합 No.	일축압축강도(kg/cm ²)		
	1일	7일	28일
#1	6.2	10.3	18.6
#2	5.8	9.8	18.3
#3	5.9	9.7	17.8
#4	4.5	8.5	16.9
#5	5.1	8.3	15.3
#6	7.3	11.4	21.9
#7	7.4	11.3	21.4

5. 가소성 그라우트 겔의 내구성

본 연구에서 제조한 가소성 그라우트제의 장기적인 내구성을 확인하기 위하여 28일간 양생된 배합 #1의 호모겔 공시체 및 기존의 규산계 가소성 그라우트 호모겔을 각각 180일간 정수중에 방치하고 방치 전후의 일축압축강도를 측정하고, 또 공시체의 외관을 비교 관찰하였다(표 6 및 그림 6).

표 6. 일축압축강도의 변화 (180일간 수침 기준)

배합 No.	일축압축강도(kg/cm ²)	
	방치전	방치후
#1	18.6	18.7
규산계	19.4	18.1



그림 6. 그라우트 겔의 형상변화(180일 수침 기준)

표 6에 나타낸 바와 같이 본 연구에서 배합한 가소성 그라우트의 겔은 180일간의 수침시 강도열화가 나타나지 않은 반면, 기존의 규산계 가소성 그라우트 겔의 경우는 약 6~7% 정도의 강도열화가 발생됨을 확인하였으며, 이러한 사실은 그림 6에 나타낸 바와 같이 육안 관찰을 통해서도 쉽게 확인할 수 있었다. 이러한 이유는 규산계 가소성 그라우트재의 경우 경화제인 규산소다에 포함되어 있는 알칼리 성분의 용탈에 기인한 것으로 생각되며 이전의 연구에 의해 개발된 항구성 그라우트재(류동성 등, 2004)인 실리카 콜로이드를 주경화제로 사용하는 가소성 재료인 경우에는 용탈물질이 포함되어 있지 않기 때문에 상대적으로 내구성이 우수한 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 실리카 콜로이드를 주경화제로 사용하고 기능성 첨가제로서 α 제, β 제 등을 배합하여 얻어지는 가소성 그라우트재를 제조하여 그 공학적 특성을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) α 제의 적정양 첨가(전체주입재중 0.1중량% 정도)를 통해 가소성 유지시간을 30~40분대의 바람직한 수준의 가소성 유지시간과 점도로 원활히 조절할 수 있음을 알 수 있었다.
- (2) β 제의 적정양 첨가(전체 주입재중 1중량% 정도)로 가소성 그라우트의 조강성이 발현됨을 확인하였다.
- (3) 항구성 재료인 실리카 콜로이드를 주경화제로 사용하면, 시간경과에 따른 그라우트 겔의 강도열화가 기존의 규산소다계 가소성 그라우트 겔에 비해 훨씬 적어 내구성 및 장기안정성이 유리함을 확인할 수 있었다.
- (4) 상기의 결과 등을 통해 본 연구에 의해 개발된 가소성 그라우트재는 가소성 특성, 강도 및 내구성 등의 품질이 우수하여 쉘드 터널 공극의 동시주입용 충전재와, 지반의 공동충진재 등으로 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (과제명 : 시공장비(기계화시공) 국산화를 위한 핵심요소 기술개발. 과제번호 : C 014A1010001-04A0201-00150)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