



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

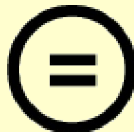
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

무기계 가소성 그라우트의 최적배합비
산정에 관한 연구



2010년 2월

부경대학교 대학원

토목공학과

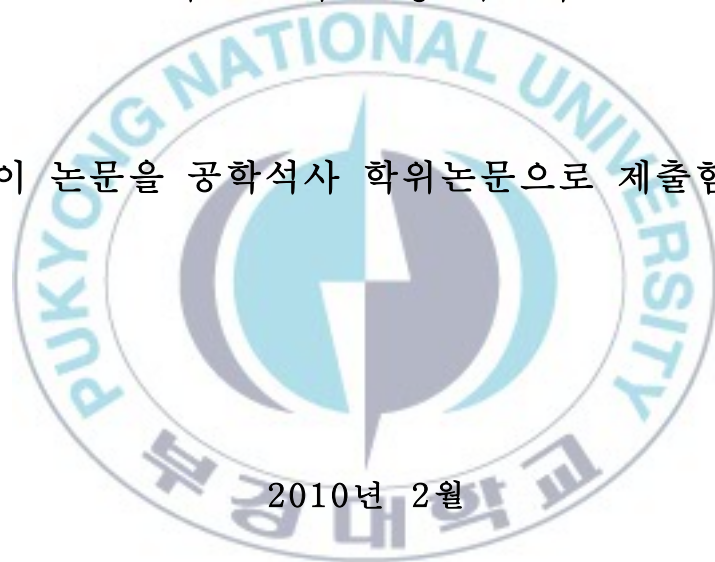
성민정

공 학 석 사 학 위 논 문

무기계 가소성 그라우트의 최적배합비
산정에 관한 연구

지도교수 정 두 회

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2010년 2월

부경대학교 대학원

토 목 공 학 과

성 민 정

목 차

	page
표 목 차	iii
그림 목 차	iv
Abstract	vi
제 1 장 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구내용 및 방법	3
제 2 장 무기계 가소성 그라우트의 특성 및 반응 메카니즘	4
2.1 가소성 그라우트의 특징	4
2.2 무기계 가소성 그라우트의 반응 메카니즘	6
2.2.1 화학반응 메카니즘	6
2.3 시료의 배합비	8
제 3 장 시험방법	11
3.1 일축압축강도	11
3.2 체적 변화성	12
3.3 모형주입장치에 의한 수중몰드 제작 및 일축압축강도 측정	12
3.4 혼합재료에 따른 점도시험 실시	13
제 4 장 시험결과 및 분석	15
4.1 일축압축강도	15
4.2 체적 변화성	19

4.3 모형주입장치에 의한 수중몰드 제작 및 일축압축강도 측정	23
4.4 혼합재료에 따른 점도 시험 및 일축압축강도 측정	25
4.4.1 무기계 6호의 점도시험	25
4.4.2 무기계 가소성 그라우트의 현장 적용성 확보	27
4.4.3 혼합재료에 따른 점도시험 결과	29
4.4.4 일축압축강도 측정 결과	36
4.4.5 최적배합비 산정	40
제 5 장 결 론	42
참 고 문 헌	43



표 목차

표 2.1 기존 가소성 그라우트	6
표 2.2 무기계 가소성 그라우트(무기계6호)의 재료특성 및 표준배합비	9
표 2.3 국내(규산계 그라우트) 뒷채움재 배합비	10
표 3.1 규산계 그라우트의 배합비(공시체 18개 제작)	13
표 4.1 국내· 외 강도기준 및 가소성 그라우트 강도	16
표 4.2 국내(규산계 그라우트) 뒷채움재 배합비	18
표 4.3 체적 감소율(%)	23
표 4.4 A, B 터널의 세그먼트 조립시간	28
표 4.5 B액의 점도 기준	28
표 4.6 점도측정 결과	40
표 4.7 강도시험 결과	40
표 4.8 표준배합비	41

그 립 목 차

그림 2.1	가소성 그라우트의 겔화와 경화과정	5
그림 2.2	가소성 그라우트의 성상	5
그림 2.3	무기계 6호의 혼합재료	9
그림 3.1	모형 주입시스템	11
그림 3.2	강도시험용 몰드 제작(수중)	13
그림 3.3	디지털 진동형 점도계에 의한 점도측정 장면	14
그림 4.1	겔의 연속성	15
그림 4.2	채성형 시간에 따른 강도특성	16
그림 4.3	가소성 그라우트 강도시험 결과	17
그림 4.4	가소성 그라우트 장기강도시험 결과	17
그림 4.5	국내(규산계 그라우트) 뒷채움재 강도시험 결과	18
그림 4.6	1일 경과 후 체적 변화 (노건조)	19
그림 4.7	내구성 확인실험 (노건조)	20
그림 4.8	7일 경과 후 체적 변화 (기중)	21
그림 4.9	체적 변화성 확인실험 (기중양생)	22
그림 4.10	체적변화 (기중)	22
그림 4.11	재료분리 현상	24
그림 4.12	수중제작 시 강도시험 결과	24
그림 4.13	점도 측정 결과 (무기계-B액)	26
그림 4.14	점도 측정 결과 (기존 규산계-A액)	26
그림 4.15	선행터널에 대한 작업시간 분석 결과	27
그림 4.16	후행터널에 대한 작업시간 분석 결과	28
그림 4.17	점도시험 결과 (DA 9256)	29

그림 4.18 점도시험 결과(DGA 3)	30
그림 4.19 점도시험 결과(DGA 4)	30
그림 4.20 점도시험 결과(SA 101)	31
그림 4.21 점도시험 결과(SA 331)	31
그림 4.22 점도시험 결과(SA 358)	32
그림 4.23 점도시험 결과(SA 400)	32
그림 4.24 점도시험 결과(SA 3582)	33
그림 4.25 점도시험 결과(SA 3585)	33
그림 4.26 점도시험 결과(SA 3587)	34
그림 4.27 점도시험 결과(DA 54)	34
그림 4.28 점도시험 결과(DA 55)	35
그림 4.29 점도시험 결과(DA 901)	35
그림 4.30 점도시험 결과(DA 902)	36
그림 4.31 일축압축강도시험 결과(DGA 3,4)	36
그림 4.32 일축압축강도시험 결과(SA 101)	37
그림 4.33 일축압축강도시험 결과(SA 331, 358, 400)	37
그림 4.34 일축압축강도시험 결과(SA 3582, 3585, 3587)	38
그림 4.35 일축압축강도시험 결과(DA 54, 55)	38
그림 4.36 일축압축강도시험 결과(DA 901, 902)	39
그림 4.37 일축압축강도시험 결과(DA 9256)	39

Determination of Optimum Mix Proportion for Inorganic Thixotropic-Grout

MinJung Sung

*Department of Civil Engineering, Graduate School
Pukyong National University*

Abstract

This study aims to compare existing silica type grout, strength, volume changeability, material segregation and viscosity by developing shield TBM tail void co-injection thixotropic grout (inorganic 6). In strength test, inorganic thixotropic grout met all strength standards stipulated in the country and foreign countries, but silica type grout didn't meet them in all sites except for C site. As a result of volume change test, inorganic thixotropic grout's volume change was slight, compared to silica type grout. As a result of material segregation, there was a hardly material segregation in inorganic thixotropic grout, there was a material segregation in the top of silica type grout when silica reacts to water earlier. As a result of viscosity test, increase of B-liquid while in works requiring a long distance transfer like shield tunnel backfilling or in sites that works are progressed intermittently, some problems occurred. Strength and viscosity were measured, changing mixing proportion of A-liquid(cement+water) and B-liquid(scarlet+water+additive), kinds and the quantity of additives to secure property which meets strength and viscosity standards in relation to a long distance transfer of inorganic thixotropic grout. viscosity and strength were measured using many kinds of additives. As a result, DA 9256 of them met all viscosity and strength standards. This time, after separating DA 9256 into MG-A and MG-B, each additive that performance was improved, was added and then, the optimum mixing proportion was computed in order to suppress sedimentation of A-liquid.

제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 목적

경제성장과 산업발전에 따른 도시인구의 집중현상은 많은 도시문제를 유발하고 있으며, 그 중 대표적인 것이 교통문제이며 산업활동의 막대한 장애가 되고 있다. 이에 따라 대규모의 인력수송을 위한 도심지 철도 설치가 필요하여 용지면적의 부족으로 지하로 운행되는 철도가 등장하였다.

도심지의 지하철 굴착공사는 대부분 NATM 공법으로 시행하여 인접한 건축물이나 구조물에 직·간접적인 구조물의 훼손을 유발하였고, 공사 중 진동이나 소음으로 인한 민원을 유발하였으며, 열악한 환경으로 인하여 산업재해의 발생을 높였다.

그러나 쉘드터널공법은 일반 발파공법에 비해 소음 및 진동뿐만 아니라 굴착과 거의 동시에 터널 내부라이닝 시공이 가능하므로 굴착으로 인한 터널주변지반의 변형억제 효과가 우수하다고 할 수 있다.

그러나 이와 같은 쉘드공법의 장점에도 불구하고 쉘드터널 굴착시 발생되는 세그먼트와 주변지반의 공극(tail void)으로 인해 터널 상부 지표면의 침하가 발생하게 된다.

이와 같은 경우에 실행되는 것이 공동충전주입으로서, 가느다란 관을 통해 그라우트를 주입해서 공극을 충전한다. 이 경우 구조물에 주입구멍을 마련해서 그 배후에 있는 공극을 충전하는 공법을 일반적으로 ‘뒷채움주입’이라고 한다.

종래의 공동충전에 사용되어 온 시멘트를 주성분으로 하는 유동성이 큰 일액성 그라우트는 매우 장시간을 거쳐서 시멘트입자를 구성하고 있는 광물이 물과 반응해서 새로운 조직을 발달시키면서 점차 유연함을 상실해서 고결한다.

그러나, 일액성 그라우트는 유동성으로서 아직 굳어져 있지 않은 상태이기 때문에, 압송시나 충전시에 지반조건 특히 지하수의 영향을 받기 쉽고, 또 충전된 후에 있어서도 그라우트가 경화될 때까지 장시간을 요하기 때문에, 재료분리나 블리딩 현상을 일으키기 쉽다. 또, 단시간의 경화능력을 갖지 않기 때문에 한정주입이 불가능하여 목적으로 하는 공동을 확실하게 충전할 수 없다는 단점이 있다(정경환 등, 2008).

이 때문에 쉘드 공사에서 용수를 수반하는 사질지반의 붕락이나 초연약지반의 침하의 우려가 있는 경우에는 지반주입재에 사용되고 있는 LW가 응급적으로 사용되고 있었다. 그러나, 이 LW와 같은 물유리게 주입재는 사용량의 조절에 따라 순결에서 완결까지 응결시간, 즉 Gel-time을 자유롭게 조절할 수 있으며, 용액으로 되어있기 때문에 지반주입시 침투가 잘된다는 장점(김대만 등, 2006)은 있으나, 물유리가 강알칼리성이고, 용탈현상의 발생으로 수축이 심하고 재령경과에 따른 강도발현이 저조하여 6개월 이상의 장기강도가 필요한 공사등에는 사용하기 어렵다는 문제점을 가지고 있다(류동성 등, 2005).

이와 같은 문제점 때문에 최근 선진국에서는 여러 가지 재료가 개발되어 적용하고 있다. 그 중의 한가지로 물유리 대신에 일반 시멘트와 같이 수화반응에 의해 고결이 이루어지고 재령 시간이 경과할수록 강도발현이 이루어지는 무기질계 지반주입재로 사용하는 방법이 그 중의 하나이다(류용선, 2008).

이러한 주입재는 순수 무기질 재료를 사용하여, 기존의 물유리게 재료를 사용할 경우에 생기는 강도저하 및 내구성, 용탈의 문제를 해결하며 가소성을 가지게 된다.

본 연구에서는 기존 사용중인 규산계 그라우트의 문제점 해결을 목표로 하여 새로운 뒷채움 주입용 그라우트를 개발하고 기존 사용중인 규산계

그라우트와 강도, 체적 변화성, 수중에서의 재료분리 그리고 점도를 비교하여 시공성과 경제성을 갖춘 최적배합비를 도출하는 것이 목적이다.

1.2 연구내용 및 방법

본 연구의 목적을 이루기 위하여 연구한 내용은 다음과 같다.

섀드터널의 뒷채움 주입재로 충전의 목적에 적합하고 기존의 사용중인 규산계 그라우트의 문제점을 해결하기 위하여 무기계 가소제와 시멘트를 주성분으로 하는 무기계 가소성 그라우트(무기계 6호)를 개발하였다.

기존에 사용중인 규산계 그라우트와 무기계 6호의 공시체를 제작하여 일축압축강도를 측정하였다.

기존의 3개 현장에서 사용중인 규산계 그라우트의 배합비를 이용하여 무기계 6호와 노건조 및 기중양생을 통하여 체적 변화성을 측정하였다.

현장 주입성을 고려하여 개발한 모형주입장치를 사용하여 규산계 그라우트와 무기계 6호의 수중에서의 재료분리성을 관찰하였다.

현장 적용성을 고려하기 위하여 규산계 그라우트와 무기계 6호의 점도를 측정하였다.

제 2 장 무기계 가소성 그라우트의 특성 및 반응 메카니즘

2.1 가소성 그라우트의 특성

셀드 터널은 굴진시 필연적으로 발생하는 세그먼트와 배면지반 사이의 공극을 충전시킬 필요가 배면며, 공극을 최소화시키기 위해서는 동시주입이 바람직하고 이를 위해서는 기존의 규산계 그라우트재의 문제점을 보완할 수 있는 가소성 형태의 재료개발이 필수적이다. 또한 지반 내에서 자연적으로 생기거나 굴착적으로 인재의 동은 상부지반의 침하원인이 될 수 있으므로 동을 충전시킬 필요전시 있다.과거점을 이러한 동 또는 배면 충전의 목적으로 주입되는 주입재는 시멘트 밀크나 규산계의 그라우트를 주입하는 것이 대부분이었면지반 근래에 들어서는 주입효과 및 품질을 향상시키기 위하여 가소성 그라우트를 주입하는 추세이다.

가소성(혹은 요변성,thixotropic) 그라우트란 지반주입재의 한 종류로서 종래의 단순한 일액성의 시멘트 밀크 지반주입재 등과는 달리 주입시 완전히 경화하기 전에 일정시간 동안 일정수준의 점도와 강도를 유지함으로써 지하수에 의해 쉽게 희석, 유실이 되지 않음과 동시에 그림 2.1과 같이 일정시간 동안 가소성을 가져 일정수준의 가압에 의해 미세한 공간까지도 밀실하게 충전시킬 수 있고 그 이후에는 경화되기 시작하여 일정 수준이상의 강도를 발현하는 주입재를 말한다(정경환 등, 2008).

가소제로 규산소다를 사용한 그라우트의 경우 알칼리 용탈에 의해 시간 경과에 따라 내구성이 저하되는 문제점이 발생할 우려가 있으며, 염기성 황산알루미나 용액을 사용할 경우 소성 유지시간의 조절이 비교적 까다롭고 기타 특성에 있어서 전체적으로 원하는 수준에 이르지 못한다.

기존에 사용된 가소성 그라우트 재료는 표 2.1과 같이 분류할 수 있다.

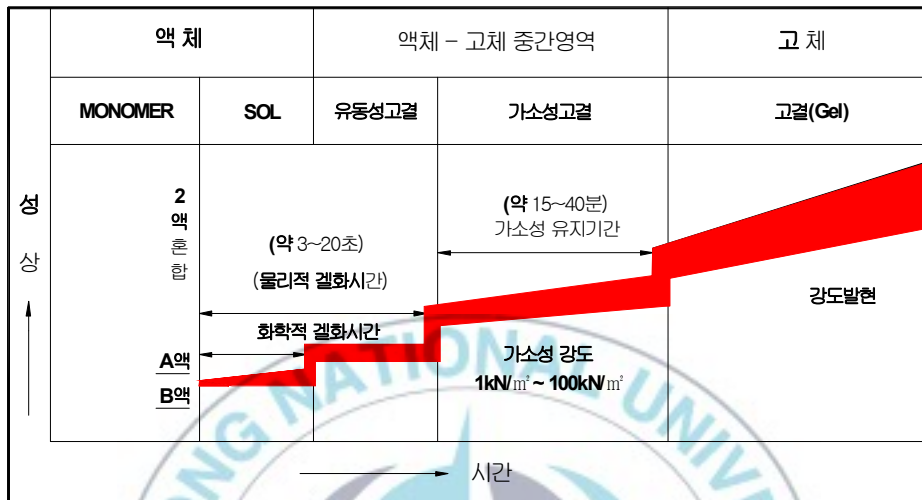


그림 2.1 가소성 그라우트의 겔 화와 경 화과정



그림 2.2 가소성 그라우트의 성상

표 2.1 기존 가소성 그라우트(실무 그라우팅 공법, 2003)

구분	규산계	알루미늄계	점토광물계	고분자계
가소제	규산소다	알루미늄 염	몬모릴로나이트	흡수성주지 벤토나이트
자유수 고정물질	함수 규산겔	수산화 알루미늄 겔	함수 점토겔	폴리머 흡수겔
주입방식	이액성	이액성	이액성	일액성
적용범위	쉴드주입	기존 구조물 배면의 뒷채움 주입,		

2.2 무기계 가소성 그라우트의 반응 메카니즘

본 연구에서 사용한 무기계 가소성 그라우트(무기계 6호)는 이액성 그라우트로서 A액은 시멘트, 물로 구성되어 있으며, B액은 스칼렛, 강도 발현제, 초기겔 형성제로 구성되어있다.

2.2.1 화학반응 메카니즘

본 연구의 무기계 가소성 그라우트는 산화철(Fe_2O_3)과 산화알루미나(Al_2O_3)의 성분비가 높은 스칼렛과 시멘트를 기반으로 하여 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 그라우트

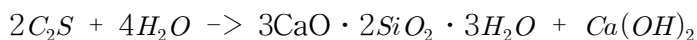
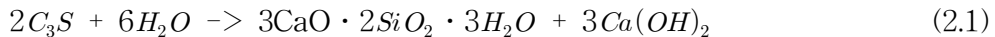
의 표면에는 지하수를 흡수하는 초기 겔이 형성되면서 지반의 함수비가 떨어져 토질성상이 개선되게 된다. 이때 무기질계 부산물을 구성하는 스칼렛의 산화알루미나와 혼합물의 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)와 석고의 황산칼슘($3CaSO_4$)과 수분(H_2O)의 작용에 의하여 가소성을 유지하는 시간 조절이 용이할 뿐만 아니라 초기 겔의 형성 시간을 단축시킬 수 있게 된다.

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

그리고 외력에 의해 형성된 초기 겔이 파괴된 이후에도 상기한 스칼렛의 산화알루미나와, 알루미늄 규소화합물과 혼합물의 작용에 의하여 가소성을 가지게 되므로 겔의 재형성이 가능하게 된다.

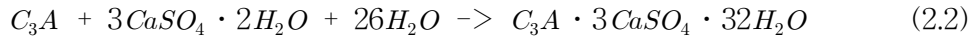
상기와 같이 응결단계를 거친 단기 재령기간부터 중장기 재령기간까지는 그라우트를 구성하는 화합물과 지하수 간의 수화반응에 의해 그라우트의 입자가 조밀하게 채워지면서 경화되어 강도가 증강됨으로써 지반의 공동이나 갈라진 틈 등에는 단단하게 굳어지는 경화체가 형성되는 경화단계를 거치게 된다.

이때 아래의 화학반응을 통하여 수화반응에 의한 수화물인 수산화칼슘으로부터 용출되는 칼슘이온(Ca^{+})에 의한 토양 입자의 응집화 및 단립화가 이루어지게 된다.



그리고 아래의 화학반응식과 같이 침상결정을 갖는 수화물인 에트링자

이트의 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 중장기 재령기간부터 장기 재령기간까지는 아래의 화학반응을 통하여 수화반응으로 생성된 수산화칼슘과 실리카(SiO_2)와 산화알루미나는 상온에서 서서히 반응하여 불용성 화합물인 C-S-H겔을 생성하는 포졸란 반응을 함에 따라서, C-S-H겔이 경화체의 공극을 기밀하게 밀폐시킴으로써 경화체의 조직을 더욱 치밀하게 한다.



따라서 본 연구의 무기계 가소성 그라우트를 쉘드 터널 굴진시 테일보이드가 발생함과 동시에 주입하여 1차적으로 강도가 증강된 경화체는 상기의 작용을 통해 다시 2차적으로 강도가 증가하게 되는 것이다. 또한, 제1액을 구성하는 무기계 부산물의 스칼렛에는 장기강도를 향상시키는 기능을 하는 산화철이 풍부하게 함유되어 있으므로 2차적으로 강도가 증강된 경화체의 강도를 더욱 증가시킬 수 있게 된다.

2.3 시료의 배합비

본 연구에서는 무기계 가소성 그라우트의 최적배합비를 산정하기 위해

사용된 무기계 6호의 배합비는 표 2.2와 같으며, 그림 2.3과 같이 무기질 계 부산물인 스칼렛을 주재료로 사용하며 초기 겔 형성재와 강도발현재를 함께 사용한다. 규산계 그라우트는 표 2.3과 같이 국내에서 적용한 현장배합비(1m³)를 이용하여 제작하였다.



그림 2.3 무기계 6호의 혼합재료

표 2.2 무기계 가소성 그라우트(무기계6호)의 재료특성 및 표준배합비

구분	A액		B액	
	시멘트	물	무기계(6호)	물
역할	그라우트 겔의 모체		그라우트 겔의 모체 초기강도 및 장기 내구성 발현 가소성 유지시간 조정	
표준배합비	50g	50g	50g	50g
배합비 (1m ³)	386kg	386kg	386g	386kg

표 2.3 국내(규산계 그라우트) 뒤택움재 배합비

구 분		A 현장	B 현장	C 현장
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

제 3 장 시험방법

3.1 일축압축강도

일축압축시험은 KS F2405(한국표준협회, 2005)에 의하여 실시하였다. 일축강도 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.

정량배합에 의한 제작방법은 A액과, B액을 각각 제작하여 믹서기를 이용하여 A액과 B액을 혼합시켜서 $\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ 의 시험편을 제작하여 일축 압축강도를 측정하였다.

모형 주입시스템을 통한 제작은 그림 3.1과 같이 모형 주입장치를 이용하여 $\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ 의 시험편을 제작하여 일축압축강도를 측정하였다.

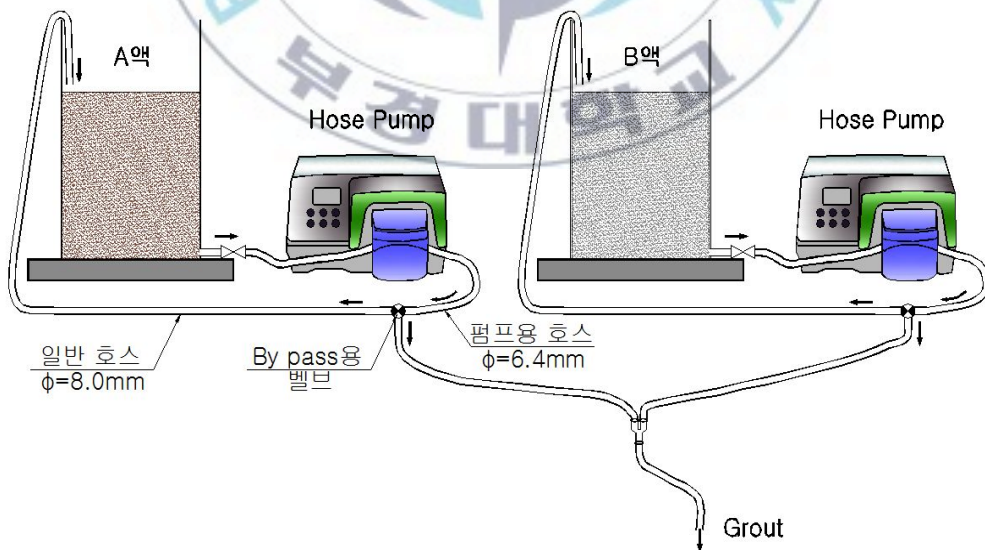


그림 3.1 모형 주입시스템

3.2 체적 변화성

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

현재 시공 중인 국내 3개 현장에서 사용되고 있는 규산계 그라우트와 가소성 그라우트의 체적 변화성 확인을 위해서 기중양생 및 노건조를 통한 체적 변형량을 측정하였다. 체적 변화성 확인 실험의 경우 가소성 그라우트와 3개 현장의 현장 배합비에 따른 시험편을 제작하였다.

3.3 모형주입장치에 의한 수중몰드 제작 및 일축압축강도 측정

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

이와 같이 쉘드 TBM 공법에서 뒷채움 주입시 그라우트의 시공성 및 품질에 대한 안정성을 확인할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 모형주입장치를 이용하여 그림 3.2와 같이 무기계 그라우트를 수중에서 제작하였으며, 기존의 쉘드 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 3.1과 같다.

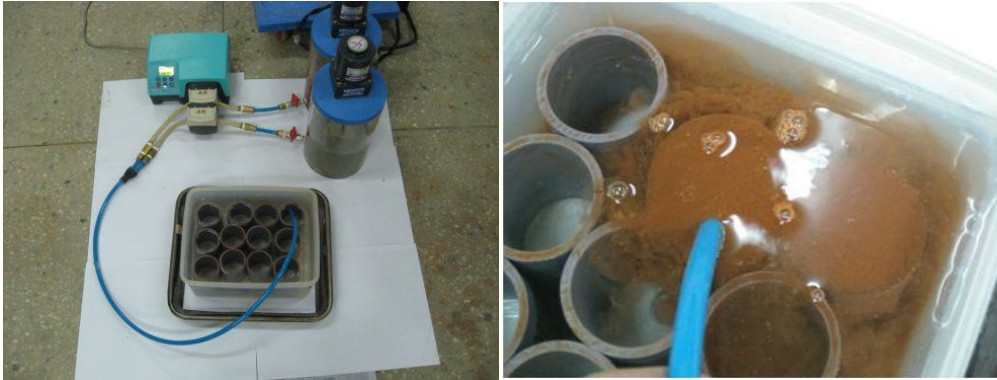


그림 3.2 강도시험용 몰드 제작(수중)

표 3.1 규산계 그라우트의 배합비(공시체 18개 제작)

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

3.4 혼합재료에 따른 점도시험 실시

무기계 6호를 사용하여 충전성 확인을 위한 모형실험 중 B액의 점도 상승이 높아 쉘터널 뒷채움과 같이 장거리 이송이 필요한 작업이나, 작업이 단속적으로 이루어지는 현장에서는 다소 문제를 일으킬 가능성을 가지고 있는 것으로 나타났다.

그림 3.3은 점도측정을 위한 디지털 점도측정 장치이며, 현장적용성이 뛰어난 최적배합비를 산정하기 위하여 각각의 혼합재료에 따라서 점도시험을 실시하였다.

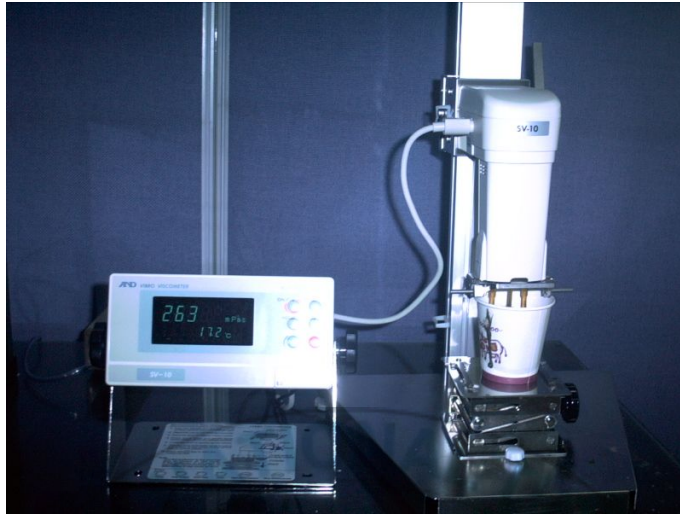


그림 3.3 디지털 진동형 점도계에 의한 점도측정 장면



제 4 장 시험결과 및 분석

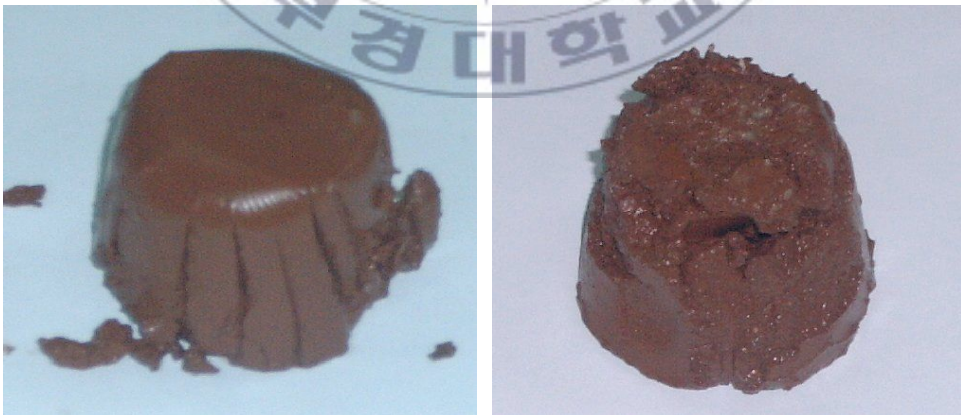
4.1 일축압축강도

무기계 그라우트(무기계 6호)의 경우 기존 가소성 그라우트의 문제점들을 보완하는 특성을 나타낸다.

초기겔 시간의 단축(5~10초)으로 수중에서의 겔 형성이 용이하여 지하수에 의한 재료분리 현상이 현저히 감소하였으며, 균질한 겔을 형성하였다. 그림 4.1에서와 같이 무기계 그라우트는 겔의 재형성은 물론 초기겔 파괴에 따른 강도특성에도 안정적인 경향을 나타내었다.

초기겔 파괴에 따른 강도특성을 파악하기 위해 겔화된 그라우트를 시간별로 파괴 후 재 성형하여 일축압축 시험을 하였으며 그림 4.2에서 보는 바와 같이 초기겔 파괴에 따른 강도저하는 나타나지 않는다.

국내 및 국외(일본)의 쉘터터널 배면 충전용 그라우트의 강도기준은 표 4.1과 같이 평균 초기강도 100kN/m^2 , 장기강도 $3,000\text{kN/m}^2$ 의 범위에 있다(일본터널공학회, 1996, 서울특별시, 2006).



a) 초기겔 형성 시

b) 초기겔 파괴 후 겔형성

그림 4.1 겔의 연속성

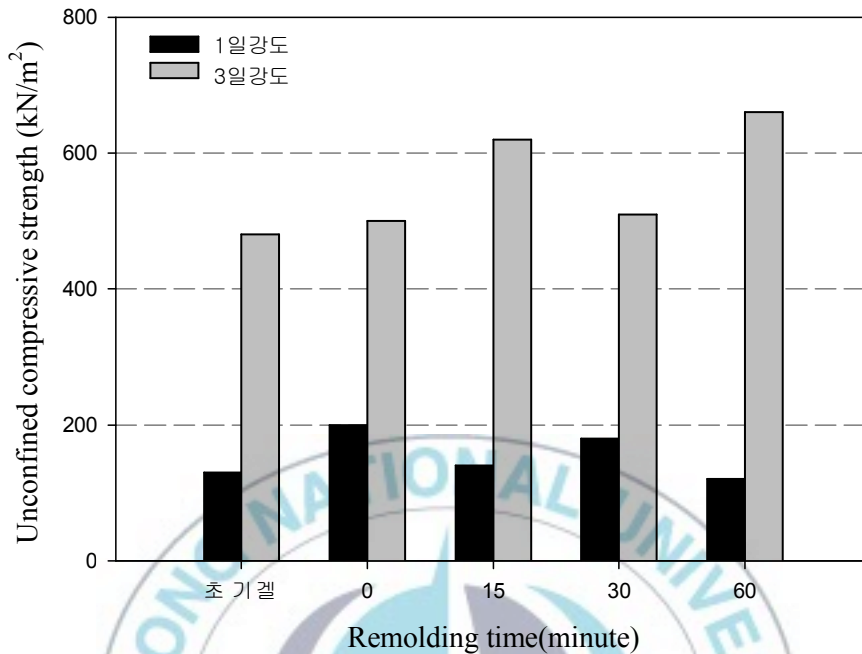


그림 4.2 재성형 시간에 따른 강도특성

일축압축시험 결과 표 4.1과 그림 4.3에 나타난 바와 같이 정량배합 및 모형 주입시스템을 통한 실험 결과 모두 기존 국내 · 외 강도기준을 상회하는 것으로 나타났으며, 또한 그림 4.4와 같이 기중 및 수중양생에 따른 장기강도(180일)를 측정하였다.

표 4.1 국내 · 외 강도기준(일본터널공학회, 1996; 서울특별시, 2006)

구 분		1시간	1일	28일
서울지하철 (00공구)		100~150 (kN/m ²)	500 (kN/m ²)	3,000 (kN/m ²)
TAC (일본)		100~150 (kN/m ²)	-	2,500 (kN/m ²)
가소성 그라우트	정량배합	296 (kN/m ²)	1,504 (kN/m ²)	5,158 (kN/m ²)
	모형주입	125 (kN/m ²)	1,121 (kN/m ²)	4,040 (kN/m ²)

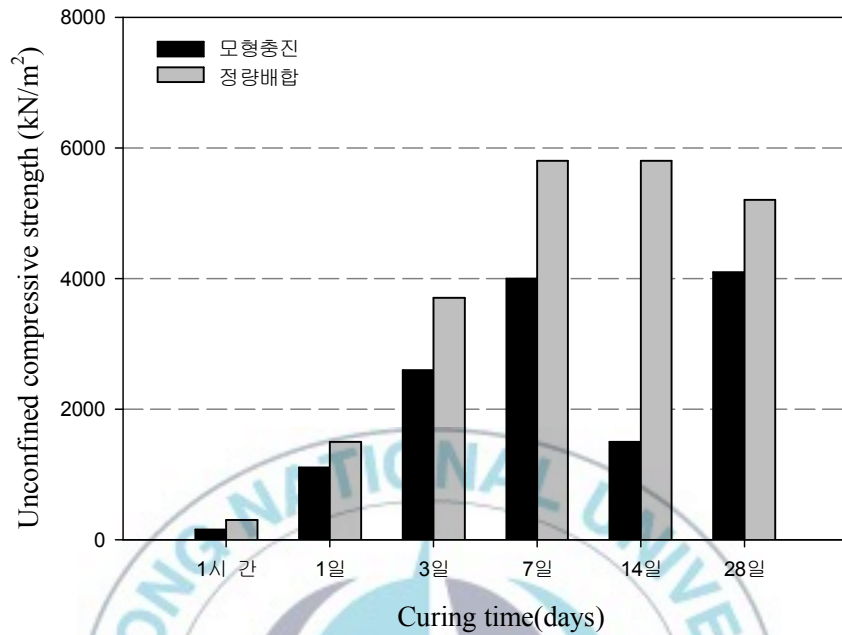


그림 4.3 가소성 그라우트 강도시험 결과

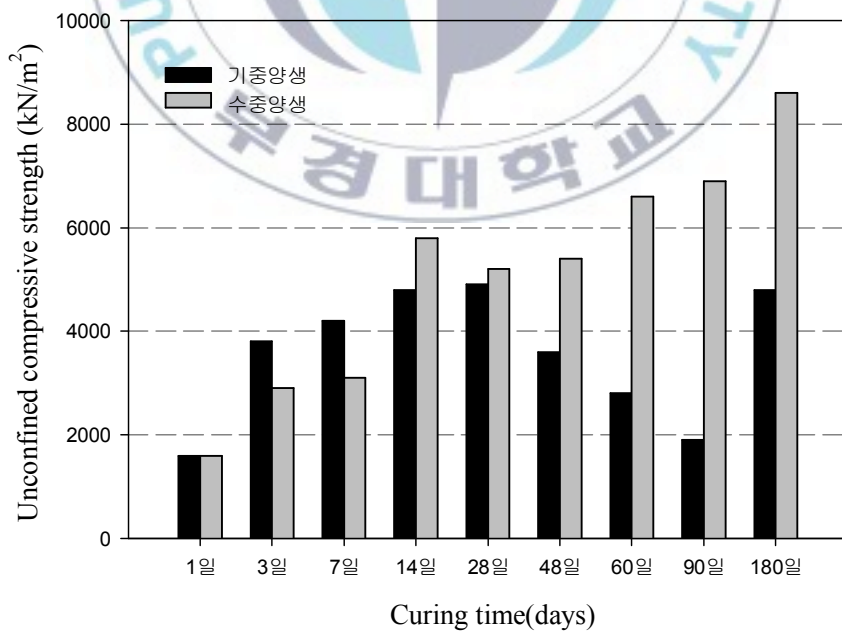


그림 4.4 가소성 그라우트 장기강도시험 결과

현재 국내 월드터널에서 사용되고 있는 규산계 그라우트 뒷채움재의 강도 확인을 위하여 현장 배합비에 따른 시험편 제작 및 강도시험을 진행하였다. 시험 결과 C현장의 경우 28일 강도가 $3,000\text{kN/m}^2$ 를 상회하는 것으로 나타났으나, A, B현장의 경우 $3,000\text{kN/m}^2$ 를 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

표 4.2 국내(규산계 그라우트) 뒷채움재 배합비

구 분		A 현장	B 현장	C 현장
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

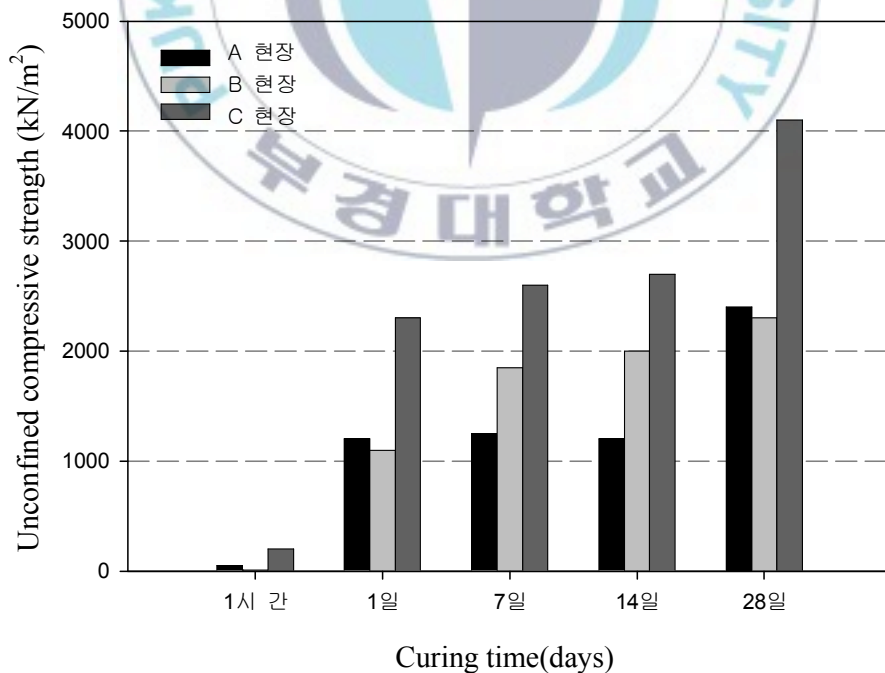


그림 4.5 국내(규산계 그라우트) 뒷채움재 강도시험 결과

4.2 체적 변화성

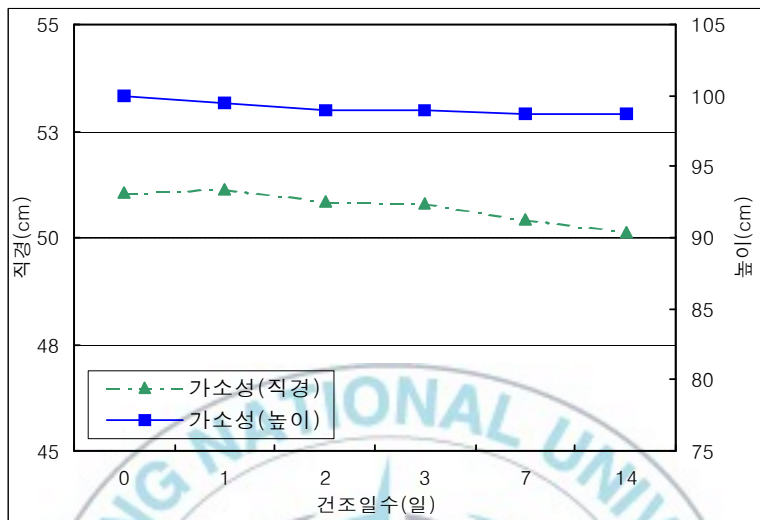
현재 시공 중인 국내 3개 현장에서 사용되고 있는 규산계 그라우트와 가소성 그라우트의 체적 변화성 확인을 위해서 기중양생 및 노건조를 통한 체적 변화량을 측정하였다.

체적 변화성 확인 실험의 경우 가소성 그라우트와 3개 현장의 현장 배합비에 따른 시험편을 제작하였다. 노건조(100~105℃)와 기중양생에 따른 체적 변화량 측정결과는 그림 4.6~그림 4.10과 같다.

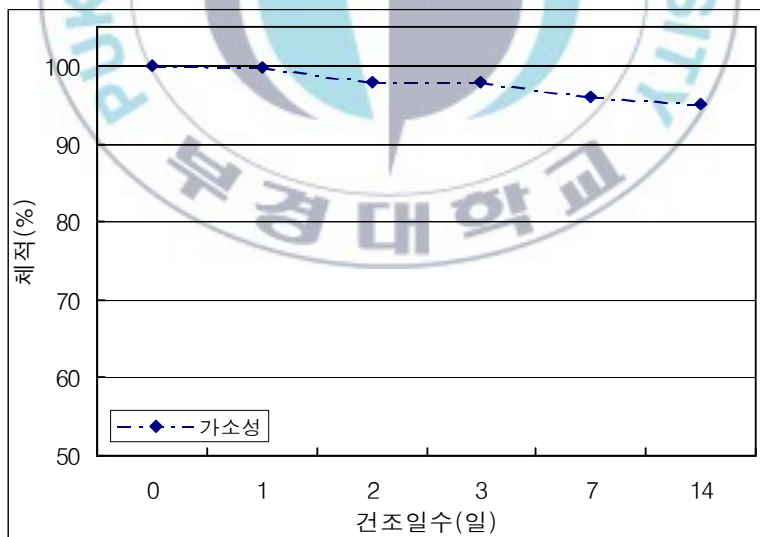


그림 4.6 1일 경과 후 체적 변화 (노건조)

노건조에 의한 체적변화량 측정의 경우 24시간 경과 후 가소성 그라우트를 제외한 기존 규산계 그라우트의 경우 파손이 심해 측정이 불가능한 상태가 되었으며, 기중양생의 경우 7일 경과 후 규산계 그라우트의 측정이 불가능 하였다.



a) 직경 및 높이변화



b) 체적 변화

그림 4.7 내구성 확인실험 (노건조)

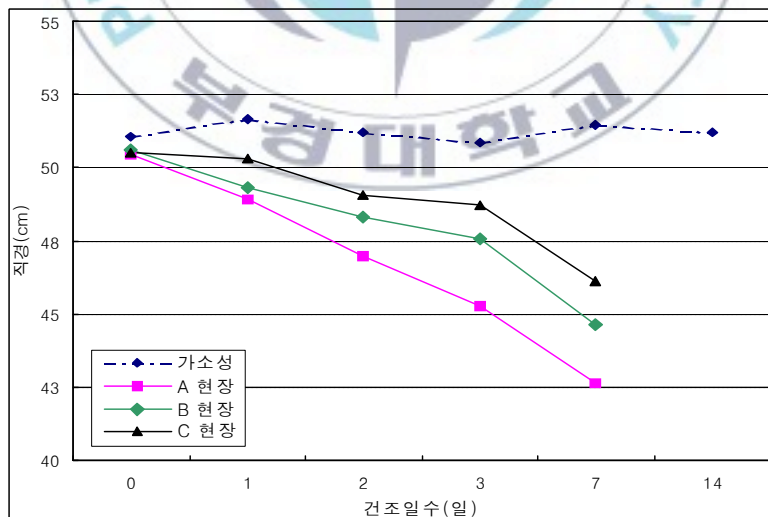
기중 건조한 가소성 그라우트의 경우 체적이 증가하였다가 감소하는 형상을 보이는데, 이는 측정오차에 의한 것으로 보여 진다.



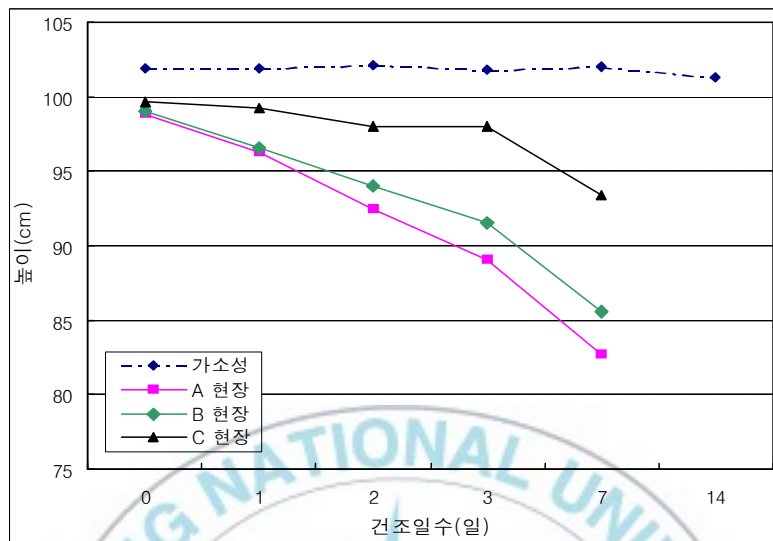
(a) 규산계 그라우트

(b) 가소성 그라우트

그림 4.8 7일 경과 후 체적 변화 (기중)



a) 직경 변화



b) 높이 변화

그림 4.9 체적 변화성 확인실험 (기중양생)

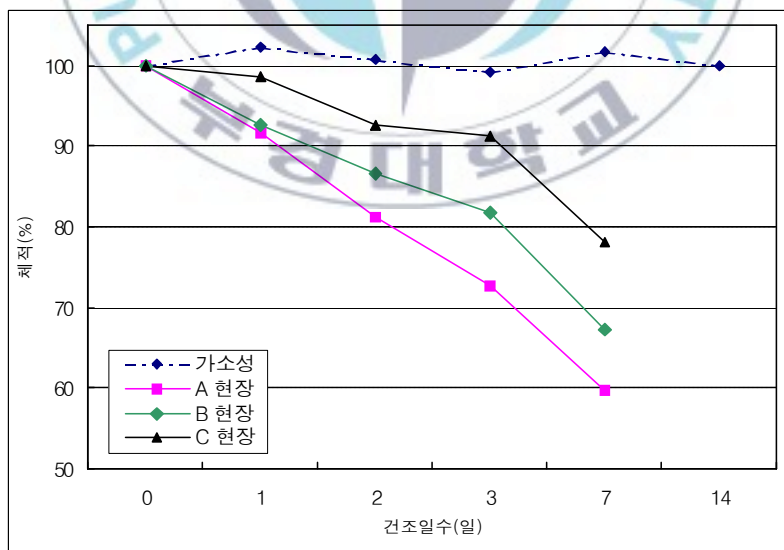


그림 4.10 체적변화 (기중)

표 4.3 체적 감소율(%)

구 분	기중양생				노건조
	A 현 장	B 현 장	C 현 장	가소성 그라우트	가소성 그라우트
직 경	15.5	11.8	8.7	0.4	0.8
높 이	16.3	13.5	6.3	0.6	0.6

기중양생과 노건조를 통한 체적 변형량 측정결과 표 4.3과 같이 가소성 그라우트는 기존 상용화 되어있는 규산계 그라우트와 비교할 때 체적 감소율이 경미한 것으로 나타났다.

4.3 모형주입장치에 의한 수중몰드 제작 및 일축압축강도 측정

샬드 TBM 공법에서 뒷채움 주입시 그라우트의 시공성 및 품질에 대한 안정성을 확인할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 모형주입장치를 이용하여 그림 3.2와같이 무기계 그라우트를 수중에서 제작하였으며, 기존 샬드 TBM 현장에서 적용된 규산계 그라우트의 배합비를 고려하여 동일한 방식으로 수중 제작하여 비교하였다.

모형주입장치를 이용할 경우 1회 배합 시 18개의 공시체를 제작하였으며 그림 4.11은 기존 규산계 그라우트와 무기계 그라우트의 재료분리 현상을 확인하기위해 수중에서의 강도 시험용 시편을 제작한 후의 모습이다. 무기계 가소성 그라우트의 경우 재료분리 현상이 거의 없는 것에 비해 기존 규산계 그라우트는 A, B액이 수중에서 혼합되는 과정에서 규산이 물과 먼저 반응하여 상부에 재료분리 현상이 크게 나타나는 것을 알

수 있다.

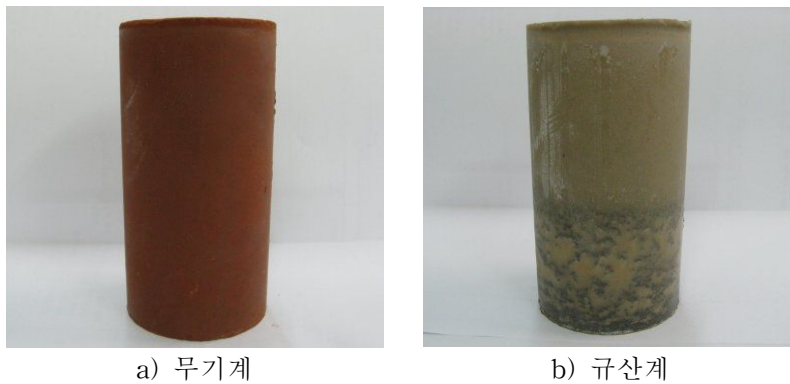


그림 4.11 재료분리 현상

그림 4.12는 수중에서 제작한 무기계 그라우트와 기존 규산계 그라우트의 강도 시험 결과로 규산계 그라우트의 경우 초기강도인 1시간 강도는 측정이 불가능 하였다. 기존 규산계 그라우트의 경우 지하수나 대수층이 있는 경우 재료분리가 심해 강도발현에서 문제가 발생하는 것으로 나타났다.

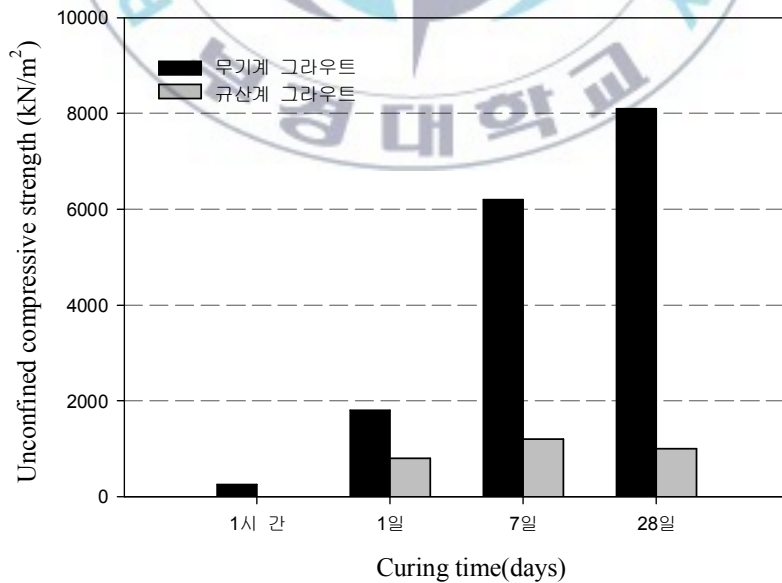


그림 4.12 수중제작 시 강도시험 결과

4.4 혼합재료에 따른 점도 시험 및 일축압축강도 측정

4.4.1 무기계 6호의 점도시험

무기계 6호를 사용하는 무기계 가소성 그라우트는 내구성 및 강도 측면에서 기존 규산계 그라우트에 비해 상당히 우월한 물성을 가지고 있는 것을 앞 절에서 확인하였다. 그러나 충전성 확인을 위한 모형실험 중 B액의 점도 상승이 높아 20분 이내의 작업에서는 최적효과를 나타낼 수 있으나 쉘드터널 뒷채움과 같이 장거리 이송이 필요한 작업이나, 작업이 단속적으로 이루어지는 현장에서는 다소 문제를 일으킬 가능성을 가지고 있는 것으로 나타났다.

상온에서 물의 점도는 약 1cp 정도이고, 물:시멘트비(7:3)의 시멘트 밀크 절대점도는 5~10cp 정도이며, 조청이나 고분자 용액과 같이 점성이 큰 물질의 경우에는 수천~수십만 cp 에 이른다(윤현돈 등, 2005). 디지털 진동형 점도계의 측정 가능한 상한 값이 12,000cp이며, 12,000cp는 현장에서 쉘드 TMB 뒷채움을 위한 시공시 주입관을 폐색시켜 B액의 이송이 불가능한 상태의 점도이다.

그림 4.13은 B액의 점도 측정 결과이다. 무기계 6호의 표준 배합비에 의한 배합이 이루어진 후 B액을 구성하는 재료들이 물과 반응하여 2,000cp이하의 점도를 약 23분가량 유지하다가 시간이 경과함에 따라 급격히 점도 증가가 진행되어 30분이 경과하기 전에 12,000cp를 타나내고 있다.

그림 4.14는 현재 이송 및 시공이 원활한 기존 현장의 규산계 그라우트 점도를 측정한 결과로서 30분이 경과 하여도 전체적으로 100cp이하의 점도를 유지하고 있다.

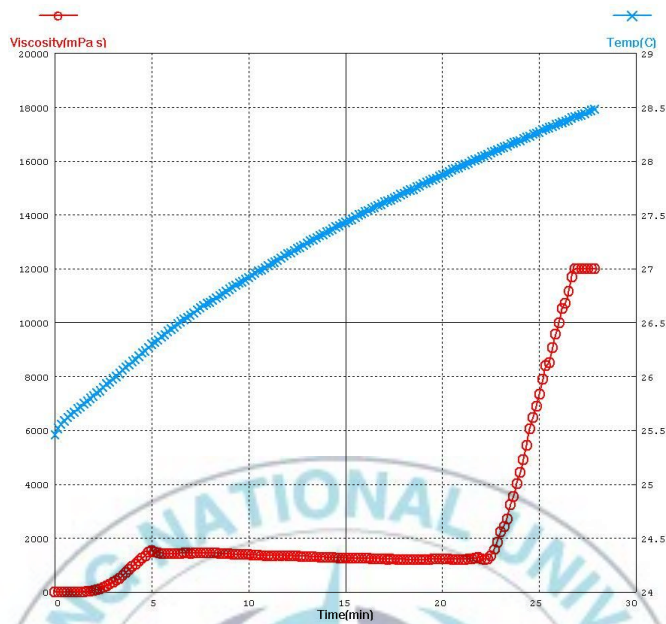


그림 4.13 점도 측정 결과 (무기계-B액)

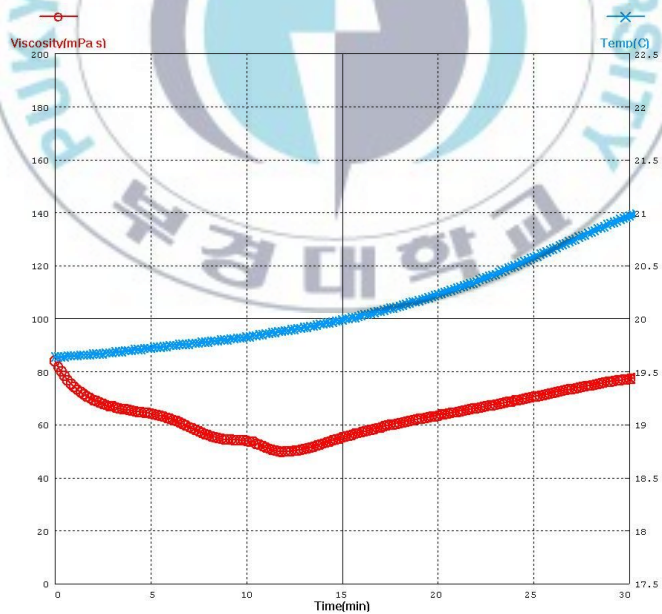


그림 4.14 점도 측정 결과 (기존 규산계-A액)

4.4.2 무기계 가소성 그라우트의 현장 적용성 확보

셴터널 뒹채움을 위한 가소성 그라우트의 현장 적용성을 확보하기 위해서는 A, B액이 지상 플랜트에서 지하의 주입공까지 장거리 이송을 하는 동안 주입관을 폐색시키지 않고 적정한 주입압력 하에서 유동이 가능한 가사시간이 확보되어야 한다. 국내 대구경 셴터널 공사현장에서는 일정 수준의 가압에 의해 가소성 그라우트가 유동할 수 있는 점도의 범위를 300~1,500cp, 그리고 가사시간은 100분으로 규정한 사례가 있다(윤현돈 등, 2005).

현재 국내에서 시공되고 있는 직경 7.8m 셴터널 현장의 작업시간을 분석해 보면 그림 4.15~그림 4.16과 같이 선행터널의 경우 조립시간의 평균시간과 표준편차의 합이 107.28분, 후행터널의 경우 세그먼트 조립에 속련도가 높아져 83.70분으로 나타나고 있다.

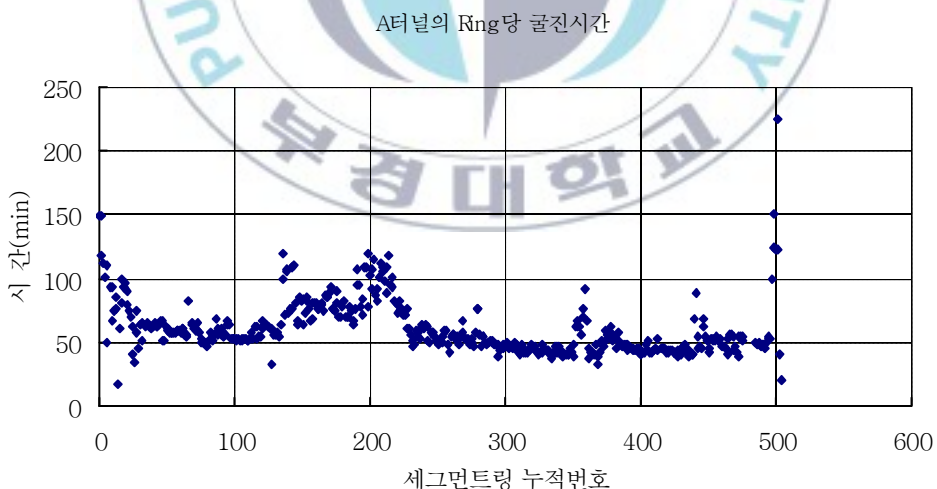


그림 4.15 선행터널(A터널)에 대한 작업시간 분석 결과

B터널의 Ring당 조립시간

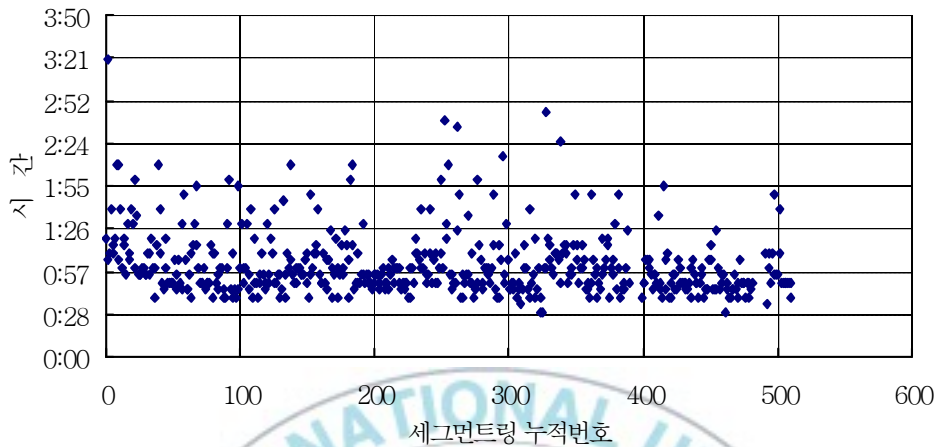


그림 4.16 후행터널(B터널)에 대한 작업시간 분석 결과

표 4.4 선행터널과 후행터널의 세그먼트 조립시간

구 분	평균(min)	표준편차(min)
선행터널(A터널)	77.79	29.49
후행터널(B터널)	61.86	21.84

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

표 4.5 B액의 점도 기준

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

4.4.3 혼합재료에 따른 점도시험

그라우트 물성은 크게 초기 켈형성, 압송에 용이한 점도(2,000cp 이하) 유지, 초기(1시간)강도 발현($100\text{kN}/\text{m}^2$ 이상) 및 장기(28일)강도 발현($3,000\text{kN}/\text{m}^2$ 이상) 등이 주요 내용이다. 최초 가소재인 무기계 6호를 사용한 가소성 그라우트의 경우 켈형성 및 강도기준은 만족하였으나, B액 자체의 점도 상승이 시공상의 문제요인으로 나타났고 이를 해결하기 위해 혼합재료에 따라 그림 4.17~그림 4.30과 같이 Case별로 점도시험을 실시하였다.

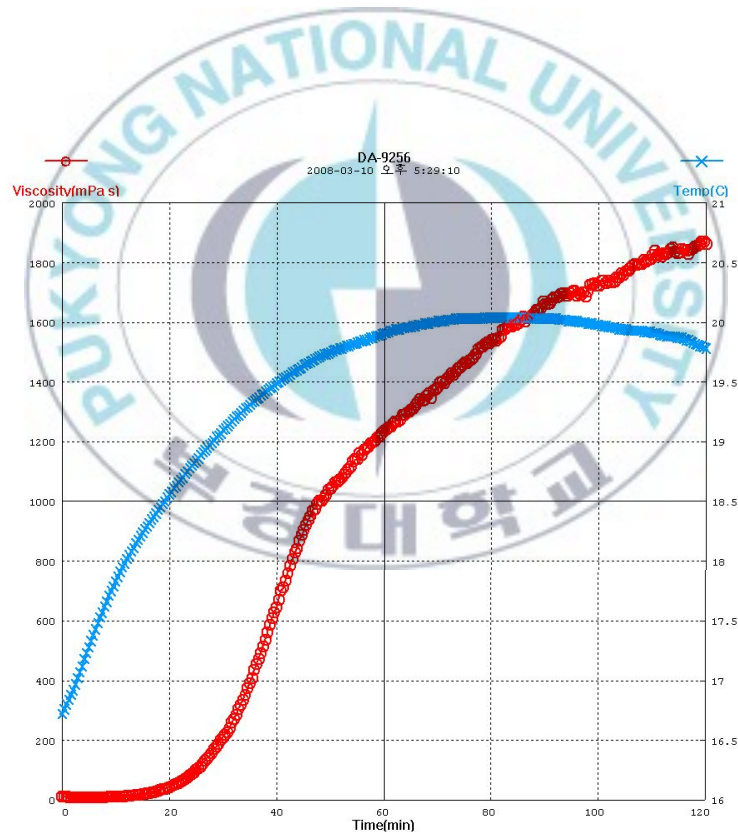


그림 4.17 점도시험 결과 (DA 9256)

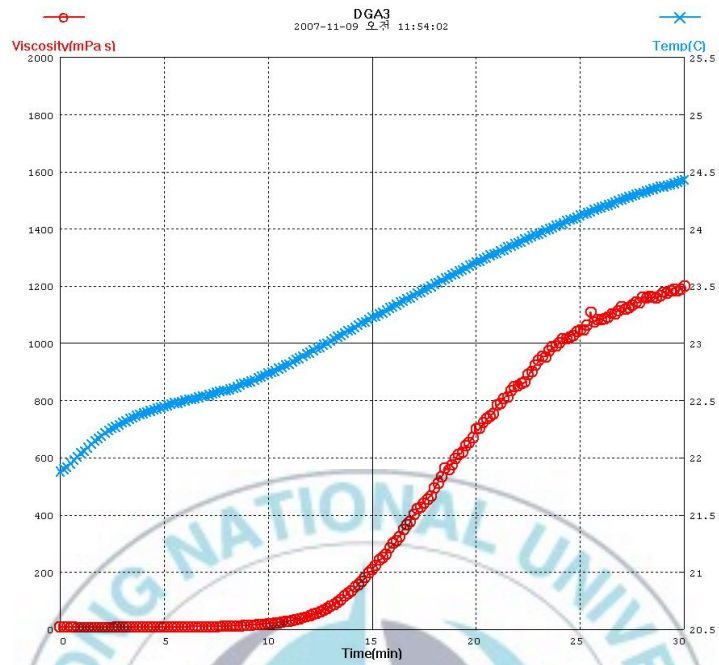


그림 4.18 점도시험 결과(DGA 3)

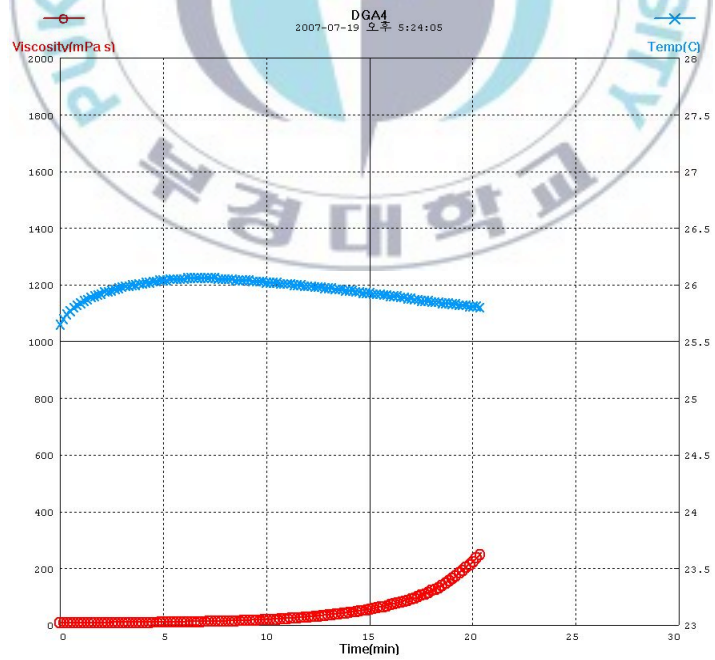


그림 4.19 점도시험 결과(DGA 4)

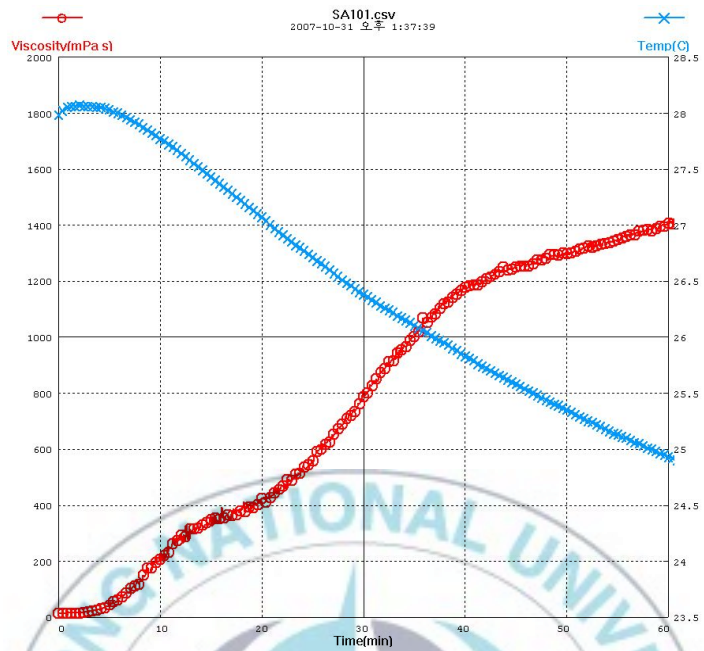


그림 4.20 점도시험 결과(SA 101)

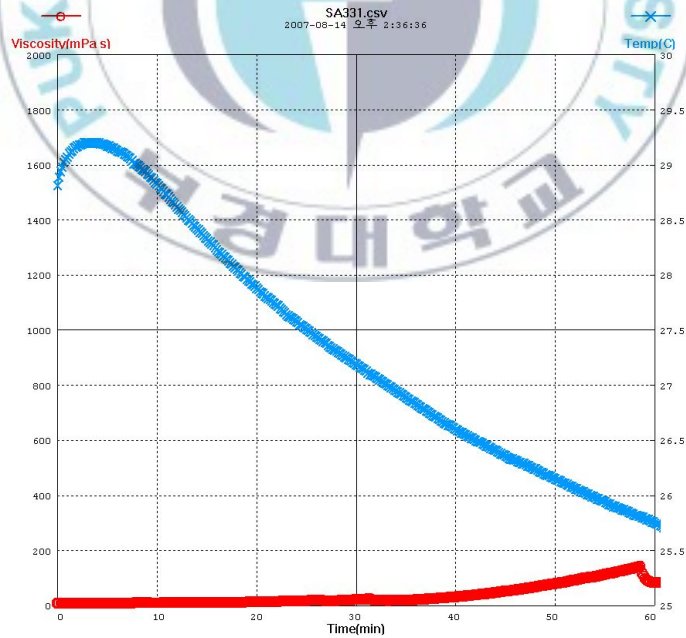


그림 4.21 점도시험 결과(SA 331)

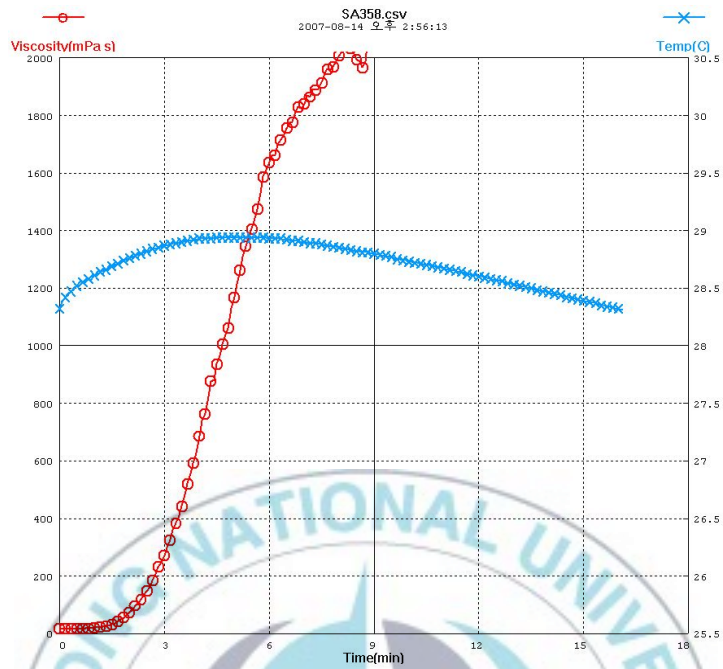


그림 4.22 점도시험 결과(SA 358)

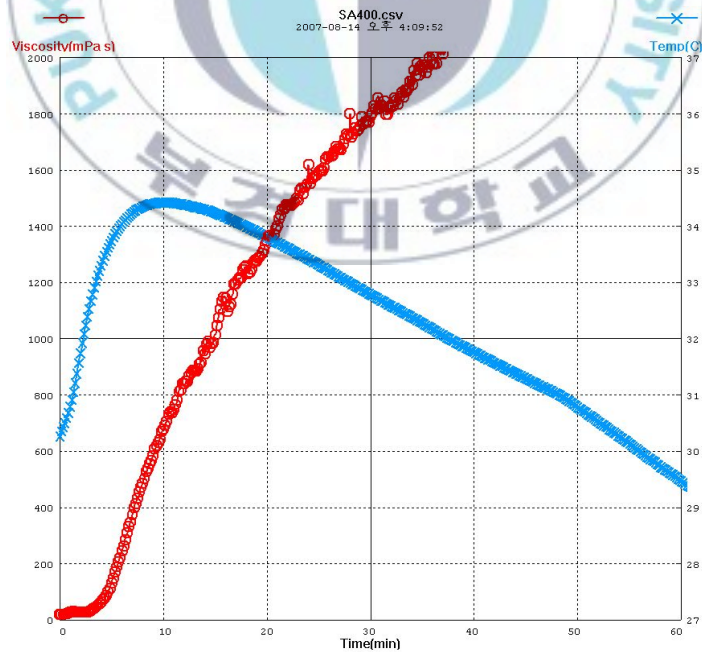


그림 4.23 점도시험 결과(SA 400)

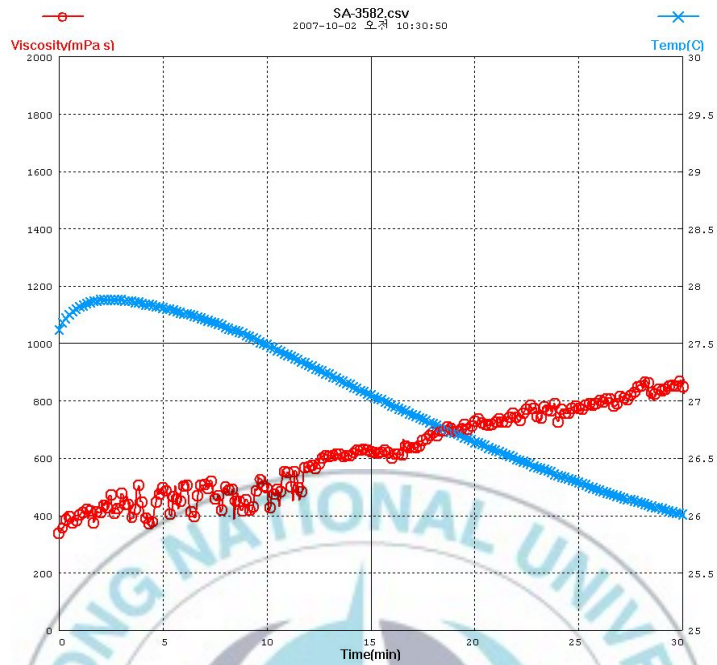


그림 4.24 점도시험 결과(SA 3582)

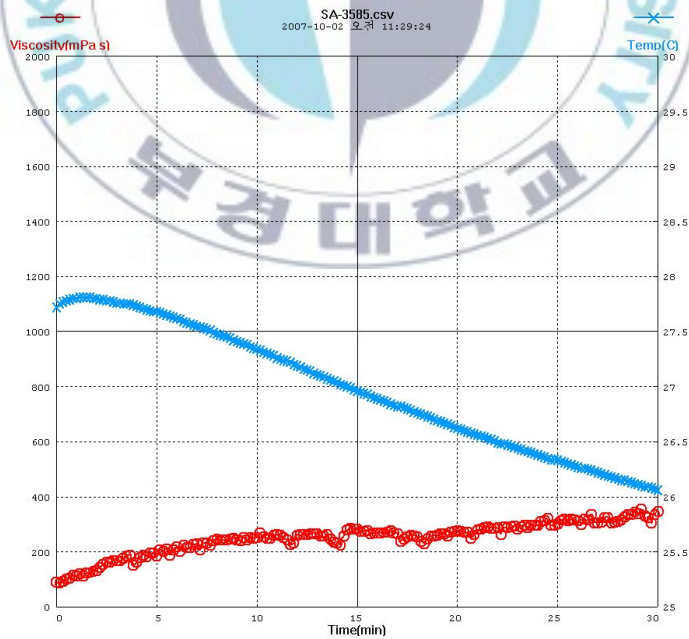


그림 4.25 점도시험 결과(SA 3585)

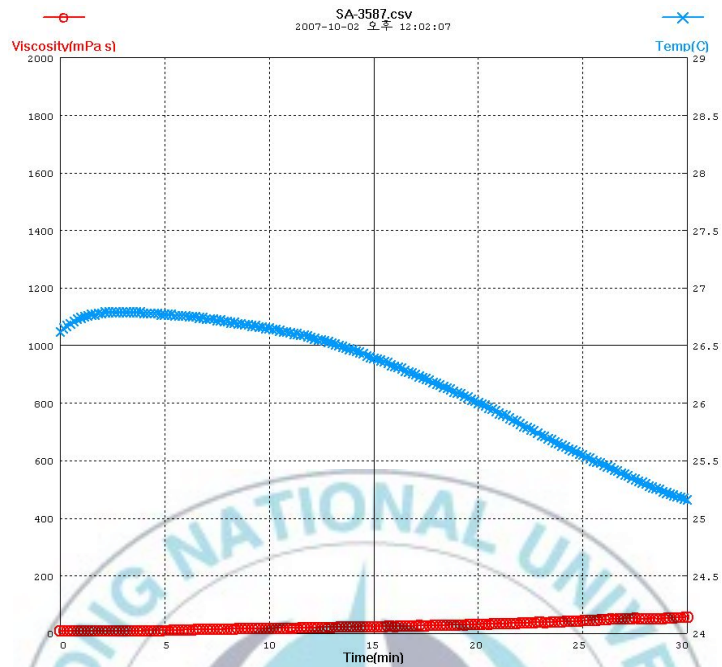


그림 4.26 점도시험 결과(SA 3587)

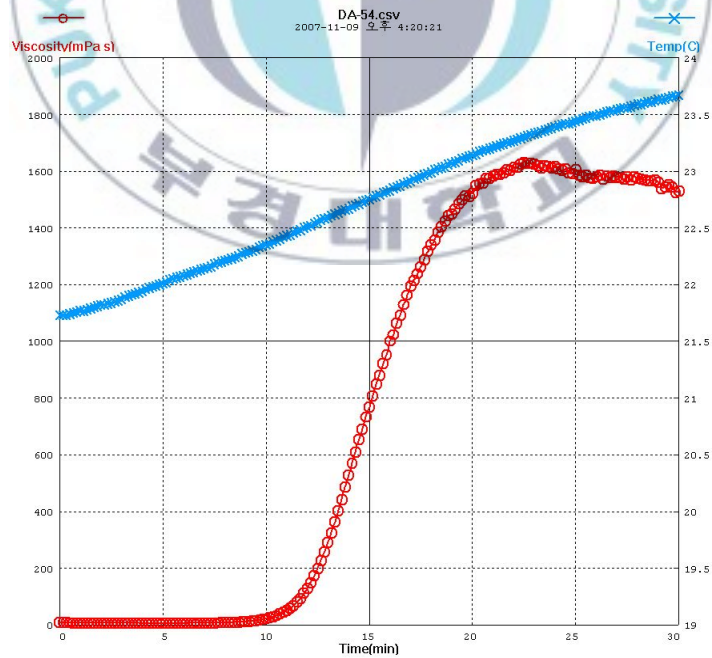


그림 4.27 점도시험 결과(DA 54)

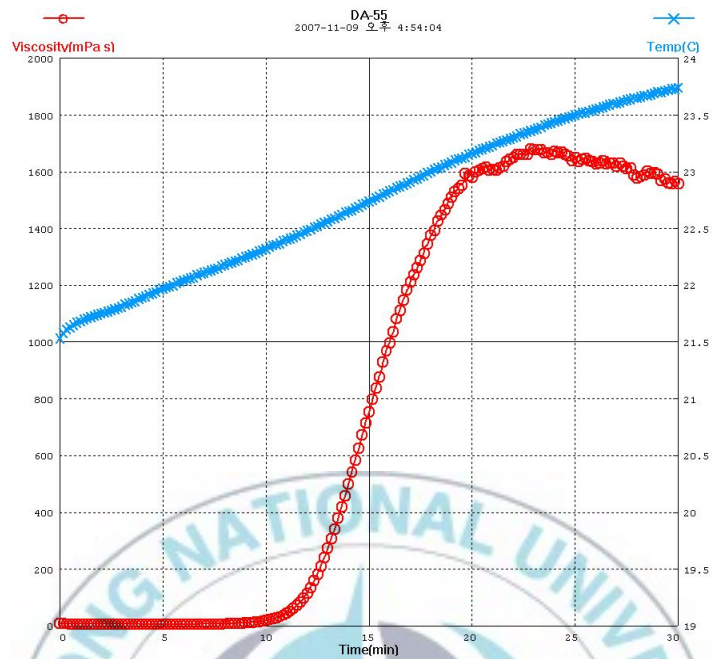


그림 4.28 점도시험 결과(DA 55)

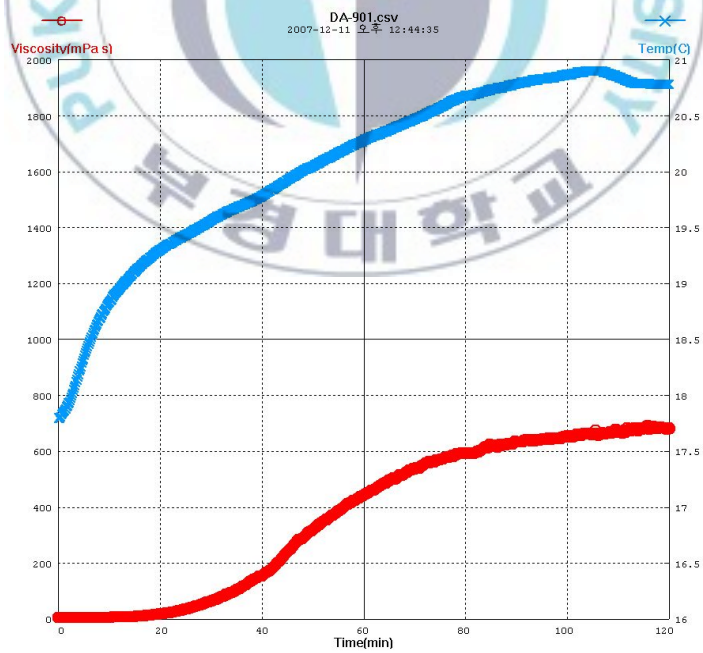


그림 4.29 점도시험 결과(DA 901)

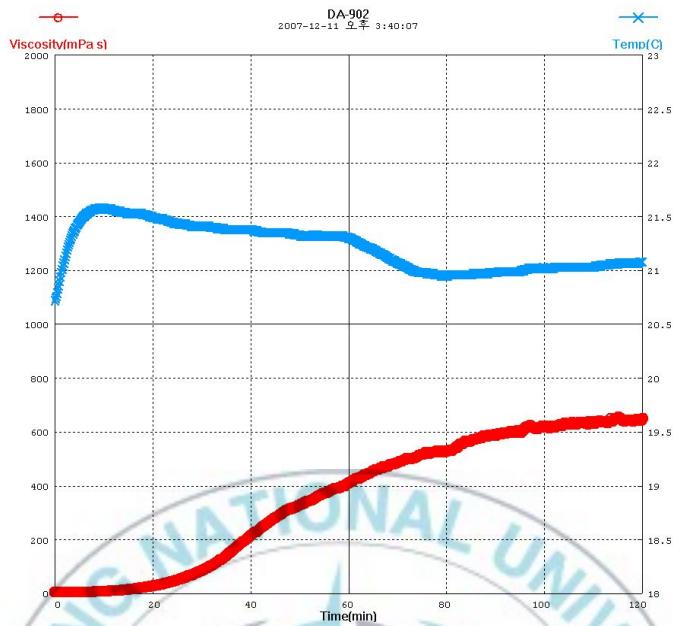


그림 4.30 점도시험 결과(DA 902)

4.4.4 일축압축강도

그라우트의 강도기준에 만족하는 물성을 확보하기 위해 각각의 그림 4.31~그림 4.37과 같이 일축압축강도 시험을 실시하였다.

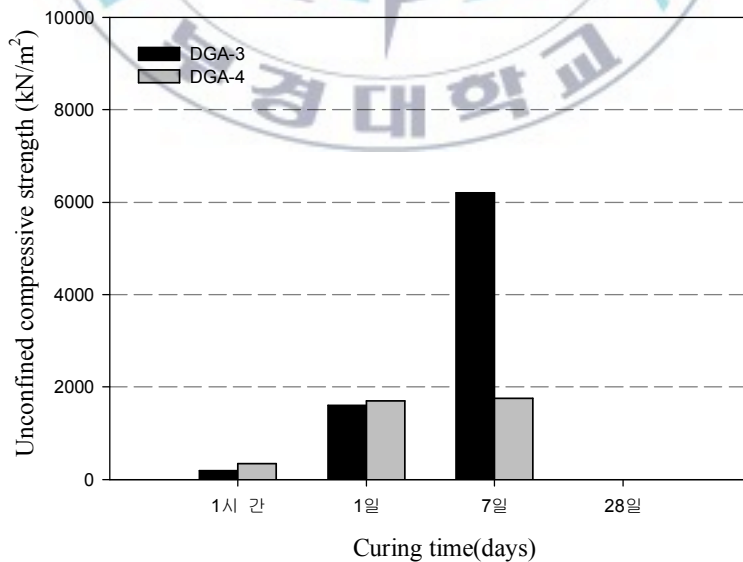


그림 4.31 일축압축강도시험 결과(DGA 3,4)

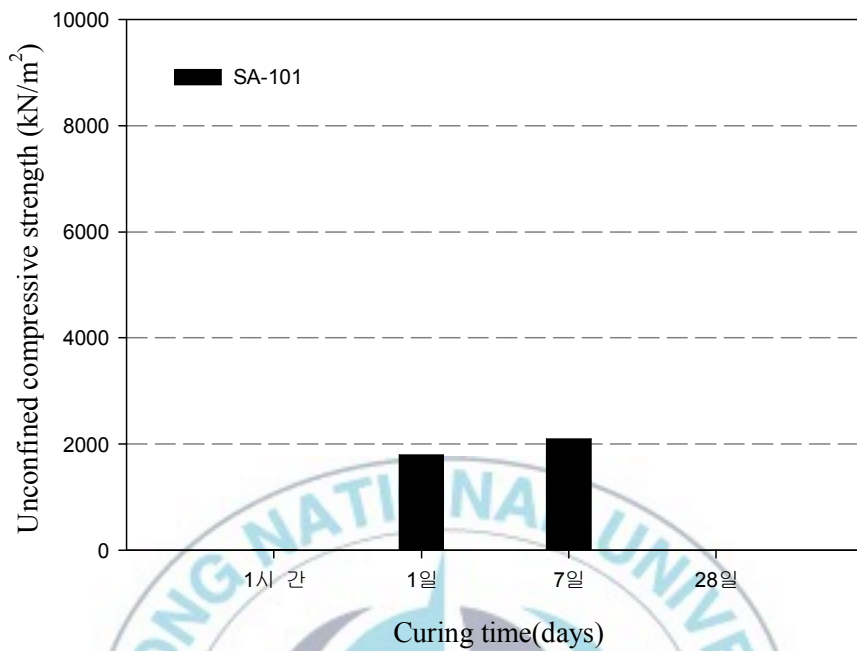


그림 4.32 일축압축강도시험 결과(SA 101)

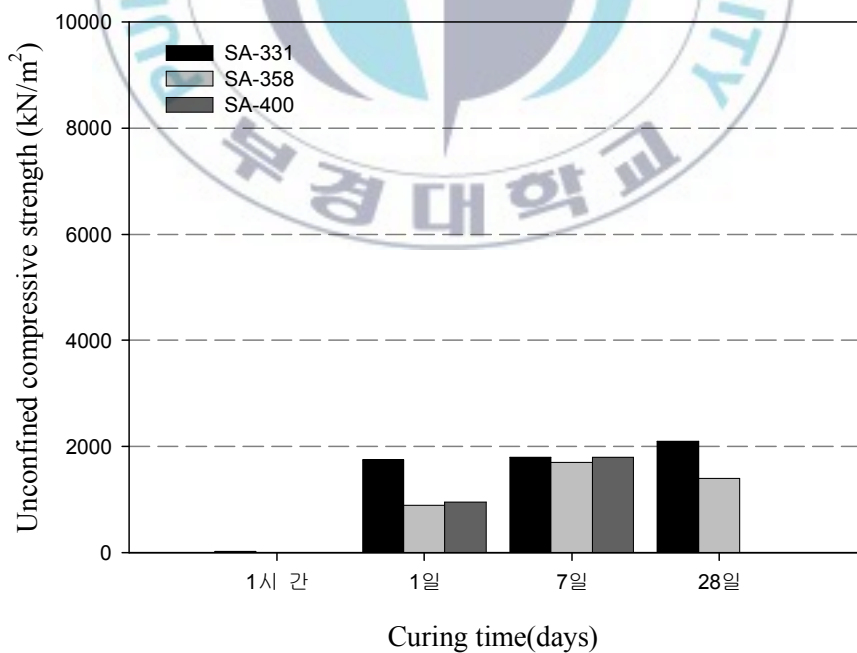


그림 4.33 일축압축강도시험 결과(SA 331, 358, 400)

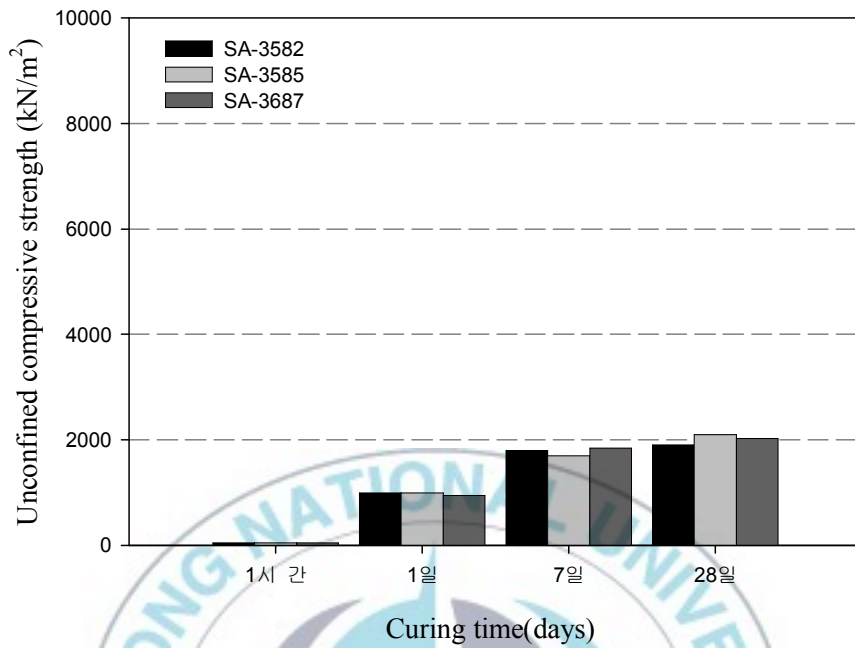


그림 4.34 일축압축강도시험 결과(SA 3582, 3585, 3587)

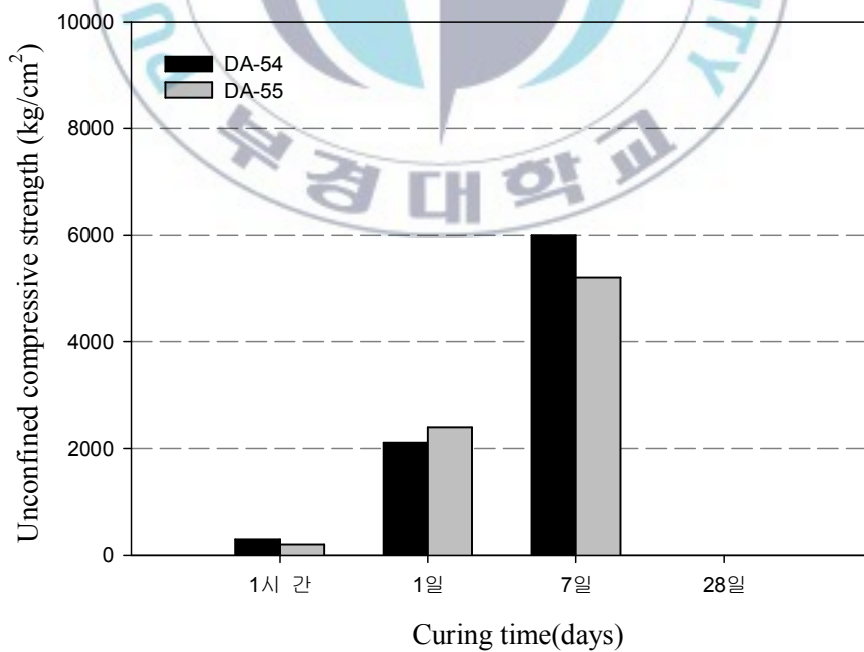


그림 4.35 일축압축강도시험 결과(DA 54, 55)

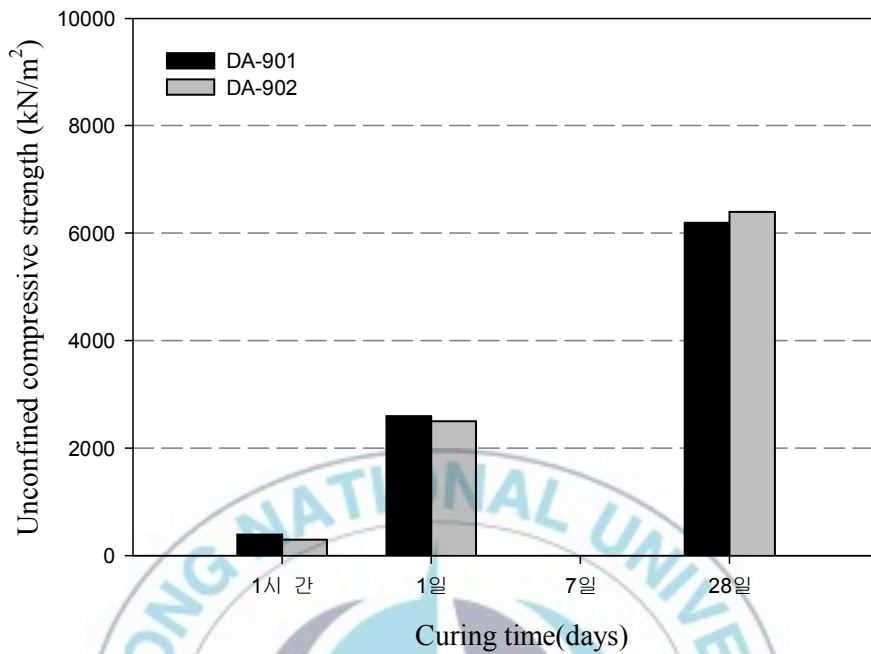


그림 4.36 일축 압축강도시험 결과(DA 901, 902)

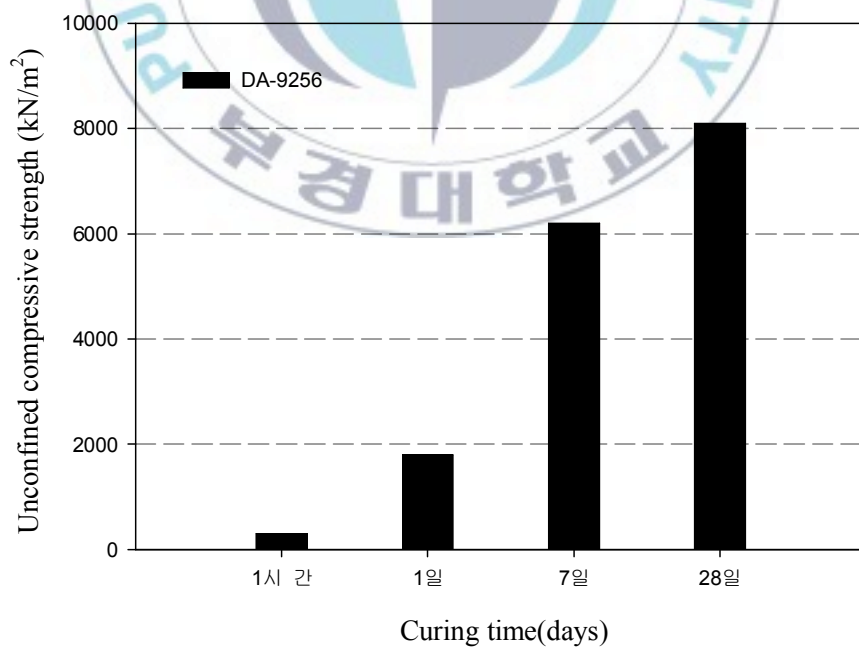


그림 4.37 일축 압축강도시험 결과(DA 9256)

4.4.5 최적배합비 산정

표 4.6 점도측정 결과

B액 첨가물 (경화지연제)	점 도 범 위 (cp)	측 정 시 간 (분)	비 고
DGA 3	1,200	30	• 블리딩 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 400	5,600	60	
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	• 블리딩 현상 심함 • 수중에서 젤 형성이 어려움
DA 55	1,700	30	
DA 901	700	120	
DA 902	650	120	
DA 9256	1,800	120	• 물성 확정

표 4.7 강도시험 결과

구 분	일축압축시험 결과(kN/m ²)			
	1 시간	1 일	7 일	28 일
DGA 3	288	4336	7291	-
DGA 4	215	1356	1342	-
SA 101	40	1482	2134	-
SA 331	38	1460	2099	-
SA 358	65	871	1269	-
SA 400	-	1504	-	-
SA 3582	30	953	1477	1766
SA 3585	30	943	1475	2139
SA 3587	20	942	1692	2102
DA 54	336	2250	5962	-
DA 55	261	2667	5342	-
DA 901	312	2536	-	6304
DA 902	297	2483	-	6507
DA 9256	254	1399	6226	8152

A액에서 발생하는 시멘트의 침강현상을 억제하기 위하여 표4.6과 표4.7의 결과에 의해 점도 및 강도기준을 만족하는 B액에 첨가된 DA 9256을 MG-A, MG-B로 분리하여 각 첨가제의 성능을 개선하여 첨가하여 최적 배합비를 산정하였다.

최적배합비는 표 4.8와 같으며, 이는 실험에 필요한 1개의 몰드를 제작하기 위한 표준배합비이다.

표 4.8 최적배합비

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

제 5 장 결 론

본 연구에서는 무기계 가소성 그라우트(무기계 6호)를 개발하여 기존에 사용중인 규산계 그라우트의 문제점을 해결하고 쉘터터널 뒷채움과 같이 장거리 압송이 필요한 현장에서 작업성을 효율적으로 할 수 있는 강도 및 점도를 만족하는 최적배합비를 산정하였다.

1. 무기계 가소성 그라우트(무기계 6호)는 조기강도 발현 및 내구성이 우수할 뿐만 아니라 초기결 파괴에 따른 강도특성에도 안정적인 경향을 나타내었다.
2. 기중양생과 노건조를 통한 체적 변형량 측정결과 가소성 그라우트는 기존 현장에서 사용되고 있는 규산계 그라우트와 비교할 때 체적 감소율이 매우 작게 나타났다.
3. 강도시험 결과 국내 · 외 장기강도 기준인 $3,000\text{kN/m}^2$ 을 상회하는 것으로 나타났으며, 이에 따르는 경제성 문제를 감안하고 기존 그라우트에 준하는 품질 및 경제성을 확보한 물성을 확보하였다.
4. 본 연구에서는 무기계 가소성 그라우트(무기계 6호)의 B액 점도 상승을 해결하기 위해 많은 종류의 첨가제들에 대해 실험을 진행하였으며, 강도와 내구성 및 장거리 이송이 가능한 점도인 $2,000\text{cp}$ 이하를 120분 이상 유지하는 B액을 확보하여 품질 및 경제성을 확보한 최적배합비를 산정하였다.

참 고 문 헌

1. 김대만, 김기영(2006), “화강풍화토-벤토나이트 혼합토의 공학적 특성”, 한국지반환경공학회 논문집, 제7권 제6호, pp. 45~56.
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. 정경환, 신민식, 김동해, 노진택, 정두희(2008), “무기계 가소성 그라우트의 개발 및 공학적 특성” 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집
5. 정경환, 유창호, 조성호, 황부성, 한경태, 김태효, 정두희(2004), “일본과 국내의 실드세그먼트 경향비교”, 한국터널공학회, 정기 학술대회 논문집, pp. 175~196.
6. 사)한국터널공학회(2006), “대형·대단면 지하공간 창출을 위한 지하공간 건설기술”, 3차년도 중간보고서.
7. 일본토목학회(1996), “터널 표준시방서(실드공법편)·동해설” pp.37~78.
8. 한국표준협회(2005), 콘크리트의 압축강도 시험 방법, KS F 2405

9. 윤현돈, 강문구, 최기훈, 정경환, 경진문, 김동해(2005), “대구경 쉴드터널의 시공 - 서울지하철 909공구 중심으로”, 한국터널공학회 제6차 터널 기계화 시공기술 심포지움 논문집, pp. 89~102.
- 10 건설정보사(2003), “실무 그라우팅 공법”, 토목공법 연구회, pp. 20~22.



감사의 글

민정아! 야! 성민정! 하고 지겹게 들려오던 그 소리가 지금은 정겹게 들립니다. 아마 조금 지나면 그립게 되겠지요. 참! 정말 힘들었습니다. 참! 정말 길었습니다. 참! 정말 기다렸습니다. 그러한 그 마음들이 모두 물결같이 흘러 아주 고운 모래알처럼 추억이 되었습니다. 돌이켜보면 처음 시작할 때의 결심히 끝까지 갈 수 있다고 믿었습니다. 그러나 지금 저 자신 모르게 처음의 결심과는 달리 소홀한 것들에 대해 아쉬움이 드는군요. 오랜 학창시절을 마감함에 있어 저는 끝은 또 하나의 시작이라는 말을 떠올립니다. 학교에서 못 다한 학업을 사회에서 이루겠다고 저는 또 다른 시작의 결심을 다짐합니다.

좌충우돌 이리저리 헤메고 있는 저를 조건없이 받아주신 우리 교수님, 오늘 제가 이렇게 남 앞에 당당히 설 수 있게 해주신 자상한 교수님, 혹시나 하는 마음으로 항상 곁에서 지켜봐주신 인자하신 교수님, 항상 교수님께 배운 모든 것을 마음속에 담고 살겠습니다. 정두희 교수님 정말 고맙습니다. 그리고 항상 존경합니다. 바쁘신 와중에도 저의 논문을 심사해 주시고 격려해주신 정진호 교수님, 항상 인자하신 웃음으로 너그럽게 제 논문을 심사해주신 이영대 교수님, 저를 하나같이 아낌없이 사랑해주신 토목공학과 교수님들께 정중히 머리 숙여 감사의 마음을 전합니다.

이 좁은 연구실에서 2년 이상을 항상 가족같이 지내온 동생이지만 때론 친구처럼 실험과 학업을 도와준 창우. 행님요~하면서 언제나 웃으면서 내 실험과 술친구가 되어준 일목이. 늦게 합류했지만 학부생임에도 불구하고 많은 실험과 나의 발이 되어준 재용이. 행님~하면서 또 다른 연구실 분위기를 만들어준 우리 실험실의 홍일점 신영이. 졸업해서도 내 논문을 도와주며 열심히 일하고 있는 찬우. 밤마다 나의 기사가 되어준 정민. 항상 내 담배친구가 되어준 곰돌이 동하. 대학원 생활동안 큰 힘이 되어준 용재형. 이 외에도 많은 도움이 되어주신 지반공학회의 회장님과 회원모두에게 감사의 마음을 전합니다.

매일 학교 일로 바쁘다는 핑계를 친한 친구 동생들에게도 잘해주지 못했는데 미흡하나마 이렇게 감사의 말로 대신한다. 친구야! 동현. 상규. 진호. 재오. 상호. 외에도 모두 고맙다. 동생아! 진수. 우식. 승우. 정관. 동균. 충영. 개밥. 외에도 모두 고맙다. 그리고 힘들 때 마다 나의 음주를 항상 책임져준 동동! 고마워~

아버지, 어머니 여기 말도 안듣고 항상 걱정만 시켰던 큰 아들을 위해서 언제나 늦게까지 가게에서 고생하시면서 헌신적인 사랑을 주시고 지켜 주신은혜 어떤 효도로 갚을 수 있을지 모르겠지만, 평생 부모님을 위해 열심히 살아서 잘 모시도록 하겠습니다. 항상 큰 손주라고 옆에서 무조건적인 응원을 해주신 할머니 사랑합니다. 언제나 친 삼촌처럼 옆에서 챙겨주신 사공 사장님과 대양사 삼촌들에게도 감사의 마음을 전합니다.

그리고 5년 동안 내가 졸업하는 그 날 까지 같이 웃고 울던 사랑하는 현정아! 이 짧은 글로 표현을 다하긴 무리겠지만 너무 사랑하고 고마워. 그동안 옆에서 나 챙겨준 그 마음 잊지 않을게. 항상 옆에서 큰 응원과 많은 도움을 주신 어머니와 멀리 일본에서도 응원해준 수정이 누나께도 정말 감사드립니다.

마지막으로 내가 없는 동안 집을 혼자서 잘 지켜준 너무 사랑하는 내 동생 민준아 알지? 행님은 항상 든든한 니 후원자인거! 그러니까 힘내고 웃으면서 살자꾸나!

끝으로 지금의 제가 있게 도와주신 모든 분들에게 이 논문을 전합니다.

성 민 정