



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](#)

2018年 2月
박사학위논문

고로슬래그 및 탄소섬유가 함유된 차수 그라우트재 개발에 관한 연구

조선대학교 대학원

토목공학과

김호철

고로슬래그 및 탄소섬유가 함유된 차수 그라우트재 개발에 관한 연구

**A Study on the development of a grouting material containing
blast furnace slag and carbon fiber**

2018년 2월 23일

조선대학교대학원

토목공학과

김호철

고로슬래그 및 탄소섬유가 함유된 차수 그라우트재 개발에 관한 연구

지도교수 김 대 현

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함

2017년 10월

조선대학교 대학원

토 목 공 학 과

김 호 철

김호철의 박사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김운중 (인)

위 원 조선대학교 교수 박정웅 (인)

위 원 조선대학교 교수 김성홍 (인)

위 원 전남대학교 교수 김영상 (인)

위 원 조선대학교 교수 김대현 (인)

2017년 12월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제 1 장 서론	1
1.1 연구배경과 목적	1
1.2 연구 동향	3
1.2.1 그라우팅 연구동향	4
1.2.2 고로슬래그 미분말 연구동향	5
1.2.3 섬유 보강 시멘트 연구동향	7
1.2.4 바이오그라우트 재료에 대한 연구동향	9
1.3 연구 내용	11
제 2 장 그라우팅 공법	13
2.1 그라우팅 공법 개요	13
2.1.1 약액의 주입방식에 의한 분류	13
2.1.2 주입재료 분류	15
2.1.3 그라우팅 공법 조건	16
2.1.4 그라우팅 침투 이론식	20
2.1.5 침투한계 주입비	22
2.2 그라우팅 공법 설계	26
2.2.1 주입재의 종류 및 특성	26
2.2.2 그라우팅 공법 선정	35
2.2.3 그라우트량 계산	37

2.3 바이오그라우팅 공법	40
2.3.1 바이오그라우팅 개요	40
2.3.2 바이오주입재 생성 이론	41
2.3.3 바이오주입재 특징	44
2.4 섬유 파쇄제	47
2.4.1 보강 섬유의 개요	47
2.4.2 탄소섬유	49
제 3 장 실내실험 방법	53
3.1 주입재료의 겔타임 측정	53
3.1.1 겔타임 측정을 위한 배합비	53
3.1.2 겔타임 측정을 위한 제작과정	55
3.2 배합비별 일축압축강도실험	56
3.2.1 호모겔 일축압축강도를 측정하기 위한 배합비	56
3.2.2 호모겔 공시체 제작	58
3.3 배합비에 따른 투수시험	60
3.4 SEM 및 EDX 분석 방법	62
3.5 환경성 평가	63
3.5.1 환경성 평가의 개요	63
3.5.2 시험방법	63
3.5.3 어독성 실험 주입재의 실험비	64
3.5.4 시험장치 및 방법	65
제 4 장 현장실험 결과 분석	66

4.1 배합비에 따른 겔타임 분석	66
4.1.1 규산소다 3호에 따른 겔타임 분석	66
4.1.2 겔타임 종합 분석	70
4.2 배합비에 따른 일축압축강도 분석	71
4.2.1 규산소다 3호의 함유량에 따른 일축압축강도 시험결과	71
4.2.2 고로슬래그 미분말 함유량에 따른 일축압축강도 시험결과	78
4.2.3 기존공법(LW공법)과의 그라우팅 특성 비교	81
4.2.4 재령에 따른 일축압축강도시험의 종합결론	82
4.2.5 일축압축강도와 겔타임 상관관계 분석	85
4.3 그라우트재의 투수시험 결과	87
4.4 SEM 및 EDX 분석결과	89
4.4.1 SEM 분석결과	89
4.4.2 EDX 분석결과	91
4.5 어독성 실험결과	93
제 5 장 결론	95
참고문헌	97

표 목 차

표 2.1 그라우트 종류별 G_{85} 와 G_{95} 의 값	23
표 2.2 일반 포트랜드 시멘트 물리적 특성	27
표 2.3 주입재 화학성분	29
표 2.4 주입재 물리적 성질	31
표 2.5 본 연구에서 사용된 물리적 특성	31
표 2.6 본 연구에서 사용된 화학적 특성	31
표 2.7 본 연구에서 사용된 고로슬래그 미분말의 품질 기준	32
표 2.8 물유리별 규격	33
표 2.9 그라우팅 룯드 구성에 의한 약액 그라우팅 종류	35
표 2.10 목적별 그라우트 분류	36
표 2.11 토질에 의한 그라우트의 충진율, 그라우팅률의 참고치	39
표 2.12 미생물용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 XRD 분석	45
표 2.13 본 연구에서 사용된 탄소섬유의 제품 특성	52
표 3.1 겔타임 측정을 위한 주입재 배합비	54
표 3.2 일축압축강도 측정을 위한 주입재 배합비	57
표 3.3 정수위 투수시험 측정을 위한 주입재 배합비	60
표 3.4 적용된 주입재 조합별 배합비	64
표 4.1 겔타임(Gel-time) 종합 분석 결과	70
표 4.2 C:B(100:0)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과	73
표 4.3 C:B(80:20)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과	75
표 4.4 C:B(60:40)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과	77
표 4.5 기존공법(LW공법)과의 그라우팅 특성 비교	81
표 4.6 재령 3일에 따른 회귀분석 결과	82
표 4.7 재령 28일에 따른 회귀분석 결과	83
표 4.8 28일 재령일에 따른 호모젤 강도 및 겔타임 측정결과	86

표 4.9 투수실험 결과 87

표 4.10 고로슬래그 미분말 C:B(100:0)에 대한 EDX 분석 결과 91

표 4.11 고로슬래그 미분말 C:B(80:20)에 대한 EDX 분석 결과 92

표 4.12 고로슬래그 미분말 C:B(60:40)에 대한 EDX 분석 결과 92

표 4.13 그라우트재의 시간경과에 따른 pH 변화 및 치사어(율) 93

그림 목 차

그림 2.1 혼합공정에 의한 그라우팅 방식 분류	14
그림 2.2 주입재 분류	15
그림 2.3 균열 내에서의 그라우트 슬러리 속도비교	17
그림 2.4 그라우트 슬러리와 물에 따른 유동학적 해석 모델	18
그림 2.5 토립자 간극에서의 약액의 침투와 규산젤에 의한 토립자 고결 모형도	20
그림 2.6 d/D(%)와 간극률 n 과의 관계	25
그림 2.7 물유리 겔화 과정	34
그림 2.8 흙 입자 간극 사이의 바이오주입재 모식도	41
그림 2.9 미생물 고결화 메커니즘	43
그림 2.10 바이오주입재의 추출과 제작과정	44
그림 2.11 미생물용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 XRD 분석	45
그림 2.12 미생물용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 SEM 분석	46
그림 2.13 보강섬유의 종류	47
그림 2.14 매트릭스 수지의 종류	49
그림 2.15 네프맥 섬유의 응력-변형률 관계	50
그림 2.16 사용된 탄소섬유 모습	51
그림 3.1 겔타임 측정을 위한 시험과정	54
그림 3.2 주입재의 겔타임 측정 모습	55
그림 3.3 일축압축강도 측정을 위한 시험과정	57
그림 3.4 호모젤 제작에 사용된 일축압축 시험용기	58
그림 3.5 일축압축시험 전경	59
그림 3.6 투수시험 배합 과정	61
그림 3.7 실험에 사용된 전자현미경	62
그림 3.8 고로슬래그 및 탄소섬유가 혼입된 공시체 모습	64
그림 3.9 어독성실험을 위한 어항수조 전경	65
그림 3.10 어독성실험을 위한 고로슬래그가 포함된 공시체의 실험	65
그림 4.1 SS:W(50:50)에 따른 겔타임 측정결과	67
그림 4.2 SS:W(35:65)에 따른 겔타임 측정결과	68

그림 4.3 SS:W(20:80)에 따른 겔타임 측정결과 69
 그림 4.4 C:B(100:0)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과 72
 그림 4.5 C:B(80:20)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과 74
 그림 4.6 C:B(60:40)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과 76
 그림 4.7 규산소다 50%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과 78
 그림 4.8 규산소다 35%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과 79
 그림 4.9 규산소다 20%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과 80
 그림 4.10 28일차 겔타임과 일축압축강도 관계 86
 그림 4.11 차수 그라우트 재료에 따른 차수효과 분석 87
 그림 4.12 일반 시료의 SEM 사진 89
 그림 4.13 탄소섬유로 보강된 일반 시료의 SEM 사진 90
 그림 4.14 시간경과에 따른 그라우트재 용탈에 대한 pH 변화 94

ABSTRACT

A Study on the development of grouting material containing blast furnace slag and carbon fiber

Kim, Ho Cheol

Advisor : Prof. Kim, Daehyeon, Ph. D.

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

Cement is the most commonly used as a representative material in construction and civil engineering industry, and has been produced in large quantities. However, emissions of carbon dioxide generated during the cement's production have caused global warming and environmental pollutions, which has not been resolved for a long time. In order to replace such cement, many studies have been actively performed for utilizing Blast Furnace Slag(BFS) which is a by product of the steel industry, as the construction and civil engineering material.

This study aims to investigate the physico-chemical properties of the BFS powder mixed cement, biogrout material and carbon fiber to determine whether it can be used as an environment-friendly cut off grout material.

Slag is fine powder or mixed cement and used as concrete slag due to potential hydraulic property of powder itself, and it has an advantage of increasing long-term strength and dandification of the internal structure of concrete. In addition, if the slag powder, which is the industrial byproduct produced every year, is used as the grout material, it has a special characteristic that it is possible to secure not only environment friendly but also great economical efficiency.

Therefore, this study aims to develop grout material with high strength and reinforced cut-off by mixing carbon fiber which is recycled resource, biogrout

materials, blast furnace slag powder(BFS powder) and cement.

For this thesis, Geltime tests of the grout material that biogrout materials, fiber crushing agents, BFS powder and cement are mixed, and unconfined compression strength(1, 3, 7, 14 and 28 days) of homo-gel samples to determine durability were performed. In addition, the permeability varying with the mixing ratio was tested.

The ratio of water to synthetic silica was fixed at 9:1, and the W/C which is a ratio of water to cement, the existing fillers, was fixed at 200% in order to perform the experiment. Inclusion ratio of fiber crushing agents was 0, 0.5, 1.0 and 1.5%, and accordingly, analysis using SEM and EDX was performed to evaluate and verify the performance of the grout material.

The experimental results showed that the compression strength increased as the inclusion ratio of fiber crushing agent increased. It is considered that the unconfined compression strength increases due to the bridge reaction of the fiber within the cement material. Moreover, as the amount of BFS powder increased, the early strength increased, and the coefficient of permeability decreased. Therefore, it can be used as a cut off wall grouting material in the field due to excellent early strength and cut-off effect.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경과 목적

그라우팅공법은 토목분야에서 주로 사면보강, 매립지역, 제방, 댐, 준설 등 차수의 목적, 구조물의 보수·보강, 연약지반 보강으로 사용되어왔고, 최근 들어 도심지를 중심으로 한 건설공사는 효율적인 토지활용을 위해 점점 더 상부구조물이 커지고 하부 지하 굴착이 광범위해지며 기존건물의 증축, 리모델링 등이 증가하는 추세로 그 토대가 되는 지반의 차수, 보강 필요성이 급증하고 있다. 하지만 공사가 진행되는 동안 연약한 지반의 안전대책이 소홀해 비롯되는 안전사고가 빈번히 발생하고 있으며, 구조물이 완성된 후에 발생하는 기울어짐, 균열, 누수 등의 원인도 기초지반의 부등 침하가 직접적인 원인인 경우가 많다(천병식 등, 1994).

특히, 저수지의 경우 대부분 소규모 저수지로 약 71%가 건설된지 40~50년이 경과된 저수지가 대다수에 이르고 있으며, 이로 인한 붕괴 위험은 더욱더 심각한 상황이다. 이러한 저수지의 경우 정밀안전진단시 주요 손상으로 제체 누수가 대부분 조사되며, 누수된 제체 보강을 위해 일반적으로 제체 내에 그라우팅 보강 등을 실시하지만 용탈현상, 지하수 오염 등의 피해가 발생되고 있는 실정이다. 또한, 그라우팅을 실시해도 지반 내 공극 등으로 인해 손상이 재발생하는 등 많은 문제점이 발생되고 있다.

이와 같은 문제점과 제약으로 인해 지반 강도 및 차수 등의 증대를 위한 새로운 그라우팅 공법이 필요하며, 이는 농업 저수지 등 토목공사의 안전한 시공뿐만 아니라 주변 지반의 붕괴, 침하 및 부등침하 또는 인접한 구조물의 균열을 사전에 방지하기 위한 그라우팅공법이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 미생물 광물질(선처리 공정)과 산업부산물(후처리 공정)을 사용하는 차수 그라우팅 공법을 개발하여 이를 현장 적용하고자 하였다.

국내 건설현장에서 주로 사용되는 그라우팅공법은 지반의 강도 증진에만 중점을 두었으며, 그라우팅공법에 주원료로 사용되는 시멘트와 약액은 이산화탄소(CO_2) 배출과 지하수 오염 등의 환경문제를 발생시킨다.

또한 우리나라는 2015년부터 교토의정서에 의해 CO_2 배출규제에 참여국이 되었으며, 허용정도 이상의 CO_2 를 발생하게 되면 CO_2 배출금을 지급해야 한다. 따라서 시멘트를 주로 사용하는 지반개량 분야에서도 시멘트 대체와 사용량을 절감할 수 있는 친환경재

료를 개발하여 저탄소, 지구 온난화 방지 등의 녹색성장 정책에 기여하고, 신소재의 개발을 통해 원자재 값 상승과 건설재료 부족 등의 문제를 해결할 필요가 있으며, 이에 대한 대책으로 시멘트 대체재의 개발은 전 방면에서 이루어져야할 시대적 과제이다.

최근에는 시멘트 대체재로써 고로슬래그에 대한 관심이 증가되고 있는데 고로슬래그는 제련, 제강 등 일련의 철강 제조 공정에 따른 부산물로서 배출되는 폐기물이며, 화학적 안정성이 우수하므로 이를 활용할 수 있다면 산업폐기물뿐만 아니라 대기오염을 줄이고, 토양 및 수질을 보존하면서도 경제적인 재료가 될 수 있다.

이 때문에 시멘트 대체재로서 고로슬래그의 활용 방안이 오래도록 개발되어져 왔으나 주로 시멘트콘크리트 분야에서 시멘트 역할을 대체하는 연구(알칼리 활성 슬래그결합재)에 집중됨으로써 장기강도, 저수화열, 화학적 내구성 등의 많은 장점들에도 불구하고 응결지연에 따른 초기강도 저하, 많은 미세균열, 초기 급결 현상 등의 뚜렷한 약점 때문에 그 한계 또한 분명하다. 그러나 지반을 개량하고 차수하는 그라우트 분야에서 시멘트의 대체재로서 고로슬래그의 급속한 유동성 저하 및 초기 급결 현상(겔화)은 오히려 장점이 될 수 있으며, 공법 특성상 그라우트재의 강도(1~3MPa)에는 시멘트 콘크리트 만큼의 초기 고강도 값(20MPa 이상)을 요구하지 않는다.

아울러 선처리 공정인 바이오그라우팅 역시 친환경 미생물 광물질을 사용하는 공법으로 미세한 입자가 0.6mm 이하의 미세균열을 억제하고, 후처리 공정으로 산업부산물 및 재활용자원 혼입률에 의해 물리적, 역학적 특성을 부여하고 재료의 환경성을 개선하며, 구조적으로는 재활용자원인 섬유를 활용하여 수평력 증대, 고로슬래그 미분말을 사용하는 유동성이 좋은 차수 그라우트재로 주입하고자 하는 대상 지반에 전범위에 걸쳐 적절히 충전할 수 있다면 그 활용도가 매우 높을 것이다.

따라서 본 연구에서는 선처리 공정인 미생물 광물질인 Calcite와 재활용 자원인 섬유 파쇄재의 탄소섬유(Carbon Fiber) 및 고로슬래그 미분말(Blast Furnace Slag powder), 시멘트(Ordinary Potrland Cement) 혼합으로 고강도, 차수성을 지닌 그라우트재를 개발하고자 하였다.

상기 배합재료의 배합비를 통해 그라우트재의 겔타임 실험과 내구성 확인을 위한 호모겔 일축압축강도(3, 7, 21, 28일) 시험을 수행하였으며, 배합비에 따른 투수시험을 수행하였고, 배합재료에 따른 SEM, EDX 분석, 어독성 시험을 수행하여 개발하고자 하는 그라우트재의 현장 적용성을 위한 최적의 배합비, 겔타임 등을 규명하고자 하였다.

1.2 연구 동향

그라우팅을 시공하는 경우 체체 내에서는 지하수 유속에 의해 충전 성능이 떨어지는 문제점을 가지고 있으며, 이러한 문제점을 해결하기 위한 국내·외의 연구는 미미한 실정이며, 이를 보완할 수 있는 공법이 제시되지 못하고 있다.

그라우팅 시 지하수 유속에 의해 충전 성능이 저하되는 이유로는 미세균열을 막지 못하기 때문에 체체가 축조된 후 저수된 물의 유로를 따라 유실 또는 공극이 점점 커져 체체 누수가 발생하는 문제점이 발생되고 있다. LW공법의 경우 이러한 0.6mm 이하의 미세균열에 시멘트 입자가 침투되어 미세균열을 억제할 수 없기 때문에 물유리계의 성분이 미세균열을 억제하게 되는데 물유리계는 침투성이 우수하지만, 강도가 약하고 내구성이 떨어지는 결점을 갖고 있기 때문에 효율적인 방법이라 할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 0.6mm 미세균열을 효율적으로 억제하기 위해 기존 친환경 공법으로 연구되어온 바이오주입재를 사용하였다(박경호, 2015; 임춘호, 2016). 바이오주입재의 특징은 시멘트 보다 비표면적인 10배이상 되기 때문에 매우 미립한 입자이며, 미생물 주입 후 배양액을 주입하는 방법으로 지반 내에 미소균열에 약액으로 침투되었다가 미생물광물을 침전시키는 방법이기 때문에 효율적으로 미세균열을 억제할 수 있을 것으로 판단되었다. 이러한 바이오그라우팅은 선처리 방법으로 사용하여 초기 미세균열을 억제하고 후처리 방법으로 주입될 그라우트재를 효과적으로 충전시킬 수 있는 공법으로 기대된다.

후처리 공법으로는 고로슬래그 미분말을 사용함으로써 시멘트의 양을 효율적으로 줄이는 친환경재료로 사용하고자 하였으며, 장기강도우수, 시멘트보다 미세립분으로 작은 균열을 충전하여 효과적인 차수그라우트재를 개발하고자 하였다. 산업부산물인 고로슬래그 미분말은 대부분 콘크리트 재료로 많이 사용되어 왔으며, 지반개량제인 차수 그라우트재료로 사용된 연구는 미미하다.

또한 체체 내에서는 지하수의 흐름 때문에 그라우트재료가 지반 내에서 수평력을 받게 되기 때문에 그에 대한 효과적으로 대응하기 위해 재활용자원인 섬유를 시멘트 무게대비 1%를 사용함으로써 수평력에 우수한 차수그라우트재를 개발하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 그라우팅에 대한 전반적인 선행연구와 바이오그라우팅, 산업부산물인 고로슬래그 미분말, 섬유보강 시멘트 등 각 분야에서 연구된 선행연구를 아래와 같이 요약하였다.

1.2.1 그라우팅 연구동향

저수지나 방조제, 하천제방과 같은 제체와 기초암반, 터널, 콘크리트 라이닝의 틈새, 연약지반 등을 차수 혹은 보강할 경우 가장 많이 쓰이는 것이 그라우팅 공법이다(천병식, 1998).

Grout는 1776년 영국의 George Sample이 처음 사용하였으며, Grouting이란 단어는 1864년 영국의 Barlow에 의해 만들어졌다(Glossop, 1960). 미국토목학회(American Society of Civil Engineers, ASCE) 그라우팅위원회(1980)에서는 Grout를 Grouting과 같은 뜻으로 쓰기도 하는데, 일반적으로 Grout는 그라우트재료, Grouting은 그라우트재를 이용한 일련의 시공과정으로 구분하여 사용되고 있다(부성안과 김동석, 2008).

약액주입을 이용한 연약지반의 보강공법 시초 사례로는 1802년 C. Berigny이 손상된 수문을 점토와 석회를 배합한 불완전한 주입재로 수문 기초 하부에 채움과 충전층에 대하여 보강하였다. C. Berigny는 최초로 약액주입의 개념을 기술적인 Procedure of grouting으로 정립하였다(Kutzner, 1996).

1900년대 L. Dumont에 의해서 1 shot 그라우팅이 개발되었으며, 1925년에 H. Joosten에 의해 2 shot 그라우팅인 염화칼슘(CaCl)과 물유리용액(NaO · nSiO)과 각각 주입하는 화학적 주입재인 순수용액형 주입재를 이용한 방법이 개발되었다.

그 후 점차적으로 그라우팅에 필요한 펌프 등의 장비발전으로 그라우팅 기술의 향상이 이루어졌다. 또한 주입재로서 시멘트 입자 크기의 중요성도 연구되었으며, 주입재료 관리, 주입압, 투수성 확인을 위한 시험방법 등의 발전이 있었다.

1930년대부터 지반의 특성을 고려한 주입범위, 주입압, 침투가능성 등에 대한 경험적 이론의 발전과 주입재료의 개발 등이 지속적으로 이루어져 왔다. 또한 2차 대전 후 도시복구 및 건설에 이러한 화학적주입재에 의한 보강이 광범위하게 사용되었다.

1980년 초부터 시멘트그라우트 주입재의 재료적 발전이 이루어졌으며 마이크로 시멘트의 습식 마이크로시멘트를 현장에서 제조하여 SGR 공법의 재료로 사용되었다. 이는 시멘트주입재의 적용확대라 볼 수 있으며, 주입특성 개선을 위한 각종의 혼화재료도 발전하게 되었다.

2000년대 이후에는 IT기술과 그라우팅 기술을 접목시킨 실시간 모니터링을 통하여 시공관리가 수행되었고, 자료 축적 및 경험을 토대로 암반분야 그라우팅에 대한 경험적 이론의 발전이 지속적으로 이루어지고 있으며, 세계적으로 무공해 붐이 불면서 친

환경 약액이 개발되었다. 특히 시멘트 그라우팅에 암을 유발물질인 6가크롬(Cr^{6+})이 보고 된 후 각 국가에서 이를 규제하는 법안이 발의되어 그라우팅을 시공하는데 많은 제약이 발생하였다. 이로 인해 화학적 주입재에 환경문제와 독성물질에 대한 무기질재료를 통한 대처 방안 등 각종 주입재가 연구 개발되고 있다.

1960년대 국내에 최초로 농어촌공사에서 횡담의 서토부에 개보수 그라우팅이 시행되었으며, 이에 시멘트 밀크 그라우팅이 일부 적용되었으나, 국내에 적극적으로 활용된 것은 기초 처리를 위한 암반 그라우팅 이후 1970년대 서울 1호선 지하철 공사를 시작으로 1980년 일본에서 LW공법을 도입해서 서울 2호선 지하철 공사에 적용되었다.

1983년에는 서울 3호선 지하철에 마이크로 시멘트가 최초로 사용되었으며, 서울 3호선 일부와 4호선에는 SGR(Space Grouting Rocket System)공법으로 지하철에 적용되었다.

그 후, 고압 분사 주입공법은 JSP(Jumbo Special Pattern)공법이 S시멘트 회사의 사일로 기초보강공사에 적용 되어 이후 RJP(Rodin Jet Pile)공법, SIG(Super Injection Grouting)공법, Jet Grouting공법, CIP(Cast in Place Pile)공법 등 국내에 댐 및 지하공간 개발이나 항만시설, 제방건설에 그라우팅이 적극적으로 시행되었다.

이와 같이 그라우팅 기술은 2세기를 지나오면서 계속 발전되어 왔으며, 기술적인 진전 및 신공법의 개발로 보조시공에서 하나의 공법으로 개발되었고, 안정성, 공사의 기간, 경제성 등을 좌우하는 중요한 역할이 되었다(양열호, 2017).

1.2.2 고로슬래그 미분말 연구동향

최근 건설산업 기초재료인 시멘트로부터 발생하는 온실가스, 이산화탄소로 인해 환경 문제가 야기되면서 이를 대체하기 위한 재료의 연구 및 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 고로슬래그는 시멘트의 대체재로써 콘크리트 및 약액주입공법, 지반보강공법에 적용하고 있으나 국외에 비해 국내 연구사례는 적은 편이며 해외 연구사례를 참고하여 2000년대 이후부터는 활발한 연구가 진행되고 있다.

1930년 독일의 Kyhl은 슬래그분말과 수산화칼륨 용액 혼합물의 응결에 대하여 연구하였으며, 수산화칼륨(KOH)과 수산화나트륨(NaOH) 용액을 사용하여 슬래그의 반응성을 평가하였다. 이를 활용하여 슬래그와 수산화나트륨 용액, 슬래그와 가성 알칼리재료의 배합에 대해 체계적인 연구를 진행하였다.

Shi and Day(1995)는 알칼리 활성화 슬래그의 수화특성을 분석하였으며, pH가 초기 반응과 반응생성물에 큰 영향을 끼치지만, 이후 고로슬래그에서 용해된 Ca와의 반응이 더욱 중요한 역할을 한다고 하였다.

소석회와 수쇄슬래그를 혼합한 슬래그 시멘트가 상품화되어 영국, 프랑스, 미국 등에서도 대량으로 생산되기 시작하였다. 이 슬래그시멘트는 포틀랜드시멘트보다도 낮은 비용으로 비중이 작고(2.7정도), 잘 미분쇄한 것은 강도 등의 품질 면에서도 당시의 포틀랜드시멘트에 충분히 대항할 수 있었다.

G. Prussing은 1882년 포틀랜드시멘트 클링커에 수쇄슬래그를 30% 정도 첨가하여 혼합 분쇄하는 새로운 방식을 채택하였다. 이 시멘트는 포틀랜드시멘트와 같은 성질을 갖고 있기 때문에, 구분상 철포틀랜드 시멘트라고 불려졌다. 한편, 수쇄슬래그 60~70%를 클링커에 혼합한 시멘트도 1907년 P. Prussing에 의해 개발되었으며, 이것은 고로시멘트라고 불려졌다. 일본에서도 1910년, 슬래그량의 60~70% 함유된 고로시멘트를 제조하여 1913년부터 본격 생산에 들어가 오늘날까지 이어지고 있다.

수쇄슬래그를 클링커와 혼합 분쇄하지 않는 방식의 고로슬래그 미분말(Ground Granulated Blast furnace Slag : GGBS)의 제조는 1923년에 독일에서 먼저 시작하였다. 석고를 3~4% 첨가하여 0.09mm 잔분 20% 정도로 조분쇄 한 것으로 Thurament라고 불려졌다. 콘크리트 혼합시 믹서에 투입하는 혼화재 방식의 이 재료는 1937년 건설 재료로서 인가가 났지만 품질의 신뢰성 등을 고려하여 사용에 제한을 받아 저 강도용 콘크리트를 대상으로 하였다.(박영복, 2017) 포틀랜드 시멘트와 Thurament를 중량비로 1:1로 만든 DIN 모르타르의 강도는 통상 재령 28일에서 기준 포틀랜드시멘트 모르타르의 70% 이상이 되도록 요구되었다.(김시환, 2008) Thurament는 유동성을 개선하여 치밀한 콘크리트를 얻기 위함과 수화열의 억제 또는 화학저항성의개선을 목적으로 수문, 댐 등의 수리구조물이나 큰 기초에 많이 이용되었다.

현재 세계적으로 주목받고 있는 고로슬래그 분말의 혼화재로서의 사용 양식은 N. Satterheim이 1953년에 발표한 건조슬래그 분말이다. 고로슬래그 분말은 Thurament보다 분말도가 크고 Blaine 값으로 3,800cm²/g 이상인 것으로 사용 제한이 없다. 먼저 1958년에 남아프리카에서 사용되었고, 1962년에는 영국에서도 사용되었다. 현재에는 캐나다, 미국 등에서도 일반화되어 있다.

고로슬래그 분말을 콘크리트 믹서에 직접 투입하는 이 방식은 혼화재로서의 특성 외에 콘크리트 믹서내에서 고로시멘트의 제조라고 하는 개념도 생겨났다. 일본에서는 이와 같은 고로슬래그 분말의 제조는 혼화재료로서의 사용이 아니라 고로시멘트의 품질

개선을 위한 투입이라는 개념이 강하다.(박영복, 2017)

국내에서는 고로슬래그 미분말을 순환잔골재로 사용한 선행연구가 대부분이었으며, 저렴하면서도 알칼리성 순환자원인 순환골재를 사용함으로 굳지 않는 모르타르의 특성 및 경화 콘크리트의 강도증진 등 기초적 성상을 분석하여 환경적인 모르타르를 개발하고자 하였다(김영희 등 2013; 한천구 등 2011; 박선규 등 2013; 정지용 등 2015) 또한 콘크리트의 시공성 및 공학적 특징에 대한 연구를 위해 고로슬래그 미분말의 치환률과 분말도를 사용하는 연구가 진행되었다(조성광, 2013; 장현오와 지남용, 2013; 이승태, 2014). 또한 고로슬래그와 알칼리 활성화제를 이용한 모래 고결에 대한 연구도 진행되었다(박성식과 최선규, 2013).

한천구 등(2009)와 김준호 등(2014)은 시멘트와 고로슬래그 미분말 치환율을 비율을 달리하여 치환하였고, 목표슬럼프와 목표 공기량을 범위에 만족하게 적용하여 경화콘크리트의 압축강도를 측정하였다. 고로슬래그 미분말이 증가할수록 유동성은 증가하고, 공기량은 미세하게 감소하였으며, 치환율의 증가에 따라 잠재수경성 반응에 기인하여 재령 28일 미만에서는 시멘트에 비하여 저하하였으나, 그 이후 재령에서는 동등 이상의 수준을 발휘하는 것으로 나타났다.

이현호 (2016)은 고로슬래그 미분말과 순환 굵은골재를 사용한 콘크리트의 재료 성능 평가에 대하여 연구하였으며, 김무한 등 (2007)도 고로슬래그 미분말을 대량 활용한 콘크리트의 공학적 특성 및 내구성특성에 관한 실험적 연구를 수행하였다.

민경산과 이승현 (2007)이 고로슬래그와 첨가제(알루미나 시멘트)를 첨가하여 내산성이 우수한 재료를 개발하였으며, 고로슬래그와 나트륨 계열의 활성화제를 이용하여 무시멘트 슬래그의 특성에 대하여 연구하였다.

이처럼 고로슬래그 미분말을 사용한 연구는 대부분 콘크리트에서 순환골재의 대체자원으로 사용하였으며, 시멘트의 대체재로도 사용되고 있으나, 그라우트재로서의 연구가 많이 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고로슬래그 미분말을 시멘트 대체자원으로 사용하고자 하였으며, 차수 그라우트재료로 평가하고자 하였다.

1.2.3 섬유 보강 시멘트 연구동향

토목 구조물에 섬유를 혼입하여 활용한 보강공법은 국내·외로 많은 연구가 이루어지고 있으며, 첨가제와 혼화제로 많은 연구가 되어 지고 있다.

콘크리트는 압축강도가 크고 내구성과 내화성이 우수하며 경제성, 시공성, 형태구성의 편리함 등으로 인하여 건축 및 토목구조물에 가장 많이 사용되는 구조재료 중 하나이다. 그러나 콘크리트는 건조함에 따라 인장응력이 작용하여 건조 수축이 크고, 상대적으로 인장강도가 작으며, 취성과파괴가 일어나는 단점을 가지고 있다(한국콘크리트학회, 2005).

하지만 합성 섬유는 경우 고강도, 고탄성률의 우수한 물리적 특성을 가지며, 이외에도 열안정성, 내약품성 내후성 등이 우수하여 산업용 섬유로 많이 사용되고 있다(Choi, 2002). 이러한 이유로 위의 콘크리트의 단점을 보완하기 위해 합성 섬유를 콘크리트에 배합하여 섬유 보강 콘크리트를 만들어 1960년대 이후로 유리 섬유 및 강섬유를 이용한 연구가 점차적으로 확장 되었다(Shah, 1988).

하기주 등(2013)은 순환골재와 고로슬래그 미분말을 치환한 강섬유 보강 RC보의 구조성능 평가를 수행하였으며, 순환골재와 고로슬래그를 치환한 콘크리트에 강섬유를 보강한 실험체에서 안정적인 휨인장 파괴를 나타내었고, 최대내력이 1~6% 증가하였다.

류금성 등(2013)은 지오폴리머를 사용하여 강도별현을 확인하였다. 실험결과, 일반 시멘트에 비해 강도발현, 동결융해 저항성이 약 20% 향상됨을 확인하였다.

최민형 (2015)은 쏘일네일링 공법에 강섬유 보강 그라우팅을 활용하여 압축강도와 인장강도를 실험하였다. 실험결과, 섬유 보강 처리가 되지 않은 그라우팅 공법에 비해 압축강도와 인장강도, 전단강도가 각각 12.1%, 29.8%, 51.5%가 증가 하였으며, 현장시공 실험에서 섬유가 보강 되지 않은 그라우팅에 비해 16%가 증가하는 것으로 나타났다.

이방연 (2012)은 섬유를 활용한 그라우팅에 적합한 점성을 가지는 섬유 혼입량을 확인하기 위해 PVA 섬유 배합비를 각각 1.3%, 12mm와 1.6%, 8mm로 배합하여 각 배합비별 점성과 인장강도를 측정 한 결과, 1.6%에 8mm가 더 낮은 점성과 인장성능이 우수하게 나왔다.

Shah and Rangan (1971)은 콘크리트에 강섬유를 혼입하여 휨강도와 인장강도를 측정한 결과, 휨강도는 20배가 인장강도는 2배가 증가한 것을 확인하였다.

이처럼 섬유를 보강한 복합재료는 내충격성능, 균열제어성능, 휨·인장성능, 전단성능, 압축성능 등 적용 범위가 넓고 구조물의 유지보수 보강 및 신축을 목적으로 활용한다.

Maalej et al. (2004)는 섬유를 보강한 복합재료는 보강 섬유에 따라 콘크리트를 개선하는 원리이기 때문에 혼입되는 섬유의 고유 값인 인장강도와 탄성계수 등을 통해 특

성이 향상되고 혼입율에 따라 균열 및 분산 능력과 변형특성에 미치는 영향이 다양하게 나타난다고 보고한바 있다.

Li (1993)은 고인성 또는 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 경우 PVA섬유 및 PE 섬유를 주로 사용하고 있으며, 이는 섬유의 특성을 고려한 것으로 섬유와 시멘트 복합재료간의 계면가교작용에 의한 변형경화 특성을 보이기 때문이다.

Fariborz et al. (2007)은 아라미드 섬유 특성으로서 인장강도가 약 2,920 MPa로 PVA섬유 및 PE섬유에 비하여 우수하며, 단섬유로 제조시 섬유의 직경과 길이는 PE 섬유와 매우 유사한 수준이라고 하였다.

섬유 보강 시멘트 연구는 섬유재료에 따라 다양한 연구결과가 나타나고 있다. 그러나 대부분의 경우 섬유재는 1%내외로 사용하는데 이는 국내 순환골재자원 사용기준을 준용하여 사용된 것으로 판단되며, 1%이상이 되면 친수성인 섬유가 유동성이 저하되어 뭉침현상 등 품질관리가 잘 되지 않는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 사용된 섬유도 시멘트의 무게대비 1%를 사용하였다.

1.2.4 바이오그라우트제 연구동향

땅 속에 존재하는 수많은 미생물 중 *Sporosarcina Pasteurii* 균(KCTC 3558)의 생화학 반응을 통해 생성된 미생물광물질을 이용하여 연약지반을 고결화시키는 기술을 Microbial Calcite Precipitation(MCP) 기술이라고 하며, 이는 느슨한 사질토 지반의 강도를 개선하거나, 고결물이 입자의 간극에 침투함으로써 차수를 통해 연약지반을 개량할 수 있는 친환경 공법으로 인식되었다(김호철, 2011; 박경호, 2011; 김대현 등, 2012; 박경호와 김대현, 2012, 2013; 전상주, 2013; 박성식 등, 2011; Park et al., 2014; Kim et al., 2014; 박경호, 2015; Park and Kim 2016).

최근에는 인도, 말레이시아, 포르투갈, 미국, 호주 등 Biocement를 개발하여 적용하고 있는 연구자들(Varalakshmi et al., 2014; Pedreira, 2014; Reddy et al., 2015; Nordin et al., 2015)이 활발하게 연구를 수행하고 있다.

미생물광물질을 이용하여 연약지반에 주입으로 강도 및 차수 증진효과를 나타내는 기술을 Biogrouting, Biocementation 등 다양하게 명명하고 있으나, 일반적으로 Biogrouting으로 사용하고 있다. 이러한 Biogrouting 공법은 시멘트를 근본적으로 감소시킬 수 있는 Biopolymer, 유기산 재료, 식물추출액 등과 같이 친환경 공법에 해당하는

다(김선태 등, 2011; 박성식 등, 2012; Chang and Cho, 2012).

MCP 기술은 느슨하거나 연약한 지반에 미생물광물질을 침전시키기 위해서는 여러 번 반복해서 주입해야하는 번거로움과 현장 적용성에 대한 한계점을 가지고 있다 (Ismail et al., 2002; Dejong et al., 2006, 2010; Soon et al., 2013).

따라서 보다 효율적이고 실용적으로 현장에 적용시키는 방법으로 Biogrouting이 개발되었다(Wiffin et al., 2007; Paassen et al., 2009; 김대현과 박경호, 2013; Park and Kim 2016; Kim and Park 2017).

바이오그라우팅 주입제는 입자가 미세하고 유동성이 좋으므로 적절한 혼화재를 사용하면 적정 심도에서 차수효과 및 강도효과가 나타날 것으로 판단되며, W/C의 비율을 조절함으로써 만족할만한 수준의 차수 및 강도효과를 나타낼 수 있을 것으로 기대되었다(임춘호, 2017).

1.3 연구 내용

본 연구에서는 고로슬래그 미분말, 시멘트, 재활용 자원인 탄소섬유와 미생물 광물질을 함께 배합하여 기존공법들의 환경적인 문제점 개선과 섬유 그라우팅에 특성인 수평력 증대에 따른 압축강도 증가, 내구성 확보, 고로슬래그 미분말을 사용하여 시멘트량 감소에 따른 압축강도, 차수성 확보 등 상기와 같은 효과를 분석하기 위해 현장적용 전에 각종 실내실험을 통하여 적정 배합비를 선정하고자 한다.

실내실험은 그라우트재 강도효과를 확인하기 위해 켈타임과 그에 따른 호모겔 일축 압축강도 시험을 수행하였고, 차수효과를 확인하기 위해 투수시험과 섬유 파쇄제를 첨가한 그라우트의 특성을 확인하고자 Scanning Electron Microscope(이하 SEM) 및 EDX 분석, 어둡성시험을 수행하였다.

본 연구 목적을 달성하고자 실시한 실내실험을 요약하면 다음과 같다.

(1) 켈타임 및 일축압축강도 시험

- 1) A액 : 규산소다:물(50%:50%, 35%:65%, 20%:80%)
- 2) B액 : 시멘트:고로슬래그 미분말(100%:0%, 80%:20%, 60%:40%), 탄소섬유(0%,1%)
- 3) C액 : 시멘트:고로슬래그 미분말 중량대비 10%

상기의 A액, B액, C액을 혼합하여 켈타임 및 일축압축강도시험을 수행하였다.

(2) 투수시험

차수그라우트재의 효과를 확인하기 위해 본 연구에서는 표준사 시료에 호모겔의 일축압축강도시험에 적용한 배합비를 사용하였으며, 정수위 투수실험을 통해 배합비에 따른 차수효과를 확인하고자 하였다.

(3) SEM, EDX 분석

일축압축강도를 측정 후 파쇄된 시료를 채취 및 건조하여 조선대학교 공동장비연구센터의 주사현미경실에 Scanning Electron Microscope(이하 SEM), EDX 분석을 의뢰하였으며, 시멘트 내에서 탄소섬유 및 시료의 구성 물질을 확인하고자 하였다.

(4) 어독성시험

본 연구에서는 고로슬래그 미분말의 환경오염 정도를 확인하기 위해 4h, 8h, 24h, 48h, 72h의 pH 변화에 따른 공시어의 치사 여부를 검토하였으며, 이를 통해 환경오염 정도를 평가하고자 하였다.

제 2 장 그라우팅 공법

2.1 그라우팅 공법 개요

그라우팅공법의 목적은 현탁액상의 시멘트 물질을 일정 압력상태에서 지반 내에 주입하여 지반의 성질을 개선하는 것이다. 액상 주입재는 주입 후 시간경과에 따라 양생되면서 강도와 강성이 증가한다. 주입재 구성물질의 다양한 성질에 따라 양생에 따른 강도와 강성의 발현정도가 다르게 나타나며, 소정의 목적에 따라 다른 성질의 시멘트 주입재를 사용한다.

주입에 의한 지반의 성질개선 범위는 크게 4가지로 정리할 수 있으며, 이는 지반의 차수, 투수능의 저감, 지반 변형의 감소, 지반 강도의 증가이다. 주입재는 재료특성(입경, 입도, 비중, 분말도, 투수계수, 구성 재료의 종류, 배합비 등)에 따라 성질(유동성, 침투성, 강도, 강성)이 변화하여 침투효과와 보강효과가 극명하게 차이가 난다(이강호, 2013).

2.1.1 약액의 주입방식에 의한 분류

약액의 주입방식에는 겔타임(Gel-time)을 기준으로 20분 이상의 겔타임일 경우 사용하는 1액 1공정, 각각 다른 주입관을 나와 혼합되는 순간 겔화되는 2액 2공정, 겔타임이 2분~10분일 경우 사용하는 2액 1공정으로 세가지 주입방식이 있다. 주입방식은 그림 2.1과 같이 분류된다(천병식, 1998).

(1) 1액 1공정식

고결시간이 긴 약액의 주입방식으로 1액 1공정식이 적용된다. 즉, 1액의 주입재를 1공정의 주입관에서 펌프로 압력을 가해서 주입한다. 주입재 믹서 안에서도 시간이 경과하면 경화반응을 시작하기 때문에 보통 현탁액형 주입재 또는 용액형 주입재에서도 20분 이상의 긴 고결시간이 확보될 수 있는 경우에 사용된다.

(2) 2액 1공정식

짧은 겔화 시간의 약액에는 2액 1공정식이 널리 사용되고 있다. 즉, A액과 B액을 각각 독립된 펌프로 압송해서 주입관 상단의 Y자관에서 합류시킨 후 1공정의 주입관으로 주입하는 방식이다(김혜양, 2011).

(3) 2액 2공정식

겔화 시간이 매우 짧은 순결성 약액이나 또는 순결성을 갖도록 배합된 약액의 주입은 2액 2공정식이 적용된다. 이 방식은 주입관이 2중으로 되어 있어서 내관에서는 A액을, 외관에서는 B액을 압송하여 주입관 선단에서 합류시키는 방식이다(박경호, 2015).

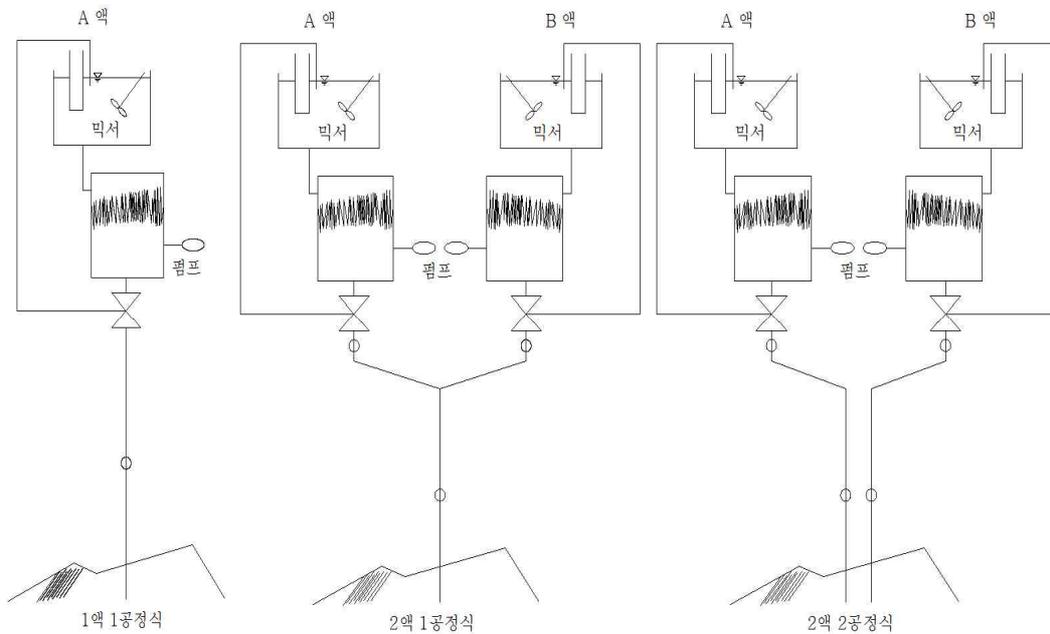


그림 2.1 혼합공정에 의한 그라우팅 방식 분류(권지연, 2012)

2.1.2 주입재료 분류

주입재의 분류는 재료, 반응형식, 시공방식 등에 따라서 여러 가지로 분류가 가능하다. 일반적으로 주입재의 종류에 따라 그림 2.2와 같이 분류한다.

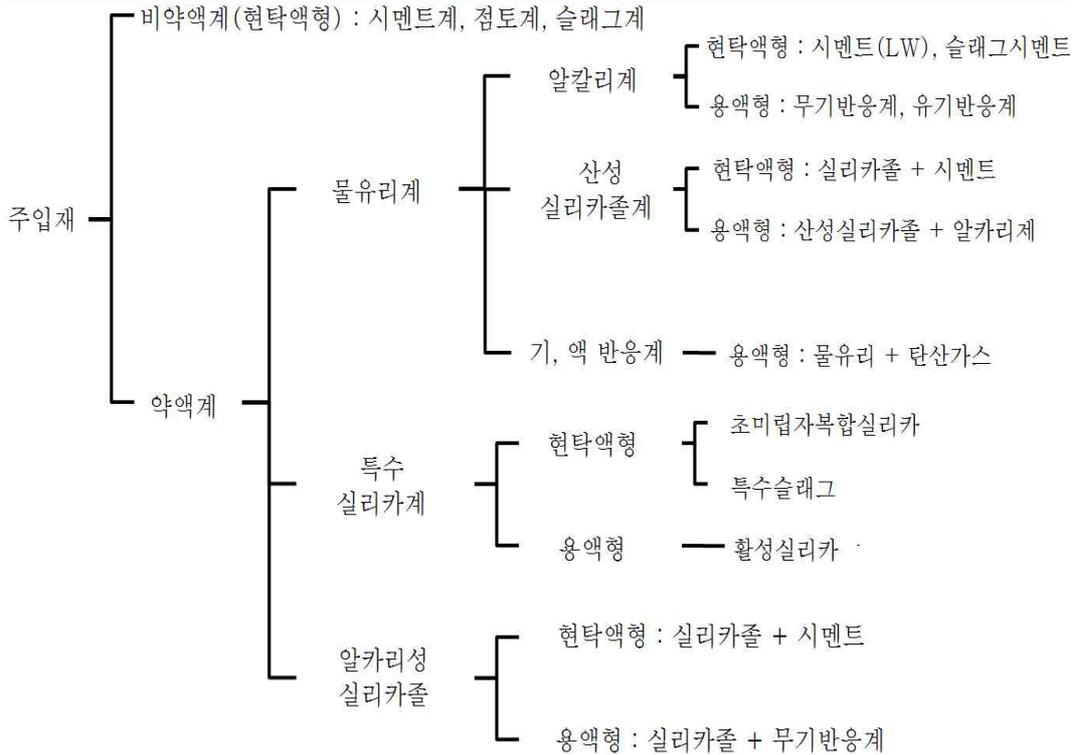


그림 2.2 주입재 분류(한국지반공학회, 2005)

(1) 비약액계(현탁액형) 주입재

비약액계(현탁액형) 주입재는 물유리계에 시멘트나 벤토나이트를 가하여 고결시킨 것으로 LW약액이 대표적 예이다. 입자가 액체 중에 분산된 현탁액 상태로 있는 주입재를 말하며, 시멘트나 벤토나이트 등을 사용하는 주입재가 대표적이고, 초미립자시멘트 주입재도 현탁액형 주입재에 속한다. 초미립자시멘트인 현탁액형 주입재는 소성유동을 한다고 볼 수 있다.

현탁액형 주입재의 침투성은 약액 입자의 크기, 주입재의 안정성(입자의 침강, 응집

정도), 유동성(겉보기 점도, 전단강도), 지반의 간극률, 간극의 크기 등에 의해서 영향을 받는다. 현탁액형 주입재의 특징은 용액형 주입재와 비교해서 침투성이 떨어지는 단점이 있는 반면, 공해가 없고 내구성이 크며 경제성이 좋은 장점이 있다(박경호, 2015).

(2) 약액계 주입재

주입재 중 어느 부분에서나 균질한 상태를 유지하며 입자를 포함하지 않은 약액을 용액형 주입재라고 한다. 용액형 주입재의 특징은 뉴턴유체에 가까운 유동특성을 갖는다. 용액형의 침투성은 주입재의 유동성, 겔타임, 지반의 간극률, 간극의 크기 등의 영향을 받는다. 용액형 주입재 중에서 물유리계 약액 이외에는 주입 후 지하수를 오염시킬 가능성이 크기 때문에 사용 전에 충분한 검토가 필요하다. 한편, 용액형 주입재의 대부분을 차지하고 있는 물유리계 약액은 시멘트계 현탁액형 주입재에 비해서 침투성이 우수하지만, 강도가 약하고 내구성이 떨어지는 결점을 갖고 있기 때문에 시멘트계 현탁액형과 조합하여 반현탁액형 주입재로 사용하는 것이 일반적이다(박경호, 2015).

2.1.3 그라우팅 공법 조건

(1) 물-시멘트비(w/c)의 영향

그라우팅의 물-시멘트비는 시멘트 중량에 대한 물의 중량비(w/c)로 표시한다. 일반적으로 주입재는 주입에 따른 침투용이성을 확보하기 위해 물-시멘트 비를 200%정도로 크게 한다. 이는 투입되는 시멘트의 양을 소량으로 배합(빈배합)하는 결과를 초래하여 화학적 불안정성을 갖는다. 빈배합 주입재는 응결시 수축량이 상대적으로 부배합인 일반 콘크리트보다 더 크게 나타난다. 상대적으로 부배합 된 콘크리트는 고결 진행률이 매우 균일하나, 물-시멘트비가 큰 빈배합 주입재는 고결 진행률이 불규칙할 뿐만 아니라 재료분리가 발생한다. 이와 같은 재료분리와 품질저하는 일정량의 혼화재 및 첨가제 등을 혼합하여 극복할 수 있다(박경호, 2015).

(2) 물-시멘트비(w/c)가 큰 그라우트 주입재의 기술적 장점

상대적으로 물-시멘트비가 큰 주입재는 점성(Cohesion)과 동점성(Dynamic viscosity)이 감소되어 암반 내 불연속면에 대한 침투가 용이하고, 물-시멘트비가 큰 주입재는 시멘트 입자들끼리의 마찰저항을 감소시켜 불연속면 벽에 대한 상대마찰 저항을 감소시킨다. 따라서 주입시 예상치 못하게 발생하는 급작스런 주입불량 즉, 막힘 등의 현상을 줄여준다.

물-시멘트비가 큰 주입재는 주입공 내에 다량의 물이 건조한 암반의 불연속면벽을 습윤상태로 만들 수 있다. 이는 주입재의 상대적 침투효율을 증가시키고 물-시멘트비가 큰 주입재는 기존 균열 등 기존 암반 내에 발달된 불연속면을 확대(Jacking)시키는 역할을 수행함으로써 균열면 내 주입재의 침투가 용이하도록 한다. 그러나 이와 같은 역할은 미세 균열에서 가능한 것이며, 기존 암반 내에 침투되어 있는 물이나 포화도, 균열면의 폭과 길이, 암반의 강성 등에 따라 그 기능이 제한될 수 있으므로 이에 대한 심도 있는 연구가 필요하다.

(3) 주입속도의 영향

주입재의 강도와 내구성은 물-시멘트비가 증가됨에 따라 급격히 줄어드는 것으로 알려져 있다. 따라서 적정 내구성과 강도 및 침투성을 확보하기 위하여 이에 대응하는 물-시멘트비를 결정하는 것이 매우 중요하다.

주입재는 불연속면 내에서 그림 2.3과 같은 속도분포를 보인다. 이것은 불연속면의 중심에서는 흐름속도가 크고 관벽에서는 무시할 만큼 작다는 예상이 가능하며, 주입 종료시 즉, 고결시작과 더불어 주입재의 밀도가 중심에서는 크고 관벽에서는 감소하게 되는 결과를 초래한다.

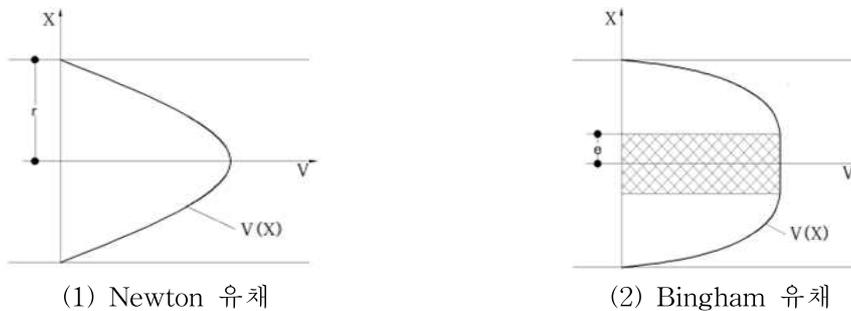


그림 2.3 균열 내에서의 그라우트 슬러리 속도비교(Deere, 1982)

(4) 그라우트 슬러리의 유동성

현탁액형의 주입체는 물과 시멘트로 구성되었으며, 일반적인 물의 흐름과는 다른 특성을 지닌다. 그림 2.4의 경우 물과 같이 점성이 작은 유체의 흐름은 Newton 흐름특성을 가진 유동체로 가정하며, 현탁액형의 주입재 슬러리는 현탁액(Suspension)특성으로 인하여 유동저항이 크다. 따라서 유동저항이 큰 현탁액 상태의 그라우팅 슬러리는 Bingham 모델로 설명한다(Deere, 1982).

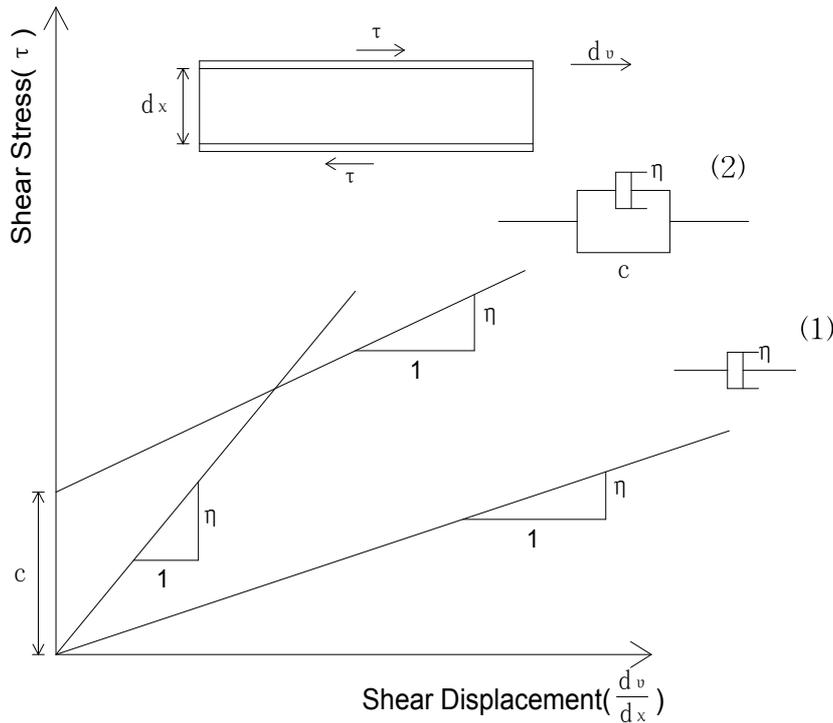


그림 2.4 그라우트 슬러리와 물에 따른 유동학적 해석 모델 : (1) Newton 유체, (2) Bingham 모델(Deere, 1982)

그림 2.4에서 τ 는 전단응력, $\frac{d_v}{d_x}$ 는 전단변형이다.

Bingham 모델의 경우 점성(Cohesion, c)과 점착력(Viscosity, η)을 포함하며, Newton 유체의 경우 점착력만을 포함한다. 따라서 Newton 유체와 Bingham 모델의 거동은 각각 아래 식 (2.1)과 식 (2.2)로 표현할 수 있다.

$$\tau = \eta \frac{d_v}{d_x} \quad (2.1)$$

$$\tau = \tau_0 + (\eta_B \frac{d_v}{d_x}) \quad (2.2)$$

여기서, η : 동적 유동계수(dynamic viscosity), η_B : 소성 유동계수(plastic viscosity)

η^1 : 겉보기 유동계수(apparent viscosity)

2.1.4 그라우팅 침투 이론식

(1) 침투와 고결의 메커니즘

그림 2.5와 같이 주입약액은 초기에 저분자 용액이지만, 시간이 경과함에 따라 물유리와 중합되어 고분자화되고 콜로이드가 커지게 된다. 콜로이드 또는 겔화가 진행되고 있는 물유리는 최초 흙 입자의 여과작용에 의해 흙 입자 사이의 점점 부근에 정착하여 다시 흙 입자 표면을 물유리 층이 덮게 된다.

처음에는 약액이 간극을 투과해서 침투범위를 넓혀 가지만 어떤 시점에서는 간극이 막히고 주입액이 지반에 침투하지 못하게 되면 주입이 완료된다. 이와 같이 토립자의 점점을 중심으로 해서 토립자 표면을 덮은 규산겔은 1차 결합 또는 2차 결합으로 견고한 규산층으로 되어 토립자 점점을 견고하게 고정하고 연속된 막에 의해 토립자를 연결한다.

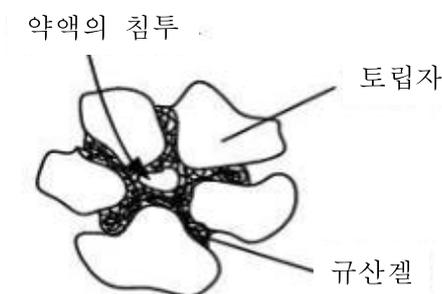


그림 2.5 토립자 간극에서의 약액의 침투와 규산겔에 의한 토립자 고결 모형도(한국지반공학회, 2005)

토립자 상호간의 규산에 의한 정착은 규산층에서 분자간의 응집력과 규산층 및 토립자 표면의 부착력으로 이루어진다. 이 가운데 규산층과 토립자 표면의 부착은 사질토의 경우 수소결합 등에 의한 2차 결합으로 의해 나타난다.

점토분이 많아짐에 따라 약액의 입자간의 침투는 불충분해지므로 전체의 균질한 고결효과는 감소한다. 이와 같은 토립자와 약액의 상호작용에 의해 약액주입 전 모래의 전단강도가 입자 상호간의 접촉이나 맞물림에 의한 마찰로 생긴 요소가 주된 것이었으나, 약액주입 후 모래의 전단강도는 이 마찰로 인한 요소 이외에 규산층 토립자 간의 고결로 인한 점착력의 요소가 추가됨을 확인하였다.

(2) 침투에 관한 이론식

주입에 있어서 침투이론식은 약액의 고결시간, 점성, 주입압력, 주입속도, 주입시간, 주입공의 유효경, 주입방식 및 지반의 투수계수, 간극률, 간극경 등과 상관관계가 있다. 또한 실제 지반의 불균질성, 지하수의 유동, 주입재 점도의 경시변화, 고결되면서 수반되는 약액의 복잡한 침투기구 등과 관련이 있다. 따라서 약액의 침투기구를 엄밀히 수식화 한다는 것은 어려운 일이며, 지반의 불균질성을 감안한다면 오히려 무의미하다고 까지 판단할 수 있지만 많은 연구자들에 의해서 침투성에 관한 경험식들이 제안되고 있다. 이러한 침투이론식들은 크게 현탁액형 침투이론식과 용액형 침투이론식으로 구분할 수 있으며 전반적으로 다음과 같은 가정들을 전제로 한다(천병식 1998).

주입재의 침투는 층류로써 Darcy의 법칙에 따르고, 주입재의 비중은 물과 큰 차이가 없으며 중력은 무시할 수 있다. 또한 주입재의 점성은 일정불변하고, 지반은 균질하게 무한히 계속되며 구속하는 것이 없다. 마지막으로 지반은 물로 포화되어 있고 지하수의 유동은 없다.

용액형주입재에 대한 침투이론식은 현탁액형에 비해서 많이 제안되어 있다. 어떤 제안식이든 유속이 그 유선의 동수구배에 비례한다는 Darcy의 법칙을 기본으로 하고 중력의 영향을 무시한다는 가정에서 식 (2.3)과 같이 유도된다.

① Maag의 식(Nakayama and Okano, 2013)

$$t = \frac{\mu n (R^3 - r^3)}{3khr} \tag{2.3}$$

여기서, t = 주입소요시간(s)

n = 지반의 간극률

k = 지반의 투수계수(cm/s)

h = 수두(주입압)(cm)

μ = 물과 약액의 점도비

R = 주입유효반경(cm)

r = 주입공반경(cm)

그러나 Maag의 식은 켈타임, 간극충전율, 주입관의 형식과는 관계가 없기 때문에 주입특성을 나타내는 정수로 설정하였으며, Maag의 식 (2.4)와 같은 실용식으로 제시한 바 있다.

$$t = \frac{\alpha n \beta}{3A k h r} (R^3 - r^3) \quad (2.4)$$

여기서, α = 간극충전율
 β = 약액의 동점성계수
 A = 주입면적

② Karol의 식(Karol, 1960)

주입재 반경으로 침투하는 것으로 가정하여 식 (2.5)와 같이 제안되었다.

$$r = 6.2 \times \sqrt[3]{\frac{1}{\nu} q \times t / n} \quad (2.5)$$

여기서, r = 침투거리(cm)
 q = 주입량(cm³/s)
 n = 간극률
 ν = 용액의 점도 역수
 t = 주입시간(s)

2.1.5 침투한계 주입비

주입재가 쉽게 침투하기 위해서는 주입재 입자가 흙 입자 사이의 간극을 무리 없이 통과할 수 있을 정도로 충분히 작아야 한다. Kravetz(1958)는 주입재와 침투 가능한 흙 입자에 대한 침투성 실험결과, 식 (2.6)과 같이 주입비 관계식을 발표한 바 있다. 식 (2.6)을 동시에 만족하는 지반에 대해서는 현탁액형 주입재의 사용이 가능하다.

$$N_1 = \frac{D_{15}}{G_{85}} > 15 \quad \text{또는} \quad N_2 = \frac{D_{10}}{G_{95}} > 8 \quad (2.6)$$

여기서, N_1, N_2 = 주입비

D_{15}, D_{10} = 토립자의 입경가적곡선의 15%, 10% 입경

G_{85}, G_{95} = 주입재의 입경가적곡선의 85%, 95% 입경

Mitchell(1970)은 토사에서 그라우팅시 주입재와 침투 가능한 흙 입자에 대한 침투성 실험결과, 식 (2.7)을 이용하여 판정하도록 하였다. 표 2.1에 주입재의 종류별 입경을 나타냈다.

$$N_1 = \frac{D_{15}}{G_{85}} > 25 \quad (2.7)$$

여기서, N_1 = 주입비

D_{15} = 토립자 입경가적곡선의 15% 입경

G_{85} = 주입재 입경가적곡선의 85% 입경

표 2.1 그라우트 종류별 G_{85} 와 G_{95} 의 값

주입재의 입경 그라우트의 종류	G_{85}^* (μm)	G_{95}^{**} (μm)
보통시멘트	67	74
조강시멘트	25	34
플라이 애시	47	52
점토	26	50
콜로이드 시멘트	18	27
초미립자 시멘트	6	8
벤토나이트	1.5	7

<주> * G_{85} = 주입재의 입경가적곡선의 85% 입경

** G_{95} = 주입재의 입경가적곡선의 95% 입경

시멘트계 주입재의 최대 입경을 보통시멘트 $100\mu\text{m}$, 초미립자시멘트 $10\mu\text{m}$ 수준으로 가정하면 주입이 가능한 암반균열의 최저 간격은 각각 $300\mu\text{m}$, $60\mu\text{m}$, $30\mu\text{m}$ 수준이 된다.

Kravetz(1958)의 주입비 식 (2.6)의 관계를 만족하면 주입재가 흠 입자 간극을 무리없이 침투주입 될 수 있다. 즉, 식 (2.6)의 관계를 만족하는 흠 입자의 최소 입경은 약 $5\mu\text{m} \sim 15\mu\text{m}$ 정도로 초미립자시멘트를 사용하는 경우 흠 입자의 최소 입경은 $50\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$ 정도이다. 반면, 보통 시멘트를 사용하는 경우는 식 (2.6)의 관계를 만족하기 위해서 흠 입자의 최소 입경이 $500\mu\text{m} \sim 1,200\mu\text{m}$ 정도로 흠 입자 입경이 약 10배 정도 커야 한다.

따라서 주입대상 토질이 가는 모래나 실트질 모래로 구성되어 있는 경우 간극률은 크지만, 유효 간극경의 크기가 작기 때문에 주입재의 입자가 큰 보통시멘트는 침투주입이 어렵고, 주입재의 입자가 충분히 작은 초미립자시멘트를 사용하면 가능하다.

현탁액형 주입재의 사용이 곤란하다고 생각되는 세사 등의 지반에 대해서는 용액형 주입재를 사용한다. 용액형 주입재의 침투성은 점도에 의해서 크게 좌우되지만, 일반적으로 투수계수가 10^{-3}cm/s 정도까지의 지반에 사용할 수 있다. 또한 겔타입이 긴 배합의 경우에는 투수계수가 10^{-4}cm/s 정도의 지반에 까지 침투 가능범위가 확대된다.

King and Bush(1961)은 일반적인 사질토 지반의 흠을 대상으로 흠 입자 간극경 d 와 흠 입자 유효입경 D 와의 관계에 대해서 그림 2.6과 같은 관계를 제안하였다. 즉, 주입대상 토질의 평균입경과 동일한 유효입경이 D 인 이상적인 구형 흠 입자를 가정하고 이와 같은 흠 입자의 평균 입경으로 형성된 흠 입자들의 간극률을 n 이라고 가정하면, 이에 대응하는 흠 입자 간극경 d 와의 관계는 가장 조밀하게 다졌을 상태에서의 간극률 $n = 26\%$ 일 경우 $d = 0.15D$ 이고, 가장 느슨하게 다졌을 때의 간극률 $n = 48\%$ 일 경우 $d = 0.41D$ 임을 보였다.

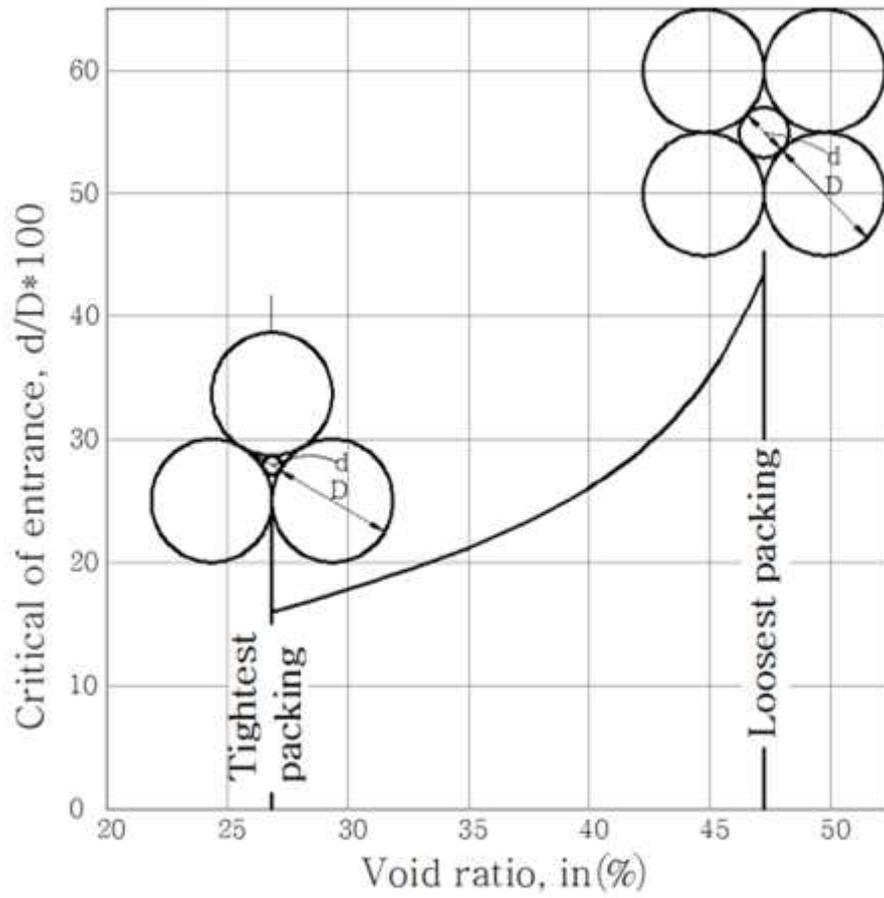


그림 2.6 $d/D(\%)$ 와 간극률 n 과의 관계(King and Bush, 1961)

2.2 그라우팅 공법 설계

2.2.1 주입재의 종류 및 특성

(1) 보통 포틀랜드 시멘트

한국 산업표준규격(Korean industrial standards) KS L 5201에 의하여 포틀랜드 시멘트(Ordinary portland cement, OPC)는 5가지 종류로 구분되며, 특징은 표 2.2와 같다.

제 1종은 OPC로 재료값이 상대적으로 저렴하여 그라우팅 재료로 가장 많이 사용되고 있지만, 다른 OPC에 비해 상대적으로 내화확성이 떨어지는 단점이 있다. 제 2종의 경우는 보통정도의 황산염이온으로 만들어졌으며, 제 1종에 비해 수화열 발생이 적다. 제 3종은 조강시멘트로 약 2주 이내에 강도가 발현되어야 하는 긴급한 그라우팅에 사용되며 OPC에 비해 입경이 작기 때문에 미세한 간극의 주입재료로 사용되기도 한다. 이 종류의 시멘트의 분말도는 $3,300\text{cm}^2/\text{g}$ 이상으로 다른 종류의 시멘트에 비해 세립이므로 상대적으로 응결속도가 빨라 조기강도가 발현된다. 그러나 강도 실현이 빠른 반면에 다른 종류의 시멘트에 비해 강도가 상대적으로 낮은 단점이 있다. 제 4종은 제 2종에 비해 수화열이 적고 제 1종에 비해 강도발현이 늦지만, 일반적으로 수화열이 낮아야 하는 주입 그라우트에 이용된다. 제 5종은 황산염이 많은 토사나 지하수가 있을 때 이용되며 강력한 내황산염 그라우트 재료이다. 이 종류의 시멘트 분말도는 $2,800\text{cm}^2/\text{g}$ 이상으로 최대입경은 $0.1\text{mm}(100\mu\text{m})$ 이다.

일반적으로 현장에서 이용하는 OPC의 경우는 단일 현탁액을 주로 사용하고 있으나, 주입재의 침하, 블리딩 현상 방지 및 주입성 증대를 위하여 나트륨(Na)형 벤토나이트나 활성벤토나이트를 3%~4%첨가하여 이용하는 경우도 많다.

표 2.2 일반 포틀랜드 시멘트 물리적 특성(건설교통부, 2003)

항목		종류	1종	2종	3종	4종	5종
분말도	비표면적(cm ² /g)		2,800 이상	2,800 이상	3,300 이상	2,800 이상	2,800 이상
응결 시간	길모어 시험	초결(분) 중결(시간)	60이상 10이하	60이상 10이하	60이상 10이하	60이상 10이하	60이상 10이하
	비카 시험	초결(분)	45이상 375이하	45이상 375이하	45이상 375이하	45이상 375이하	45이상 375이하
수화열 (cal/g)	7일 28일		-	70이상 (80이하)	-	60이상 70이상	-
압축 강도 (kg/cm ²)	1일		-	-	130	-	-
	3일		130이상	110이상	250이상	-	90이상
	7일		200이상	180이상	280이상	75이상	160이상
	28일		290이상	285이상	310이상	180이상	210이상

(2) 혼합시멘트

혼합시멘트는 최근 해상 점성토층이나 온천지역 등과 같이 염소이온이나 황산염이온이 많은 지역에서 콘크리트의 열화 때문에 제 5종 OPC와 함께 사용량이 증대되는 시멘트이다. 이 시멘트는 내화학적 시멘트로 고로슬래그시멘트나 플라이애시시멘트 등으로 구분되는데, 이는 혼합시멘트에 첨가되는 혼합재량의 첨가비율만큼 C3A(클링커 구성광물)를 감소시키는 효과는 같으면서도 혼합시멘트가 갖는 장점을 포함하고 있다.

혼합시멘트의 장점은 제철과정이나 발전과정에서 발생하는 부산물로 슬래그나 플라이애시와 같은 폐자원을 사용하므로 최근 선진국에서는 사용이 적극 장려되고 있다. 그러나 아직까지 일반화되지 않은 상태로 향후 방조제 등의 그라우팅에 적용성이 높을 것으로 예상된다.

(3) 고로슬래그 미분말

고로슬래그 미분말은 잠재수경성을 갖고 있고, 그 자체의 경화성질은 미약하지만 포틀랜드시멘트와 혼합할 경우 수산화칼슘이나 황산염의 작용에 의해 경화가 촉진되어 포틀랜드시멘트에서 얻을 수 없는 다음과 같은 우수한 콘크리트의 특성을 얻을 수 있다.

- 수화발열 속도의 저감 및 콘크리트의 온도상승 억제 효과
- 장기 강도의 향상
- 수밀성의 향상
- 염화물 이온 침투 억제에 의한 철근 부식 억제 효과
- 황산염 등에 대한 화학저항성의 향상
- 알칼리 반응의 억제 효과
- 유동성의 향상

이와 같은 특성을 갖는 고로슬래그 미분말은 혼화재료로서 사용함에 따라, 즉 사용자가 고로슬래그미분말의 분말도 및 치환율을 자유롭게 선택함에 따라 목적에 맞는 콘크리트의 특성을 얻을 수 있다. 국내에서는 고로슬래그 미분말은 현재 고로시멘트로서의 사용이 대부분이지만, 고로슬래그미분말의 뛰어난 특성을 더욱 효율적으로 사용할 필

요가 있으며, 고로슬래그미분말의 규격화 및 콘크리트용 혼화제로서의 활용이 요구되고 있다.

1) 고로슬래그 미분말의 수화반응

고로슬래그 미분말이 pH 12이상의 수산화칼슘 포화용액 중에 노출되면, 알루미늄 규산염의 결합은 약화되어 수화가 시작되고, 칼슘이온이 소비된다. 그러나 Ca(OH)₂의 보급을 중단하고, 알칼리 농도가 희석되면 반응은 정지하게 된다. 슬래그가 물과 접촉하면 슬래그 입자 표면에 치밀한 불투성의 산성피막이 생기기 때문에 반응을 이어가기 위해서는 강알칼리에 의한 피막의 파괴가 필요하다. 이와 같은 자극작용을 위하여 NaOH, KOH 나 Ca(OH)₂ + CaSO₄의 첨가도 유효하게 작용할 수 있다.

자극작용에 의해 슬래그 표면으로부터 용해반응이 일어나면, 다음에 그 용액으로부터 불용성물질이 석출되어 경화가 시작된다. 이 경우 슬래그는 장기적으로는 슬래그 질량의 약 10%에 상당하는 Ca(OH)₂와 결합한다. 포틀랜드시멘트 클링커는 약 25%의 Ca(OH)₂를 생성방출하기 때문에 클링커 : 슬래그 = 25 : 75의 혼합비까지는 슬래그의 전부를 활성화시킬 수 있는 Ca(OH)₂를 확보할 수 있다.

표 2.3은 고로슬래그 미분말 및 OPC의 SiO₂, Al₂O₃ + Fe₂O₃의 함유량을 비교한 것이며, 고로슬래그 미분말의 경우 SiO₂가 더 많은 비중을 차지하고 있으며, OPC 경우 Al₂O₃ + Fe₂O₃가 고로슬래그 미분말보다 4배이상 많은 것으로 확인된다.

표 2.3 주입재 화학성분(건설교통부, 2003)

구 분	고로슬래그 미분말(%)	OPC(%)
SiO ₂	33	20
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	15	70

표 2.4는 주입재의 물리적 성질을 비교한 것이다.

국내의 고로슬래그미분말의 규격화는 KS F 2563(콘크리트용 고로슬래그 미분말)으로써 1997년에 제정되었다. 그 후 콘크리트 제품에 혼화재료로써 뿐만 아니라 레미콘에도 현재 많은 양이 사용되고 있으며, 그 사용량도 점점 확대되고 있다. KS F 2563

에서는 고로슬래그미분말의 비표면적의 크기에 따라 고로슬래그 4,000, 고로슬래그 6,000 및 고로슬래그 8,000의 3종류로 구분되고 있다. 일반적으로 고로슬래그 미분말의 비표면적이 클수록 유동성 및 강도발현성이 좋은 것으로 되어 있다.

조사결과에 의하면 고로슬래그 미분말 4000은 mass concrete나 혹은 일반 콘크리트 용으로 사용이 가능하고, 고로슬래그 미분말 6000은 그 유동특성을 살려 고유동 콘크리트에의 적용이 가능하며, 고로슬래그 미분말 8000은 강도발현에서의 특징을 살려 고강도 콘크리트에 사용이 가능할 것으로 나타났다. 고로슬래그 미분말을 혼화재로써 사용하는 목적은 앞에서 지적한 고로슬래그 미분말의 여러 가지 특성을 이용하여 콘크리트의 성능향상에 그 목적을 두고 있다. 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 수밀성, 염분차폐성, 내동해성, 내해수성, 내산성, 내황산성 및 알칼리-실리카 반응억제 등에 뛰어나며, 고분말도 슬래그의 경우 상기와 같은 특성이 보다 현저하게 나타나게 된다. 또한, 고분말도의 슬래그의 경우는 일반 슬래그 시멘트에서 나타나는 조기강도 발현성에 대한 문제점을 극복할 수 있기 때문에 고강도 콘크리트에 적용이 가능해질 수 있다는 특징을 가진다.

고로슬래그의 잠재수경성을 발현시켜 시멘트를 대체하는 콘크리트 결합재로 개발하기 위해 지속적으로 연구가 되어 많은 알칼리 활성화 재료들이 제안되었다. 이러한 알칼리 활성화 재료들이 혼합된 슬래그를 그라우트재로서 활용하기 위한 연구들이 진행되면서 슬래그의 켈화발생 현상들을 확인하고 관련 특허를 출원하여 공법 상용화가 추진되었다. 그러나 여전히 슬래그의 그라우트재로서의 탁월한 잠재력에 비해 연구, 개발, 공법상용화에 있어서는 미진한 현실이다.

표 2.4 주입재 물리적 성질(건설교통부, 2003)

		KS 규정값	OPC	미분말 고로슬래그 1급	미분말 고로슬래그 2급	미분말 고로슬래그 3급
비 중		-	3.15	2.80	2.80	2.80
분말도(cm ² /g)		2,800이상	3,250	3,000 ~ 5,000	5,000 ~ 7,000	7,000 ~ 10,000
응결(Vicat)	w/c(%)	-	28.7	-	-	-
	초결(분)	60이상	170	-	-	-
	종결(분)	600이하	450	-	-	-
압축강도	w/c(%)	-	48.5	-	-	-
	1일(kg/cm ²)	-	61	-	-	-
	3일(kg/cm ²)	130이상	202	-	-	-
	7일(kg/cm ²)	200이상	264	550	750	950
	28일(kg/cm ²)	290이상	450	750	950	1,050

본 연구에서 사용된 고로슬래그 미분말의 경우, A사의 고로 슬래그 미분말 1종을 사용하였으며, 제품의 물리적 특성, 화학적 특성, 품질기준은 표 2.5, 2.6, 2.7과 같다.

표 2.5 본 연구에서 사용된 물리적 특성

종 류	밀도 (g/cm ³)	평균입경 (μ m)	잔분 (45 μ m,%)	비표면적 (cm ² /g)	수분 (%)
고로슬래그 미분말 1종	2.88~2.94	2~4	2.0이하	8000~10,000	0.4이하

표 2.6 본 연구에서 사용된 화학적 특성

<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>SO₃</i>	감열감량
30.0~36.0	12.0~18.0	0.25~0.35	38.0~45.0	10.0이하	4.0이하	3.0이하

표 2.7 본 연구에서 사용된 고로슬래그 미분말의 품질 기준

항 목		KS 규격 기준(KS F 2563) 1종
밀도(g/cm ³)		2.80이상
비표면적(cm ² /g)		8,000~10,000
활성도지수(%) (SAI)	재령 7일	95 이상
	재령 28일	105 이상
	재령 91일	105 이상
플로값 비(%)		95 이상
MgO(%)		10.0 이하
SO ₃ (%)		4.0 이하
감열감량(%)		3.0 이하
염화물 이온(%)		0.02 이하

(4) 물유리계(Water glass)

규산나트륨(규산소다)은 수용성 규산염 중 가장 널리 사용되고 있는 무기화합물이다. 화학식으로는 규산소다, 분자식으로는 Na₂ O·nSiO₂ (n은 Mole비)로 나타낸다. 물유리는 무기재료로서 매우 뛰어난 많은 특성을 지니고 있어서 다방면의용도를 갖는 재료이다. 이것은 건식법으로서 규산(nSiO₂)과 탄산나트륨(Na₂ CO₃) 또는 습식법으로서 규산(nSiO₂)과 수산화나트륨(NaOH)를 원료로 해서 만들어진다. n은 몰비로 n=4~5 범위의 것이 공업적으로 생산되고 있다. n이 1이하인 것은 결정성규산소다 라고 부르며 n이 1이상인 것은 비정질의 구조가 되어 액상으로서 통상 규산소다라고 부른다.

규산소다는 몰비에 의해 1호, 2호 3호, 4호가 있으며 일반적으로 약액주입에 사용되

는 것은 3호 물유리로 특수한 경우에 2호, 4호가 사용될 때가 있다. 분자식으로 표현되며, 물에 대한 용해성이 있기 때문에 물유리(water glass)라고도한다. $SiO_2 / Na_2 O$ 의 몰비와 농도에 따라 다양한 성질을 나타내며 다양한 용도로 사용되고 있다(이규환, 2002).

표 2.8은 물유리계별 특성을 나열한 표이다.

표 2.8 물유리별 규격

구 분	1호	2호	3호	메타규산나트륨	
외 관	물엿 상태의 무색 도는 약간의 착색된 액체			1종	2종
$SiO_2(\%)$	35~38	34~36	28~38	27.5~29	19.22
$Na_2O(\%)$	17~19	14~15	9~10	28.5~30	20~22
Fe(%)	0.03이하	0.03이하	0.02이하	-	-
물 불용분(%)	0.2이하	0.2이하	0.2이하	-	-
$Na_2SiO(n)$	약 2	약 2.5	약 3	약 1	약 1

제1단계에서 콜로이드 입자를 형성하고, 제2단계에서는 이 입자들이 서로 집합, 중합하여 연속적인 구조를 만들어 용매를 통해 확장함으로 겔화를 이루게 된다. 즉, 제1단계에서 규산은 시라놀($Si-OH$)끼리 탈수해서 중합하고 실록산(Siloxane) 결합($Si-O-Si$)을 하며, 입자형의 1차 입자가 되고 1차 입자끼리 결합하여 콜로이드 집합체를 형성한다. 이 집합체는 콜로이드 2차 입자라고 부를 수 있지만 이것이 용액 전체로 확장하여 겔을 형성한다. 이러한 1차 입자의 결합단계에는 수소결합에 의해 약하게 연결되지만 규산콜로이드 표면이 시라놀로 되는 점을 고려한다면, 시라놀 사이에 중합이 일어나서 입자 사이에 실록산 결합이 형성되는 결과, 입자끼리 견고하게 연결되어 망상형(3차원)의 겔을 만든다(그림 2.7 참조).

2.2.2 그라우팅 공법 선정

그라우팅 공법의 선정은 지반개량을 할 필요가 있는 개소에 대해서 사전에 토질, 지하수, 지하 매설물, 우물, 공공용수역 등의 조사를 하고, 그라우팅 공법에 의하는 것이 공사현장의 보안, 지하 매설물의 보호, 주변 가옥의 보전, 지하수위 저하방지 등의 관점에서 적당하다고 판단되는 경우에 산정한다. 대상 지반이 연약 점성토층이나 고유기질의 경우 그라우팅 공법의 선정에 있어 특히 신중하게 검토할 필요가 있다. 약액 그라우팅의 종류는 표 2.9와 같다.

표 2.9 그라우팅 룯드 구성에 의한 약액 그라우팅 종류(양형철 등, 2012)

그라우팅 공법	룯드 구성	그라우트 혼합방식	겔화시간	공법명
약액 그라우팅	단관	1액 1공정	완결(수십분)	시멘트몰탈주입
		2액 1공정	완결(수분)	LW공법
				스트레이너주입
	2중관	1액 1공정	완결(수분)	TAM공법
		2액 1공정	완결(수분)	LW공법
		2액 2공정	급결(수십초)	LAG공법
			급결(수십초) 완결(수분)	JS-CGM공법

그라우팅 공법의 선정이 결정되었다면 그라우팅 목적을 명확하게 한 후에 지반조건, 시공조건, 주변 환경 조건 등의 기초자료에 의하여 합리적, 경제적인 개량범위, 그라우

팅 방식, 그라우트량, 로드의 설치 형태, 그라우팅공의 배치 등을 결정한다.

그라우팅의 목적은 차수와 지반보강, 공동충전의 3가지로 크게 구별한다. 그라우팅 설계는 지반공학적인 이론 계산에 의해 본체 공사에 꼭 필요한 지반개량 범위와 정도를 명확하게 하고, 그것을 만족시킬 수 있는 그라우팅 방식, 그라우팅량 등을 공학적으로 결정하는 것이 바람직하다. 그러나 현실적으로는 보통의 경우 유사 공사에서 과거 실적 기준을 기준으로 이루어지는 것이 대부분이고, 지반공학적인 이론계산은 그 타당성을 검증할 때의 참고로서 보조적으로 사용되고 있다. 그라우팅 장소에 근접하여 하천, 호수와 늪, 양어장, 농작물, 우물 등이 존재할 경우에는 그라우팅 자체가 안정성이 높은 것이라도 소정의 범위 내에 확실하게 침투되도록 겔타임을 포함하여 신중하게 검토해야 한다.

표 2.10은 목적별 그라우트의 분류이다.

표 2.10 목적별 그라우트 분류(양형철 등, 2012)

항 목		기 본 적 인 조 건	
개량 의 목적	차수		침투성을 고려한 저점성 용액형 약액
	지반 보강	침투	저점성 용액형 약액
		맥상	겔타임이 짧고 호모겔 강도가 큰 현탁형 약액
		침투·맥상	호모겔 강도가 크고 침투성이 있는 약액
	용수방지		지하수에 희석시 겔타임이 변하지 않는 약액 급결성 고결의 약액(용액 또는 현탁형)(2중관 사용)
복합 그라 우팅	선행 그라우팅		겔타임이 짧고 호모겔 강도가 비교적 큰 현탁형 약액
	본 그라우팅		선행그라우트와 같이 침투성을 갖는 약액
특수지반		(산성, 알칼리성 지반) 사전에 check하여 그라우트를 선정	
기 타		환경 보존성을 검토(독성, 지하수 오염, 수질 오타 등)	

2.2.3 그라우팅량 계산

그라우팅량의 계산은 개량 대상토층의 지반조건이나 그라우팅 목적에 적합한 그라우팅의 종류와 펌프압송방식 등 기술적인 면과 경제적인 면을 고려하여 계획할 필요가 있다. 일반적으로 그라우팅량을 구하는 기본식은 개량 대상토량 (V)에 그라우팅률 (λ)을 곱한 식 (2.8)과 같다.

$$Q = V\lambda = Vn\alpha(1 + \beta) \quad (2.8)$$

여기서, Q = 개량 대상 지반에 대한 그라우트량(1m³ = 1,000L)

V = 개량 대상 지반의 체적(m³)

λ = 그라우팅률

n = 간극률

α = 충전율

β = 손실계수

식 (2.8)에 의한 그라우팅량의 산정은 입자간 침투 그라우팅을 전제로 한 것이며, 맥상 그라우팅과 같은 경우에는 적용하기 어렵다. 따라서 맥상 그라우팅 형태에서는 현재 계산방식이 확립된 것이 없기 때문에 경험적으로 맥상 그라우팅의 경우에도 식 (2.8)을 적용하고 있다.

(1) 간극률

보통 지반의 간극은 일반적으로 물과 공기로 점유되어 있는 부분을 나타내고 있다. 그러나 공기는 미미하기 때문에 일반적으로 간극수에 대해서만 고려한다. 간극수는 자유수와 흡착수로 이루어져있다. 이중에서 자유수는 중력수라고도 말하고, 각종 배수공법을 실시하는 것에 따라 배제할 수 있는 물이다. 한편 흡착수는 보통 수행하는 배수공법 등을 사용해도 배제할 수 없는 물을 말한다. 그라우팅량의 검토에서 간극률은 그라우팅에 의해 주입재로 바꿀 수 있는 자유수가 차지하는 체적을 대상으로 하며, 이것을 유효 간극률이라고 한다.

간극률은 토질조사에 의해 실측하는 것이 바람직하지만, 실측이 곤란한 경우에는 경험적으로 유사지반에서의 시공경험으로부터 결정할 수 있다.

(2) 충전율

충진율은 개량 범위 내에 있어서 소정의 그라우팅 효과를 얻기 위해서 필요한 것으로 지반의 간극에 대한 충전 비율을 나타낸다. 이 값은 개량 대상 지반의 토질성상, 그라우팅의 침투성, 그라우팅의 형태 등에 의해 달라진다.

(3) 손실계수

실제 그라우팅에 있어서 계획된 개량 범위 내에 소정의 그라우팅 효과를 얻기 위해서는 계획된 개량범위 외에까지 약액이 미치는 것은 피할 수 없으며, 이러한 상태는 시공상의 안전율로서 그라우팅률을 결정할 때 고려할 필요가 있다. 이 값은 개량 대상의 중요도, 개량효과의 기대도 등에서 결정되어야 하는 것이지만, 현재는 이 계수에 대한 이론적인 뒷받침이 되어있지 않고, 경험적으로 손실계수(β)는 0.1 정도가 사용되고 있는 경우가 많다. 그라우팅량의 산출에 관한 참고자료는 표 2.11과 같다.

표 2.11 토질에 의한 그라우트의 충전율, 그라우팅률의 참고치(양형철 등, 2012)

토질	항목	N	투수 계수 (cm/s)	n(%)	그라우트 종 별	충진율 (%)		그라우팅률(%)		비고
						보 강	차 수	보 강	차 수	
자갈 모래	무르다	4~10	10^1	40~50	현탁액계	95	100	43~48	45~50	$\alpha \cdot (1+\beta)$: 충전율 $n \cdot \alpha(1+\beta)$: 그라우팅률
					용액계	-	100	-	45~50	
	중정도	10~30	10^0	35~40	현탁액계	95		33~38	-	
					용액계	90	100	31~36	35~40	
	조밀	30~50	10^{-1}	30~35	현탁액계	90	-	27~31	-	
					용액계	90	95	27~31	28~33	
사질토	무르다	4~10	10^{-2}	45~50	용액계	90~95	40.5~47.5			
	중정도	10~30	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	40~45	용액계	90~92	36.0~41.4			
	조밀	30~50	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	35~40	용액계	80~85	28.0~34.0			
점성토	무르다	0~4	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	60~75	현탁액계	40	-	24~30	-	
					용액계	45	-	27~34	-	
	중정도	4~8	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	50~60	현탁액계	30	-	15~18	-	
					용액계	30	-	15~18	-	
부식토	0~5	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	70~90	현탁액계	60		42~54			
				용액계	-	100	-	70~90		

- <주> 1. 토질조사 결과 N치, 투수계수 간극률이 표와 다를 때는 간극률을 우선한다.
 2. 간극률이 분명하지 않을 때는 N치로 추정한다.
 3. 손실계수 β 는 0.1로 한 값이다.
 4. 그라우팅목적의 중요도로 충전율을 고려한다.

2.3 바이오그라우팅 공법

2.3.1 바이오그라우팅 개요

흙의 고결화는 고결작용 또는 퇴적물이 퇴적암으로 되는 속성작용이라고 한다. 이러한 고결화는 간극을 통하여 고결물이라 부르는 고형물질들이 간극 내에 침전되어 퇴적물 입자들을 서로 묶어 주어 흙 입자를 단단하게 형성하도록 한다(김호철, 2010).

미생물에 의한 흙의 고결화는 친환경 소재인 미생물의 요소분해효소 반응을 통해 이산화탄소(CO_2)와 암모늄(NH_4)을 생성하여 탄산염(HCO_3)를 만들고, 반응용액인 염화칼슘 수용액($CaCl_2$)의 혼합으로 바이오주입재($CaCO_3$)가 흙 속의 간극 내에 침전되어 흙 입자들을 단단한 고결물로 형성하도록 하는 것이다. 바이오그라우팅은 연약지반의 고결화를 이루는 공법으로 주로 주입공법이 사용되고 있다.

주입공법은 주사바늘을 사용하여 체내에 주사하는 것처럼 비교적 가는 주입 관을 지반 속에 삽입한 후 여러 가지의 주입재(시멘트, 약액 등)에 압력을 가하여 지반 속의 간극, 공동, 균열 등을 메워 강도증가와 차수효과를 높이고자 하는 연약지반 개량공법이다. 비배수 그라우팅의 중요한 특성은 자연성질을 이용하는 것이다. 이러한 비배수 그라우팅공법은 흙 퇴적물의 원상태가 파괴되지 않는 특성이 있어 흙이 자연성질 그대로를 유지한다.

화학적 그라우팅은 보통 $10^{-1}cm/s \sim 10^{-4}cm/s$ 범위의 침투성을 가진 토양을 처리하는 데 사용된다(Karol, 2003; Leonard and Moller, 1963). 화학적인 그라우팅은 한번 주입되면 침전물 입자의 축진에 의해서 퇴적물에 굳어 응고되거나 긴 결정체로 채워져 얽히게 되는데, 침전물이 응고되고 굳어지는 시간은 활성제, 흡입제, 축매제의 밀도에 따라 다르며, 그 범위는 1분~300분까지이다(Karol, 2003).

바이오그라우팅공법은 환경오염에 많은 영향을 미치는 시멘트와 약액 등의 사용량을 줄이거나 대체하여 친환경 소재인 미생물을 이용함으로써 바이오주입재 침전을 통해 입자 사이의 간극을 채움으로 지반의 강도 증가효과와 차수효과를 증대하는 공법이다.

그림 2.8은 흙 입자 주변에 바이오주입재가 고결되어지는 과정을 나타내고 있다. 바이오주입재가 흙 입자 주변에 균일한 두께의 모습으로 존재하고 있으며, 바이오주입재에 의한 두 입자 사이의 결합은 비교적 적음을 확인하였다. 이렇게 빈 공간을 쪼로 채움으로서 흙의 강도가 증가 되었으며, 이러한 강도 증가는 흙의 안정성을 증가시킴과

동시에 침하로 인한 붕괴 가능성을 줄이고, 흠 입자를 고정시키는 결과를 가져 온다 (박경호, 2015).

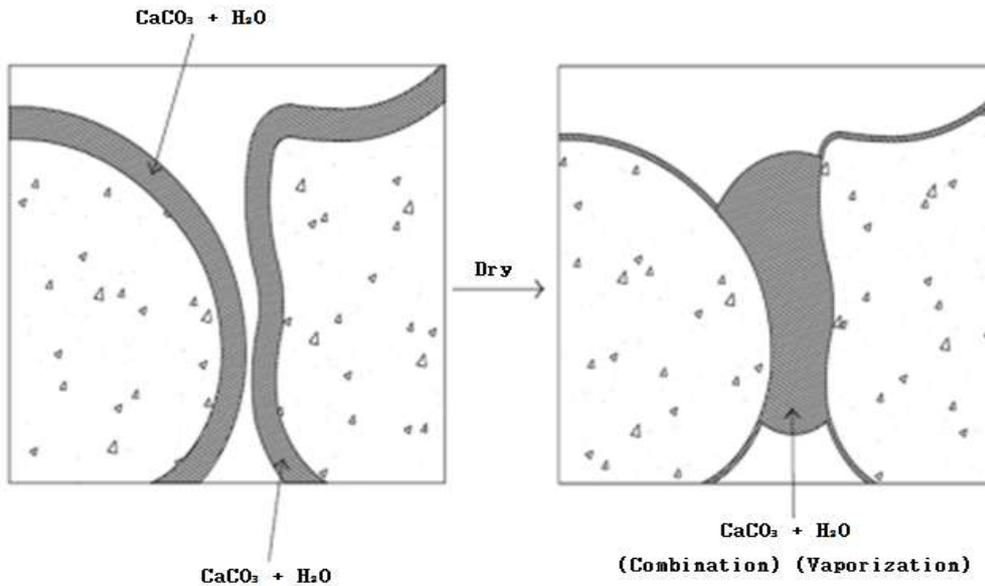


그림 2.8 흠 입자 간극 사이의 바이오주입재 모식도(Park et al., 2014)

2.3.2 바이오주입재 생성 이론

(1) 미생물과 요소(Urease)의 반응

미생물을 이용한 흠의 고결화는 미생물의 생화학 반응을 통해 고결물인 바이오주입재가 흠 입자 사이에 침전되어 나타난다. 본 연구에서는 미생물을 배양하기 위해 배양 배지를 만들었으며, 영양배지(Nutrient Broth)와 요소를 혼합하여 사용하였다. 미생물 성장 요소 중 하나인 영양배지는 식물의 성장에 필요한 물질을 용해시킨 수용액이다.

또한 요소는 화학식($CO(NH_2)_2$)로 나타내고, 무색의 결정성 물질로 물과 반응성이 좋아 물에 잘 녹는다. 이러한 요소는 모든 포유동물과 일부 어류의 단백질 대사 최종 분해 산물로 이용되고 있으며, 단백질이 분해되고 나면 암모니아가 생성된다.

요소분해효소는 Urease라고도 하며, 요소를 가수분해하여 암모니아와 이산화탄소를 생성시키는 반응에 관여한다. 이러한 요소분해효소는 미생물, 고등식물, 하등식물, 고등동물의 위정액과 적혈구에 널리 분포하며 식물에도 존재하기도 한다. 미생물과 요소의

반응식은 아래 식 (2.9)와 같으며, 미생물 성장을 통해 아래와 같이 탄산이온과 두 개의 암모니아이온으로 가수분해 된다.

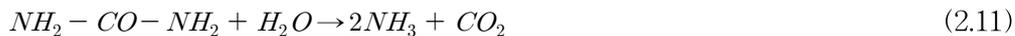


(2) 바이오주입재 생성 이론

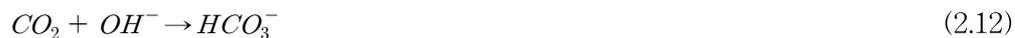
미생물 요소분해효소 반응으로 생성된 탄산이온과 염화칼슘 수용액에서 생성된 칼슘이온의 반응을 통해 미생물을 이용한 바이오주입재 침전 반응식은 식 (2.10)과 같이 나타난다.



Bacillus Pasteurii 미생물은 요소와 물과 반응하여 2개의 암모늄과 이산화탄소로 분해되는데 반응식은 식 (2.11)과 같다.



이때 발생하는 2개의 암모늄은 수용액 상태인 물과 다시 결합하여 2개의 수산화이온이 발생한다. 이러한 수산화이온은 이산화탄소와 결합하여 탄산염을 생성하게 된다. 탄산염의 생성 과정은 식 (2.12)와 같다.



탄산염은 물과 반응시 세 가지 상태로 존재 할 수 있다. 즉, 탄산이온, 탄산수소이온, 탄산으로 각각 존재하며, 바이오주입재의 침전은 탄산염 반응에 따라 다르게 발생한다 (Ramachandran et al., 2001).

이러한 탄산염의 생성 정도가 높을수록 칼슘이온과 결합하여 결과적으로 바이오주입재를 생성한다. 바이오주입재의 생성과정은 반응식 (2.13)과 같다.



pH의 변화는 미생물의 활성을 유발시키며, 요소의 분해는 높은 pH 환경에서 발생됨을 확인하였다. 즉, 미생물 반응을 통해서 생성된 바이오주입재는 지반 내의 간극을 채워 흙 입자간의 결합력을 높여 지반의 고결화가 형성된다. 그림 2.9는 바이오주입재의 생성과정과 흙 입자에 침전되는 모습을 도식화 한 것이다.

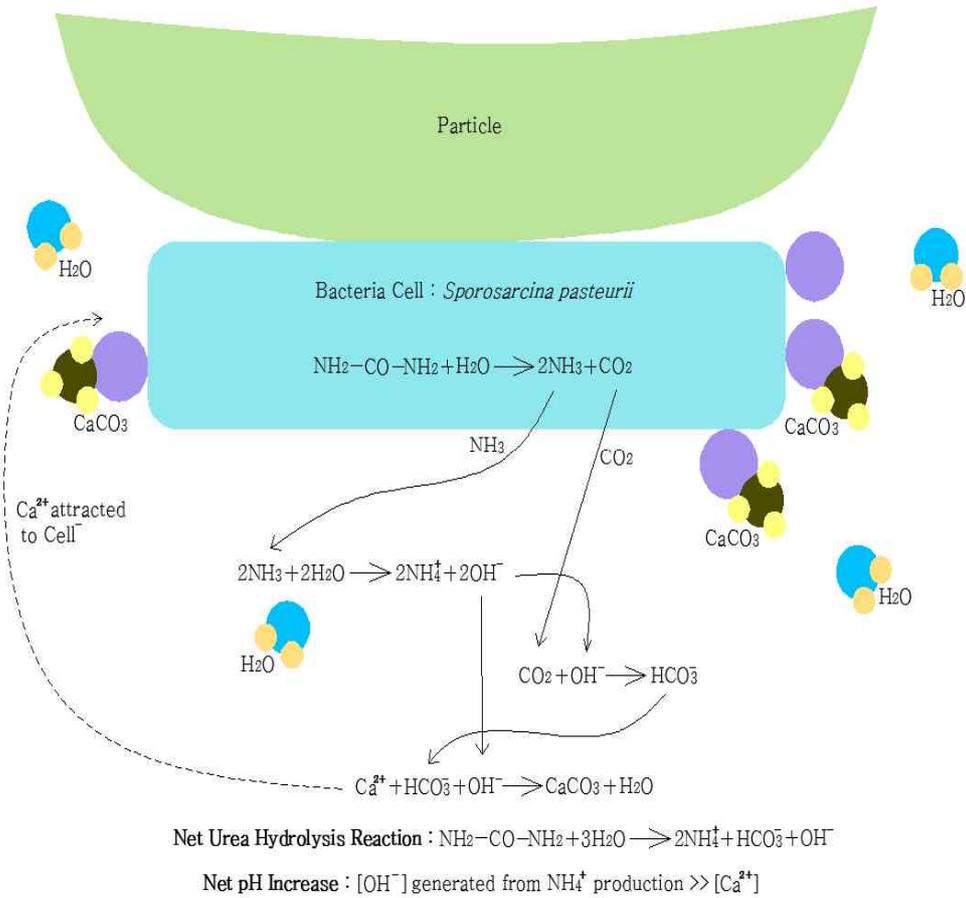


그림 2.9 미생물 고결화 메커니즘(Dejong et al., 2010)

2.3.3 바이오주입재 특징

(1) 바이오주입재 제작과정

본 연구에 사용된 바이오주입재는 일반농도처리에 사용되는 미생물 용액과 동일한 방법으로 제작하였다. 미생물 용액과 염화칼슘 수용액(0.75M)을 1 : 1 배합하면 하얀색 침전물이 생기며, 필터를 통해 침전물인 바이오주입재만을 추출하였다. 추출된 바이오주입재는 온도 40℃에서 24시간 건조시킨 후에 사발접시를 이용하여 분말로 제작하였다. 바이오주입재의 제작과정은 그림 2.10과 같다.



(a) 미생물용액과 염화칼슘 수용액 혼합



(b) 필터를 통해 바이오주입재 추출



(c) 건조



(d) 사발접시를 통해 분말화 함

그림 2.10 바이오주입재의 추출과 제작과정

(2) 바이오주입재의 특성

미생물 용액과 염화칼슘 수용액의 반응결과, 하얀색 침전물이 생겼으며, 미생물 용액에서 생성된 탄산염과 염화칼슘 수용액에서 생성된 칼슘이온이 각각 결합하여 고결물이 생성되었다. 이와 같이 생성된 고결물이 바이오주입재이다. 이러한 반응 용액을 건조기에서 40℃로 건조시켜 용액을 증발시키고 하얀색 침전물을 SEM와 XRD 분석으로 수행하였다. SEM 분석은 입자를 전자현미경으로 확대하여 입자의 구성을 확인할 수 있으며, XRD 분석은 입자의 구성 광물을 확인할 수 있다.

표 2.12과 그림 2.11은 XRD 분석결과이다. XRD 분석결과, Calcite의 정점과 일치함을 보여 분석한 광물이 Calcite, 즉 탄산칼슘임을 확인하였다. 그림 2.12는 SEM 분석을 통해 백색의 가루 모양인 탄산칼슘의 정육각형 알갱이가 서로 엉겨 붙어 있음을 확인하였다(박경호, 2015).

표 2.12 미생물용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 XRD 분석

Ref. Code	Scale Factor	광물명칭 (Mineral name)	화학식
01-072-1937	0.710	Calcite	$CaCO_3$

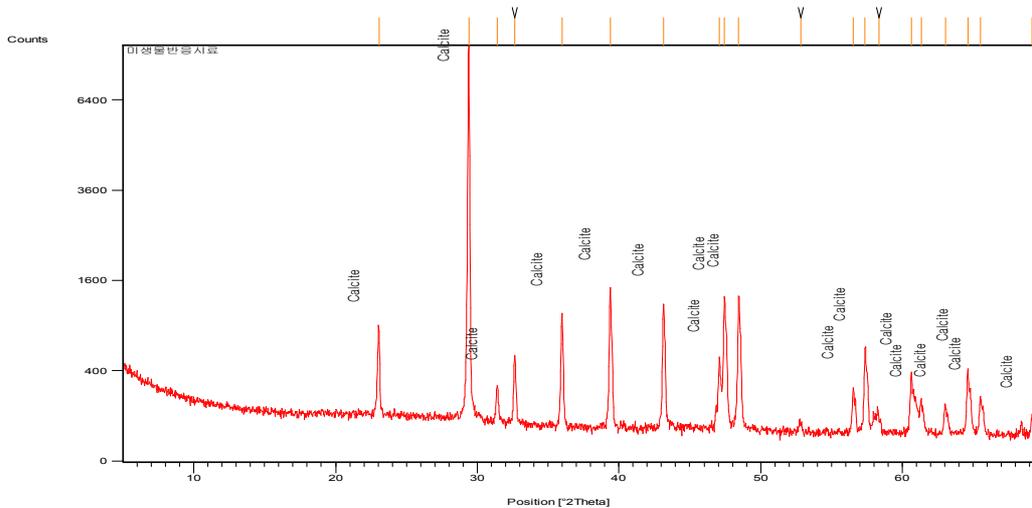
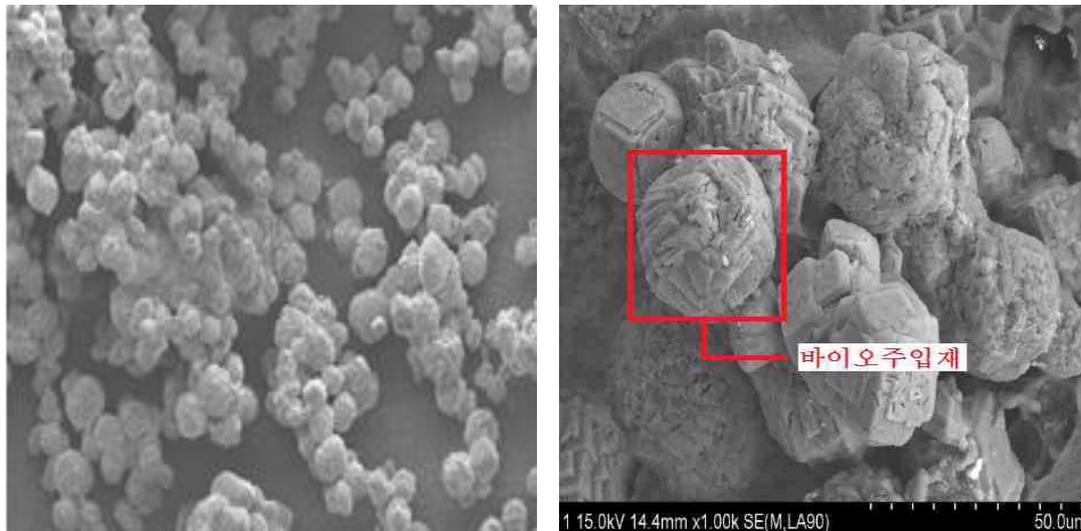


그림 2.11 미생물용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 XRD 분석



(a) 500배 확대 모습

(b) 5,000배 확대 모습

그림 2.12 미생물용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 SEM 분석

2.4 섬유 파쇄제

2.4.1 보강 섬유의 개요

섬유 그라우트의 역학적 성질은 제조방법 뿐만 아니라 매트릭스 및 보강 섬유의 종류에 크게 영향을 받으며, 습도, 염화물 등 화학적 성질에 대한 저항은 섬유 그라우트를 구성하는 재료에 크게 좌우되므로 시공방법 및 대상 구조물의 용도에 맞는 섬유 그라우트를 사용해야 한다. 본 연구에서는 건설용으로 사용되는 제품을 구성하는 재료에 대해 다음과 같이 간략히 조사하였다.

(1) 보강섬유

섬유 그라우트 내의 보강섬유는 주로 하중을 전달하는 역할을 하는 요소로서 현재 국내외 건설분야에서 주로 사용되고 있는 보강섬유의 종류는 유리섬유(Glass fiber), 보론섬유(Boron fiber), 그래파이트섬유(Graphite fiber), 탄소섬유(Carbon fiber), 아라미드섬유(Aramid fiber) 등이 있으며, 특히 콘크리트 구조부재의 보강용으로는 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유가 대부분을 차지하고 있다. 보강섬유의 종류에 따른 섬유 그라우트 보강재는 그림 2.13과 같다.

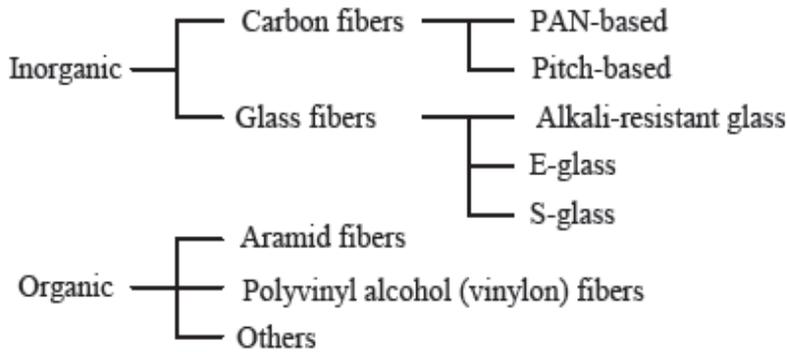


그림 2.13 보강섬유의 종류

현재 가장 많이 사용되고 있는 것은 유리섬유인데 그 이유는 역학적 성질보다는 가격이 저렴하다는 경제성 때문이며, 경제성 이외에도 매트릭스 수지와 잘 부타되는 특

성이 있기 때문이다.

역학적 특성면에서 강도와 강성은 탄소섬유가 가장 크며, 강도와 강성이 탄소섬유보다는 작으나 인성이 큰 재료를 필요로 하는 경우에는 아라미드섬유가 가장 적합하다고 할 수 있지만 습기에 약하다고 알려져 있다. 역학적 특성 외에도 고려해야 할 물리적, 화학적 특성으로는 열팽창계수, 각종 화학성분과의 반응 여부, 구조재료가 태양에 노출되었을 경우 자외선에 의해 노화되는 속도 등이 있다. 따라서 사용할 섬유를 선택할 경우에는 섬유의 특성을 신중히 고려하여 검토하여야 한다.

사용되는 보강섬유에 따라 유리섬유를 보강섬유로 사용한 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic), 아라미드섬유를 보강섬유로 사용한 AFRP(Aramid Fiber Reinforced Plastic), 탄소섬유를 보강섬유로 사용한 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) 등이 있으며 두 종류 이상의 보강섬유를 혼합하여 사용한 Hybrid 보강제도 있다.

섬유 그라우트의 합성부재에서 두 재료의 합성작용을 기대하기 위해서는 두 재료의 열팽창계수 값에 큰 차이가 없어야 한다. 섬유 그라우트재의 열팽창계수는 보강섬유 및 매트릭스 수지의 종류와 섬유함유율에 따라 달라지며 보강섬유의 배치방향과 그 직각방향이 각각 다르다. 섬유 그라우트의 여러 역학적 성질과 유사하게 보강섬유의 배치방향을 열팽창계수는 주로 보강섬유의 성질에 영향을 받으며, 보강섬유와 직각방향을 열팽창계수는 매트릭스 수지의 영향을 받는다(Bank, 1993). 따라서 섬유 그라우트의 특성을 분석한 후 구조물에 적용되는 섬유를 선택하여야 할 것이다.

(2) 매트릭스 수지

매트릭스 수지는 주로 부재단면의 형상유지와 보강섬유를 보고하는 역할을 하는 요소로서 크게 열경화성 수지와 열가소성 수지로 분류된다. 열경화성 수지는 한번 성형되면 다시 열을 가해도 액상화 하지 않으나, 열가소성 수지는 굳은 후 다시 열을 가하면 쉽게 액상화 하는 경향이 있다. 매트릭스 수지의 종류에 따른 섬유 그라우트 보강재의 종류는 그림 2.14와 같다.

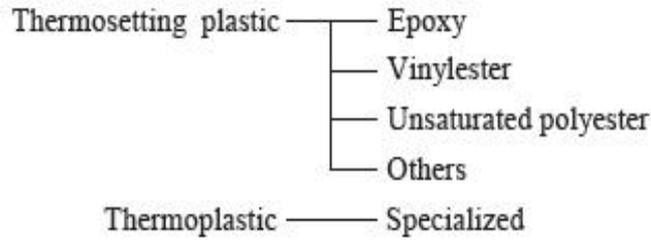


그림 2.14 매트릭스 수지의 종류

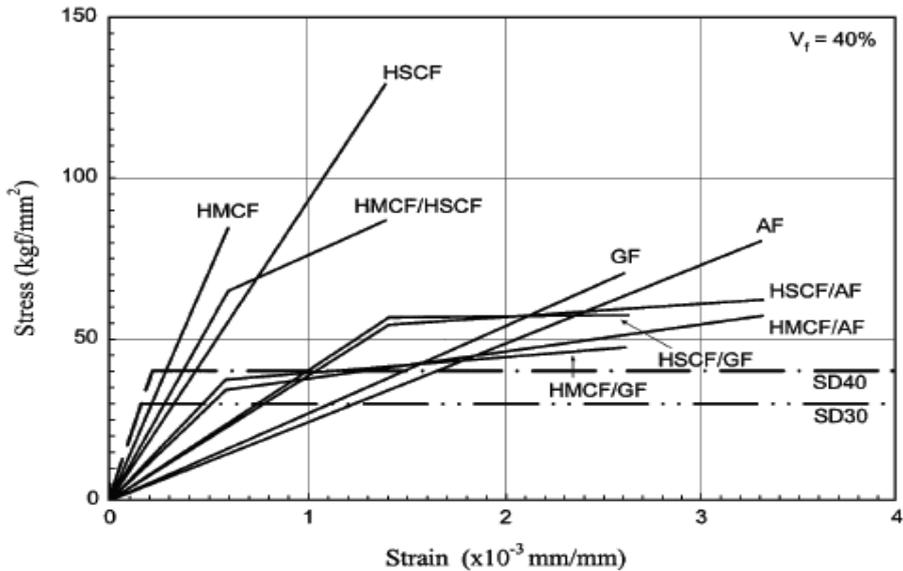
건설분야에서 주로 사용되는 매트릭스 수지는 열경화성 수지로서 그 종류는 다양하나 보통 폴리에스터(Polyester), 비닐에스터(Vinylester), 에폭시(Epoxy), 페놀수지 등이 많이 사용된다. 이들 매트릭스 수지는 역학적 성질이나 온도에 대한 성질 그리고 여러 가지 환경에 대응하는 성질이 서로 다르기 때문에 매트릭스 수지의 선택은 매우 중요하다. 건설분야에서 가장 많이 사용되는 열경화성 수지는 가격이 저렴한 폴리에스터이나 경우에 따라서 비닐에스터와 에폭시 수지도 많이 사용된다. 열에 대해서 가장 안전한 수지는 페놀계 수지로서 화재의 위험성이 큰 곳에서 주로 사용되나 경제적으로 비싼 편이다.

2.4.2 탄소섬유

본 연구에서 사용한 그라우트재 보수 및 보강 재료는 탄소섬유(Carbon Fiber, Reinforcing Fiber)를 비닐에스터(Vinyl-ester, Matrix) 수지에 함침시킨 후 격자(Grid) 형태로 성형한 것이다. 이 재료는 네프맥(NEFMAC, M.S. Asia)이라고 부르며 현재 각종 콘크리트 구조물의 보수와 보강에 사용되고 있다. 네프맥에는 주로 탄소섬유를 사용하고 있으나, 탄소섬유 이외에도 유리섬유와 아라미드 섬유가 사용된다. 또한 탄소섬유 중에서도 고탄성인 것과 고강도인 것 그리고 이들 2가지를 혼합한 것도 사용되고 있다. 이와 같은 혼합 이외에도 탄소섬유와 유리섬유 또는 탄소섬유와 아라미드 섬유를 혼합한 섬유를 사용하기도 한다.

제작된 네프맥 재료의 대략적인 응력-변형률 관계를 그림 2.15에서 보여주고 있다. 이 그림에서 각 섬유에 대한 응력-변형률 관계는 단위체적에 대한 섬유의 중량이 40%

인 것을 기준으로 한 것이며, 섬유를 나타내는데 사용된 기호는 그림 밑에 원어를 사용하여 설명하였다. 문자 CF, AF, GF는 각각 탄소, 아라미드, 유리섬유를 나타내며, HS와 HM은 고강도와 고탄성을 각각 나타낸다.



- HMCF : high modulus carbon fiber
- HSCF : high strength carbon fiber
- GF ; glass fiber(E-glass)
- AF : aramid fiber(Kevlar)
- HMCF/HSCF : high modulus and high strength carbon fiber hybrid
- HSCF/GF : high strength carbon fiber and glass fiber hybrid
- HSCF/AF : high strength carbon fiber and aramid fiber hybrid
- HMCF/GF : high modulus carbon fiber and glass fiber hybrid
- HMCF/AF : high modulus carbon fiber and aramid fiber hybrid

그림 2.15 네프맥 섬유의 응력-변형을 관계(이기범, 2008)

그림 2.15에서 보여주고 있는 바와 같이 네프맥에서 사용하는 섬유의 종류는 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유가 있으며, 탄소섬유에도 고강도와 고탄성 2종류가 사용된다. 강도만을 비교해 볼 때 고강도 탄소섬유는 유리섬유나 아라미드 섬유에 비해 약 1.5배 정도의 큰 강도를 나타내고 있다. 또한 고탄성 탄소섬유는 다른 2종류의 섬유에

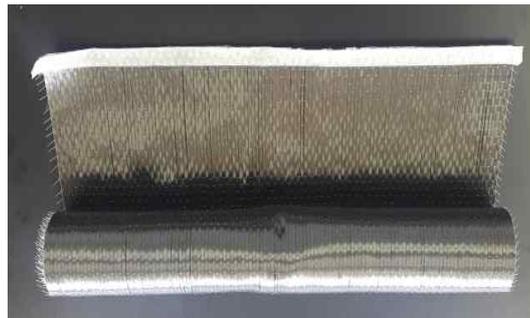
비해 약 2~3배 정도의 높은 탄성계수를 가지고 있으므로 그 만큼 견고하다고 볼 수 있다.

따라서 고탄성 탄소섬유를 사용할 경우 부재의 강성이 커지므로 변형에 저항하는 능력이 커진다. 유리섬유와 아라미드섬유는 강도와 강성에 있어서 큰 차이가 없으나, 인성이 비교적 큰 특징을 가지고 있다. 인성은 하중을 받아 끊어질 때까지 변형이 크게 발생하는 것을 의미한다. 따라서 아라미드섬유와 유리섬유는 콘크리트와 같이 취성이 크고 인성이 작은 재료와 함께 사용할 경우 역학적 거동이 현저히 다르므로 보수 및 보강 재료로 선택할 경우에는 주의가 필요하며, 특히 유리섬유는 콘크리트 내에 있는 알칼리성분에 의해서 약해지는 단점도 있다.

복합재료의 특성 중 기존의 재료(그라우트재)의 특성과 비교할 때 부식이 되지 않는다는 점, 즉 화학약품에 저항하는 성질이 뛰어나다는 점, 전기나 자성을 띠지 않는다는 점, 단위중량당의 강도 및 강성이 현저히 크다는 점이 대표적인 장점이라고 할 수 있다. 따라서 네프맥은 기존의 노후 또는 손상된 콘크리트의 보수 및 보강뿐만 아니라 자성을 띤 재료를 사용할 수 없는 반도체 생산 시설, 화학약품 등을 많이 사용하는 상하수처리시설 및 제지공장 그리고 항만구조물의 건설에서 사용하는데 적합하다고 할 수 있다.

상기 내용을 정리하면 섬유 보강재는 크게 유리섬유, 아라미드 섬유, 탄소섬유 등이 있다. 그 중 유리섬유의 경우 콘크리트 내에 있는 알칼리 성분으로 인해 약해지는 단점이 있고, 아라미드섬유의 경우 습기에 약하기 때문에 본 연구에서 적용한 섬유는 탄소섬유로 사용하였다.

그림 2.16은 본 연구에서 사용된 탄소섬유 모습이다.



(a) 탄소섬유시트

그림 2.16 사용된 탄소섬유 모습



(b) 실험에 사용된 파쇄된 탄소섬유

그림 2.16(계속) 사용된 탄소섬유 모습

연구에서 사용된 탄소섬유는 H사에서 구입한 제품을 사용하였으며, 고로슬래그 및 시멘트와의 혼합을 위해 파쇄된 탄소섬유를 사용하였다. 파쇄된 탄소섬유는 직경 0.5~1.0cm로 원활한 혼합과 추후 현장 시공시 현장의 주입을 높이기 위해 다음과 같이 설정하여 실험을 실시하였다.

또한, 본 연구에 사용된 탄소섬유의 제품의 특성은 표 2.13과 같다.

표 2.13 본 연구에서 사용된 탄소섬유의 제품 특성

품 목	제품특성
섬유종류	고강도탄소섬유
섬유중량(g/m ²)	200
시트치수(Wcm × Lm)	50 × 50
섬유비중(g/cm ³)	1.80
설계두께(mm)	0.11
표준시공두께(mm)	0.45
인장강도(kgf/cm폭)	390
파단시 변형률(%)	1.5

제 3 장 실내실험 방법

3.1 주입재료의 겔타임 측정

3.1.1 겔타임 측정을 위한 배합비

일반적으로 그라우팅용인 시멘트 현탁액형 주입재의 급결재로 규산소다 3호와 같은 물유리계를 주로 사용한다. 대표적으로 사용되는 물유리계인 규산소다의 경우 겔화형성이 뚜렷하고, 비교적 저점성으로 침투성도 좋으며, 단가가 매우 저렴하기 때문에 시공면에서 경제성이 우수하다(임춘호, 2017).

본 연구에서는 급결재인 규산소다 3호와 물, 고로슬래그 미분말과 시멘트의 배합비에 각각 탄소섬유 0, 1%를 혼합한 후 미생물 광물질을 섞어 겔타임을 측정하였다.

주입재 제조는 A액(62.5ml) 속의 규산소다3호의 함량을 물 대비 각각 31.25ml(50%), 21.88ml(35%), 12.5ml(20%) 로 변화시키고, B액 속의 사용된 고로슬래그 미분말은 시멘트 대비 0g(0%), 5g(20%), 10g(40%)를 첨가하였다. 또한 각각의 고로슬래그 미분말과 시멘트의 배합비에 탄소섬유 0, 1%를 첨가하였으며, 1%의 기준은 재활용자원 활용 기준을 참고하였다. W/C는 시멘트 + 고로슬래그 미분말의 중량대비 200%로 고정하였다. C액의 미생물 광물질은 선처리 공정으로 현장시험시 시멘트 대비 10%를 주입하므로 겔타임 측정에서는 2.5g을 고정으로 첨가하였다. 미세광물질인 Calcite가 그라우트 재료에 포함될 경우 미세공극을 채워 보다 지반이 조밀해질 것으로 판단된다.

겔타임은 A액, B액, C액을 각각 200ml 종이컵에 62.5ml씩 채운 후 연속적으로 좌, 우 혼합시켜 종이컵에서 유동성이 정지되는 시간을 3회 측정하여 평균값으로 나타내었다.

표 3.1은 겔타임 측정을 위한 주입재 배합비이다.

표 3.1 겔타임 측정을 위한 주입재 배합비(중량비)

A액(62.5ml)		B액				C액
규산소다 3호(ml)	물(ml)	시멘트 (g)	고로슬래그 미분말(g)	탄소섬유 (g)	물 (ml)	미생물광물질 (g)
31.25(50%)	31.25(50%)	25.0(100%)	0(0%)	0, 0.25	50	2.5
21.88(35%)	40.62(65%)	20.0(80%)	5.0(20%)			
12.5(20%)	50.0(80%)	15.0(60%)	10.0(40%)			

그림 3.1은 겔타임을 확인하기 위한 시험과정이다.

SS는 규산소다 3호(Sodium silicate)이며, W는 물(Water), C는 시멘트(Cement), B는 고로슬래그 미분말(Blast furnace slag powder), F는 탄소섬유(Carbon fiber), CC는 미생물 광물질(Calcite)을 나타내었다.

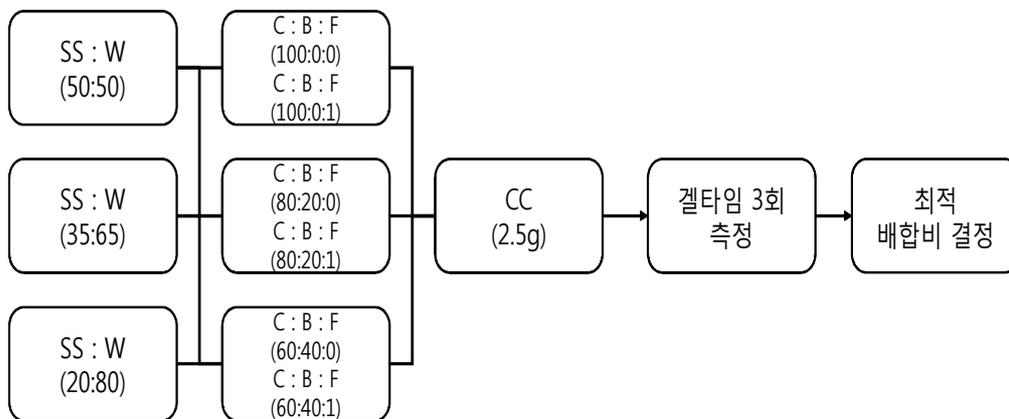


그림 3.1 겔타임 측정을 위한 시험과정

3.1.2 겔타임 측정을 위한 제작과정

본 실험에서는 주입재 배합비를 중량비로 계산하여 A액과 B액을 각각 200ml 종이컵에 62.5ml씩 채운 후 혼합하였다. 겔타임을 측정하기 위해 각각의 종이컵 2개로 배합한 후, 혼합을 시작한 시간부터 종이컵에서 유동성이 없을 때까지 좌, 우로 이동시킨 후 시간을 초단위로 기록하였고, 3회 반복 측정하여 평균으로 나타내었다.

그림 3.2(a)는 겔타임을 측정하기 위해 배합하여 유동성이 정지 할 때까지 반복적으로 좌, 우로 움직이는 사진이고, 그림 3.2(b)는 유동성이 정지 한 후의 초단위를 기록한 사진이다.



(a) 종이컵에 배합



(b) 종이컵 유동성 확인

그림 3.2 주입재의 겔타임 측정 모습

3.2 배합비별 일축압축강도실험

3.2.1 호모겔 일축압축강도를 측정하기 위한 배합비

본 연구에서 측정하고자 하는 호모겔 공시체는 흙 시료를 사용하지 않고 주입재료만의 순수한 일축압축강도를 측정하여 주입재료의 타당성을 확인하기 위한 실험으로, 시멘트와 고로슬래그 미분말, 탄소섬유, 미생물 광물질의 배합비를 통한 강도효과를 확인하고자 하였다.

공시체의 강도를 평가하기 위해서 5cm(D) × 10cm(H) 원주형 몰드에 성형하여 호모겔 형태의 공시체를 제작하였으며, 3시간 후 탈영하여 수중양생으로 3, 7, 21, 28일의 일축압축강도를 확인하였다.

주입재 제조는 A액(350ml) 속의 규산소다 3호의 함량을 물 대비 각각 175ml(50%), 122.5ml(35%), 70ml(20%) 로 변화시키고, B액 속의 사용된 고로슬래그 미분말은 시멘트 대비 0g(0%), 20g(20%), 40g(40%)를 첨가하였다. 또한 각각의 배합비에 탄소섬유 0, 1%를 첨가하였으며, 1%의 기준은 재활용자원 활용기준을 참고하였다. W/C는 시멘트 + 고로슬래그 미분말의 중량대비 200%로 고정하였다. C액의 미생물 광물질은 선처리 공정으로 현장시험시 시멘트 대비 10%를 주입하므로 겔타임 측정에서는 10g을 고정으로 첨가하였다. 미세광물질인 Calcite가 그라우트 재료에 포함될 경우 미세공극을 메워 보다 조밀해질 것으로 판단된다.

실험의 신뢰성을 높이기 위하여 각 배합비마다 2개의 Case를 제작하여 일축압축강도의 평균값을 사용하였고, 일축압축강도는 만능재하시험기를 이용하였으며, 압축속도는 1mm/min 수준으로 일축압축강도를 측정하였다.

표 3.2는 일축압축강도 측정을 위한 주입재의 배합비이다.

표 3.2 일축압축강도 측정을 위한 주입재 배합비(중량비)

A액(350ml)		B액				C액
규산소다 3호(ml)	물(ml)	시멘트 (g)	고로슬래그 미분말(g)	탄소섬유 (g)	물(ml)	미생물 광물질 (g)
175(50%)	175(50%)	100(100%)	0(0%)	0, 1	200	10
122.5(35%)	227.5(65%)	80(80%)	20(20%)			
70(20%)	280(80%)	60(60%)	40(40%)			

그림 3.3은 주입재의 일축압축강도를 확인하기 위한 시험과정이다.

SS는 규산소다 3호(Sodium silicate)이며, W는 물(Water), C는 시멘트(Cement), B는 고로슬래그 미분말(Blast furnace slag powder), F는 탄소섬유(Carbon fiber), CC는 미생물 광물질(Calcite)을 나타내었다.

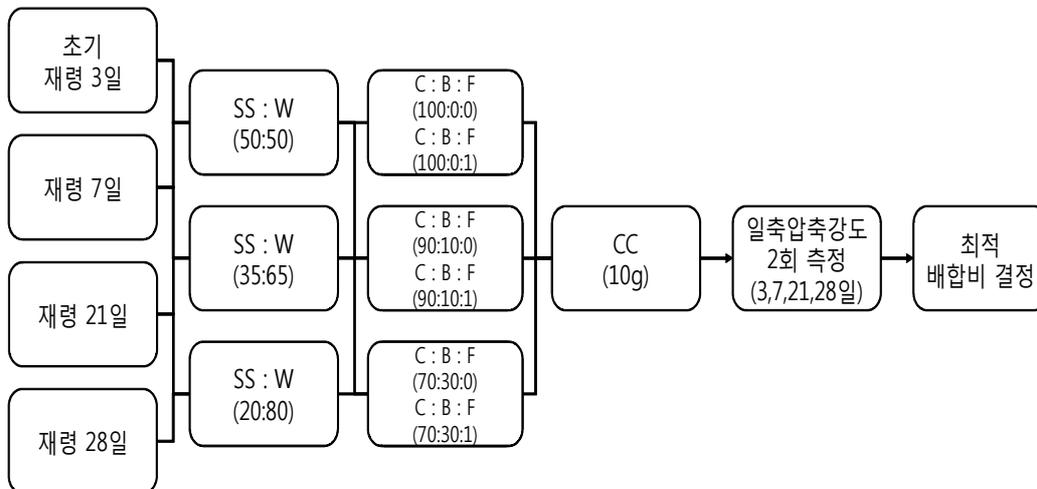


그림 3.3 일축압축강도 측정을 위한 시험과정

3.2.2 호모겔 공시체 제작과정

(1) 시험용기

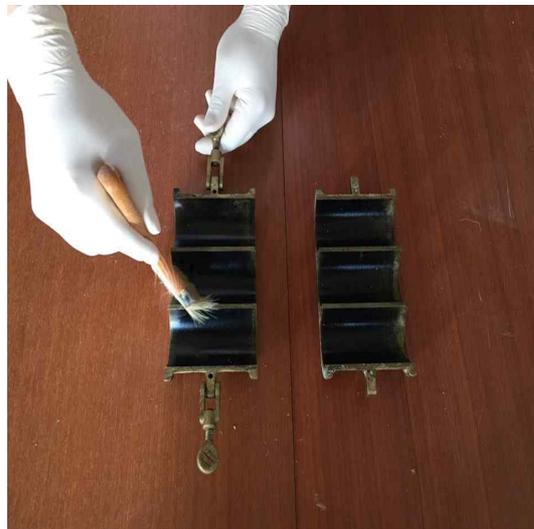
일축압축강도실험을 위한 공시체의 몰드 크기는 KS F 2331에 의해 7cm(D)와 14cm(H)로 1 : 2의 크기를 추천하고 있으며, 시료의 크기나 직경 대 높이의 비율을 맞추도록 하고 있다. 그러나 실질적으로 사용하는 시료의 크기나 실험에 사용된 몰드에 맞추기는 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서 사용된 몰드의 크기는 5cm(D)와 10cm(H)의 원형 몰드로서 직경 대 높이의 비율이 1 : 2로 제작하였다. 실험 몰드는 주철로 제작하였으며, 탈거 과정에서 공시체의 변형을 최소화하기 위하여 용기 안쪽에 윤활제를 얇게 도포하였다. 공시체를 제작 후 용기의 탈거가 용이하도록 1/2로 분리되는 형태로 설계되었다.

실험에 사용할 용기는 그림 3.4와 같다.



(a) 공시체 몰드



(b) 윤활제 도포

그림 3.4 호모겔 제작에 사용된 일축압축 시험용기

(2) 호모겔 공시체 제작

1/2로 분리되는 공시체 몰드에 윤활제를 도포한 다음 배합비에 따라 주입재를 혼합 성형하였다. 준비된 몰드에 주입재를 넣고, 24시간 후 공시체를 탈형하여 수중 양생을 통해 공시체를 재령하였다.

완성된 공시체의 크기는 5cm(D)와 10cm(H)로 주입재에 따른 일축압축강도를 분석하기 위해 3일, 7일, 21일, 28일까지 재령 하였으며, 그림 3.5와 같이 일축압축강도실험을 수행하였다.



(c) 배합후 공시체 모양



(d) 공시체 제작 후 수중양생



(e) 시험전경



(f) 시험후 공시체 모양

그림 3.5 일축압축시험 전경

3.3 배합비에 따른 투수시험

본 연구에서는 정수위 실험을 이용하여 포화투수실험을 수행하였다. 정수위 시험은 모든 형태의 흙에 폭 넓게 사용되고 있으며, 유추되는 물의 양을 Q와 측정시간 t를 측정하여 투수계수를 유출한다.

선처리 미생물 광물질과 후처리 고로슬래그 미분말 및 시멘트, 탄소섬유를 이용한 차수 그라우팅 공법은 시멘트와 약액으로 사용하는 그라우팅공법과 미분말 입자를 이용하여 흙 입자 사이에 주입되고, 탄소섬유에 의해 수평저항력이 증가되므로 지반의 강도 증가 및 차수의 효과를 나타내는 공법이다.

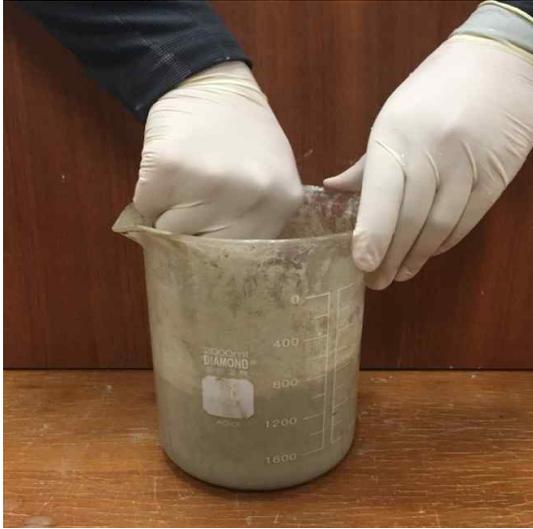
정수위 투수실험을 위해 표 3.3은 시료 배합비를 나타내었다.

주입재 제조는 A액(350ml) 속의 규산소다3호의 함량을 물 대비 105ml(30%)로 고정하였으며, C액 속의 미생물 광물질은 시멘트 + 고로슬래그 미분말 양의 10%로 고정하였다. B액 속의 사용된 고로슬래그 미분말은 시멘트 대비 0g(0%), 20g(20%), 40g(40%)를 첨가하였으며, 탄소섬유는 0, 1%를 사용하였고 각각의 배합비를 표준사 900g에 교반하여 100mm(D) × 120mm(H)의 모형토조에서 실험을 진행하였다.

시료의 하단에 철망과 거름종이를 설치하여 시료가 빠져나가지 못하게 하였고, 배합 후 수중양생을 실시하여 20±2°C로 일정 온도를 맞춰 1일 양생을 정수위 투수실험을 수행하였다.

표 3.3 정수위 투수시험 측정을 위한 주입재 배합비

A액(350ml)		B액				C액	시료
규산소다 3호(ml)	물 (ml)	시멘트 (g)	고로슬래그 미분말(g)	탄소섬유 (g)	물 (ml)	미생물 광물질 (g)	표준사 (g)
105(30%)	245(70%)	100(100%)	0(0%)	0, 1	200	10	900
		80(80%)	20(20%)				
		60(60%)	40(40%)				



(a) A액 + B액 + C액 Mixing



(b) 투수시험

그림 3.6 투수시험 배합 과정

3.4 SEM 및 EDX 분석 방법

본 연구에서는 SEM 및 EDX 분석을 위한 장비로 사용한 전자현미경 Scanning Electron Microscope (이하, SEM) 이다. 전자현미경은 전자에 대한 렌즈작용을 코일에 흐르는 전류를 변환시킴으로서 magnetic field를 사용하여 전자의 이동 경로를 변하게 하여 마치 볼록렌즈가 빛을 집속하듯 전자를 모아주는 것과 유사하다. 광선 대신에 전자 빔을 사용하기 때문에 현미경의 내부는 진공상태여야 하는 이유는 전자가 공기와 충돌하면 에너지가 소실되거나 굴절되는 등 원하는대로 제어하기 어렵게 때문이다. 또한, 표본과 대물렌지와 렌즈 사이의 거리는 일정하지만 중간렌즈와 투영렌즈의 코일에 통하는 전류의 세기에 의해 배율이 결정되며 상의 초점은 대물렌즈의 코일에 흐르는 전류에 의해 조절된다.

광학현미경은 실제의 상을 볼 수 있지만 전자현미경은 형광판이나 사진판을 상을 볼 수 있다. 광학현미경은 높은 에너지의 전자빔을 이용하여 전자가 시편과 충돌할 때 발생하는 이차전자, 반산전자, X-선 등을 검출하여 확대 상을 촬영하는 장치로서 표본의 빛을 흡수/반사상이 형성되는 반면, 전자현미경에서는 전자선이 시료의 표면에 충돌하면서 발생하는 이차 전자, 산란전자, 투과전자, X-Ray 등을 측정하여 표면의 형태를 영상으로 나타낸다.



그림 3.7 실험에 사용된 전자현미경

3.5 환경성 평가

3.5.1 환경성 평가의 개요

지반 개량재와 주입재의 환경영향을 평가하기 위한 방법으로서 일본에서 약액주입공법에 의한 지반개량시 고결체로부터 약액의 성분이 용탈되어 주변 토양과 지하수를 오염시킨 사례가 보고되고 있는 바, 주입공사시 그라우팅 용액이 주변 환경에 미치는 영향을 평가하기 위한 방법이다.

국내에서는 약액주입공법에 의한 지반개량시 고결체로부터 약액의 성분이 용탈됨으로서 주변의 토양과 지하수를 오염시킨 사례가 보고되고 있으며, 환경오염을 고려하면서 불가피하게 약액주입을 수행하여야 할 경우 주변 환경의 영향을 고려하여 적절한 공법과 재료를 선택하도록 법적인 근거를 마련하고 있다. 그러나 국내에서는 지금까지 약액주입공법에 의한 피해사례가 보고된 적이 없고 외국의 사례를 통해 추정할 뿐이다.(천병식과 김진춘, 1998; 이강호, 2012; 오명현, 2015)

관련규정인 KS M 0111(KS I 3217)에 의하면 Lethal Concentration(LC) 50은 어류를 급성 독물질이 함유되어 있는 폐수의 희석액 중에 공시어를 기르고 그 사이에 공시어의 50%가 살아남는 폐수의 농도를 나타낸다. 본 연구에서는 미생물광물질, 규산소다, 고로슬래그 미분말을 혼합하여 만든 고결체를 수조의 바닥에 설치하고 용탈되는 알칼리에 의한 어독성을 측정하였으며 이를 통해 수질오염에 미치는 영향을 평가하였다.

3.5.2 시험방법

본 연구에서 사용된 시험방법은 KS 규정에 의한 시험방법에 의거하였으며, 시험수조의 재질은 유리와 스테인레스 스틸을 사용하였고, 용량은 50L이상으로 제작하였다. 공기송풍+수온은 25°C를 유지하였다. 또한 공시어는 수질환경 및 실험실 생존조건에 적합한 금붕어를 선택하여 20마리를 1개조로 사용하였고, pH 미터는 시간이 경과시간에 따라 pH 측정이 용이하도록 포터블형을 사용하여 측정하였다. 충분한 산소공급을 위해 Blower를 부착하였고, 지반 주입재 시료의 시편을 표면적으로 일정하게 유지되도록 수조에 넣고 실험을 수행하였다. 결과표시는 시간에 따른 pH 변화 그래프(횡축은

time, 종축은 pH)와 시간에 따른 치사어수 변화 그래프(변화가 없어야 환경에 무해함)를 통해 나타내었다.

3.5.3 어독성 실험 주입재의 실험비

본 연구에서 사용된 실험시료는 그림 3.8과 같이 체적 (L)5cm × (B)5cm × (H)5cm의 시편 9개를 고로슬래그 미분말이 함유된 공시체와 OPC로 각각 제작하였고, 시료는 제작 후 4시간동안 물속에 수침시킨 다음 실험에 사용하였다. 본 실험에 적용된 주입재 조합별 배합비는 표 3.4와 같다.

표 3.4 적용된 주입재 조합별 배합비

구분	A액(350ml)		B액				C액
	규산소다 3호(ml)	물 (ml)	시멘트 (g)	고로슬래그 미분말(g)	탄소섬유 (g)	물 (ml)	미생물광물질 (g)
고로슬래그 미분말 공시체	70(20%)	280(80%)	80(80%)	20(20%)	1	200	10
OPC공시체	70(20%)	280(80%)	100(100%)	0(0%)	0	200	0



그림 3.8 고로슬래그 및 탄소섬유가 혼입된 공시체 모습

3.5.4 시험장치 및 방법

시험수조는 일반 어항수조(밖에서 관찰이 용이한 유리체를 사용)를 사용하였고, 어항수조의 용량은 약 50L [(B) 33cm × (L) 63cm × (H) 40cm] 이상인 것으로 그림 3.10과 같다. 충분한 산소를 공급하기 위해 Blower를 설치하였으며, 공기송풍이 가능한 크기의 수조를 제작하였다. 그림 3.10의 공시어는 수온, 먹이, 취급 등 실험내의 생존조건에 적합한 것으로 공시어의 크기는 약 5cm ~6cm로 금붕어를 사용하였으며, 실험당 1개조 20마리를 사용하였다. 또한, 경과시간에 따라 pH를 측정하기 위해 pH 미터를 설치하였다.



그림 3.9 어독성실험을 위한 어항수조 전경



그림 3.10 어독성실험을 위한 고로슬래그가 포함된 공시체의 실험

제 4 장 실내실험 결과 분석

4.1 배합비에 따른 켈타임 분석

4.1.1 규산소다 3호에 따른 켈타임 분석

(1) SS:W(50:50) 켈타임 분석

SS:W의 배합비가 50:50일 경우 시멘트 : 고로슬래그 미분말(100:0, 90:10, 70:30) 비율과 탄소섬유 0, 1%에 따라 켈타임을 분석하였다. 켈타임 분석을 수행하기 위해서 3회 이상의 켈타임을 측정하여 평균값을 나타내었다.

그림 4.1에서 시멘트는 “C”로 표기하였으며, 고로슬래그 미분말은 “B”로 표기하였으며 탄소섬유는 “F”로 표기하였다. 또한 숫자의 표현은 배합비의 %를 나타내었다.

C:B-F 100:0-1에서 3회 측정 평균 95초로 켈타임이 가장 빨랐으며, C:B-F 60:40-0에서 평균 217초로 켈타임이 가장 늦게 나타났다. 고로슬래그 미분말의 양이 20% 증가할수록 켈타임은 약 1.3~1.5배 증가하는 경향이 나타났으며, 탄소섬유 1% 증가할수록 켈타임은 약 1.1~1.2배 감소하는 경향이 나타났다.

따라서 시멘트 양이 감소함에 따라 수화반응과 포졸란 반응이 약해지는 결과로 켈타임이 증가하는 경향이 나타났으며, 고로슬래그 미분말이 시멘트 속에 침투하여 수화열을 저감시켜 켈타임이 증가하는 것으로 판단된다. 또한 친수성 재료인 탄소섬유의 양이 증가할수록 물을 흡수하여 켈타임이 감소되는 것으로 나타났다.

Gel SS:W 50:50

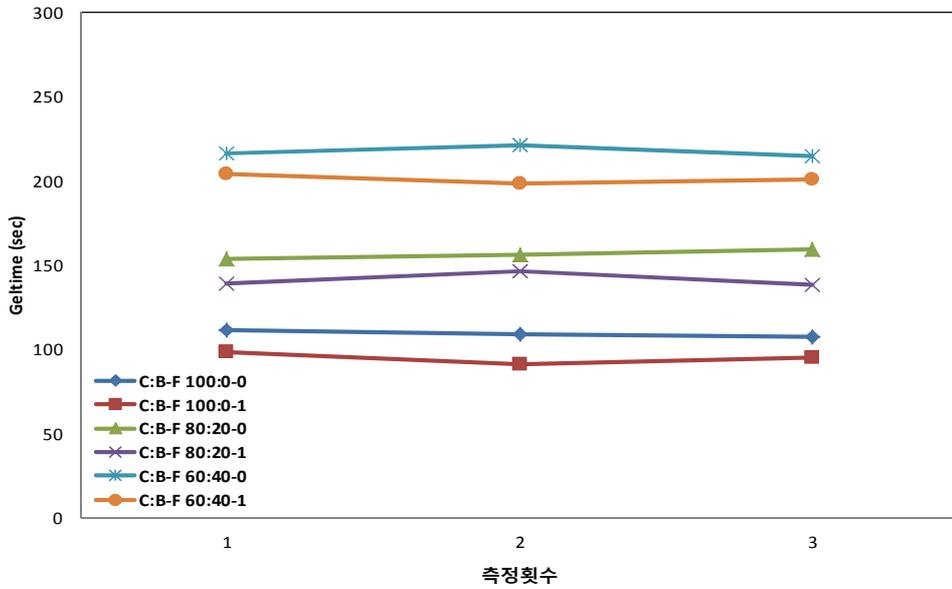


그림 4.1 SS:W(50:50)에 따른 겔타임 측정결과

(2) SS:W(35:65) 겔타임 분석

그림 4.2와 같이 C:B-F 100:0-1에서 3회 측정 평균 118초로 겔타임이 가장 빨랐으며, C:B-F 60:40-0에서 평균 245초로 겔타임이 가장 늦게 나타났다. 고로슬래그 미분말의 양이 20% 증가할수록 겔타임은 약 1.3~1.4배 증가하는 경향이 나타났으며, 탄소섬유 1% 증가할수록 겔타임은 약 1.1배 감소하는 경향이 나타났다. 이는 앞서 언급한 바와 같이, 시멘트 양의 감소와 고로슬래그 미분말 함량의 증가에 따라 수화반응과 포졸란 반응이 약해지는 결과로 겔타임이 증가하였으며, 친수성 재료인 탄소섬유가 증가할수록 겔타임이 감소함을 확인하였다.

Gel SS:W 35:65

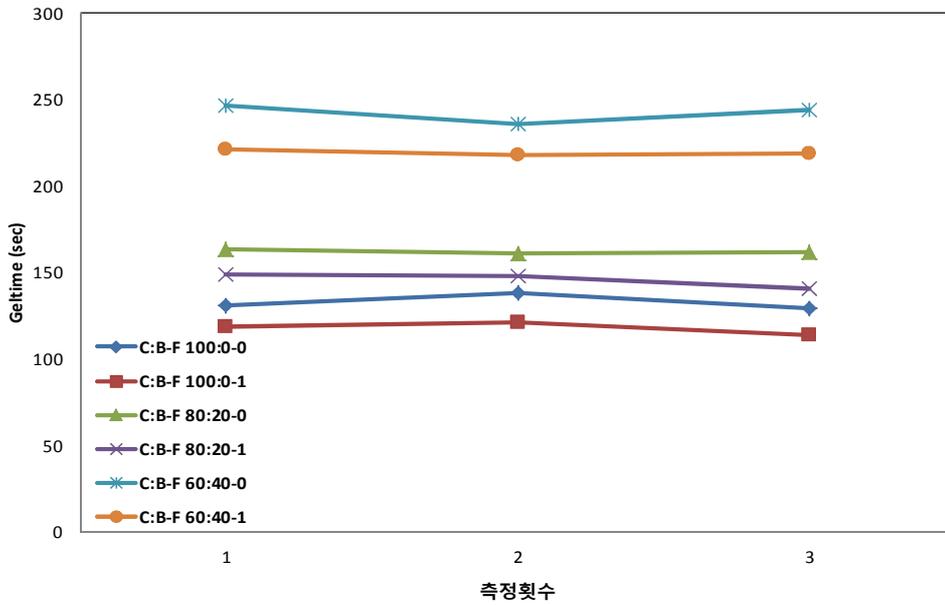


그림 4.2 SS:W(35:65)에 따른 겔타임 측정결과

(3) SS:W(20:80) 겔타임 분석

그림 4.3과 같이 C:B-F 100:0-1에서 3회 측정 평균 137초로 겔타임이 가장 빨랐으며, C:B-F 60:40-0에서 평균 288초로 겔타임이 가장 늦게 나타났다. 고로슬래그 미분말의 양이 20% 증가할수록 겔타임은 약 1.3~1.4배 증가하는 경향이 나타났으며, 탄소섬유 1% 증가할수록 겔타임은 약 1.1배 감소하는 경향이 나타났다. 이는 앞서 언급한 바와 같이, 시멘트의 양의 감소와 고로슬래그 미분말 함량의 증가에 따라 수화반응과 포졸란 반응이 약해지는 결과로 겔타임이 증가하였으며, 친수성 재료인 탄소섬유가 증가할수록 겔타임이 감소하는 것으로 나타났다.

Gel SS:W 20:80

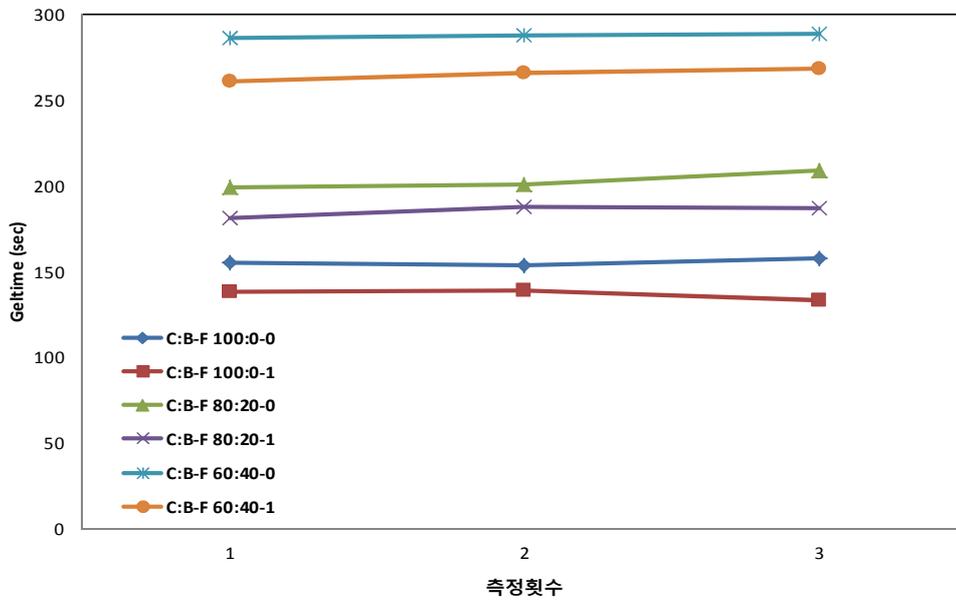


그림 4.3 SS:W(20:80)에 따른 겔타임 측정결과

4.1.2 겔타임 종합 분석

SS:W의 배합비에 따른 C:B(100:0, 80:20, 60:40)-F(0, 1%)의 겔타임 분석 결과, 고로슬래그 미분말 10%, 20% 첨가시 겔타임은 약 1.2~1.4배 증가하는 경향을 나타내었으며, 규산소다 3호의 양이 15%, 30% 증가할수록 겔타임은 약 1.5배 감소하는 경향을 나타내었다.

본 연구에서 수행한 실험결과, 시멘트를 줄이고 고로슬래그 미분말로 치환할 경우, 겔타임의 경우 급결보다는 완결에 가까운 겔타임을 갖는다. 따라서 고로슬래그 미분말의 첨가는 겔타임을 지연시킴으로 급결시 보다 완결시에 사용하는 것이 적정할 것으로 나타났으며, 이는 조기강도 발현에 부정적인 영향을 미치므로 조기강도 발현을 위해서는 혼화재인 석회(CaO), 실리카(SiO_2), 알루미나(Al_2O_3), 산화철(Fe_2O_3)의 양을 증가시켜 목표(초급결, 급결 등)하는 겔타임을 확보해야 할 것으로 판단된다.

표 4.1은 겔타임 종합 분석 결과를 정리하였다.

표 4.1 겔타임(Gel-time) 종합 분석 결과

SS:W(%)	C:B-F(%)	겔타임(Gel-time)(초)			
		1회	2회	3회	평균
50:50	100:0-0	111	109	107	109
	100:0-1	98	91	95	95
	80:20-0	154	156	159	156
	80:20-1	139	146	138	141
	60:40-0	216	221	215	217
	60:40-1	204	198	201	201
35:65	100:0-0	131	138	129	133
	100:0-1	119	121	114	118
	80:20-0	163	161	162	162
	80:20-1	149	148	141	146
	60:40-0	246	236	244	242
	60:40-1	221	218	219	219
20:80	100:0-0	155	154	158	156
	100:0-1	138	139	133	137
	80:20-0	199	201	209	203
	80:20-1	181	188	187	185
	60:40-0	286	288	289	288
	60:40-1	261	266	268	265

4.2 배합비에 따른 일축압축강도 분석

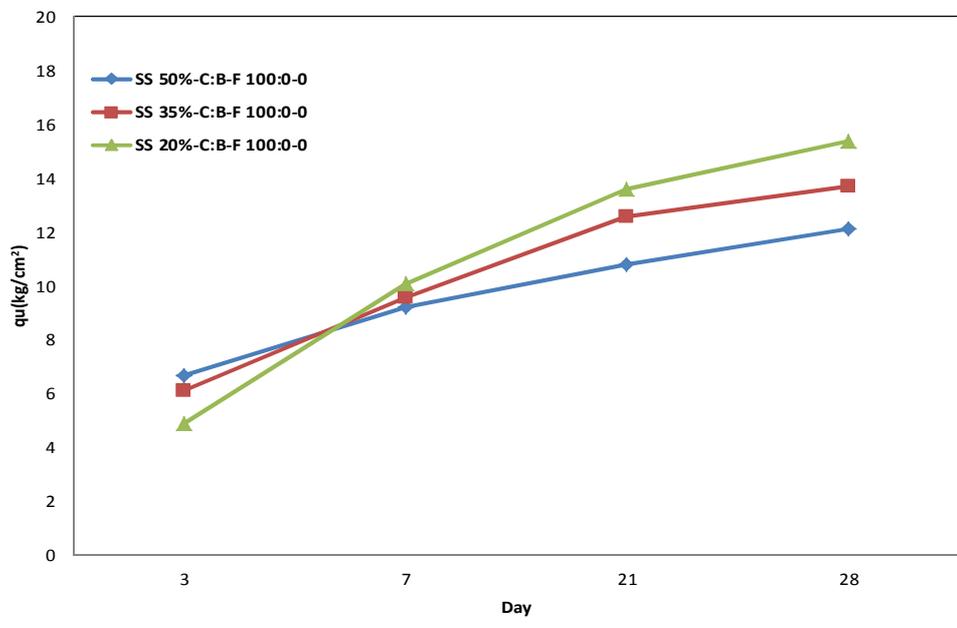
4.2.1 규산소다 3호의 함유량에 따른 일축압축강도 시험결과

표 4.2와 그림 4.4와 같이 C:B(100:0)-F 0, 1%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 규산소다 3호가 20%-F 0%일 때 3일 강도에서는 4.9kg/cm^2 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 50%-F 1%일 때 7.6kg/cm^2 로 가장 높게 나타났다.

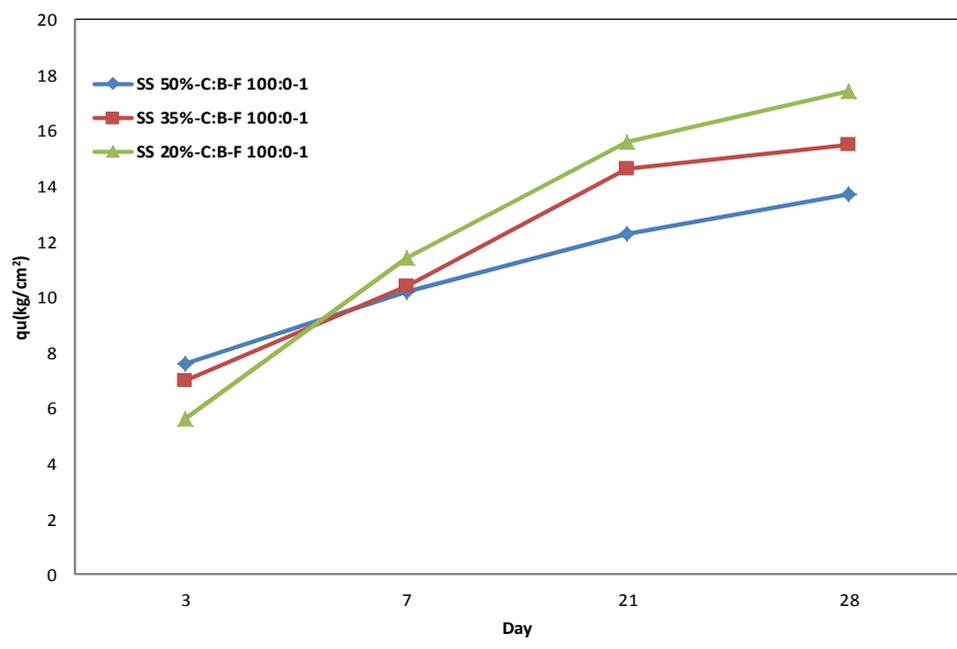
28일 강도에서는 규산소다 3호가 50%-F 0%일 때 12.1kg/cm^2 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 20%-F 1%일 때 17.4kg/cm^2 로 가장 높게 나타났다.

규산소다 3호의 함유량이 증가할수록 3일 강도에서는 겔타임 시간이 짧아져 조기강도를 발현하기 때문에 호모겔 일축압축강도 값이 증가하였으나, 28일 강도에서는 규산소다 3호의 함유량이 많을수록 현저히 강도가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 박원춘 등(2004), 이강호(2013), 임춘호(2017)와 유사한 결과를 나타내었는데, 규산소다 3호의 첨가가 다량 함유되면 28일 재령시 시멘트에 미소한 균열을 가져오는 문제가 발생하는 것으로 확인되었다. 또한 탄소섬유 1% 첨가시 일축압축강도는 약 1.2배 정도 증가함을 확인하였다. 이는 탄소섬유가 그라우트재에 교반되면서 파괴면의 형성을 억제하는 것으로 판단되며, 추후 탄소섬유가 아닌 이와 유사한 재활용 자원을 활용한 폐천막, 페타이어, 폐섬유 등을 사용하면 경제적으로 효과적일 것으로 판단된다.

급결의 차수가 요구될 경우에는 규산소다 3호의 함유량이 50%가 적합할 것으로 판단되나, 차수의 목적이 아닌 강도증진의 목적이면 조기강도가 높고 28일강도도 유사한 규산소다 3호의 20%가 적합할 것으로 판단된다.



(a) 탄소섬유 0%



(a) 탄소섬유 1%

그림 4.4 C:B(100:0)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

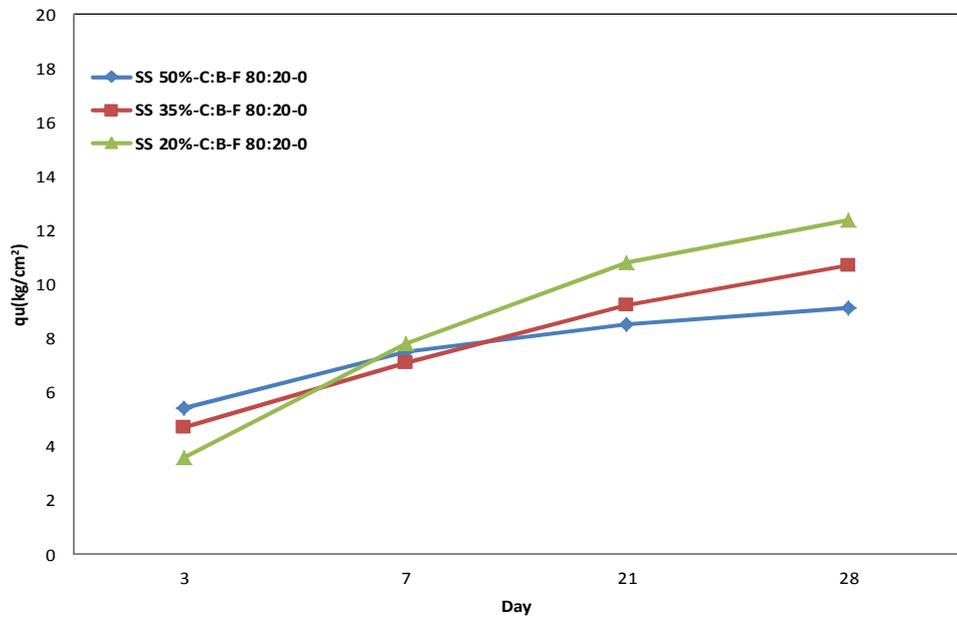
표 4.2 C:B(100:0)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

재령 (day)	일축압축강도(kg/cm^2)					
	SS 50%		SS 35%		SS 20%	
	F 0%	F 1%	F 0%	F 1%	F 0%	F 1%
3	6.7	7.6	6.1	7.0	4.9	5.6
7	9.2	10.2	8.6	10.4	10.1	11.4
21	10.8	12.3	12.6	14.6	13.6	15.6
28	12.1	13.7	13.7	15.5	15.4	17.4

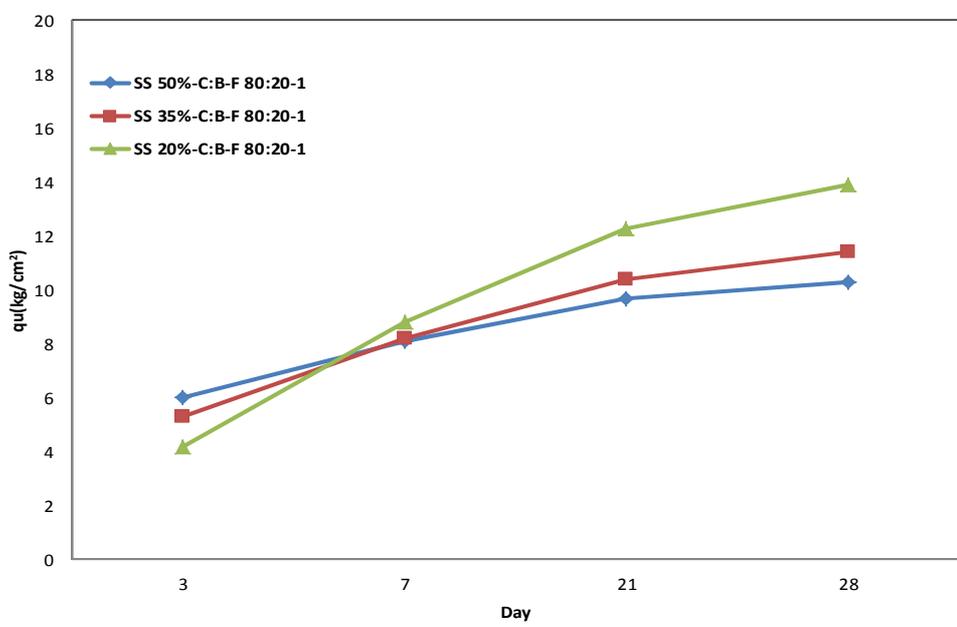
표 4.3 및 그림 4.5와 같이 C:B(80:20)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 규산소다 3호가 20%-F 0%일 때 3일 강도에서는 $3.6kg/cm^2$ 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 50%-F 1%일 때 $6.0kg/cm^2$ 로 가장 높게 나타났다. 또한 28일 일축압축강도에서는 규산소다 3호가 50%-F 0%일 때 $9.1kg/cm^2$ 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 20%-F 1%일 때 $13.9kg/cm^2$ 로 가장 높게 나타났다.

그림 4.4와 마찬가지로 3일 강도에서는 규산소다 3호의 영향으로 인해 겔타임이 빨라 규산소다 3호 50%에서 가장 높은 강도를 나타내었으나, 28일 강도에서는 규산소다 3호가 미소한 시멘트의 균열을 가져오기 때문에 일축압축강도가 낮아지는 것으로 나타났다. 또한 탄소섬유 1% 첨가시 일축압축강도는 약 1.12배 증가함을 확인하였다.

급결의 차수가 요구될 경우에는 규산소다 3호의 함량이 50%가 적합할 것으로 판단되나, 차수의 목적이 아닌 강도증진의 목적이면 28일강도가 높은 규산소다 3호의 20%가 적합할 것으로 판단된다.



(a) 탄소첨유 0%



(a) 탄소첨유 1%

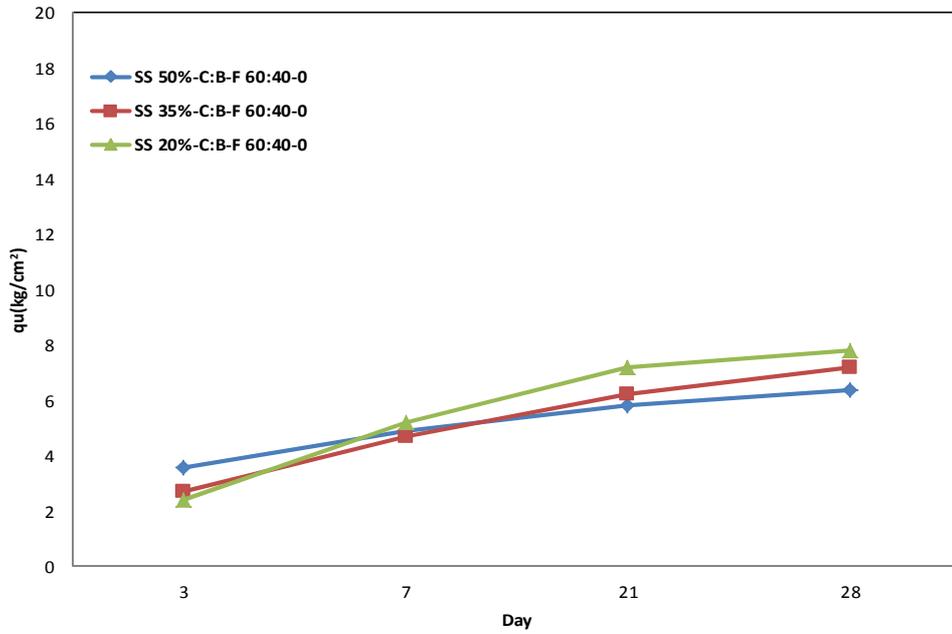
그림 4.5 C:B(80:20)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

표 4.3 C:B(80:20)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

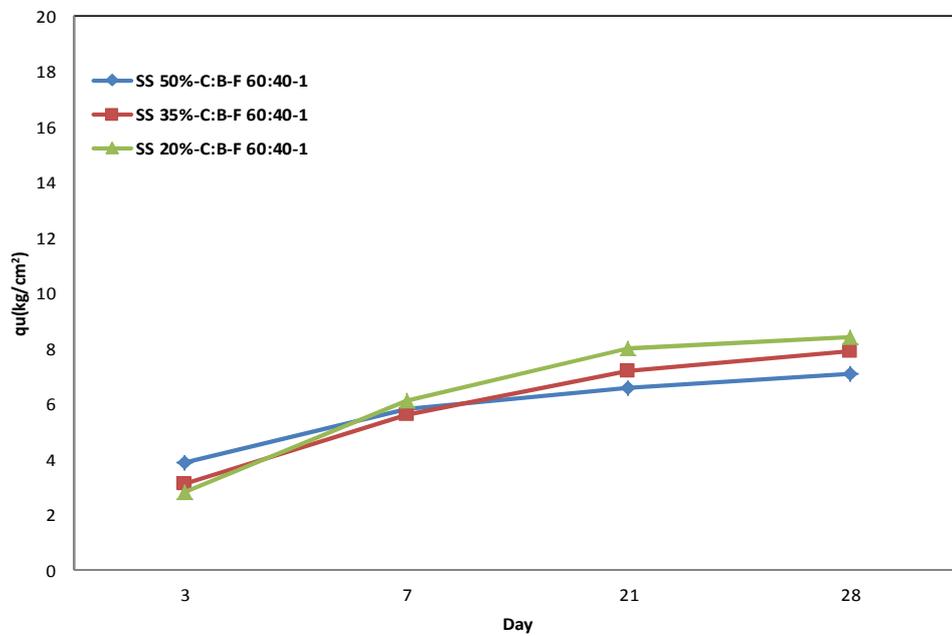
재령 (day)	일축압축강도(kg/cm^2)					
	SS 50%		SS 35%		SS 20%	
	F 0%	F 1%	F 0%	F 1%	F 0%	F 1%
3	5.4	6.0	4.7	5.3	3.6	4.2
7	7.5	8.1	7.1	8.2	7.8	8.8
21	8.5	9.7	9.2	10.4	10.8	12.3
28	9.1	10.3	10.7	11.4	12.4	13.9

표 4.4와 그림 4.6과 같이 C:B(60:40)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 규산소다 3호가 20%-F 0%일 때 3일 강도에서는 $2.4kg/cm^2$ 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 50%-F 1%일 때 $3.9kg/cm^2$ 로 가장 높게 나타났다. 또한 28일 강도에서는 규산소다 3호가 50%-F 0%일 때 $6.4kg/cm^2$ 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 20%-F 1%일 때 $8.5kg/cm^2$ 로 가장 높게 나타났다.

3일 강도에서는 규산소다 3호의 함유량에 따라 강도차이는 작게 나타났으나, 28일 강도에서는 규산소다 3호의 함유량에 따라 큰 영향을 미치는 것으로 확인하였다.



(a) 탄소점유 0%



(a) 탄소점유 1%

그림 4.6 C:B(60:40)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

표 4.4 C:B(60:40)일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

재령 (day)	일축압축강도(kg/cm^2)					
	SS 50%		SS 35%		SS 20%	
	F 0%	F 1%	F 0%	F 1%	F 0%	F 1%
3	3.6	3.9	2.7	3.1	2.4	2.6
7	4.9	5.8	4.7	5.3	5.2	5.6
21	5.8	6.6	6.2	6.8	7.2	7.6
28	6.4	7.1	7.2	7.9	7.8	8.5

4.2.2 고로슬래그 미분말 함유량에 따른 일축압축강도 시험결과

그림 4.7과 같이 규산소다 3호가 50%일 때 C:B의 배합비(100:0, 80:20, 60:40)-F 0, 1%에 따른 일축압축강도를 살펴보면 다음과 같다.

C:B-F가 100:0-0, 1%일 때의 28일 강도 대비 C:B-F가 80:20-0, 1%는 약 75%의 강도를 나타내며, C:B-F가 60:40-0, 1%는 약 51~52%의 강도를 나타냈다.

고로슬래그 미분말의 경우 잠재수경성으로 기대했던 것과는 달리 시멘트와 같이 물과 혼합되는 과정에서 수화반응 및 포졸란 반응은 나타나지 않았으며, 시간경과에 따라 강도증가도 미미한 것으로 나타났다.

고로슬래그 미분말은 미소한 알갱이로 구성되어 있으며, 수밀성 향상, 장기강도 향상 등으로 인해 차수에 대한 효과는 높은 것으로 확인되었으나, 초기강도 저하 등의 특징으로 인해 강도는 상당히 저하되는 것으로 나타났으며, 강도증진을 위해서 석회 등의 혼화재를 추가로 혼합하여 시공을 해야 할 것으로 판단된다.

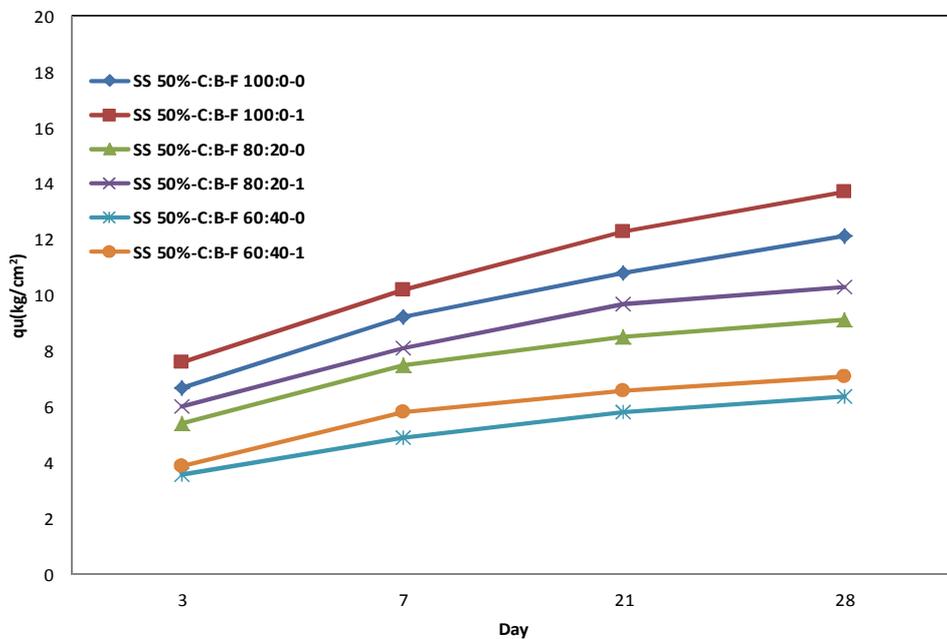


그림 4.7 규산소다 50%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

그림 4.8과 같이 규산소다 3호가 35%일 때 C:B의 배합비(100:0, 80:20, 60:40)에 따른 일축압축강도를 살펴보면 다음과 같다.

C:B-F가 100:0-0, 1%일 때의 28일 강도 대비 C:B-F가 80:20-0, 1%는 약 73~78%의 강도를 나타내며, C:B-F가 60:40-0, 1%는 약 50~52%의 강도를 나타냈다.

그림 4.7과 마찬가지로 강도에 대한 효과를 증진시키려면 추가적인 혼화재나 시멘트의 양을 증가시켜 사용해야 될 것으로 판단되나, 현장에서 요구하는 차수 그라우팅의 강도는 일반적으로 0.6kg/cm^2 이상이므로 최적 배합비는 상황에 따라서 20%에서 40%까지 대체자원으로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 강도증진을 위한 배합비를 고려한다면 추가적인 혼화재를 사용해야 할 것으로 판단된다.

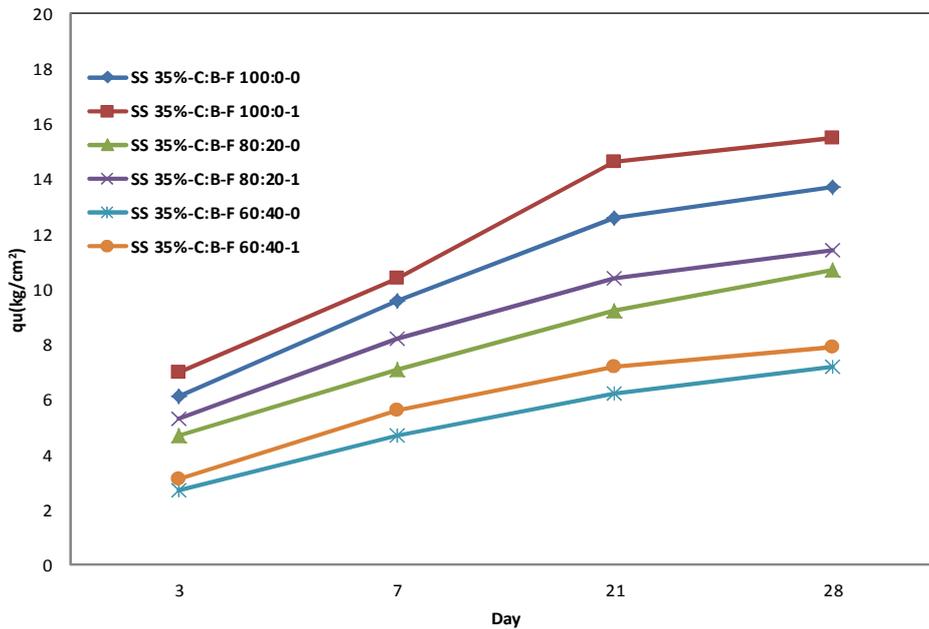


그림 4.8 규산소다 35%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

그림 4.9와 같이 규산소다 3호가 20%일 때 C:B의 배합비(100:0, 80:20, 60:40)에 따른 일축압축강도를 살펴보면 다음과 같다.

C:B-F가 100:0-0, 1%일 때의 28일 강도 대비 C:B-F가 80:20-0, 1%는 약 79~80%의 강도를 나타내며, C:B-F가 60:40-0, 1%는 약 49~51%의 강도를 나타냈다.

시멘트 대비 고로슬래그 미분말의 함유량에 따른 일축압축강도 분석결과, 현장에서

요구하는 차수 그라우팅의 강도는 일반적으로 0.6kg/cm^2 이상이므로 최적 배합비는 상황에 따라서 20%에서 40%까지 대체자원으로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 친환경 및 경제성을 고려한다면, 규산소다 20%의 강도를 적용하여 현장에 시공시 차수효과 및 내구성 증진이 충분히 확보될 것으로 판단된다.

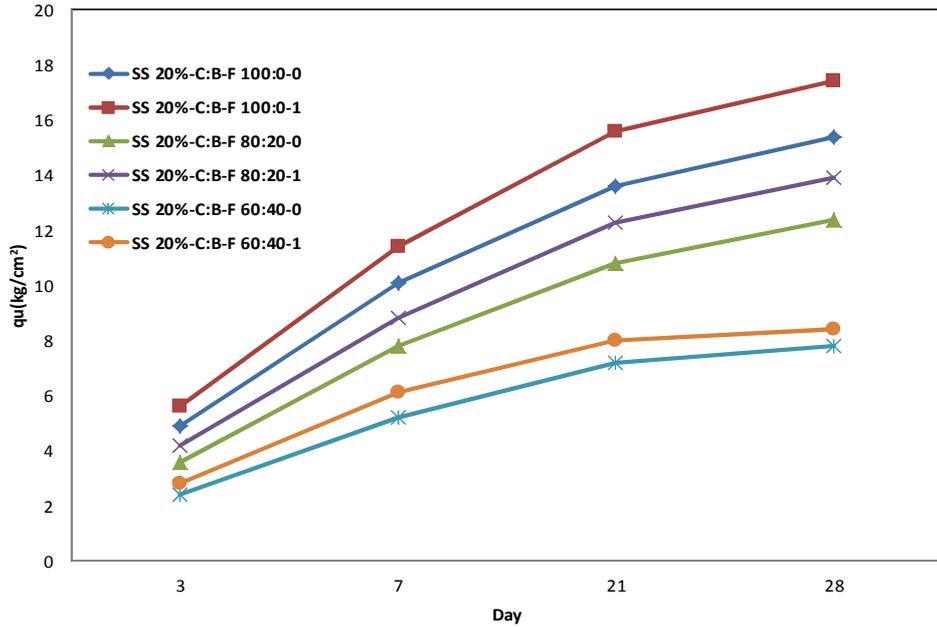


그림 4.9 규산소다 20%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 결과

4.2.3 기존공법(LW공법)과의 그라우팅 특성 비교

본 연구에서 실험한 겔타임, 일축압축강도 등의 특성과 기존 공법인 LW공법과 테이터를 비교하였으며, 그 값은 표 4.5와 같다.

처리공정을 살펴보면, 기존공법(LW공법)의 경우, 1액 1공정으로 단순 공정이지만 본 연구에서 사용된 그라우트재의 경우 선처리 2액 1공정 및 후처리 1액 1공정으로 지반 내의 공극을 보다 밀실하게 충전시킬 것으로 판단되며, 압축강도의 경우 비슷한 경향을 보이고 있으며, 겔타임은 본 연구에서 사용된 그라우트재의 경우, 겔타임 시간 조절이 가능하며, 완결 겔타임으로 적합한 것으로 확인되었다. 차수효과의 경우 시멘트 고로슬래그비 80:20 과 60:40에서 만족하는 것으로 조사되었으며, 경제성은 기존공법(LW공법)이 다소 저렴한편이나, 내구성에 취약점이 있으며, 본 연구의 그라우트재의 경우 보통정도의 경제성이 내구성의 경우, 탄소섬유와 그라우트재의 혼입으로 인한 일체 거동으로 강도 및 차수효과가 증대될 것으로 판단된다.

표 4.5 기존공법(LW공법)과의 그라우팅 특성 비교

항 목	기존공법(LW공법)	본 연구에서 사용된 그라우트재
처리공정	1액 1공정	선처리 : 2액 1공정 후처리 : 1액 1공정
압축강도	10~20kg/cm ²	3.6~17.4kg/cm ²
겔타임	120~180초(조절불가)	95~288초(조절가능)
차수효과	10 ⁻⁵ ~ 10 ⁻⁶ cm/sec	9.9 ⁻⁵ ~ 2.4 ⁻⁶ cm/sec
지반조건	모든지반	모든지반
경제성	저렴	보통

4.2.4 재령에 따른 일축압축강도실험의 통계분석

재령일에 따른 종합결론을 도출하기 위해서 다중회귀분석을 사용하였다. 다중회귀분석이란 종속변수(y, 일축압축강도)의 다수의 독립변수(X_1 = 규산소다, X_2 = 시멘트, X_3 = 탄소섬유)가 서로 인과관계를 가질 때 독립변수가 변화함에 따라 종속변수에 미치는 영향을 규명하는 통계기법이다. 본 연구에서 사용된 재료인 물과 바이오주입재는 모든 공시체에서 동일한 조건이기 때문에 독립변수에서 제외하였다.

결과분석에는 P값(가설의 유의성)과 t값(변수들의 영향성)을 이용하는 방법이 있는데 P값의 경우 독립변수의 값이 0.05보다 적으면 유의하다. 일반적으로 간편성 때문에 P값을 많이 이용하나, 정확한 분석을 위해서는 t값을 이용하는 것이 올바른 방법이다. t값을 검증할 때에는 95%의 신뢰도를 가정한다. 즉, 유의수준을 5%로 본다. 이와같은 가설을 검증하는 것은 곧 양측검정을 의미하기 때문에 대개 t값의 절대치가 2보다 작으면 독립변수는 종속변수에 미치는 영향이 미미하다(송기준 등 2013).

재령 3일에 따른 공시체의 다중회귀분석 결과, r^2 는 0.99로 다수의 독립변수 값이 종속변수의 변동량에 99%의 높은 정확도를 나타내며, 추정된 회귀계수는 X_1 , X_2 , X_3 의 P값이 0.05보다 작으므로 통계적으로 유의한 모형이다. 또한 t값의 절대값이 X_1 , X_2 , X_3 모두 2보다 크기 때문에 각각의 독립변수가 종속변수에 영향을 나타냄을 확인하였다. 재령에 3일에 따른 회귀분석결과는 표 4.6과 같고 표를 통하여 식 (4.1)의 회귀식을 얻었다.

표 4.6 재령 3일에 따른 회귀분석 결과

항목 \ 통계	계수	표준오차	t값	P값
일축압축강도(kg/cm ²)	-3.713	0.310	-11.973	9.63×10 ⁻⁹
규산소다(ml)(SS)	0.015	0.001	12.506	5.49×10 ⁻⁹
시멘트(g)(C)	0.078	0.003	23.169	1.45×10 ⁻¹²
탄소섬유(g)(F)	0.747	0.132	5.659	5.89×10 ⁻⁵

$$q_u = 0.015SS + 0.078C + 0.747F - 3.713 \quad (4.1)$$

여기서 q_u = 일축압축강도(kg/cm²)

SS = 규산소다(g)

C = 시멘트(g)

F = 탄소섬유(g)

재령 3일에 따른 회귀분석 결과, 종속변수 중 탄소섬유에 의한 영향이 가장 크게 나타난 것과 같이 분석되었으나, 이는 탄소섬유의 양을 시멘트 비율에 1%를 사용하기 때문에 시멘트 100g시 탄소섬유는 1g이 사용되어 정확한 독립변수로 보기가 어렵고 중량비로 회귀분석을 수행하다보니 오히려 적은 양의 토목섬유가 큰 계수값을 나타내어 강도에 미치는 영향이 큰 것같이 분석되었다. 그러나 식 (4.1)을 사용하여 일축압축강도를 예상해본 결과 적정한 식으로 산출되었음을 확인하였다. 단, 탄소섬유를 제외한 회귀분석 결과에서는 규산소다는 0.015, 시멘트 계수는 0.082, Y축 절편 계수는 -3.713로 시멘트의 영향이 가장 큰 것으로 분석되었다.

재령 28일에 따른 공시체의 다중회귀분석 결과, r^2 는 0.98로 다수의 독립변수 값이 종속변수의 변동량에 98%의 높은 정확도를 나타내며, 추정된 회귀계수는 X_1 , X_2 , X_3 의 P값이 0.05보다 작으므로 통계적으로 유의한 모형이다. 또한 t값의 절대값이 X_1 , X_2 , X_3 모두 2보다 크기 때문에 각각의 독립변수가 종속변수에 영향을 나타냄을 확인하였다. 재령에 28일에 따른 회귀분석결과는 표 4.7과 같고 표를 통하여 식 (4.2)의 회귀식을 얻었다.

표 4.7 재령 28일에 따른 회귀분석 결과

항목 \ 통계	계수	표준오차	t값	P값
일축압축강도(kg/cm ²)	0.086	0.698	0.123	0.904
규산소다(ml)(SS)	-0.027	0.003	-9.374	2.07×10^{-7}
시멘트(g)(C)	0.171	0.008	22.581	2.06×10^{-12}
탄소섬유(g)(F)	1.563	0.297	5.265	0.0001

$$q_u = -0.027SS + 0.171C + 1.563F + 0.086 \quad (4.2)$$

여기서 q_u = 일축압축강도(kg/cm²)

SS = 규산소다(g)

C = 시멘트(g)

F = 탄소섬유(g)

재령 28일에 따른 회귀분석 결과, 재령 3일과 마찬가지로 종속변수 중 탄소섬유에 의한 영향이 가장 크게 나타난 것과 같이 분석되었으나, 이는 탄소섬유의 양을 시멘트 비율에 1%를 사용하기 때문에 시멘트 100g시 탄소섬유는 1g이 사용되어 정확한 독립 변수로 보기가 어렵고 중량비로 회귀분석을 수행하다보니 오히려 적은 양의 토목섬유가 큰 계수값을 나타내어 강도에 미치는 영향이 큰 것같이 분석되었다. 그러나 식 (4.2)을 사용하여 일축압축강도를 예상해본 결과 적정한 식으로 산출되었음을 확인하였다. 단, 탄소섬유를 제외한 회귀분석 결과에서는 규산소다는 -0.027, 시멘트 계수는 0.179, Y축 절편 계수는 0.086으로 시멘트의 영향이 가장 큰 것으로 분석되었다.

4.2.5 일축압축강도와 켈타임 상관관계 분석

켈타임의 빠르고 늦음에 따라, 강도의 크고 작음에 따라, 침투범위의 넓고 좁음에 따라 급결 차수의 목적으로 사용하는지, 완결 보강의 목적으로 사용하는지에 대한 기준을 결정할 필요가 있다.

우리가 흔히 쓰고 있는 일반 그라우팅의 경우 켈타임에 대한 명시된 기준은 없으나, 일반적으로 초급결 켈타임은 6~12초, 급결 켈타임은 12~50초, 일반 켈타임은 50~90초, 완결 켈타임은 90~600초의 켈타임을 기준으로 하며, 켈타임의 조절은 시멘트량의 증감으로 간단히 조절이 가능하다.

본 연구에서는 켈타임에 대한 강도에 따라 목적을 분류하였으며, 켈타임에 따른 압축강도의 결과를 도시하였다. 고로슬래그 미분말 및 탄소섬유를 혼합한 그라우트재의 경우, 시멘트 양이 감소함에 따라 수화반응과 포졸란 반응이 약해지는 결과로 켈타임이 증가하고 반면에 강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 탄소섬유의 증가에 따라 켈타임 감소 및 일축압축강도 증가가 나타났는데 이는 친수성 재료인 탄소섬유의 양이 증가할수록 물을 흡수하여 켈타임 감소가 이루어진 것이며, 일축압축강도 증가는 탄소섬유가 그라우트재와 일체거동을 통한 내구성 증진 및 강도증가가 이루어진 것으로 판단된다.

일반적으로 그라우트재를 사용할 경우, 초급결이나 급결의 경우는 보다 빠른 켈타임을 만족시켜야 하는 지반조건이라면 본 배합비에서는 혼화재인 석회($CaCO_3$) 등의 혼화재를 첨가하고 물과 규산소다의 비율을 일정비율로 증가시킬 경우 초급결이나 급결에도 사용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 과도한 규산소다 3호의 사용은 용탈현상으로 인한 수질오염 및 환경오염 등을 야기시킬 수 있으므로 본 그라우트재는 완결(90~600초)에서만 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

또한, 본 연구의 배합비에서는 규산소다 3호 50%, 35%, 20% 모두다 완결 켈타임에 해당되는 것으로 평가되었으며, 이는 강도증진보다는 차수효과에 보다 더 효과적일 것으로 판단된다. 이러한 배합비는 현장조건 및 적용하고자 하는 방법(차수, 강도증진 등)에 따라 수정하여 현장조건에 맞는 배합비를 결정하여 사용해야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 켈타임에 따른 일축압축강도를 분석한 결과, 규산소다 35%에서 C:B가 80:20일 때가 효율대비 가장 효과적인 배합비로 분석되었다.

또한, 그림 4.10, 표 4.8는 재령 28일에 따른 호모겔 강도 및 그에 따른 켈타임을 나

타내었으며, 이때의 실험값의 ± 10 으로 오차범위를 선정하였다.

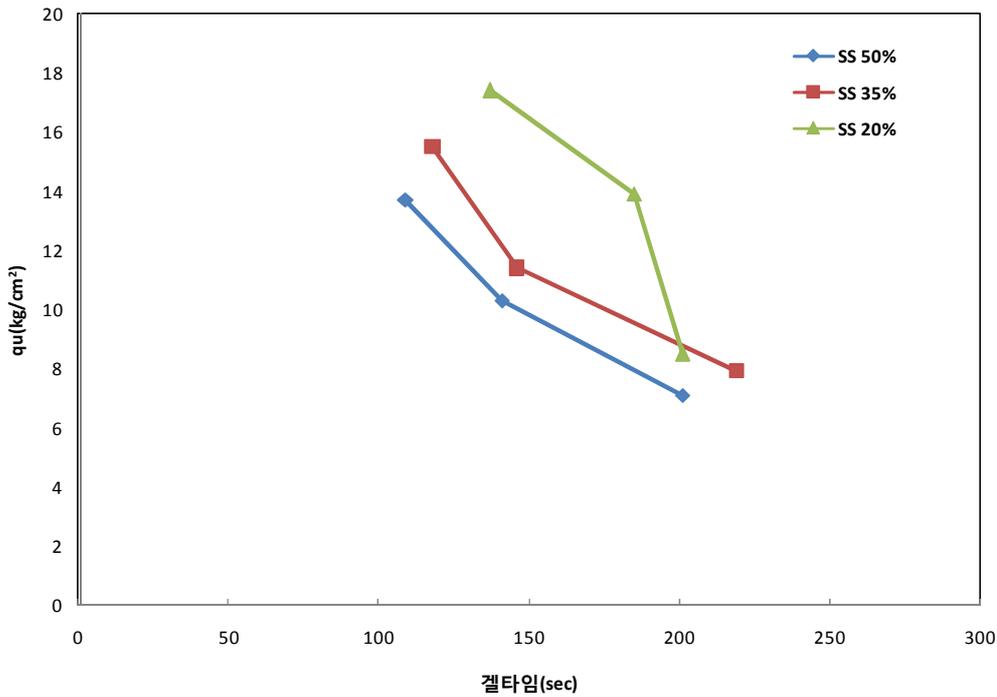


그림 4.10 28일차 겔타임과 일축압축강도 관계

표 4.8 28일 재령일에 따른 호모겔 강도 및 겔타임 측정결과

구 분		일축압축강도(kg/cm^2)				겔타임 (sec)
		3일	7일	21일	28일	
C : B (100 : 0)	SS 50%	7.6	10.2	12.3	13.7	95~109
	SS 35%	7.0	10.4	14.6	15.5	118~133
	SS 20%	5.6	11.4	15.6	17.4	137~156
C : B (80 : 20)	SS 50%	6.0	8.1	9.7	10.3	141~156
	SS 35%	5.3	8.2	10.4	11.4	146~162
	SS 20%	4.2	8.8	12.3	13.9	185~203
C : B (60 : 40)	SS 50%	3.9	5.8	6.6	7.1	201~207
	SS 35%	3.1	5.3	6.8	7.9	219~242
	SS 20%	2.6	5.6	7.6	8.5	265~288

4.3 그라우트재의 투수실험 결과

정수위 투수시험은 식 (4.1)과 같다.

$$k = QL/AHt \quad (4.1)$$

여기서, Q : 통과량(cm^3), L : 시편의 길이(cm)

A : 공시체 면적(cm^2)

H : 수두차(cm), t : 측정시간(sec)

식 (4.1)을 적용하여 표 4.9와 같이 투수실험 결과를 확인하였다.

표 4.9 투수실험 결과

시 료	통과량 (cm^3)	시편 길이 (cm)	공시체 면적 (cm^2)	수두차 (cm)	측정시간 (sec)	투수계수 (cm/sec)
C:B-F (100:0-0)	12.42	15	176.6	17.75	600	9.9×10^{-5}
C:B-F (100:0-1)	12.01	15	176.6	17.75	600	9.6×10^{-5}
C:B-F (80:20-0)	5.56	15	176.6	17.75	600	4.4×10^{-6}
C:B-F (80:20-1)	5.31	15	176.6	17.75	600	4.2×10^{-6}
C:B-F (60:40-0)	3.2	15	176.6	17.75	600	2.6×10^{-6}
C:B-F (60:40-1)	3.0	15	176.6	17.75	600	2.4×10^{-6}

그림 4.11은 본 연구결과와 기존 개발공법에 대한 차수효과를 비교하였다.

박원춘 등(2004)과 이강호(2010)는 미세립분, 마이크로 시멘트를 이용한 투수실험을 수행하였다. 실험결과, 투수계수는 각각 $5.0 \times 10^{-6} cm/sec$, $8.0 \times 10^{-5} cm/sec$ 로 나타나

C:B가 80:20의 경우와 유사한 경향을 나타내었다. 또한 현장에서 그라우팅 차수를 평가할 때 특정한 기준은 없으나, 투수계수가 약 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 가 되면 차수가 되었다고 판단한다. 따라서 본 연구에서 사용 그라우트의 경우 C:B가 80:20, C:B가 60:40일 때 충분한 차수효과를 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

고로슬래그 미분말이 20% 증가할수록 약 1.5배 이상 투수계수가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 고로슬래그 미분말의 수밀성이 뛰어나 차수효과를 나타내는 것으로 판단된다. 따라서 고로슬래그 미분말을 사용하여 그라우팅에 사용할 경우 대체적으로 차수그라우트재료의 사용이 필요할 것으로 판단되며, 강도의 증진이 필요할 경우 추가적인 혼화재 및 시멘트의 혼합비율을 높여서 적용해야 할 것으로 판단된다.

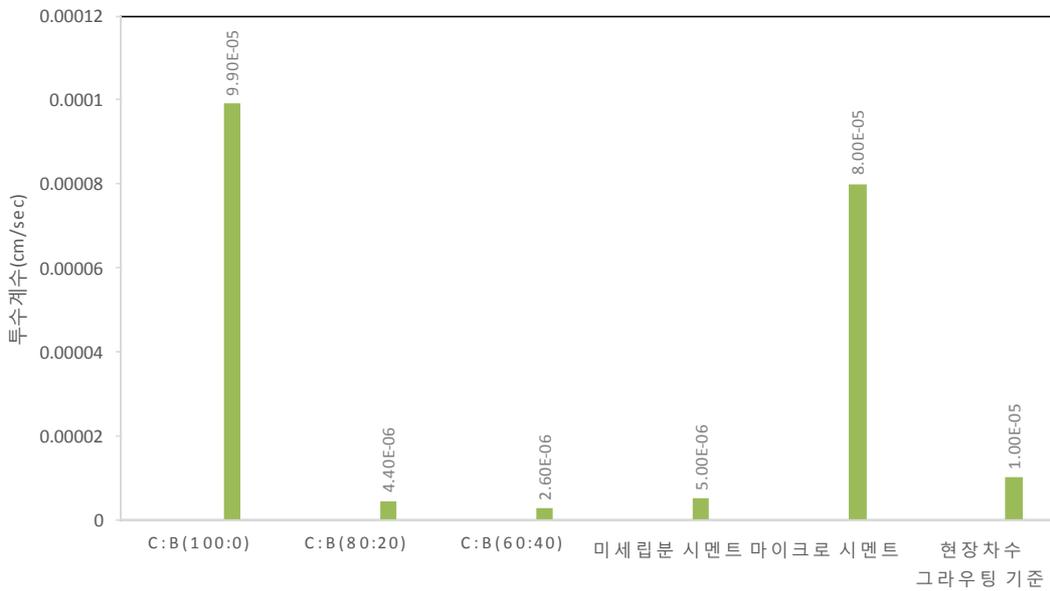


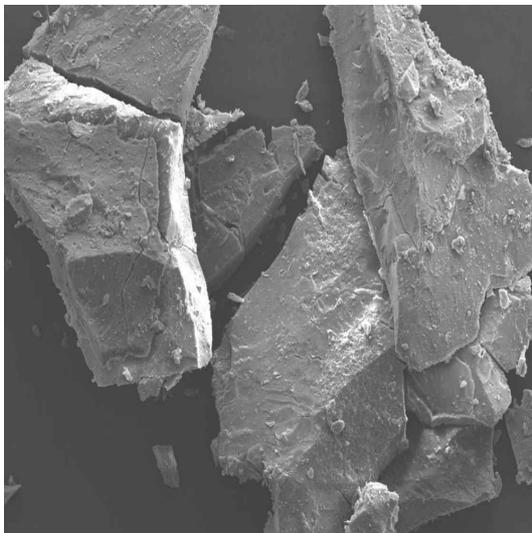
그림 4.11 차수 그라우트 재료에 따른 차수효과 분석

4.4 SEM 및 EDX 분석결과

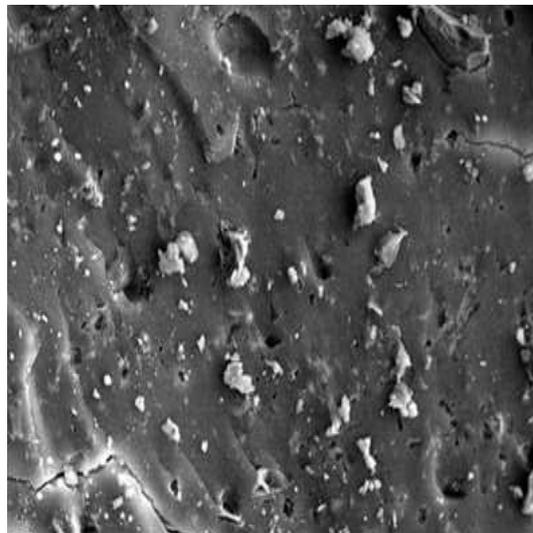
4.4.1 SEM 분석결과

섬유 보강재의 특성 시험은 그라우트재 내에서 섬유와 시멘트의 결합에 대한 메커니즘을 파악하기 위한 시험으로 일축압축강도 측정 시 파괴된 재료 시편을 사용하였으며, C:B-F 0%와 C:B-F 1%의 대표적인 시료를 위주로 조선대학교 공동생활실습관에 의뢰하였다.

다음은 SEM 전자현미경으로 그림 4.12(a)는 C:B-F 0%의 채취된 샘플시료를 사진촬영 하였고, 그림 4.12(b)는 채취된 샘플시료의 결표면을 500배율로 확인하였다. 공시체의 표면에 여러 알갱이들이 쌓여 있음 확인할 수 있는데, 이는 시멘트의 부스러기, 미생물 광물질, 마이크로 시멘트로 확인되었으며, 전반적으로 입자간에 밀실한 상태를 나타내고 있는 것으로 확인되었다.



(a) 500배율

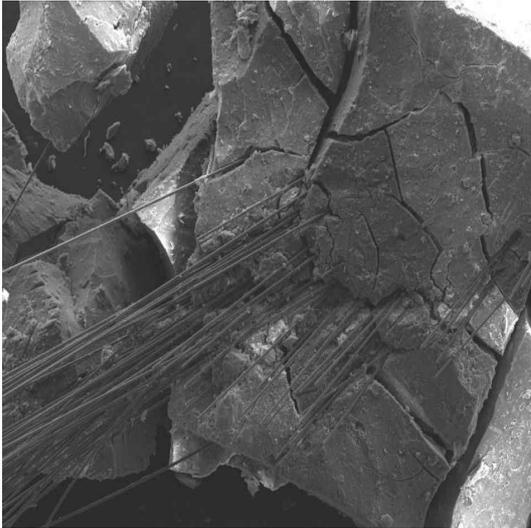


(b) 500배율

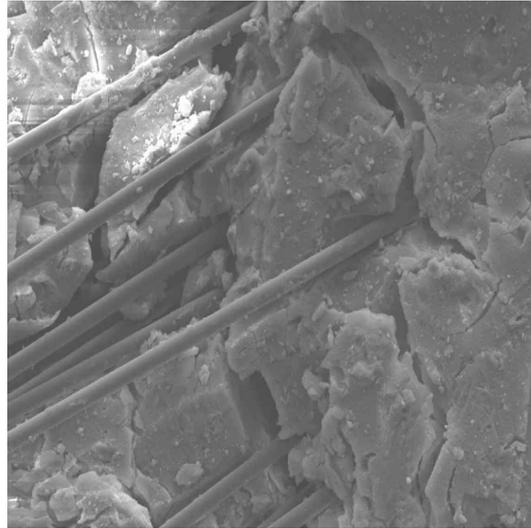
그림 4.12 일반 시료의 SEM 사진

C:B-F 1%로 탄소섬유가 포함된 채취 샘플시료를 사진촬영 하였고, 그림 4.13(b)는 채취된 샘플시료의 결표면을 500배율로 확인하였다. 그림 4.12는 탄소섬유가 그라우트

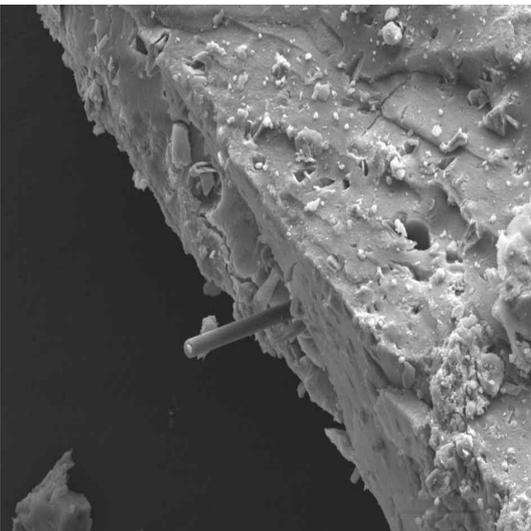
재에 결합되어 있는 형상이며 굳어진 공시체가 탄소섬유와 일체거동을 하므로 압축강도에 영향을 미치게 되며, 또한, 철근콘크리트와 같이 섬유보강으로 인해 내구성 증대가 이루어질 것 판단된다.



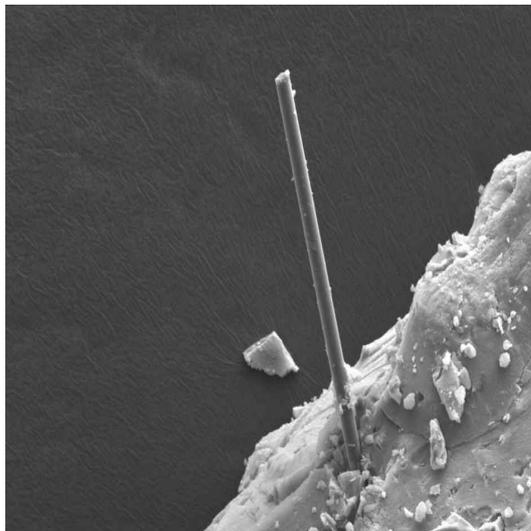
(a) 다량의 섬유로 보강된 시료(100배율)



(b) 다량의 섬유로 보강된 시료(500배율)



(c) 소량의 섬유로 보강된 시료(100배율)



(d) 소량의 섬유로 보강된 시료(500배율)

그림 4.13 탄소섬유로 보강된 일반 시료의 SEM 사진

4.4.2 EDX 분석결과

(1) 실험 방법

본 연구를 통해 혼합된 시료의 일부를 채취하여 Energy Dispersive X-ray microanalysis (이하, EDX) 분석을 하였으며, 그래프로 표시하였다.

(2) 실험 결과

EDX 분석 결과, 본 배합비의 주요 구성요소는 O(산소)와 C(탄소), Ca(칼슘), Si(규소)로 나타났다. C는 배합비에 적용된 탄소섬유를 나타내는 것으로 판단되며, O, Ca, Si, Al(알루미늄), Mg(마그네슘), Na(나트륨) 등의 원소는 시멘트와 고로슬래그 미분말에서 나타나는 원소임을 확인하였다.

고로슬래그 미분말의 양이 증가함에 따라 Si 및 Ca가 증가한 것으로 나타났는데 이는 시멘트와 고로슬래그 미분말은 유사한 광물로 구성되어 있으므로 비표면적이 큰 고로슬래그 미분말 함유량이 증가함에 따라 Si 및 Ca가 증가한 것으로 판단된다.

본 실험결과는 일축압축강도 측정 후 파쇄된 시료에서 채취하여 EDX 분석을 수행하였고 채취위치에 따라 결과 값이 상이하므로 1개의 일축압축강도 실험 대상체에서 3개소에서 채취하여 평균으로 나타낸 값을 사용하였다.

표 4.10 고로슬래그 미분말 C:B(100:0)에 대한 EDX 분석 결과

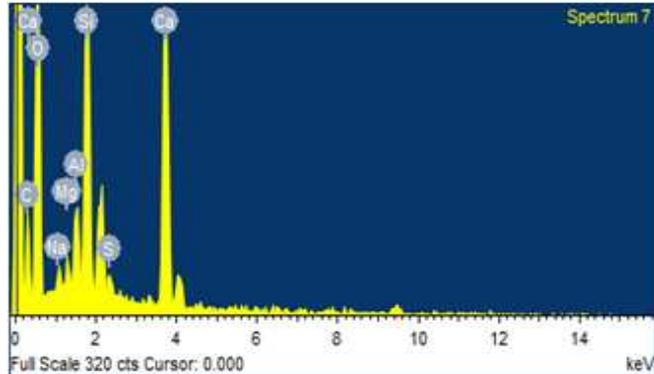
시 료	그 래 프	함 유 원 소	
		광물	함유원소%
C:B (100:0)		O	62.55
		C	23.31
		Si	5.76
		Ca	5.02
		Al	1.43
		Na	1.06
		Mg	0.67

표 4.11 고로슬래그 미분말 C:B(80:20)에 대한 EDX 분석 결과

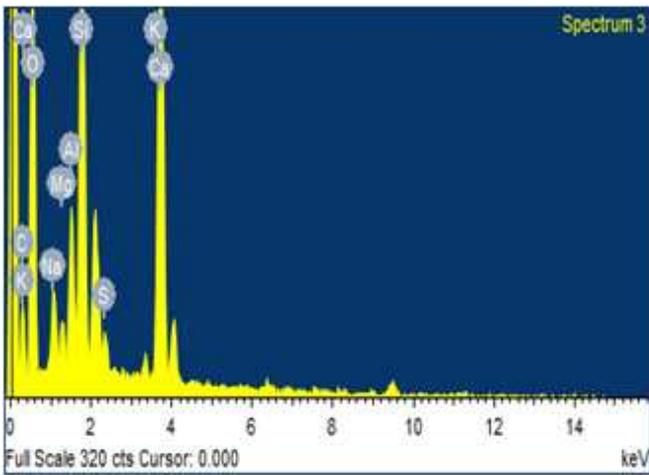
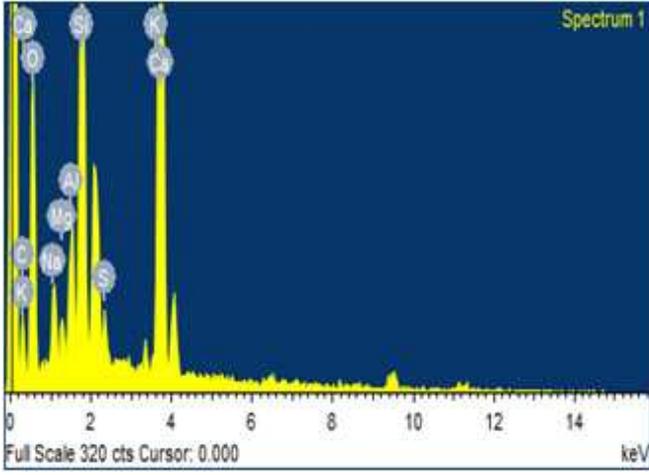
시 료	그 래 프	함 유 원 소	
		광물	함유원소%
C:B (80:20)		O	60.30
		C	21.31
		Si	6.78
		Ca	6.03
		Na	2.40
		Al	1.84
		Mg	0.79

표 4.12 고로슬래그 미분말 C:B(60:40)에 대한 EDX 분석 결과

시 료	그 래 프	함 유 원 소	
		광물	함유원소%
C:B (60:40)		O	57.01
		C	18.90
		Ca	9.14
		Si	8.62
		Na	2.84
		Al	1.89
		Mg	0.91

4.5 어독성 실험결과

표 4.13은 고로슬래그 미분말 및 탄소섬유를 혼합한 공시체 투하에 따른 pH 변화 및 치사어(율)을 나타낸 표이며, 그림 4.13은 시간경과에 따른 고로슬래그 및 탄소섬유를 혼입한 재료 비율과 시멘트 100%의 용탈에 대한 pH 변화를 나타낸 그래프이다.

본 연구에서는 각 실험으로부터 0, 4, 8, 24, 48, 72시간의 pH와 치사율을 구하고 공시어가 50%이상을 치사하는 pH를 검토하였다. 이러한 검토는 용탈로 인한 pH 변화를 측정하여 환경오염 정도를 확인할 수 있는 지표가 될 수 있을 것으로 판단된다. 초기 pH는 공시체의 알칼리 용탈이 거의 없는 시점에서의 수조내 물의 pH를 측정한 결과, pH는 6.9~7.1정도였다.

어독성 실험결과, 고로슬래그 및 탄소섬유를 혼입하여 제작한 고결체에서는 최대 pH는 9.8까지 올라가 공시어의 활동이 비교적 둔해짐을 볼 수 있으며, 24시간, 48시간 측정시에도 pH는 변함이 없는 상태로 9.8을 유지하였고, 치사된 공시어는 없었다.

OPC로 제작한 고결체에서는 24시간 경과 후 최대 pH 10.3을 나타내었으며, pH 10 이상 증가할 때 공시어의 활동이 느려지고 최종적으로 치사된 공시어는 10%로 나타났다. 본 연구에서 고로슬래그 미분말을 혼입한 공시체를 살펴본 결과, 치사율은 0%로 조사되었으며, 이는 시멘트양의 감소 및 탄소섬유 함유량 증가에 따른 pH감소가 이루어진 것으로 판단되며, 환경적으로 다소 안정적인 것으로 평가되었다.

표 4.13 그라우트재의 시간경과에 따른 pH 변화 및 치사어(율)(계속)

연번	그라우트재	조건	초기	4h	8h	24h	48h	72h
1	고로슬래그 및 탄소섬유 혼합재	pH	6.9	7.5	8.1	9.8	9.8	9.8
		치사어수	0	0	0	0	0	0
		치사율 (%)	0	0	0	0	0	0

표 4.13 그라우트재의 시간경과에 따른 pH 변화 및 치사어(율)

연번	그라우트재	조건	초기	4h	8h	24h	48h	72h
2	보통포틀랜드 시멘트 (OPC)	pH	7.1	7.6	10.1	10.3	10.3	10.3
		치사어수	0	0	0	2	2	2
		치사율 (%)	0	0	0	10	10	10

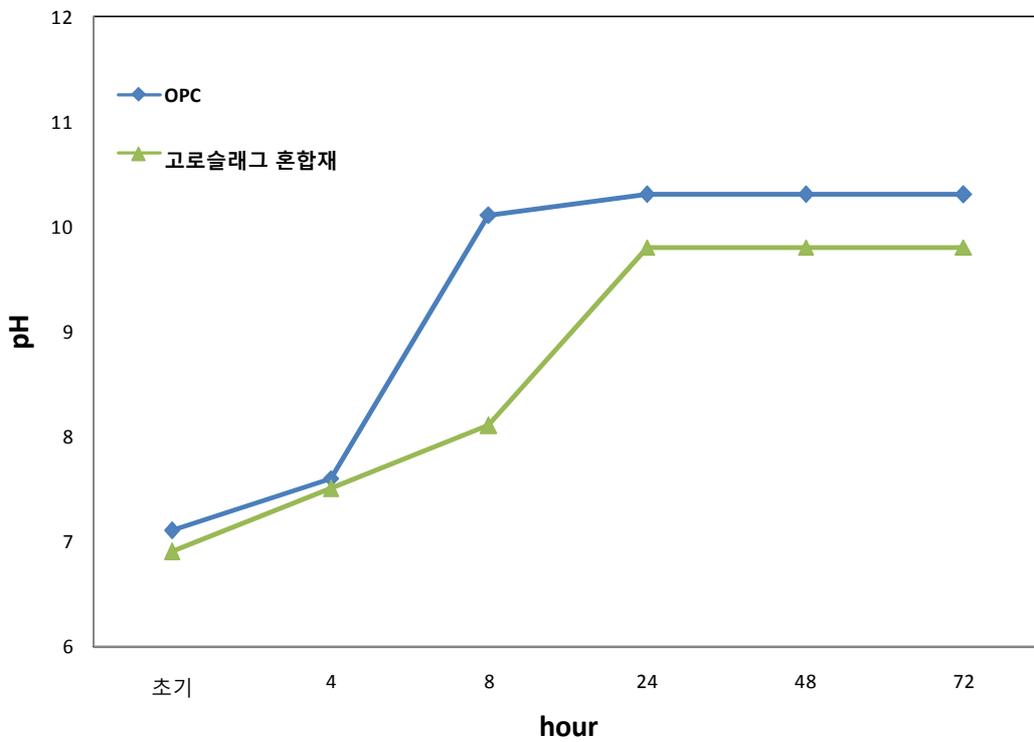


그림 4.14 시간경과에 따른 그라우트재 용탈에 대한 pH 변화

제 5 장 결 론

본 연구에서는 선처리 공정인 미생물 광물질과 후처리 공정인 재활용 자원인 섬유 파쇄체의 탄소섬유 및 고로슬래그 미분말, 시멘트 혼합으로 우수한 압축강도, 차수성을 지닌 그라우트재를 개발하고자 하였다. 상기 배합재료의 배합비를 통해 그라우트재의 겔타임 실험과 내구성 확인을 위한 호모겔 일축압축강도(3, 7, 21, 28일) 시험을 수행하였으며, 배합비에 따른 투수시험을 수행하였고, 배합재료에 따른 SEM 및 EDX 분석, 어독성시험을 수행하여 개발하고자 하는 그라우트재의 역학적인 기초 성능을 평가하고 검증하고자 하였다.

1. 겔타임 측정결과, 고로슬래그 미분말의 양이 20% 증가할수록 겔타임은 약 1.3~1.4 배 증가하였으며, 탄소섬유가 1% 첨가시 겔타임은 약 1.1배 감소하였다. 시멘트 양이 감소함에 따라 수화반응과 포졸란 반응이 약해지는 결과로 겔타임이 증가하는 경향이 나타났으며, 고로슬래그 미분말이 시멘트 속에 침투하여 수화열을 저감시켜 겔타임이 증가되는 것으로 판단된다. 또한 친수성인 탄소섬유의 양이 증가할수록 물을 흡수하여 겔타임이 감소하는 것으로 나타났다.
2. 일축압축강도를 측정한 결과, 규산소다 3호의 함유량이 증가할수록 3일 강도에서는 겔타임 시간이 짧아져 조기강도를 발현하기 때문에 호모겔 일축압축강도가 증가하였으나, 28일 강도에서는 규산소다 3호의 함유량이 많을수록 재료에서 부분적 균열이 발생하여 현저히 강도가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한 탄소섬유 1% 첨가시 일축압축강도는 약 1.2배 정도 증가함을 확인하였으며, 이는 탄소섬유가 그라우트재내에서 보강재 역할을 하여 내구성이 증진된 것으로 판단된다.
3. 일축압축강도 측정결과, C:B-F가 100:0-0, 1%일 때의 28일 강도 대비 C:B-F가 80:20-0, 1%는 약 75%의 강도를 나타내며, C:B-F가 60:40-0, 1%는 약 51~52%의 강도를 나타냈다. 고로슬래그 미분말은 미소한 알갱이로 구성되어 있으며, 수밀성 향상, 장기강도 향상 등으로 인해 차수에 대한 효과는 높은 것으로 확인되었으나, 초기강도 저하 등의 특징으로 인해 강도는 상당히 저하되는 것으로 나타났으며, 강도증진을 위해서는 석회 등의 혼화재를 혼합하여 시공을 해야 할 것으로 판단된다.

4. 투수실험결과, C:B가 80:20, C:B가 60:40일 때 투수 계수가 약 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 이상으로 확인되어 차수그라우트재로서의 적합성을 확인하였다. 고로슬래그 미분말이 20% 증가할수록 약 1.5배 이상의 투수계수가 감소하는 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 고로슬래그 미분말의 수밀성이 뛰어나 차수효과가 나타내는 것으로 판단된다.
5. SEM 분석결과, 탄소섬유가 그라우트재내에서 일체거동을 하므로 내구성증진 및 강도증가가 충분히 이루어질 것으로 확인되었으며, EDX 분석결과, 고로슬래그 양이 증가할수록 Si 및 Ca가 증가하였으며, 이는 비표면적이 큰 고로슬래그 미분말의 양이 증가되는 결과로 판단된다.
6. 환경성 평가를 위한 어독성 시험결과, 고로슬래그 및 탄소섬유가 혼입된 고결체에서 초기 pH는 6.8이며, 최대 pH 9.8까지 유지되는 것으로 확인되었으며, 이로 인한 공시어의 치사는 없는 것으로 확인되었다. 어독성평가를 통해 살펴본 결과, 고로슬래그 및 탄소섬유가 혼입된 고결체의 경우 시멘트양의 감소 및 탄소섬유 함유량 증가에 따른 pH감소가 이루어진 것으로 판단되며, 환경적으로 다소 안정적인 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. 건설교통부(2003), 마이크로시멘트 현장제조 및 시리간 시공모니터링을 이용한 최적 그라우팅 시스템 개발연구, 한국건설기술연구원 보고서
2. 권지연(2012), 실내실험을 통한 알칼리성 실리카졸-시멘트 주입재의 공학적 특성에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교
3. 김대현, 박경호, 김호철, 이용희(2012), “미생물 처리 방법이 바이오그라우트에 미치는 영향”, 한국지반환경공학회논문집, 제 13권, 제 5호 pp.51~57.
4. 김대현, 사공명, 박경호(2013), “친환경 바이오그라우팅을 이용한 모래지반 개량 공법”, 한국철도학회논문집, 제 16권, 제 6호, pp.473~481.
5. 김무한, 김규용, 조봉석, 나철성, 김영덕(2007), “고로슬래그 미분말을 대량 활용한 콘크리트의 공학적 특성 및 내구성특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집, 제 23권, 제 3호, pp.61~68.
6. 김선태, 도종남, 조현수, 천병식(2011), “다당류 친환경 지반개량재를 이용한 지반강도 증대 효과”, 한국지반환경공학회논문집, 제 12권, 제 11호, pp.13~21.
7. 김영희, 한천구, 이향재(2013), “고로슬래그 미분말과 천연잔골재를 사용하는 모르타르의 강도증진에 미치는 OPC 및 순환잔골재 치환율의 영향”, 대한건축학회 논문집, 제 29권, 제 3호, pp.81~88.
8. 김준호, 한민철, 한천구(2014), “고로슬래그 미분말과 알칼리 자극재로서 순환골재를 사용하는 콘크리트의 강도발현 특성”, 한국건설순환자원학회 논문집, 제 2권, 제 2호, pp.107~114.
9. 김호철(2011), 미생물 이용한 흙의 고결화 특성, 석사학위논문, 조선대학교
10. 민경산, 이승현(2007), “알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 내황산성”, 한국세라믹학회 논문집, 제 44권, 제 11호, pp.633~638.
11. 박경호(2011), 미생물 반응에 의한 연약지반의 강도 개선, 석사학위논문, 조선대학교
12. 박경호(2015), 친환경 바이오그라우팅공법에 대한 모래지반에서의 적용성 평가, 박사학위논문, 조선대학교
13. 박경호, 김대현(2012), “Bacteria를 이용한 실트와 모래의 고결화에 따른 탄산칼슘 확인”, 한국지반공학회논문집, 제 28권, 제 6호, pp.53~61.

14. 박경호, 김대현(2013), “Bacteria로 처리된 모래지반의 강도 및 주입효과”, 한국지반 공학회논문집, 제29권, 제 2호, pp.65~73.
15. 박경택, 한천구, 김대건(2012), “고로슬래그 미분말 기반 순환골재 모르타르의 품질에 미치는 미분시멘트의 영향”, 대한건축학회 논문집, 제 28권, 제 9호, pp.131~138.
16. 박성식, 김화중, 이준철(2011), “미생물에 의해 생성된 광물질이 고결모래의 강도에 미치는 영향”, 한국지반공학회논문집, 제 27권, 제 5호, pp.75~84.
17. 방성식, 최선규, 남인현(2012), “식물추출액을 이용한 지반 고결제 개발”, 한국지반 공학회논문집, 제 28권 제 3호, pp.67~75.
18. 박성식, 최선규(2013), “고로슬래그와 알칼리 활성화제를 이용한 모래 고결 및 조기 강도에 관한 연구”, 한국지반공학회논문집, 제 29권, 제 4호, pp.45~56.
19. 부성안, 김동석(2008), “방조제 그라우팅 보강기술 개발”, 농어촌과 환경, 제 99권, pp.89~102.
20. 류금성, 고경택, 이장화(2013), “플라이애시와 고로슬래그 미분말을 혼합 사용한 지오폴리머 모르타르의 강도발현 및 내구성”, 한국건설순환자원학회논문집, 제 6권, pp.35~41.
21. 송기준, 최은희, 한수연(2013), *엑셀 2010을 이용한 쉬운 통계학*, 진샘미디어
22. 양열호(2017), 아라미드를 활용한 그라우팅공법 보강효과 평가, 석사학위논문, 조선대학교
23. 양형철, 김건호, 김보석, 김승희, 김영섭, 김창근, 김호열, 류연길, 엄귀만, 유일형, 이상열, 이오형, 정지현, 한산용(2012), 그라우팅환경공학, 구미서관
24. 이기범(2008), 탄소섬유그리드 보강 콘크리트 부재의 구조적 거동특성, 박사학위논문, 홍익대학교
25. 이방연(2012), “그라우팅에 적합한 점성을 갖는 변형률 경화 시멘트 복합재료”, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 제 16권, 제 1호, pp.153~162.
26. 이승태(2014), “콘크리트의 강도 및 내구성에 대한 고로슬래그 미분말 분말도의 영향”, 대한토목학회논문집, 제 34권, 제 4호, pp.1095~1104.
27. 이현호(2016), “고로슬래그 미분말과 순환 굵은 골재를 사용한 콘크리트의 재료 성능 평가”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, pp.1523~1524.
28. 임춘호(2016), 바이오그라우팅공법의 주입재 배합비에 따른 적용성, 박사학위논문, 조선대학교

29. 장현오, 지남용(2013), “고로슬래그 미분말을 혼입한 보통강도 고유동 콘크리트 배합에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집, 제 29권, 제 6호, pp.81~88.
30. 전상주(2013), 미생물 반응으로 생성된 탄산칼슘의 흡의 강도 개선 효과, 석사학위논문, 조선대학교
31. 정지용, 장승엽, 최영철, 정상화, 김성일(2015), “고강도 고로슬래그 혼합 시멘트 페이스트의 수화 및 포졸란 반응에 미치는 고로슬래그 미분말의 치환률과 분말도의 영향”, 콘크리트학회 논문집, 제 27권 제 2호, pp.115~125.
32. 조성광(2013), “고로슬래그 미분말 사용율을 높인 콘크리트의 시공성 및 공학적 특성에 관한 실험적 연구”, 융복합지식학회논문지, 제 1권, 제 1호, pp.43~50.
33. 최민형(2005), 강섬유 보강 그라우팅을 사용한 Soil Nailing 공법의 보강효과 연구, 석사학위논문, 단국대학교
34. 천병식, 정중주, 오민열(1994), “동수지반에서 주입된 물유리계 약액의 내구성에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.685~688.
35. 천병식(1998), 최신 지반주입 : 이론과 실제, 구미서관
36. 하기주, 이동렬, 하재훈(2013), “순환골재와 고로슬래그 미분말을 치환한 강섬유 보강 RC보의 구조성능 평가”, 콘크리트학회 논문집, 제 25권, 제 5호, pp.477~484.
37. 한국시멘트협회(2011), 2010 시멘트 통계연보, 한국시멘트협회 보고서
38. 한국지반공학회(2005), 지반공학시리즈 6, 연약지반, 한국지반공학회 저
39. 한국콘크리트학회(2005), 최신콘크리트 공학
40. 한천구, 손석현, 박경택(2011), “고로슬래그 미분말과 순환잔골재를 사용하는 무 시멘트 모르타르의 특성에 미치는 순환골재 미분말의 영향”, 제 27권 제 6호, pp.99~106.
41. 한천구, 김성환, 손호정(2009), “고로슬래그 미분말의 치환율 증가에 따른 고강도 콘크리트의 공학적 특성 분석”, 한국건설순환자원학회논문집, 제 7권, pp.62~68.
42. ASCE(1997), “Grouting : Compaction, Remediation and Testing, Proceedings of ASCE”
43. Chang, I. H. and Cho, G. C.(2012), “Strengthening of Korean Residual Soil with b-1,3/1,6-glucan Biopolymer”, Construction and Building Materials, Vol. 30, pp.30~35.
44. Choi, S. M.(2002), “Polyviny Alcohol Fibers : Introduction and Manufacturing Technology”, Fibertechnology and Industry, Vol. 6, No. 2, pp.83~95.

45. Deere, D. U.(1982), "Cement-bentonite Grouting", Proceedings of Conference Sponsored by the Geotechnical Engineering Division, ASCE, New Orleans, USA, pp.279~300.
46. Dejong, J. T., Fritzges, M. B., and Nüsslein, K.(2006). "Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, No. 11, pp. 1381~1392.
47. Dejong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C. and Nelson, D. C.(2010), "Bio-mediated Soil Improvement", Journal of Ecological Engineering, Vol. 36, pp.197~210.
48. Fariborz, V., Claudia, P. O., Paulo, J. M. and George, C.(2007), "Resistance of Concrete Protected by Fabric to Projectile Impact", Cement and Concrete Research, ELSRVIER, Vol. 37, pp.96~106.
49. Glossop, R.(1960), "The Invention and Development of Injection Processes", Geotechnique, pp.90~100.
50. Iler, R. K.(1979), The Chemistry of Silica, John Wiley and Sons
51. Ismail, M. A., Joer, H. A., Randolph, M. F. and Meritt, A.(2002), "Cementation of Porous Materials using Calcite", Geotechnique, Vol. 52, No. 5, pp.313~324.
52. Kim, D. H., Park, K. H. and Kim, D. W.(2014), "Effects of Ground Conditions on Microbial Cementation in Soils", Materials, Vol. 7, pp.143~156.
53. Kim, D. H. and Park, K. H.(2017), "Evaluation of The Grouting in The Sandy Ground using Bio Injection material", Geomechanics and Engineering, Vol. 12, No. 5, pp.739~752.
54. King, J. C. and Bush, E. G. W.(1961), "Symposium on Grouting : Grouting of Granular Materials", Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 87, pp.1~32.
55. Kutzner, C.(1996), "Grouting of Rock and Soil", A.A Balkema, pp.203~204.
56. Li, V. C.(1993), "The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications", Japan Society of Civil Engineers, Vol. 10, No. 2, pp.37~48.
57. Maalej, M., Zhang, J., Quek, S. T. and Lee, S. C.(2004), "High-velocity Impact Resistance of Hybrid-fiber Engineered Cementitious Composites", In Proc. 5th

Int. Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Franc, pp.1051~1058.

58. Nordin, N., Wong, L. S. and Regunathan, P.(2015), "A Review on The Compressive Strength of Biomineralized Mortar", The 3rd National Graduate Conference Univ. Tenaga Nasional, Malaysia, 8-9 April, pp.234~239.
59. Park, K. H., Jun, S. J. and Kim, D. H.(2014), "Effect of Strength Enhancement of Soil Treated with Environment-Friendly Calcium Carbonate Powder", The Scientific World Journal, Vol. 2014, pp.1~11.
60. Park, K. H. and Kim, D. H.(2016), "Analysis of Homogel Uniaxial Compression Strength on Bio Grouting Material", Materials 2016, Vol. 9, pp.1~12.
61. Pedreira, R.(2014), "Bio-cementation of Sandy Soils for Improving their Hydro-mechanical Characteristics", Geotechnique, Vol. 64, No. 12, pp.1~5.
62. Reddy, L., Manjusha, A. and Arun kumar, M.(2015), "Bio Cement - An Eco Friendly Construction Material", International Journal of Current Engineering and Technology, Vol. 5, pp.1~4.
63. Shah, S. P. and Rangan, B. V.(1971), "Fiber Reinforced Concrete Properties", ACI Materials Journal, pp. 126~135.
64. Shah, S. P., Ludirdja, D., Daniel, J. I. and Mobasher, B.(1988), "Toughness-Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete Systems", ACI Materials Journal, Vol. 85, No. 5, pp.352~360.
65. Shi, C. and Day, R. L.(1995), "A Calorimetric Study of Early Hydration of Alkali-slag Cement", Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 6, pp.1333~1346.
66. Soon, N. G., Lee, L. M., Khun, T. C. and Ling, H. S.(2013), "Improvements in Engineering Properties of Soils through Microbial-Induced Calcite Precipitation", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 17, No. 4, pp.718~728.
67. Varalakshmi and Devi, A.(2014), "Isolation and Characterization of Urease Utilizing Bacteria to Produce Biocement", IOSR Journal of Environmental Science, Vol. 8, No. 4, pp.52~57.
68. Whiffin, V. S., Paasen, L. A. and Harkes, M. P.(2007). "Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique", Geomicrobiology Journal, Vol.

24, No. 5, pp.417~423.

69. Paassen, L. A., Harkes, M. P., Zwieter, G. A., Zon, W. H., Star, W. R. L., and Loosdrecht, M. C. M.(2009), “Scale Up of Biogrout: A Biological Ground Reinforcement Method”, Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp.2328~2333.