



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](#)

2015年 8月

박사학위논문

친환경 바이오그라우팅공법에 대한
모래지반에서의 적용성 평가

조선대학교대학원

토목공학과

박 경 호

친환경 바이오그라우팅공법에 대한 모래지반에서의 적용성 평가

**Evaluation of Applicability of Environment Friendly Biogrouting
Methods in Loose Frictional Soils**

2015년 8월 25일

조선대학교 대학원

토목공학과

박 경 호

친환경 바이오그라우팅공법에 대한 모래지반에서의 적용성 평가

지도교수 김 대 현

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함

2015년 4월

조선대학교 대학원

토 목 공 학 과

박 경 호

박경호의 박사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 朴 吉 鉉 (인)

위 원 조선대학교 교수 金 聖 洪 (인)

위 원 조선대학교 교수 姜 聲 承 (인)

위 원 인천대학교 교수 金 東 郁 (인)

위 원 조선대학교 교수 金 大 賢 (인)

2015년 6월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제 1 장 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구동향	4
1.2.1 국내 연구동향	5
1.2.2 국외 연구동향	9
1.3 연구방법 및 범위	13
제 2 장 그라우팅공법	15
2.1 그라우팅공법 개요	15
2.1.1 그라우팅공법 종류	15
2.1.2 주입재료 분류	17
2.1.3 그라우팅공법 조건	18
2.1.4 그라우팅 침투 이론식	22
2.1.5 침투한계 주입비	25
2.2 그라우팅공법 설계	28
2.2.1 주입재 종류 및 특성	28
2.2.2 그라우팅공법 선정	35
2.2.3 그라우팅량 계산	37
2.2.4 그라우팅공 배치	40
2.2.5 그라우팅공법 현장시공 모습	41

2.3 바이오그라우팅 공법	44
2.3.1 바이오그라우팅 개요	44
2.3.2 미생물 고결화 영향인자	46
2.3.3 미생물에 의한 바이오주입재 생성 이론	48
2.3.4 최적 바이오주입재 도출	51
제 3 장 실내실험	60
3.1 MCP 공시체 일축압축강도실험	60
3.1.1 공시체 제작	62
3.1.2 배합비	66
3.2 바이오그라우팅공법 주입실험	68
3.2.1 공시체 제작	69
3.2.2 배합비	73
3.3 LW공법과 바이오그라우팅공법 비교	79
3.3.1 일축압축강도실험 배합비	79
3.3.2 그라우팅 실험 배합비	83
3.3.3 전단탄성계수 측정	85
3.4 환경성 평가	93
제 4 장 실험 결과 및 고찰	99
4.1 MCP 공시체 일축압축강도실험 결과	99
4.1.1 재령에 따른 일축압축강도실험 결과	99
4.1.2 세립분과 중량비에 따른 일축압축강도실험 결과	109
4.1.3 바이오주입재 혼합 비율에 따른 일축압축강도실험 결과	111

4.2 바이오그라우팅공법 주입실험 결과	114
4.2.1 단층토 바이오그라우팅실험 결과	114
4.2.2 다층토 바이오그라우팅실험 결과	124
4.2.3 바이오그라우팅 주입률과 주입범위 결과	129
4.2.4 바이오주입재와 시멘트 투수실험 결과	138
4.3 LW공법과 바이오그라우팅공법 비교	139
4.3.1 일축압축강도실험 결과	139
4.3.2 그라우팅실험 결과	146
4.3.3 기존 고결제와 경제성 비교	153
4.4 환경성 평가 결과	154
제 5 장 결론	158
참고문헌	160

표 목 차

표 2.1 주입재의 G_{85} 와 G_{95} 의 값(μm)	26
표 2.2 일반 포틀랜드시멘트 물리적 특성	29
표 2.3 주입재 화학성분	31
표 2.4 주입재 입도분포	31
표 2.5 주입재 물리적 성질	32
표 2.6 규산소다 종류	33
표 2.7 그라우팅 룯드 구성에 의한 약액 그라우팅 종류	35
표 2.8 목적별 그라우팅 분류	36
표 2.9 토질에 의한 그라우팅의 충진율, 그라우팅률의 참고치	39
표 2.10 토질별 그라우팅 간격	41
표 2.11 염화칼슘 몰비(M)에 따른 바이오주입재 생성량과 가격	56
표 2.12 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 XRD 분석	58
표 3.1 모래 시료 물리적 특성	64
표 3.2 세립분에 따른 균등계수와 곡률계수	65
표 3.3 주입재에 따른 시료 배합비(중량비)	67
표 3.4 바이오그라우팅 주입실험에 사용된 시료 물리적 특성	72
표 3.5 단층토 실험을 위한 배합비	73
표 3.6 다층토 실험을 위한 배합비	75
표 3.7 바이오그라우팅 주입범위를 평가하기 위한 배합비	76
표 3.8 바이오주입재와 시멘트 투수실험 배합비	78
표 3.9 그라우팅 주입재에 따른 일축압축강도 시료 배합비	80
표 3.10 LW 공법 표준 배합비	83
표 3.11 주입재에 따른 그라우팅실험 배합비	84
표 3.12 적용된 주입재 조합별 배합비	94
표 4.1 세립분 0% 일 때 재령에 따른 일축압축강도 결과	100
표 4.2 세립분 5% 일 때 재령에 따른 일축압축강도 결과	102
표 4.3 세립분 15% 일 때 재령에 따른 일축압축강도 결과	104

표 4.4	재령 7일에 따른 회귀분석 결과	106
표 4.5	재령 28일에 따른 회귀분석 결과	107
표 4.6	세립분에 따른 일축압축강도 결과	109
표 4.7	바이오주입재 혼합 비율에 따른 일축압축강도 결과	112
표 4.8	표준사에 대한 바이오그라우팅 XRD 분석표	117
표 4.9	SP시료에 대한 바이오그라우팅 XRD 분석표	120
표 4.10	SW시료에 대한 바이오그라우팅 XRD 분석표	123
표 4.11	단층토에 대한 고결범위와 고결강도 측정 결과	123
표 4.12	다층토에 대한 고결범위와 고결강도 측정 결과	128
표 4.13	바이오그라우팅 적용성 평가	137
표 4.14	바이오주입재와 시멘트 투수실험 결과	138
표 4.15	OPC, Micro, 바이오주입재 일축압축강도 결과	140
표 4.16	규산소다 3호의 함유에 따른 OS, MS, BS 일축압축강도 결과	142
표 4.17	OPC 개선에 따른 일축압축강도 결과	143
표 4.18	Micro 시멘트 개선에 따른 일축압축강도 결과	145
표 4.19	주입재에 따른 전단파속도 측정 결과	147
표 4.20	대상지에 따른 주입비 N_1 , N_2	151
표 4.21	주입재에 따른 토양오염분석 결과	157

그 립 목 차

그림 2.1 혼합공정에 의한 그라우팅 방식 분류	16
그림 2.2 주입재 분류	17
그림 2.3 균열 내에서의 그라우팅 슬러리 속도비교	20
그림 2.4 그라우팅 슬러리와 물에 따른 유동학적 해석 모델	21
그림 2.5 흙 입자 공극에서 약액의 침투와 규산겔에 의한 고결 모형도	22
그림 2.6 d/D(%)와 공극률 n과의 관계	27
그림 2.7 물유리 겔화 과정	34
그림 2.8 그라우팅공 배치	40
그림 2.9 그라우팅 현장시공 전경	42
그림 2.10 흙 입자 간극 사이의 바이오주입재 모식도	45
그림 2.11 미생물 크기에 따른 박테리아 종류	47
그림 2.12 Urea의 양에 따른 미생물 성장곡선	48
그림 2.13 미생물 고결화 메커니즘	50
그림 2.14 영양배지와 요소	51
그림 2.15 미생물 배양배지 만드는 방법	53
그림 2.16 계대배양방법	54
그림 2.17 염화칼슘 몰비(M)에 따른 정량화 실험	55
그림 2.18 염화칼슘 몰비(M)에 따른 바이오주입재 생성량과 가격 그래프	56
그림 2.19 바이오주입재 추출과 제작과정	57
그림 2.20 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험	58
그림 2.21 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 XRD 분석	59
그림 2.22 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 SEM 분석	59
그림 3.1 미생물 고결화를 위한 실험과정	61
그림 3.2 일축압축 실험용기	62
그림 3.3 일축압축실험 공시체 제작과정	63
그림 3.4 모래 시료 입도분포곡선	65
그림 3.5 Ca4-F0-7 공시체 성형 후 실험 모습	66
그림 3.6 바이오그라우팅공법을 위한 주입실험	69

그림 3.7	실내실험을 통한 바이오그라우팅 전경	70
그림 3.8	바이오그라우팅 주입실험에 사용된 시료의 입도분포곡선	72
그림 3.9	다충토 시료 조건	74
그림 3.10	바이오주입재와 시멘트 투수실험 전경	78
그림 3.11	주입재에 따른 호모겔 공시체 제작 과정	81
그림 3.12	OPC 공시체의 성형 후 실험 모습	82
그림 3.13	벤더엘리먼트 측정시 사용된 장비	86
그림 3.14	벤더엘리먼트 원리	87
그림 3.15	벤더엘리먼트 구조와 제작된 벤더엘리먼트	89
그림 3.16	벤더엘리먼트 배열에 따른 전파거리	90
그림 3.17	전파시간 결정 방법	91
그림 3.18	전단파속도 실험 전경	92
그림 3.19	전단파속도 측정 결과	92
그림 3.20	시멘트와 바이오주입재 시편 제작	95
그림 3.21	어독성 실험 준비과정	96
그림 3.22	공시어 방류와 치사된 공시어	98
그림 4.1	세립분 0%일 때 재령에 따른 일축압축강도 결과	101
그림 4.2	세립분 5%일 때 재령에 따른 일축압축강도 결과	103
그림 4.3	세립분 15%일 때 재령에 따른 일축압축강도 결과	105
그림 4.4	시멘트의 포졸란 반응에 의한 지반 강도	108
그림 4.5	세립분 함유량에 따른 일축압축강도 비교	110
그림 4.6	시멘트 대비 바이오주입재 혼합에 따른 일축압축강도 결과	113
그림 4.7	표준사 시료에 대한 바이오그라우팅 결과	115
그림 4.8	표준사에 대한 바이오그라우팅 XRD 분석 결과	116
그림 4.9	SP시료에 대한 바이오그라우팅 결과	118
그림 4.10	SP시료에 대한 바이오그라우팅 XRD 분석 결과	119
그림 4.11	SW시료에 대한 바이오그라우팅 결과	121
그림 4.12	SW시료에 대한 바이오그라우팅 XRD 분석 결과	122
그림 4.13	다충토 A실험 공시체 전경	124
그림 4.14	다충토 A실험에 대한 바이오그라우팅 결과	125
그림 4.15	다충토 B실험 공시체 전경	126

그림 4.16 다충토 B실험에 대한 바이오그라우팅 결과	127
그림 4.17 SP시료에 대한 바이오그라우팅 결과	130
그림 4.18 SW시료에 대한 바이오그라우팅 결과	131
그림 4.19 지반조건에 따른 주입률 평가	132
그림 4.20 일축압축강도 측정 모습	133
그림 4.21 SP시료의 지반조건에 따른 고결범위와 고결강도 결과	134
그림 4.22 SW시료의 지반조건에 따른 고결범위와 고결강도 결과	136
그림 4.23 OPC, Micro, 바이오주입재의 일축압축강도	140
그림 4.24 규산소다 3호의 함유에 따른 OS, MS, BS의 일축압축강도	141
그림 4.25 OPC 개선에 따른 일축압축강도	143
그림 4.26 Micro 시멘트 개선에 따른 일축압축강도	144
그림 4.27 전단탄성계수 측정 결과	149
그림 4.28 주입재에 따른 전단파속도와 일축압축강도의 상관관계	150
그림 4.29 고결체에 따른 pH 측정 결과	155
그림 4.30 고결체에 따른 치사어 측정 결과	156

ABSTRACT

Evaluation of Applicability of Environment Friendly Biogrouting Methods in Loose Frictional Soils

Park, Kyung Ho

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

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

Recently, soft grounds and coastal areas have been steadily reclaimed for more efficient use of lands and for increase of construction spaces. For the purpose, significant effort has been put to develop efficient ground improvement methods on soft grounds consisting of loose sandy or silty soils.

International and domestic research on implementation of biogrout using bio byproduct materials on soft clayey and loose sandy soils was performed. The common purposes of these past studies were (1) to achieve cementation of soft soils, (2) to evaluate field applicability of developed methods, and (3) to develop environment-friendly materials improving soil strength and reducing compressibility.

Despite the past research results, more efficient biogrouting method is required; therefore, new biogrouting methods were developed in this study. The objectives of this study can be summarized as follows:

- 1) Production of optimal powdery biogrout material for the implementation of Microbial Calcite Precipitation (MCP) method: To achieve the goal, mixtures of different specimens were made varying mixture ratios of non-treated, biogrout-treated, cement-treated, biogrout and cement treated (biogrout to cement ratios of 1:9, 3:7, 5:5) soils and fines of 0%, 5% and 15%. From the

comparison of uniaxial compression test results (uniaxial compression strengths at curing days of 7 and 28 days) of these non-treated and treated mixtures, mixtures' strength improvement was quantitatively evaluated to analyze the effects of the soil treatment and to evaluate the treatments' economic efficiency.

- 2) Development of biogrouting injection methods for different ground conditions [from well-graded sand, fine to coarse (SW) sands to poorly graded (SP) sand under different relative compactions (RC) of 70%, 80%, 85%, 90%, 95%]: The effects of injection rate on diffusion range of cementation and cementation strength were evaluated. In addition, practicality and applicability of biogrouting were assessed.
- 3) Evaluation of strengthening effects of the Labiles Waterglass (LW) grout and the biogROUT by mixing different grouting materials [Ordinary Portland Cement (OPC), Micro cement, BiogROUT and Sodium silicate No. 3].
- 4) Deduction of an optimal biogROUT method, by evaluating cementation created from the reaction of environment-friendly material microorganisms. Strength and waterproofing effects after the biogROUT and in-situ applicability were estimated based on the Bender element test results. Chemicals and cements were not used in grouting.
- 5) Validation of environmental safety of the biogROUT materials based on the results of the fish toxicity tests: The environment effects of the LW method and the biogROUT method were compared. This aims to analyze the positive effect of biogROUT on the environment from the examination of soil contamination.

Uniaxial compressive strengths of sand-gel (biogROUT material to Cement mixing ratio of 3:7) specimens were as high as approximately 85% of the cement treated specimens' strengths. From the strength comparison on the homo-gel specimens, the strengths of the injection materials OB-1 (OPC 100% + biogROUT 30%) and MB-1 (micro 100% + biogROUT 30%) were 15% higher than those of the OPC and micro injection materials.

It is the mixing ratio for reducing the amount of cement used. About the homo-gel specimens, comparison results of the strength of the injection materials OB-1 (OPC 100% + Biogrout 30%) and MB-1 (Micro 100% + Biogrout 30%) showed the strengths about 15% higher than those of the OPC and micro injection material. In the injection materials OS (OPC 100% + Sodium silicate 30%) and MS (Micro 100% + Sodium silicate 30%) containing sodium silicate No. 3, strength was reduced by 50%~70%. This indicates that biogrout can be a good potential candidate as a supplementary cementation material replacing the LW injection materials.

Results of the laboratory biogrouting test, 100% injection efficiency was achieved on the SP specimens under RC of 70% ~ 85%; however, reduction of injection efficiency was identified when RC exceeded 90%. For the SW specimens, the injection ratio was less than 10% when RC exceeded 85%. Therefore, it is concluded that the applicability of biogrout are highly dependent on ground conditions.

The moduli of the materials increased with increasing curing time. Comparison results of the shear modulus for the LW injection materials and the biogrout injection materials revealed that the shear moduli of the OB-1 and MB-1 injection materials were approximately 15% higher than those of the OPC and Micro cement materials.

The fish toxicity test results showed that the biogrout material is more environment-friendly material compared to the LW injection materials.

In this study, an environment-friendly biogrout is newly developed and is compared with the existing LW method based on the results of injection experiments conducted under conditions similar to the actual sites. From the research, it is concluded that the developed biogrouting method can be an efficient method and has high potentials of field implementation.

제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 목적

최근 천연소재의 고갈로 인한 원자재 값 상승과 산업발전에 따라 국가기관 산업의 양적, 질적 확대에 의해 국내 부지의 확보가 용이하지 않다. 따라서 효율적으로 토지를 이용하고자 그동안 건설부지로 사용되지 않던 연약지반에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한 해외 수주 등으로 중동지역에 많은 건설업체가 진출하고 있어 연약지반의 개량을 위한 새로운 공법 개발이나 신소재의 개발이 필요하다.

과거에는 연약지반의 현장조건을 고려하여 연약지반의 원지반 토사 자체를 치환하는 치환공법, 샌드 드레인, 페이퍼 드레인을 사용하여 압밀을 유발하는 압밀배수공법, 동적하중을 이용하여 연약지반을 개량하는 다짐공법, 시멘트나 약액 등 화학약품을 이용하여 지반을 고결화시키는 그라우팅공법 등을 주로 사용하였다.

그 중, 그라우팅공법은 토목분야에서 주로 댐, 사면보강, 제방, 준설, 매립지역 등의 연약지반 보강, 구조물의 보수 보강, 차수의 목적으로 사용되었고, 최근에는 고속도로, 비행장, 고속철도, 해저시설물, 항만건설공사, 터널, 지하철공사 등의 건설 현장에서 많이 사용되고 있다. 이와 같이 그라우팅의 필요성이 확대되고 있어 그라우팅의 수요는 더욱 증대될 전망이다. 그러나 그라우팅공법은 전문성 없이 경험만 있다면 누구나 할 수 있는 단순 지반보강 보조공법으로 인식되고 있어 매년 7,000억 원 이상의 그라우팅 시장규모에 900여 개의 그라우팅 등록업체가 난립하고 있다(국토해양부, 2009).

국내 건설현장에서 주로 사용되는 그라우팅공법은 물유리계약액, 우레탄, 고압 분사 주입 등이 단독 또는 병행되어 쓰이고 있다. 그라우팅공법은 지반의 강도 증진에만 중점을 두었으며, 그라우팅공법에 주원료로 사용되는 시멘트와 약액은 이산화탄소(CO_2) 배출 및 지하수 오염 등의 환경문제를 발생시킨다. 이에 연약지반 개량공법과 관련하여 지반공학 분야에서도 새로운 공법 개발에 많은 관심과 투자가 이루어지고 있으며, 연약지반 개량공법에서 환경적인 측면을 고려한 공법이 절실히 요구되고 있다.

그라우팅공법은 주입재의 재료적 한계로 인하여 여러 문제점이 제기되어 왔으며, 재료적 한계를 극복하기 위해 연구되고 있다. 약액 그라우팅 중 일반적으로 많이 쓰이는 공법은 Labile Waterglass(LW)공법으로 주로 자갈층, 모래층에 전면 침투가 가능하며, 0.6mm 이하 세사 층에서는 주입이 곤란하고 연약한 점성토와 실트 층에는 맥상(흙의

조직을 파괴하면서 주입하는 형태)으로 주입되어 침하방지, 지반강화 등의 효과가 있다(안진현, 2009). 이러한 LW공법의 주된 재료는 시멘트로서 겔화특성과 낮은 침투능이 단점으로 지적되어 왔다. 그러나 최근 재료의 발달 및 시멘트 분쇄기술의 발달로 Micro시멘트(김진춘, 2007), 급결시멘트(김중선 등, 2007), 가소성시멘트(김대현, 2010) 등 새로운 시멘트계 주입재가 개발되었으며, 시멘트의 겔화특성과 침투성의 개선이 기대되고 있다(김중선 등, 2009). LW공법의 차수효과는 흙과 물유리계 주입재의 점착력으로 볼 수 있는데 지하수 유속이 증가할수록 약액의 희석, 유실이 심하여 점착력이 감소하고, 약액의 용탈이 커져서 내구성이 떨어진다. 따라서 LW공법은 동수지반에 적용할 때 겔타임을 짧게 하고, 약액의 농도, 주입률, 주입속도를 높여야 효율성이 증진된다(천병식 등, 1994).

한편, 한국시멘트협회(2011)에 따르면 2006년 국내 시멘트의 생산량은 약 4,800만 톤으로 세계 시멘트 생산량 7위에 해당한다. 1톤의 시멘트를 생산시 발생하는 CO_2 는 약 0.9톤으로 시멘트 4,800만 톤 중 시멘트 1%를 대체할 수 있는 개발재를 만든다면 약 48만 톤의 시멘트를 감축할 수 있고, 이는 약 130억 원/년(탄소배출권의 경우 CO_2 1톤당 22달러 부과)의 비용을 감축할 수 있다. 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 친환경재료를 개발하여 저탄소, 지구 온난화 방지 등의 녹색성장 정책에 기여하고, 신소재의 개발을 통해 원자재 값 상승과 건설재료 부족 등의 문제를 해결할 필요가 있다.

이에 지반 공학적으로 문제가 되는 연약한 점토지반, 느슨한 모래지반에 친환경 신소재인 미생물의 생화학 반응을 통해 생성된 고결물(바이오주입재)을 치환, 주입하여 흙을 고결화(Cementation)시키는 친환경 소재를 개발하고자 노력하고 있다.

특히 국내에서 바이오주입재를 이용한 지반공학 분야의 연구로는 김대현 등(2010)이 활발히 연구하고 있으며, 미생물을 이용한 연약지반 개량 공법이 개발되기 위해서는 흙입자와 바이오주입재의 고결화 메커니즘 규명이 매우 중요하다. 또한 시멘트를 절감할 수 있는 친환경 소재인 Biopolymer, 유기산 재료, 식물추출액 등을 활용한 지반개량 공법이 연구되고 있다.

국외에서는 미국과 네덜란드를 중심으로 Dejong et al.(2010), Paassen et al.(2009)의 연구자들이 미생물을 이용하여 흙의 고결화와 바이오그라우팅을 통해 친환경 소재를 개

발하고 있다. 그러나 경제적 비용, 강도개선의 문제, 한정된 지반에서의 적용 등 바이오 주입재와 바이오그라우팅공법을 현장에 적용하기 위해서는 많은 부분들이 개선, 보완되어야 한다. 특히 반복주입으로 인한 번거로운 미생물 처리과정과 상층액처리 등의 문제점이 있는데 이러한 문제를 해결하기 위해서는 바이오주입재를 시멘트와 같은 주입재로 개발하여 사용해야 한다.

따라서 본 연구에서는 바이오주입재를 시멘트와 같은 분말형태로 주입재를 개발하였으며, 시멘트 대체와 절감할 수 있는 바이오주입재를 개발하여 일축압축강도, 차수, 그라우팅, 환경성 평가를 수행하였다. 본 연구의 목적을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기존 주입재와 바이오주입재를 샌드겔 공시체에 혼합 성형하여 시간경과에 따른 일축압축강도를 분석하고, 기존 주입재 대비 바이오주입재에 대한 경제성을 분석하고자 한다.
- 2) 현장과 유사한 조건으로 주입실험을 수행하여 바이오주입재의 적용 가능한 지반 조건을 제시하고, 투수실험을 통해 차수효과를 확인하고자 한다.
- 3) 기존 주입재와 바이오주입재를 호모겔 공시체로 제작하여 일축압축강도를 통해 주입재의 시간경과에 따른 강도개선을 확인하고, 주입재에 따른 강도 증진효과를 분석하고자 한다.
- 4) 기존 LW 공법과 바이오그라우팅공법으로 주입실험 후 시간경과에 따라 주입재에 따른 전단탄성계수의 변화를 측정하여 그라우팅 적용성을 분석하고자 한다.
- 5) 기존 주입재와 바이오주입재의 환경성 평가를 위해 어독성 실험과 토양오염분석을 하였으며, 주입재에 따른 수질오염과 토양오염에 미치는 환경적 영향을 평가하고자 한다.

1.2 연구동향

미생물을 이용한 흙의 고결화 연구는 최근 십여 년에 걸쳐 다양한 연구가 진행 중이다. 특히 땅 속에 존재하는 수많은 미생물 중 *Sporosarcina Pasteurii* 균(KCTC 3558)의 생화학 반응을 통해 생성된 바이오주입재를 이용하여 연약지반을 고결화시키는 연구가 국내외 연구자들(김호철, 2011; 박경호, 2011; 김대현 등, 2012, 2013a; 박경호와 김대현, 2012, 2013; 전상주, 2013; Michell and Santamarina, 2005; Dejong et al., 2006)에 의해서 진행되었다.

바이오주입재를 이용하여 느슨한 사질토 지반에 혼합 성형으로 강도 증진효과를 나타내는 기술을 Microbial Calcite Precipitation(MCP) 기술로 명명한다. 이러한 MCP 기술은 느슨한 사질토 지반의 강도를 개선하거나, 고결물이 입자의 간극을 침투하여 메움으로 차수를 통해 연약지반을 개량할 수 있는 친환경 공법으로 인식되었다. 또한 시멘트를 근본적으로 감소시킬 수 있는 Biopolymer, 유기산 재료, 식물추출액 등을 활용한 지반개량 공법이 다양하게 연구되었다(김선태 등, 2011; 박성식 등, 2012; Chang and Cho, 2012).

MCP 기술은 순수한 사질토 지반을 대상으로 강도개선을 확인하였으나, 느슨하거나 연약한 지반에 바이오주입재를 침전시키기 위해서는 여러 번 반복해서 주입해야하는 번거로움과 현장 적용성에 대한 한계점을 가지고 있다(Dejong et al., 2006, 2010; Soon et al., 2013).

따라서 친환경 미생물 고결화 공법인 MCP 기술을 보다 효율적이고 실용적으로 현장에 적용시키고자 연약지반 처리 공법인 그라우팅공법과 MCP 기술을 접목시켜 바이오그라우팅공법을 개발하였다(김대현과 박경호, 2013; 김대현 등, 2013a; Paassen et al., 2009; Wiffin et al., 2007).

1.2.1 국내 연구동향

최근 미생물을 이용한 흙의 고결화 연구는 소수의 연구자에 의해 시도되고 있으며, 미생물 고결화 연구에 대한 관심이 점차적으로 높아지고 있다. 이러한 미생물 고결화 연구는 지반공학 분야 뿐 만 아니라 미생물학 분야, 건축공학 분야, 환경 분야 등 다방면에 걸쳐 활용되고 있다.

첫 번째로, 국내의 MCP 기술에 대한 선행연구를 살펴보면 다음과 같다.

오중신(2008)이 미생물(*Sporosarcina Pasteurii*)을 화장 풍화토에 적용하여 일축압축강도실험을 하였으나, 혼화재로 석회 3%가 첨가되어 순수한 미생물의 고결화 효과를 확인하지 못하였다.

박성식 등(2011)은 미생물(*Sporosarcina Pasteurii*)에 의해 생성된 광물질이 고결모래의 강도에 미치는 영향을 분석하기 위해서 느슨한 모래에 시멘트 3%를 섞어 3일 동안 양생시킨 후 미생물을 10회 반복 주입하는 방법으로 일축압축강도를 측정하였다. 그러나 모래 공시체의 고결을 위해 시멘트를 첨가하여 순수한 미생물의 고결화 효과를 확인하지 못하였다.

김대현 등(2010), 김호철(2011), Kim et al.(2012)은 느슨한 사질토와 실트질 지반에 순수한 미생물의 고결화 효과를 확인하였다. 무처리된 시료와 일반농도처리 시료, 고농도처리 시료를 느슨한 사질토와 실트질 시료에 최적 함수비를 설정하였고, 미생물 용액과 염화칼슘 수용액(0.75M)을 1:1 비율로 혼합 성형하여 시료를 제작하였다. 실험결과, Scanning Electron Microscope(SEM), Energy Dispersive X-ray spectroscopy(EDX)와 Mapping(시료 표면에 원소의 포함정도를 그림으로 표시) 분석을 통해 칼슘(Ca)계열의 함유가 높아짐에 따라 고결정도가 증가됨을 확인하였고, 무처리 시료와 고농도처리 시료의 고결화를 육안 상으로 비교할 수 있었다. 그러나 XRD 분석을 통해 미생물로 처리된 시료에서 탄산칼슘($CaCO_3$)의 정점(Peak point)을 확인하지 못하였다. 이는 탄산칼슘의 결정구조가 5%미만이거나, 결정성이 좋지 못하였기 때문이다.

이에 박경호와 김대현(2012)은 무처리 시료 대비 시료의 중량 25%만을 사용한 고농도처리 시료에서 XRD로 분석되지 않았던 탄산칼슘의 결정구조를 확인하였다. EDX 분석결과, 칼슘의 함량이 약 27%로 나타나 흙 입자 속에 탄산칼슘이 많이 침전됨을 확인하였고, 포켓관입시험기로 500kPa 이상의 일축압축강도를 나타내었다. 이를 통해

순수한 미생물 고결화의 메커니즘을 규명하였고, MCP 기술을 이용하여 연약지반의 고결화 가능성을 확인하였다. 그러나 수용액상태의 탄산칼슘을 이용하여 연약지반의 강도를 개선할 때 많은 양을 주입하여야 하므로 배수, 공기 건조, 상층액의 처리 곤란 등의 문제점을 확인하였다.

따라서 전상주(2013), Park et al.(2014)은 미생물의 생화학 반응으로 생성된 바이오주입재를 건설재료로 널리 이용되고 있는 시멘트와 같은 분말형태로 제작하여 사용함으로써 바이오주입재의 정량적 강도 증진효과를 확인하였다. 시멘트, 바이오주입재, 시멘트+바이오주입재(혼화재 2%, 4%, 6%, 8%의 중량비 5:5)로 느슨한 모래에 혼합하여 일축압축강도실험을 수행하였다. 실험결과, 바이오주입재, 시멘트, 바이오주입재+시멘트 공시체 모두 중량비가 증가할수록, 재령이 증가할수록 일축압축강도도 증가하였다. 중량비 2%에서 시멘트보다 바이오주입재에서 높은 강도가 나타났고, 중량비 4%~6%에서 바이오주입재보다 시멘트에서 높은 강도가 나타났다. 이는 중량비가 증가할수록 공시체 내의 시멘트 첨가량이 증가되어 시멘트의 수화작용 및 포졸란 반응을 통해 강도가 증가됨을 확인하였다.

Kim et al.(2014)는 지반조건에 따라 MCP 기술을 이용하여 모래지반 상대밀도(Relative Density, D_R) 40%, 60%, 80%, 실트지반 상대다짐도(Relative Compaction, RC) 60%, 75%, 90%, 양입도(Well-graded Sand, 이하 SW), 빈입도(Poorly-graded Sand, 이하 SP)의 풍화토 시료 각각 상대밀도(D_R) 65% 지반에 미생물 용액+염화칼슘 수용액을 1:1 비율로 혼합 성형하여 EDX 분석을 수행하였다. 실험결과, 모래지반에서 상대밀도(D_R) 60%일 때 가장 높은 칼슘함량이 나타났고, 실트지반에서 지반조건에 상관없이 비슷한 칼슘함량이 나타났다. 또한 풍화토의 SP지반에서 칼슘함량이 높은 것으로 나타났는데, 이는 간극의 크기가 MCP 기술에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

박성식과 최선규(2013)은 잠재 수경성을 지닌 고로슬래그와 알칼리 활성화제를 이용하여 모래를 고결시키는 연구를 수행하였다. 미생물 알칼리 활성화제를 혼합하여 공시체를 제작한 다음 7일 동안 기중 양생시킨 후 일축압축강도실험을 수행하였다. 실험결과, 알칼리 활성화제의 종류에 관계없이 고로슬래그의 함유량이 4%에서 16%로 증가함에 따라 건조밀도가 증가하면서 일축압축강도는 평균 178kPa에서 2,435kPa까지 증가하였다.

건축공학분야로는 김화중(2009) 등이 콘크리트 구조물의 장기 수명화를 목적으로 MCP 기술을 이용하여 콘크리트의 미세균열을 보수하는 기초연구를 수행하였다. 3일간 수증양생을 하고 절건 상태에서 모르타르에 균열을 만들어 10ml 주사기로 인공균열에

미생물 용액과 반응용액을 주입하였다. 주입 7일 후 XRD 분석을 통하여 탄산칼슘 광물을 확인하였으나, 균열의 충전과 보수 가능성에 대한 기초연구로서 공시체의 강도에 대한 문제는 언급되지 않았다.

최상민(2012)은 미생물을 혼입한 시멘트 페이스트에서 일축압축강도 증가 원인을 파악하기 위해 일축압축강도실험을 수행하였다. 실험결과, 미생물을 혼입한 시멘트 페이스트의 일축압축강도 증진은 미생물 용액에 의한 시멘트 페이스트의 수화촉진으로 나타났다.

김대현 등(2013b)은 미생물(*Sporosarcina Pasteurii*)을 이용하여 매립 지반의 초기와 장기적인 공기 단축을 이룰 수 있고, 항만건설 공사시 종래의 응집제와 침강제의 사용으로 인한 환경문제를 해결할 수 있도록 미생물을 이용한 준설토의 침강 속도 및 자중압밀 속도 향상 방법을 개발하였다. 실험결과, 미생물 용액+반응용액+실트질 시료는 물+실트질 시료에 비해 4시간 경과 후 수중에 부유물이 거의 존재하지 않았으며, 침강속도가 빠르게 나타났다. 최근 해상에서 준설되는 토사의 실트질 부유물이 환경오염을 유발하여 경제적으로 피해를 주는 문제점이 보고된 바, 바이오주입재를 통해 이러한 문제점을 해결할 수 있는 가능성을 확인하였다.

바이오주입재를 연약지반 개량공법 재료로 사용할 경우 시멘트와 같이 수화작용이 나타나지 않기 때문에 혼합 초기에 공기 건조나 발열에 의한 추가적인 조치가 필요할 것으로 나타났다. 그러나 바이오주입재에 시멘트가 첨가되면 공기건조나 발열 없이 강도가 증가되어 바이오주입재를 혼화재의 개념으로 사용할 수 있으며, 시멘트 사용량을 효율적으로 절감할 수 있는 최적의 비율을 찾아야 한다. 또한 다양한 분야에서 미생물이 사용되고 있으므로 지속적인 연구를 통하여 실용성 있는 연구로 개발되어야 한다.

두 번째로, 국내의 바이오그라우팅공법에 대한 선행연구를 살펴보면 다음과 같다.

김대현 등(2012)은 MCP 기술을 이용하여 바이오그라우팅에 미치는 영향을 분석하기 위해 4가지 시료의 조건(멸균 시료, 비멸균시료, 반응용액과 미생물 용액의 선처리 혼합시료, 반응용액과 미생물 용액의 후처리 혼합시료)으로 실험하였다.

EDX 분석결과, 선처리와 후처리의 Ca 함량의 차이는 미미하나, 바이오그라우팅은 혼합되는 즉시 반응을 일으키기 때문에 선처리 기술의 방법이 효과적인 것으로 확인되었다. 또한 멸균과 비멸균 시료의 실험결과, 비멸균 시료보다 멸균 시료에서 칼슘함량이 높았으며, 이는 흙 속에 존재하는 자연 미생물이 MCP를 일으키는 미생물과 결합하여 바이오주입재의 침전을 방해하는 것으로 나타났다.

박경호와 김대현(2013)은 미생물의 생화학 반응에 의해서 생성된 바이오주입재를 통해 느슨한 모래지반의 고결화와 주입효과를 확인하였다. (직경 D)5cm × (높이 H)10cm 공시체에 미생물 용액 2,000ml와 염화칼슘용액 2,000ml를 현장조건과 유사한 방법인 2액 1공정 주입 장치를 제작하여 주입실험을 수행하였다. 실험결과, 배수조건에서 5.4cm 정도의 고결범위와 150kPa의 고결강도가 나타났으며, 이를 통하여 바이오그라우팅의 가능성을 확인하였다.

Kim and Park(2013)은 느슨한 모래와 실트질모래(SM)시료로 제작한 공시체에 미생물 용액과 염화칼슘 수용액을 1:1 비율로 주입하여 차수효과를 확인하였다. 실험결과, 느슨한 모래에서는 무처리 시료보다 일반농도로 처리된 시료에서 약 30%의 차수효과가 나타났으며, SM시료에서는 약 35%의 차수효과가 나타났다.

2액 1공정 주입 장치를 제작하여 바이오그라우팅 주입실험을 하였으나, 공시체의 크기가 (D)5cm × (H)10cm인 기초연구로 바이오그라우팅 주입재에 대한 주입 가능성만을 확인하였다. 따라서 중형 모형토조에서 지반조건에 따라, 바이오주입재의 비율에 따라 흙의 거동을 분석하고, 기존 그라우팅공법인 약액공법 중 대표적인 LW공법과 바이오그라우팅공법의 주입실험을 통해 개략적인 현장 적용성을 분석할 필요가 있다.

1.2.2 국외 연구동향

미생물을 이용한 국외 연구는 유럽, 미국, 일본 등에서 활발히 연구가 진행되고 있으며, 현재 MCP 기술과 그라우팅공법을 접목시켜 바이오그라우팅이라는 용어가 공통적으로 사용되고 있다. 또한 유럽에서 바이오그라우팅공법의 특허가 2007년(WO 2007/069884 A1), 2008년(EP 1 978 100 A1) 등록됨으로서 바이오그라우팅 연구가 활발히 진행되고 있음을 확인하였다.

첫 번째로, 국외의 MCP 기술에 대한 선행연구에 대해 살펴보면 다음과 같다.

MCP 기술은 미생물 요소분해효소(Urease) 반응에 의해 생성된 탄산칼슘 침전(Dejong et al., 2006; Ivanov and Chu, 2008; De Muynck et al., 2010)을 말하며, 이러한 MCP 기술은 인공 시멘트 처리 방법으로서 다양한 방법으로 개발되어 왔다.

기존 그라우팅은 지반 주입시 주입재가 지하수에 침투, 용출되어 pH를 변경시키고 주입체에 독성을 가지고 있어 2차, 3차의 환경적 피해가 발생되어 왔다. 이에 MCP 기술은 지반공학에서 친환경 재료로 각광받고 있으며, 흙 속에 자연적으로 존재하는 비병원성의 미생물을 사용함으로 기존 주입재인 시멘트와 약액을 개선할 수 있는 친환경 기술로 인식되고 있다.

국외에서 미생물(*Bacillus Pasteurii*) 균을 사용하여 탄산칼슘의 침전의 물리적, 생화학 특성을 조사하였다. 일반적으로 탄산칼슘의 침전 속도는 세포의 성장과 상관관계가 있으며, pH에 따라 요소분해효소의 반응 활동이 높아지는 것을 확인하였다(Boquet et al., 1973; Ferrer et al., 1988; Rivadeneyra et al., 1991; Stocks-Fisher et al., 1999; Frederik and Willy, 2002).

Ismail et al.(2002)는 Calcite in Situ Precipitation System(CIPS)라는 방법으로 모래 입자의 표면과 간극에 탄산칼슘 결정의 침전시키는 연구를 수행하였다. 실험결과, 강도 증진 효과, 흙 입자의 간극 크기의 감소, 탄산칼슘 침전, 고결화 효과 등을 확인하였다.

Mitchell et al.(2005)은 MCP 기술에 대한 미생물의 크기와 시료의 입경크기에 따른 적용성을 분석하였으며, MCP 기술을 실험적으로 지반공학 분야에 적용한 Dejong et al.(2006)은 Ottawa 모래를 이용하여 무처리된 모래 시료, 석고 시멘트로 처리된 모래 시료, 미생물로 처리된 모래 시료에 대해 각각 입자간의 고결 정도를 확인하였다. 실험에 사용된 Ottawa 50-70 모래는 천연 상태의 모래를 사용하였고, 온도 180°C에서 24 시간 멸균되어 졌으며, 각각의 모래 시료는 상대밀도(D_R) 40%로 맞추어 실험을 수행

하였다. 실험결과, 미생물로 처리된 모래 시료에서 며칠 사이에 감지할 만한 수준의 고결정도가 발생하였고, 미생물의 성장으로 인해 입자 사이의 간극에서 고결 효과가 나타남을 확인하였다. 그러나 실험과정이 복잡하여 현장에서의 적용성에 대한 어려움이 있었다.

Liang and Ralf(2012)는 기존의 미생물 투과 방식을 표면투과 방식으로 변경하여 모래 시료에서 균일한 고결정도를 확인하였다. 탄산칼슘 침전의 최적조건을 찾게 된다면 MCP 기술의 비용을 줄일 수 있고, 대규모 적용에 더욱 용이하게 사용될 것으로 기대하였다.

Soon et al.(2013)은 미생물(*Bacillus Megaterium*) 균을 사용하여 전단강도를 개선하고 차수효과를 분석하였다. 시료는 잔류토와 모래를 사용하였으며, 상대밀도(D_R)는 85%, 90%, 95%를 사용하였고, 무처리+반응용액, 미생물, 미생물+반응용액을 사용하였다. 실험결과, MCP 기술을 통해 잔류토와 모래에서는 전단강도의 개선을 나타내었다. 잔류토에서 차수효과는 낮았으나 모래에서 높은 차수효과를 나타내었다. 이전까지의 MCP 기술을 이용한 실험은 일축압축강도를 측정된 결과를 나타내었으나, Soon et al.(2013)은 전단강도를 측정하여 시료의 강도개선을 나타내었다.

미생물의 생화학 반응을 통해 생성된 고결물인 바이오주입재는 *Bacillus* 균의 미생물에 의해 나타났으며, 이러한 미생물은 pH의 영향을 받는 것을 확인하였다. 또한 MCP 기술은 미생물 용액과 염화칼슘 수용액을 각각 주기적으로 반복주입 하는 번거로움, 상층액 처리의 문제점, 자연 상태의 흙 속에 존재하는 미생물과의 결합을 통한 고유성질의 변질, 한정된 모래지반에서의 적용성 등 현장 적용성에 대한 복합적인 문제점이 존재하는 것을 확인하였다.

두 번째로, 국외의 바이오그라우팅공법에 대한 선행연구를 살펴보면 다음과 같다.

친환경 미생물의 생화학 반응을 통해 생성된 바이오주입재를 이용하여 느슨한 지반에 혼합 성형과 치환을 통한 강도증진에 관한 연구는 계속적으로 수행되었다. 이러한 MCP 기술은 느슨한 사질토 지반의 강도를 개선하거나 바이오주입재가 입자 사이의 간극을 침투하여 차수효과를 통해 연약지반을 개량할 수 있는 친환경 기술로 개발되었다. 그러나 MCP 기술은 다양한 문제점이 있어 현장 적용성에 대한 한계를 가지고 있다.

따라서 친환경 미생물 고결화 공법인 MCP 기술을 보다 효율적이고 실용적으로 현장에 적용시키고자 연약지반 처리 공법인 그라우팅공법에 MCP 기술을 접목시켜 바이오그라우팅공법을 개발하여 현장과 유사한 조건으로 주입실험을 수행하였다(Whiffin,

2004; Whiffin et al., 2007; Paassen et al., 2009). 또한 칼슘이온이 집중되어 있는 모래 입자의 표면에 미생물을 주입하여 바이오주입재가 입자 사이의 간극에 침전되어 고정되는 연구를 수행하였다(Scholl et al., 1990; Torkzaban et al., 2008).

Harkes et al.(2010)은 흙 입자 사이의 간극에 미생물의 흡착과 고정을 위해서는 느린 유속으로 미생물 용액과 반응용액의 적절한 상호 혼합을 가능하게 할 필요가 있음을 확인하였다.

대표적인 바이오그라우팅의 공법을 적용한 선행연구를 살펴보면 다음과 같다. Whiffin(2004)은 Itterbeck sand(흙 입경가적곡선의 60%와 10%에 해당하는 입경비 = $D_{60}/D_{10} = 1.64$)를 사용하여 PVC 원기둥[(지름 D) 66mm, (길이 L) 5m]을 수직으로 고정시키고, 원기둥 속에 모래를 동일한 상대밀도(D_R)로 채워 간극의 체적을 6L로 공시체를 제작하였다. 6L의 미생물 용액을 주입 후 모래기둥 전체에 걸쳐 미생물을 고정시키기 위해 염화칼슘 수용액(0.05M) 6L를 주입하였다. 그리고 1M Urea와 9L의 염화칼슘 수용액을 요소분해효소 반응이 멈출 때까지 반복 주입하였다. 그 후 모래 기둥을 24시간 동안 요소분해효소가 반응하도록 방치하였고, 탁도계를 사용하여 배출 용액의 농도를 측정하였다. 미생물 용액과 염화칼슘 수용액 모두 낮은 압력(약 7m/day)으로 길이 5m에 걸쳐 막힘없이 주입하였다.

실험결과, 비파괴 시험인 초음파 속도로 강도 변형식을 사용하여 $100\text{kg}/\text{cm}^2$ 정도의 일축압축강도의 값을 얻었으나, 이는 정량적인 분석이 아닌 추정에 의한 일축압축강도로 신뢰성은 높지 않았다. 또한 미생물 용액과 염화칼슘 수용액을 주기적으로 주입한 결과, 탄산칼슘의 침전이 5m 모래기둥 전반에 걸쳐서 생성되었으나, 주입구 부분에서 많은 침전이 이루어 졌고, 주입구와 멀어질수록 탄산칼슘 침전량은 비례적으로 감소하였다. 이를 통해 탄산칼슘의 침전은 미생물 용액과 염화칼슘 수용액 혼합 후 탄산칼슘 침전이 일어남을 확인하였고, 탄산칼슘 침전양에 따라 강도의 효과가 나타났다.

Paassen et al.(2009)은 현장 적용성을 검토하고자 (폭 B)0.9m × (길이 L)1.1m × (높이 H)1m의 컨테이너 박스에 동일한 상대밀도(D_R)의 모래를 채워 실험을 수행하였다. 컨테이너 박스의 안쪽 옆면에는 배수거름 장치를 설치하고, 밑면에는 배수장치를 만들어 Mass river sand($D_{60}/D_{10} = 1.6$)와 Itterbeck sand($D_{60}/D_{10} = 1.64$)에 대하여 주입실험을 수행하였다.

Mass river sand는 컨테이너 박스의 안에 동일한 상대밀도(D_R)를 유지하기 위해 지게차를 사용하여 동일한 높이에서 자연 낙하로 시료를 채웠다. 그리고 100L 미생물 용액과 염화칼슘 수용액(0.5M)을 박스 중앙에서 옆면을 따라 50L/hr의 일정한 주입압력

으로 주입하였다. 50일 동안 3,500L의 반응용액은 8번에 걸쳐 주입하였으며, 약 12%의 효율로 200M의 탄산칼슘($20\text{kg}/\text{m}^3$)이 침전되었다. 실험결과, 탄산칼슘은 바닥면의 모서리 부분과 옆면을 따라 침전됨을 확인하였다.

Itterbeck sand도 Mass river sand와 마찬가지로 동일한 상대밀도(D_R)를 맞추기 위하여 지게차를 사용하여 동일한 높이에서 자연 낙하로 시료를 채웠다. 주입량을 점차적으로 증가시켜 40일 동안에 4,000L의 염화칼슘 수용액을 16번에 걸쳐 주입하였으며, 50%의 효율로 1,000M의 탄산칼슘($100\text{kg}/\text{m}^3$)이 침전됨을 확인하였다.

실험결과, 수동콘관입시험(Manual cone penetration test)를 통하여 표면에서 5,000kPa 보다 높은 강도를 나타냈고, 탄산칼슘의 정량화를 통해 탄산칼슘의 양에 따라 강도 증진효과를 확인하였다. 그러나 강도의 증가는 바이오주입재가 침투되는 겉 표면에서만 강도가 증가되었고, 침투가 되지 않은 중앙에서는 강도의 증가가 미미한 결과를 나타내었다.

앞서 수행한 바이오그라우팅 연구를 통해 주입기술이 상당히 중요한 요인임을 확인하였고, 느슨한 모래지반에서 강도 증진효과를 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 LW 공법과 같이 유사하게 주입될 수 있도록 공기 압축기(Air compressor)를 이용하여 150kPa의 주입압을 가하였고, A액, B액을 만들어 2액 1공정으로 주입되도록 그라우팅 장비를 제작하였다. 또한 주입노즐을 제작하여 모형토조 중앙에서 미생물 용액과 염화칼슘 수용액을 주입하여 주입재의 고결범위를 확인하였다. 그리고 다양한 지반조건에서 기존에 사용되는 LW공법과 바이오그라우팅공법의 고결강도와 고결범위의 비교를 통해 바이오그라우팅의 공법에 따른 적용성을 평가하였다.

1.3 연구방법 및 범위

국내에서는 공사비 절감과 국토의 효율적인 이용을 위해 연약지반과 해안 준설 매립지반을 기초지반으로 활용한 공사현장이 증가하고 있는 추세인데, 이러한 연약지반과 준설 매립지반은 초기 지지력이 낮고, 함수비가 높아 기초지반으로 사용하는데 많은 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 대책공법들이 개발되어 현장에 적용되고 있으나, 단순히 지반을 개량하는 데에만 중점을 두고 있어 환경문제를 개선하는데 대한 많은 한계가 있다(박경호, 2011). 그러나 바이오그라우팅공법은 친환경 미생물을 반응을 통해 바이오주입재를 생성시켜 입자 사이의 간극을 채움으로서 환경적 피해 없이 강도의 개선과 차수효과를 나타낼 수 있다(전상주, 2013).

본 연구에서는 MCP 기술을 이용하여 연약지반인 느슨한 사질토 지반에 바이오주입재를 분말형태로 제작하였다. 혼합 성형하는 방법으로 공시체를 제작하였으며, 일축압축강도에 대한 강도 증진효과를 분석하였다. 무처리, 바이오주입재, 시멘트, 바이오주입재+시멘트의 비(혼화재 4%, 8%의 중량비 1:9, 3:7, 5:5)의 공시체를 7일과 28일로 제작하였다. 또한 공시체 중량 대비 세립분의 함유량을 0%, 5%, 15%로 혼합하여 동일한 다짐방법을 통해 공시체의 시간경과에 따른 일축압축강도를 분석하였다. 이는 토목현장에서 다루는 대부분의 흙이 입자 크기가 균등하지 않고 크고, 작은 입자가 서로 섞여 있어 실트와 같은 세립분이 일정 이상 포함된 경우가 많기 때문이다(박병기와 이광찬, 1999; 박승균, 2010). 또한 현장지반은 대부분 느슨하게 고결된 상태로 존재하므로 고결된 지반 내의 실트나 점토와 같은 세립분이 현장 지반의 강도에 미치는 영향에 대한 정확한 평가가 선행되어야 할 필요성이 있기 때문에 세립분을 추가하여 현장 조건과 유사한 지반을 구성하였다(박성식 등, 2010).

시멘트나 화학적인 약액을 주로 사용하고 있는 LW공법(OPC, Micro시멘트+규산소다 3호)과 화학적 약액을 사용하지 않는 바이오그라우팅공법(바이오주입재+규산소다 3호, OPC, Micro시멘트+바이오주입재)의 주입실험결과를 비교하여 현장 적용성을 평가하였다. 또한 호모겔 공시체 시료를 (D)5cm × (H)10cm로 제작하여 일축압축강도를 측정하였다. 마지막으로 환경성 평가를 수행하기 위해 어독성 실험과 주입실험 후 주입재에 따른 토양오염분석을 수행하였다.

따라서 본 연구의 방법 및 범위를 요약하면 다음과 같다.

- 1) MCP 기술을 이용하여 바이오주입재를 분말 형태로 제작하였다. 무처리, 바이오주입재, 시멘트, 바이오주입재+시멘트의 비(1:9, 3:7, 5:5)의 공시체에 따른 세립분 0%, 5%, 15%를 혼합하여 7일과 28일 샌드겔 공시체를 제작 후 일축압축실험을 통해 바이오주입재의 연약지반 강도 증진효과를 평가하였다. 또한 주입재에 따라 주입실험을 수행하여 차수효과를 평가하고, 기존 주입재 대비 바이오주입재에 대한 경제성을 분석하였다.
- 2) 지반조건(SW, SP; 상대다짐도(RC) 70%, 80%, 85%, 90%, 95%)에 따라 2억 1공정 주입장비로 주입실험을 수행하였으며, 주입률, 고결범위, 고결강도를 평가하여 바이오그라우팅이 적용 가능한 지반조건을 제시하고 실용성을 평가하였다.
- 3) 그라우팅에 사용되는 주입재의 혼합(OPC, Micro시멘트, 바이오주입재, 규산소다 3호)을 통해 호모겔 공시체를 제작하였고, 기존 LW 주입재와 바이오주입재의 일축압축강도를 분석하였다.
- 4) 시멘트나 화학적인 약액을 주로 사용하고 있는 LW공법과 화학적 약액인 규산소다 3호를 사용하지 않은 바이오그라우팅공법을 수행하였으며, 비파괴 전단탄성계수 측정할 수 있는 벤더엘리먼트를 이용하여 시간경과에 따라 전단탄성계수를 분석함으로써 주입재에 따른 현장 적용성을 분석하였다.
- 5) 환경성 평가를 위해 어독성 실험과 주입실험 후 주입재에 따른 토양오염분석을 통해 수질오염과 토양오염에 미치는 환경적 영향을 분석하였다.

제 2 장 그라우팅공법

2.1 그라우팅공법 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 3가지로 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 그라우팅공법 종류

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.

(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 A액, 외관에서는 B액을 압송하여 주입관 선단에서 합류시키는 방식이다.

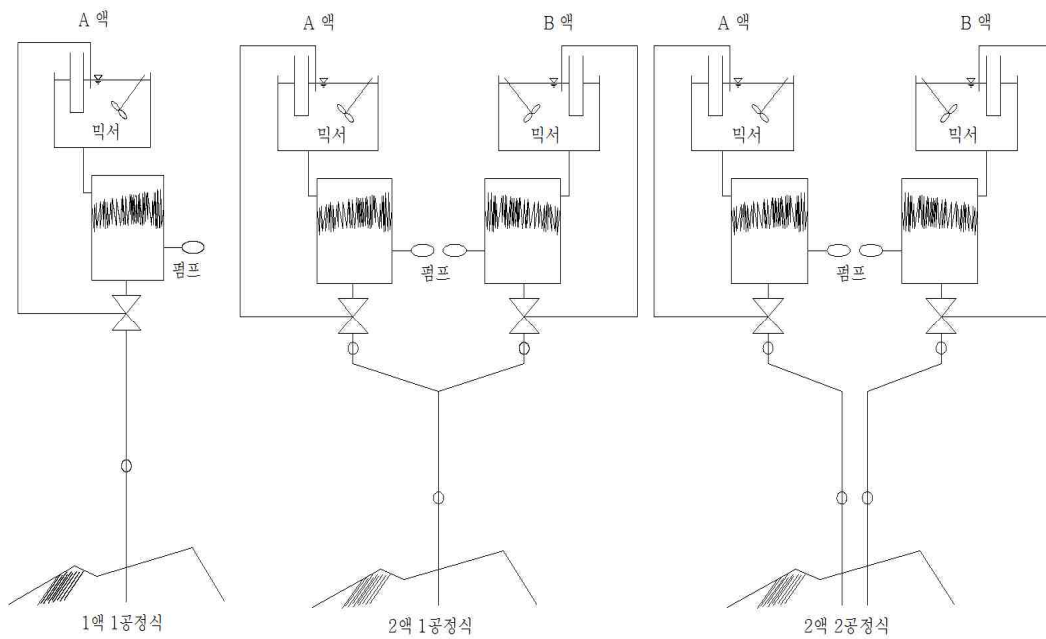


그림 2.1 혼합공정에 의한 그라우팅 방식 분류(권지연, 2012)

2.1.2 주입재 분류

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

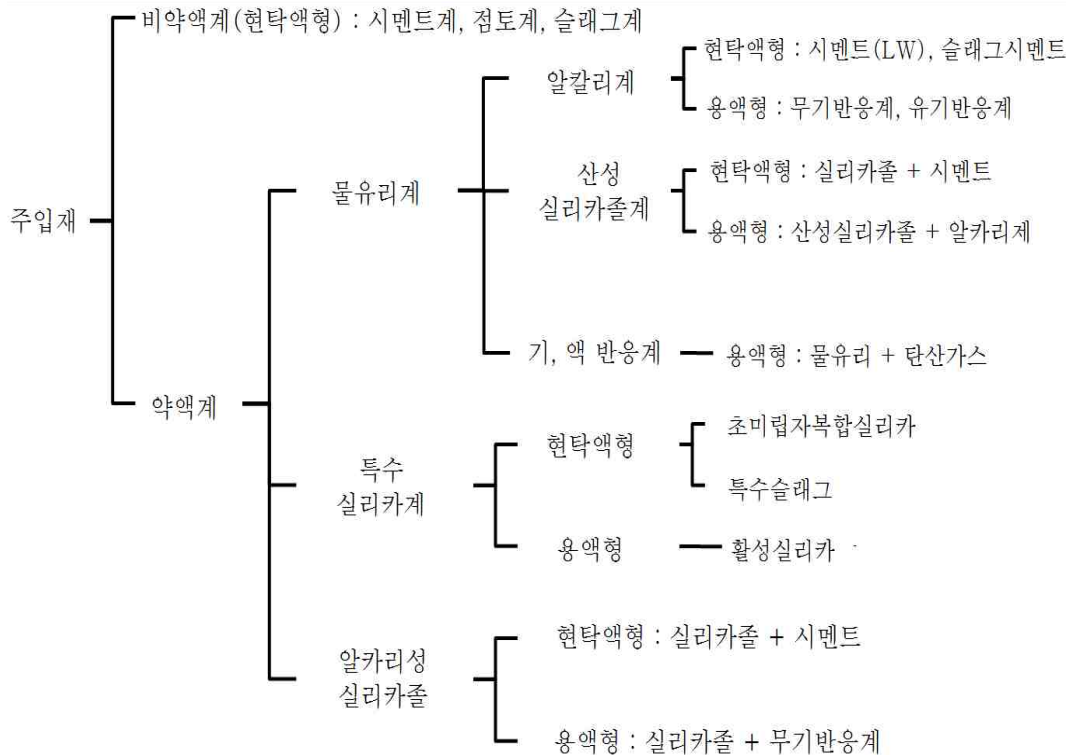


그림 2.2 주입재 분류(한국지반공학회, 2005)

(1) 현탁액형(알칼리 약액) 주입재

현탁액형(알칼리 약액) 주입재는 물유리계에 시멘트나 벤토나이트를 가하여 고결시킨 것으로 LW공법이 대표적 예이다. 입자가 액체 중에 분산되어 현탁액 상태로 있는 주입재를 말하며, 시멘트나 벤토나이트 등을 사용하는 주입재가 대표적이다. 초미립자시멘트 주입재도 현탁액형 주입재에 속하며, 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 영향

을 받는다. 현탁액형 주입재의 특징은 용액형 주입재와 비교해서 침투성이 떨어지는 단점이 있는 반면, 공해가 없고 내구성이 크며 경제성이 좋은 장점이 있다.

(2) 용액형 주입재

주입재 중 어느 부분에서나 균질한 상태를 유지하며 입자를 포함하지 않은 약액을 용액형 주입재라고 한다. 용액형 주입재의 특성은 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.

2.1.3 그라우팅공법 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 첨가재 등을 혼합하여 극복할 수 있다.

(2) 물-시멘트비가 큰 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 내내 침투되어 있는 물이나 포화도, 균열면의 폭과 길이, 암반의 강성 등에 따라 그 기능이 제한 될 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.

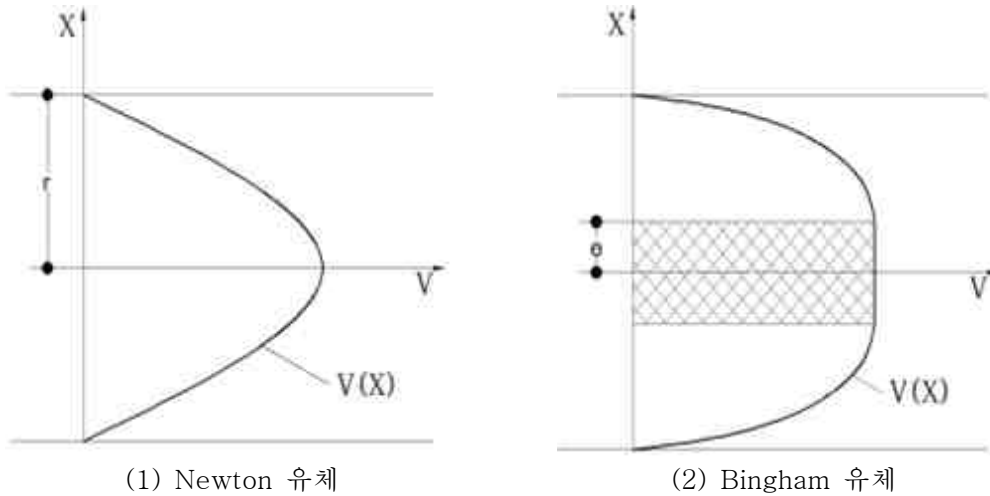


그림 2.3 균열 내에서의 그라우팅 슬러리 속도비교(Deere, 1982)

(4) 그라우팅 슬러리의 유동성

현탁액형의 주입재는 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).

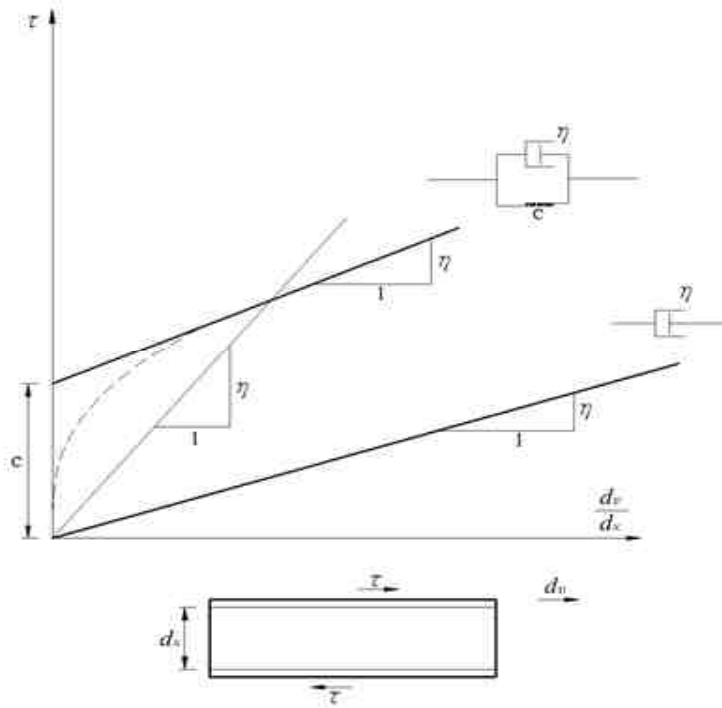


그림 2.4 그라우팅 슬러리와 물에 따른 유동학적 해석 모델 : (1) Newton 유체, (2) Bingham 모델(Deere, 1982)

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

Bingham모델의 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.

$$\tau = \eta \frac{d_v}{d_x} \tag{2.1}$$

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

여기서, η = 동적 유동계수(dynamic viscosity)

η_B = 소성 유동계수(plastic 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 흠입자의 여과작용에 의해 흠입자 사이의 점점 부근에 정착하여 다시 흠입자 표면을 물유리 층이 덮게 된다.

처음에는 약액이 간극을 통과해서 침투범위를 넓혀 가지만 어떤 시점에서는 간극이 막히고 주입약이 지반에 침투하지 못하게 되면 주입이 완료된다. 이와 같이 흠입자의 점점을 중심으로 흠입자 표면을 덮은 규산겔은 1차 결합 또는 2차 결합으로 견고한 규산층으로 되어 흠입자 점점을 견고하게 고정하고, 연속된 막에 의해 흠입자를 연결한다.

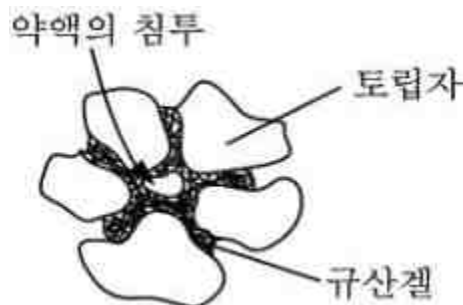


그림 2.5 흠입자 간극에서 약액의 침투와 규산겔에 의한 고결 모형도(한국지반공학회, 2005)

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

점토분이 많아짐에 따라 약액의 입자간 침투는 충분하지 않아 전체의 균질한 고결효과는 감소한다. 이와 같은 흠입자와 약액의 상호작용에 의해 약액주입 전 모래의 전단강도가 입자 상호간의 접촉이나 맞물림에 의한 마찰로 생긴 요소가 주된 것이었다. 그러나 약액주입 후 모래의 전단강도는 이 마찰로 인한 요소 이외에 규산층 흠입자간의 고결로 인한 정착력의 요소가 추가됨을 확인하였다.

(2) 침투에 관한 이론식

주입에 있어서 침투이론식은 약액의 고결시간, 점성, 주입압력, 주입속도, 주입시간, 주입공의 유효경, 주입방식, 지반의 투수계수, 간극률, 간극경 등과 상관관계가 있다. 또한 실제 지반의 불균질성, 지하수의 유동, 주입재 점도의 경시변화, 고결되면서 수반되는 약액의 복잡한 침투와 관련이 있다. 따라서 약액의 침투를 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 층류로서 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(cm^3/s)

n = 간극률

ν = 용액의 동점성계수

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} = 흙 입자의 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} = 흙 입자 입경가적곡선의 15% 입경

G_{85} = 주입재 입경가적곡선의 85% 입경

표 2.1 주입재의 종류별 G_{85} 와 G_{95} 의 값

주입재의 종류 \ 주입재의 입경	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} = 주입재 입경가적곡선의 85% 입경

** G_{95} = 주입재 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 무리 없이 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 켈타임이 긴 배합

의 경우에는 투수계수가 10^{-4} cm/s 정도의 지반에 까지 침투 가능범위가 확대된다.

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

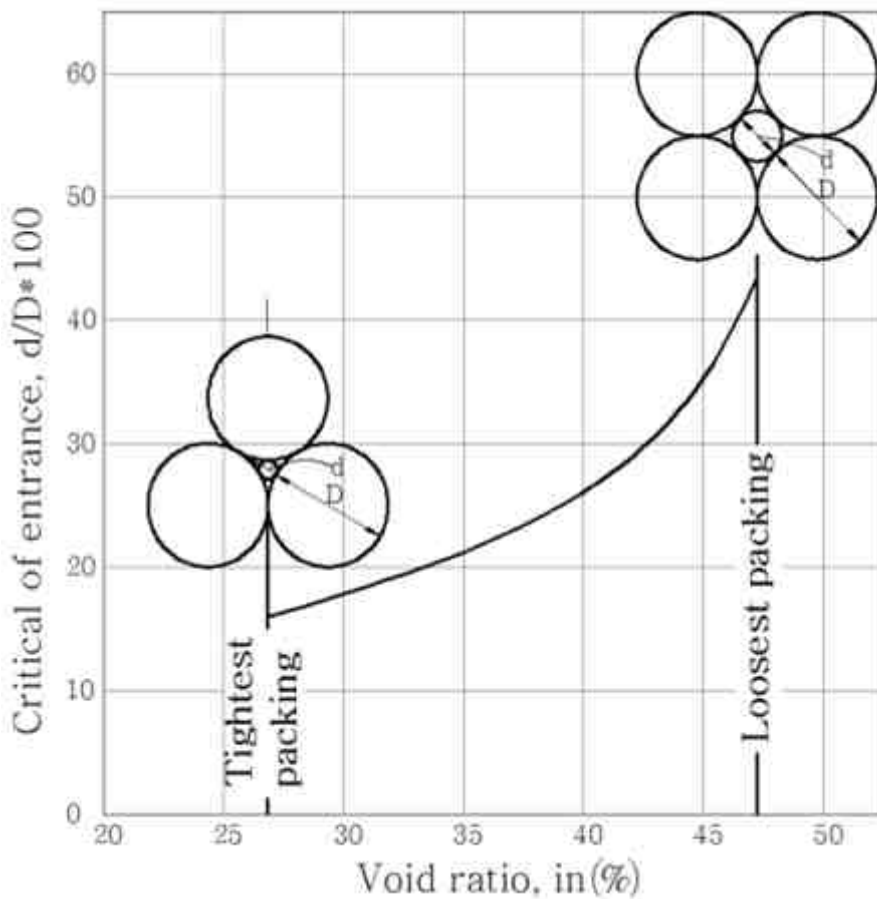


그림 2.6 $d/D(\%)$ 와 간극률 n 과의 관계(King and Bush, 1961)

2.2 그라우팅공법 설계

2.2.1 주입재 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 주입재로 사용되기도 한다. 이 종류의 시멘트 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 주입에 이용된다. 제 5종은 황산염이 많은 토사나 지하수가 있을 때 이용되며 강력한 내황산염 주입재이다. 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, 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
응결 시간	길모어 시험	초결(분)	3600이상	3600이상	3600이상	3600이상	3600이상
		종결(분)	600이하	600이하	600이하	600이하	600이하
	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		-	-	130이하	-	-
	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) 초미립자시멘트

일반적으로 주입 대상 지반에 대한 침투성은 주입재의 입자가 작을수록 좋아지므로 최근 현탁형 주입재의 주입성 개선을 목표로 시멘트 입자의 미립화에 많은 연구가 진행되고 있다(김진춘, 1999). 이 시멘트는 OPC에 비하여 입자가 작은 초미립자시멘트(Micro시멘트)로 물리적 성질은 OPC와 동일하며 독성과 냄새가 없다. 또한 C3A가 적고 강도발현이 크고 염화물과 황산염에 대한 화학적 저항성이 우수하므로 해수침투 지역, 온천지역, 쓰레기 매립장 등의 염화물 발생지역, 해안의 방조제 그라우팅 공사에 활용이 가능하다. 표 2.3은 주입재의 화학성분이다.

표 2.3 주입재 화학성분(건설교통부, 2003)

구분	Micro시멘트(%)	OPC(%)
SiO_2	28.5	20.3
$Al_2O_3 + Fe_2O_3$	66.8	69.5

표 2.4는 주입재의 일반적인 입도분포 비교이다. OPC의 경우 최대입경이 $100\mu m$, 평균 입경이 $17\mu m$ 인데 비해 Micro시멘트의 경우 최대입경이 $24\mu m$, 평균 입경이 $4.2\mu m$ 이다.

표 2.4 주입재 입도분포(김진춘, 1999)

주입재의 종류 입경크기(μm)	Micro시멘트(%)	OPC(%)
1	10.1	4.7
1.5	13.4	5.6
2	19.2	8.3
3	30.1	11.3
4	48.3	16.1
6	79.6	21.7
8	87.3	28.4
12	98.4	36.7
16	99.8	48.0
24	100.0	62.2
32		77.9
48		93.7
64		97.2

표 2.5는 주입재의 물리적 성질을 비교한 것이다. 강도의 특성은 초미립자시멘트의 경우 OPC에 비해 장기 강도뿐만 아니라 초기 강도도 상대적으로 우수한 특성을 보인다. 이러한 특성은 주입성과 강도를 증가시켜 내구성을 향상시키는 주입공사에 적합하다.

표 2.5 주입재 물리적 성질(건설교통부, 2003)

		KS 규정값	Micro시멘트	OPC
비중		-	2.94	3.15
분말도(cm^2/g)		2,800이상	8,150	3,250
비카시험	w/c(%)	-	30.5	28.7
	초결(분)	60이상	205	170
	종결(분)	600이하	485	450
압축강도	w/c(%)	-	50.7	48.5
	1일(kg/cm^2)	-	162	61
	3일(kg/cm^2)	130이상	356	202
	7일(kg/cm^2)	200이상	535	264
	28일(kg/cm^2)	290이상	689	450

(4) 물유리계

물유리는 산화소다(Na_2O)와 이산화규소(SiO_2)가 여러 가지 비율로서 결합한 것으로 화학식으로는 규산소다, 분자식으로는 $Na_2O \cdot nSiO_2$ 로 나타낸다. 물유리는 무기재료로서 많은 특성을 지니고 있어 다방면의 용도를 갖는 소재이다.

Na_2O 와 SiO_2 몰비(M)는 0.5~4의 범위의 것이 공업적으로 생산되고 있으며, n이 1 이하의 것은 결정성 규산소다라고 부르고, n이 1이상인 것은 비결정의 구조가 되어 액상으로 통상 규산소다라고 부른다.

규산소다는 몰비(M)에 의해 1호, 2호, 3호, 4호가 있으며, 일반적으로 약액주입에 사용되는 것은 3호 물유리로 특수한 경우에 2호, 4호가 사용될 때가 있다. 표 2.6은 규산소다의 종류를 나타낸 표이다.

표 2.6 규산소다 종류

종 류	화 학 명	분 자 식	몰비(M)
규산소다 1호	DiSodium DiSilicate	$Na_2O \cdot 2SiO_2$	2.0
규산소다 2호	TeraSodium PentaSilicate	$2Na_2O \cdot 5SiO_2$	2.5
규산소다 3호	DiSodium TriSilicate	$Na_2O \cdot 3SiO_2$	3.0
규산소다 4호	Disodium TeraSilicate	$Na_2O \cdot 4SiO_2$	4.0

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).

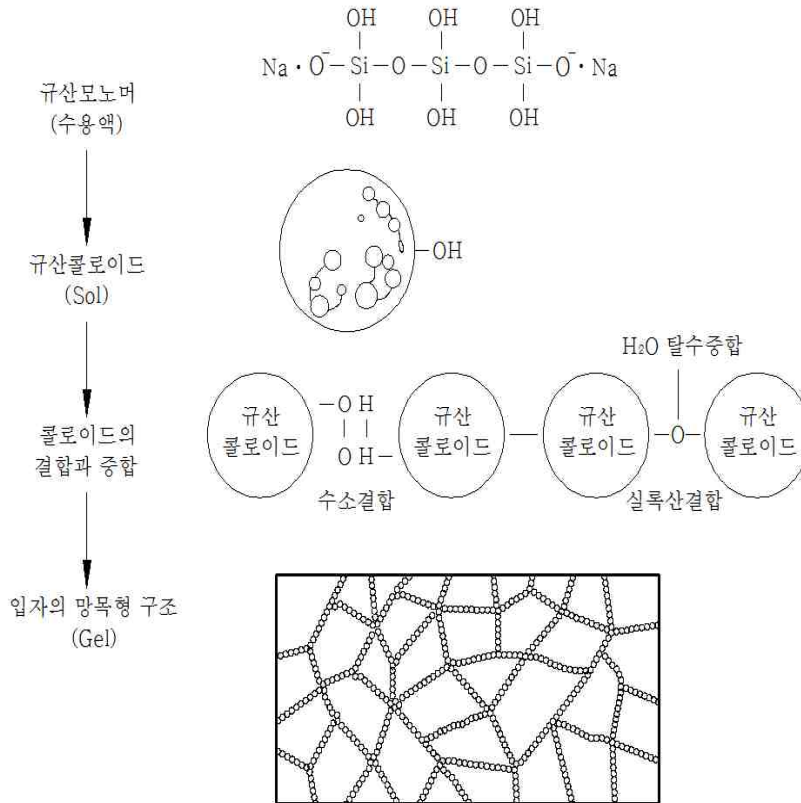


그림 2.7 물유리 겔화 과정(Iler, 1979)

규산입자의 등전점(입자의 전하가 0이 될 때의 pH값)은 약알칼리성 부근에 있으며, 알칼리 용액에 있어서는 수산화이온(OH^-)이온을 흡착해서 음전하를 띠고 있다. 따라서 pH가 높을수록 전기적 반발력이 크고 응집되기 어려우며, 반대로 산을 더하여 pH가 저하됨에 따라 전기적으로 중화되어 반발력이 적게 되어 응집되기가 쉽다. 이것이 물유리에 산을 더한 경우의 겔화의 원리이며, 물유리에 각종 염류를 더해도 응집된다.

2.2.2 그라우팅공법 선정

그라우팅공법의 선정은 지반개량을 할 필요가 있는 개소에 대해서 사전에 토질, 지하수, 지하 매설물, 우물, 공공용수역 등의 조사를 하고, 그라우팅공법에 의하는 것이 공사현장의 보안, 지하 매설물의 보호, 주변 가옥의 보전, 지하수위 저하방지 등의 관점에서 적당하다고 판단되는 경우에 산정한다. 대상 지반이 연약 점성토층이나 고유기질의 경우 그라우팅공법의 선정에 있어 특히 신중하게 검토할 필요가 있다. 약액 그라우팅의 종류는 표 2.7과 같다.

표 2.7 그라우팅 룯드 구성에 의한 약액 그라우팅 종류(양형철 등, 2012)

그라우팅공법	룯드 구성	그라우팅 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

그라우팅공법의 선정이 결정되었다면 그라우팅 목적을 명확하게 한 후에 지반조건, 시공조건, 주변 환경 조건 등의 기초자료에 의하여 합리적, 경제적인 개량범위, 그라우팅 방식, 그라우팅량, 로드의 설치 형태, 그라우팅공의 배치 등을 결정한다.

그라우팅의 목적은 차수와 지반보강, 공동충전의 3가지로 크게 구별한다. 그라우팅 설계는 지반공학적 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 실적을 기준으로 이루어지는 것이 대부분이고, 지반공학적 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 2.8은 목적별 그라우팅의 분류이다.

표 2.8 목적별 그라우팅 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	선행그라우팅과 같이 침투성을 갖는 약액	
특수지반		(산성, 알칼리성 지반) 사전에 검토하여 그라우팅을 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 그라우팅량(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 2.9와 같다.

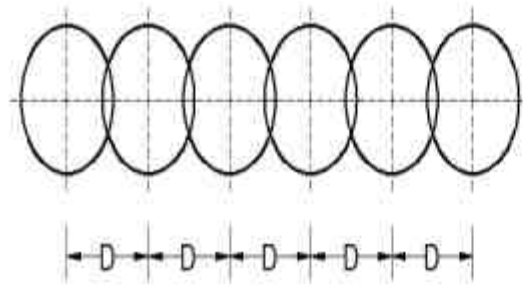
표 2.9 토질에 의한 그라우팅의 충진율, 그라우팅률의 참고치(양형철 등, 2012)

토질	항목	N	투수 계수 (cm/s)	간극률 n(%)	그라우팅 종 별	충진율 (%)		그라우팅률(%)		비고
						보강	차수	보강	차수	
자갈 모래	무름	4~10	10^1	40~50	현탁액계	95	100	43~48	45~50	$\alpha(1+\beta)$ = 충진율 $n\alpha(1+\beta)$ = 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	
사질 토	무름	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		
점성 토	무름	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		

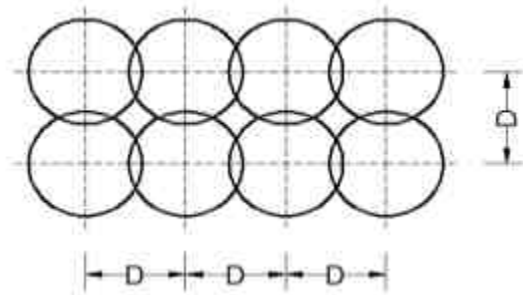
- <주> 1. 토질조사 결과 N치, 투수계수 간극률이 표와 다를 때는 간극률을 우선한다.
 2. 간극률이 분명하지 않을 때는 N치로 추정한다.
 3. 손실계수 β 는 0.1로 한 값이다.
 4. 그라우팅목적의 중요도로 충진율을 고려한다.

2.2.4 그라우팅공 배치

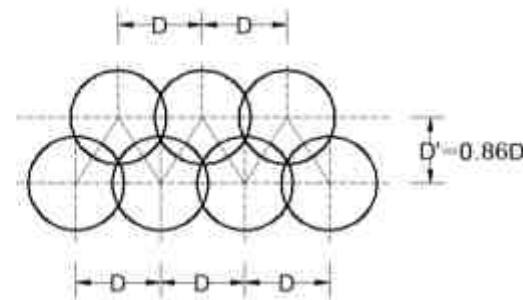
그라우팅공의 배치는 그림 2.8에 나타내는 바와 같이 단열식과 복렬식으로 나누어진 다. 경사 시공의 경우 그라우팅공 침단에서 표준 간격을 유지하도록 설계하고, 수평 시공의 경우 토층을 따라 수평방향으로 침투하기 쉬운 것에서 상하방향의 그라우팅공 간격을 조밀하게 한다.



(a) 단열배치



(b) 복렬 정사각형 배치



(c) 복렬 정삼각형 배치

그림 2.8 그라우팅공 배치(양형철 등, 2012)

토질별 그라우팅 간격을 결정하기 위해서는 표 2.10과 같이 토질별 그라우팅의 간격을 생각하는 것이 필요하다.

표 2.10 토질별 그라우팅 간격(양형철 등, 2012)

토질 \ 항목	주입목적		약액
	지수(m)	보강(m)	
점성토	-	1.0~2.0	현탁형
모래	0.6~1.0	0.8~1.2	용액형
모래·자갈	0.8~1.2	1.0~1.5	현탁형, 용액형

2.2.5 그라우팅공법 현장시공 모습

다음 그라우팅은 LW공법으로 00저수지 수리시설 개보수공사중 그라우팅 공사의 모습을 그림 2.9와 같이 나타내었다. LW공법은 지반을 천공하여 주입관을 설치한 상태에서 주입펌프와 연결하여 약액 혼합액을 압송하고, 주입관 선단부로 주입재를 분출시켜 토사층 간극에 주입재를 침투시키는 공법이다.

그림 2.9(a)는 시멘트를 혼합하는 모습이다. 장비 설치작업은 효율적으로 진행될 수 있도록 주입장소의 중앙부에 설치하는 것이 바람직하고, 그림 2.9(b)는 비트 및 케이싱을 사용하여 소정의 계획심도까지 천공하는 모습이다. 천공작업과 주입작업은 별도작업으로 천공작업에 진행에 따라 바로 주입작업이 진행된다. 그림 2.9(c)는 본 연구에서 사용하고자 하는 2액 1공정을 통한 주입 모습이다. 주입은 선단부터 계획 주입량을 선정하고 주입하여 주위지반을 압밀시킨다. 일반적으로 LW공법은 500kPa~1,000kPa로 주입하고 유효개량 폭은 약 0.6m, 개량경은 약 1m까지 개량이 가능한 공법이다. 그림 2.9(d)는 복렬 정삼각형 모습으로 주입이 완료된 모습이다.

LW공법의 장점으로는 협소한 공간에서 작업이 가능하고 시공 장비가 간단하여 차수효과가 양호하다. 그러나 단점으로는 시공 후 효과 확인이 불확실하고 내구성에 대한 주입재의 검증이 요구되어지며, 개량체의 강성이 작은 것과 주입재의 용탈 등에 의한 환경적 제한 사항이 따르는 문제가 있다.



(a) 시멘트 혼합



(b) 천공 장비

그림 2.9 그라우팅 현장시공 전경



(c) 2역 1공정을 이용한 주입 모습



(d) 복렬 정삼각형 배치 주입 완료 후 모습

그림 2.9 그라우팅 현장시공 전경(계속)

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 2.10은 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 중합된 젤로 채움으로서 흙의 강도가 증가 되었으며, 이러한 강도 증가는 흙의 안정성을 증가

시킴과 동시에 침하로 인한 붕괴 가능성을 줄이고, 흠 입자를 고정시키는 결과를 가져온다.

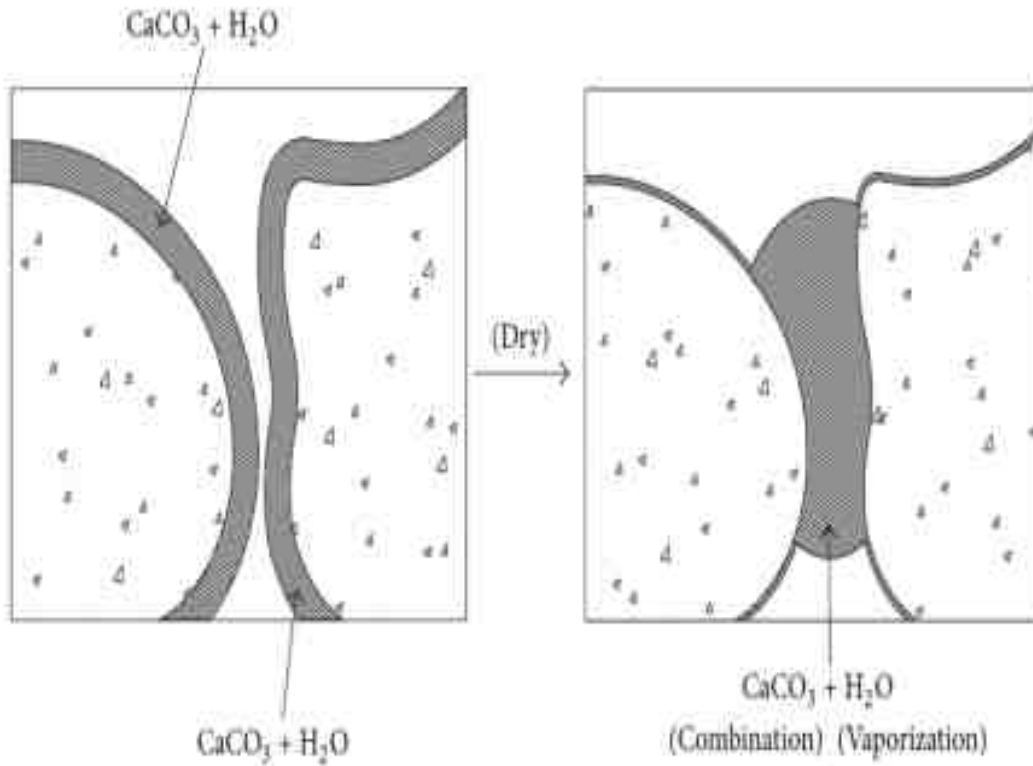


그림 2.10 흠 입자 간극 사이의 바이오주입재 모식도(Park et al., 2014)

2.3.2 미생물 고결화 영향인자

(1) 미생물의 성장 조건 고려

pH는 미생물 성장에 매우 중요한 요인이다. 바이오주입제 결정 침전이 증가하는 비율은 pH 9이상에서 발생된다(Stock-Fischer et. al., 1999). 본 연구에서 사용한 미생물 용액의 pH는 8.5로 나타났다. 또한 미생물의 성장은 수분의 함량과 온도의 영향도 받는다. 미생물의 호흡속도는 실질적으로 생성되는 바이오주입제의 양을 증가시켜주는 역할을 하며, 본 연구에서 사용된 미생물의 최적 온도는 30°C이다.

(2) 흙 입자의 크기와 미생물 크기의 상관관계

흙 입자의 크기와 간극비는 미생물의 반응이 실질적으로 이루어 질 수 있는 조건으로 미생물 성장에 중요한 요인이다. 통일분류법을 기준으로 흙을 분류하면 자갈의 경우 4.75mm 이상의 입자, 모래의 경우 0.075mm~4.75mm 미만의 입자, 실트의 경우 0.002mm~0.075mm 미만의 입자, 점토의 경우 0.002mm 미만의 입자들로 분류된다.

미생물 초기의 크기는 0.0001mm~0.0003mm 정도이며, 실험에 사용된 미생물은 투입당시 흙 사이의 간극을 자유롭게 통과할 수 있으나, 칼슘이온(Ca^{2+})의 영향을 받아 바이오주입제의 침전이 일어날 경우 바이오주입제와 흡착하여 결과적으로 약 20배 정도 커진 0.002mm~0.006mm의 크기의 알갱이가 된다(Mitchell et al., 2005). 이에 미생물 반응을 통해 생성된 바이오주입제가 주입될 수 있는 간극이 확보 되어야 주입이 가능함을 확인하였다. 그림 2.11은 미생물의 크기와 흙의 크기 등을 비교하여 적용할 수 있는 범위를 확인하였다.

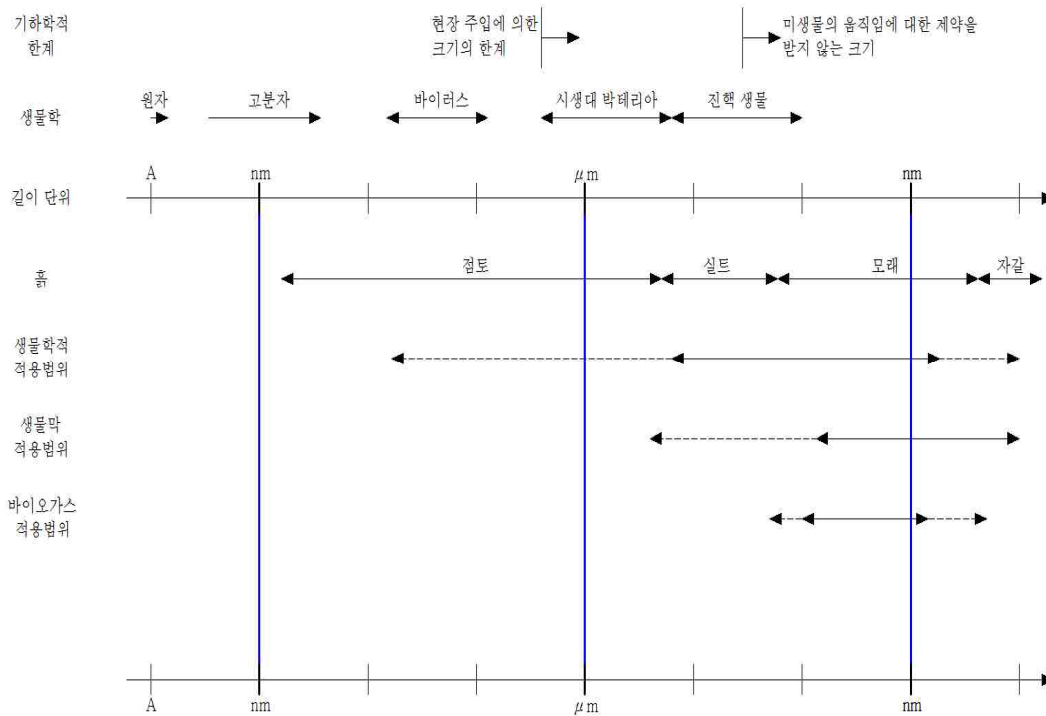


그림 2.11 미생물 크기에 따른 박테리아 종류

(3) 요소(Urea)의 함량에 따른 미생물 성장곡선

본 연구에서 사용된 미생물(*Bacillus Pasteurii*)의 활성화를 알아보기 위하여 미생물의 성장곡선을 측정하여 늦은 성장기의 시간을 파악하였고, 배양액 요소의 조건을 변경하여 그림 2.12와 같이 성장곡선 그래프를 작성하였다.

미생물은 30시간이 넘을 때까지 사생기를 거치지 않고, 1일간의 지속기간을 확인한다. 요소 2%의 경우 가장 높은 활성화를 보였으며, 24시간이 경과하고 나서 1%이상의 요소에서 만이 미생물이 증가하는 것을 확인하였다. 마지막으로 계대배양 후 약 10시간~12시간 경과할 때 미생물의 최대 활성화 기간인 늦은 성장기 시간대로 나타났다.

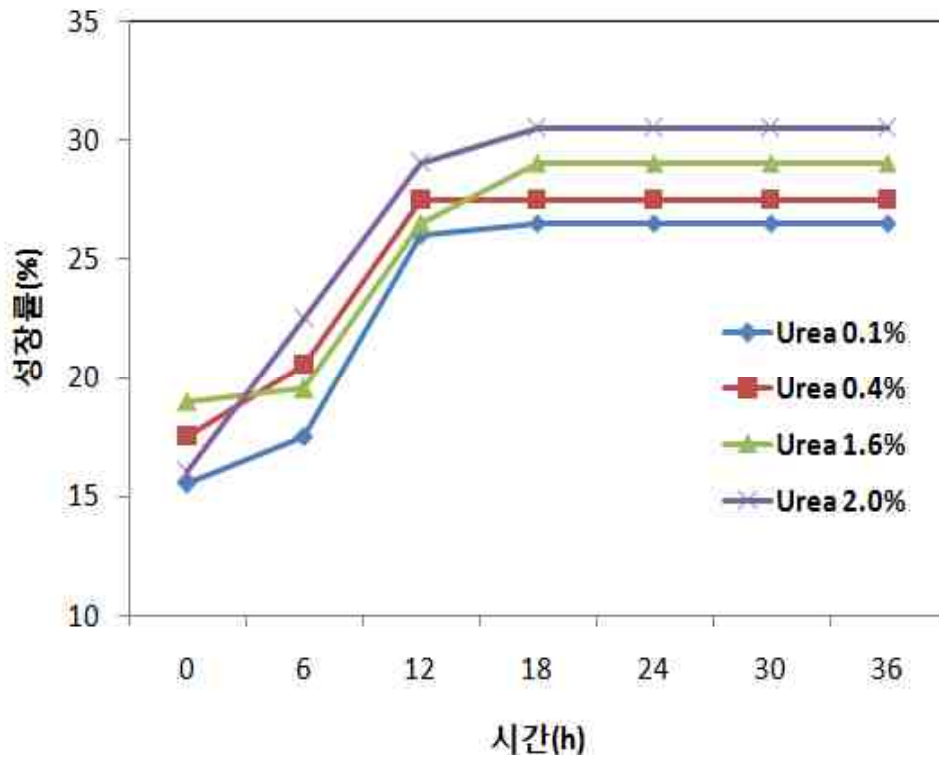


그림 2.12 Urea의 양에 따른 미생물 성장곡선

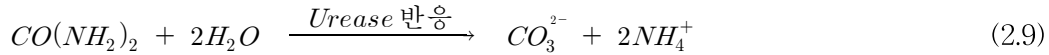
2.3.3 미생물에 의한 바이오주입재 생성 이론

(1) 미생물과 요소분해효소의 반응

미생물을 이용한 흙의 고결화는 미생물의 생화학 반응을 통해 고결물인 바이오주입재가 흙 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, 고등

동물의 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.

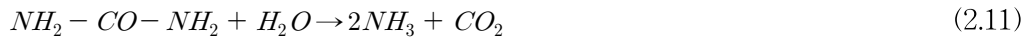


(2) 바이오주입재 생성 이론

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 바이오주입

재를 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 2.13은 바이오주입재의 생성과정과 흙 입자에 침전되는 모습을 도식화한 것이다.

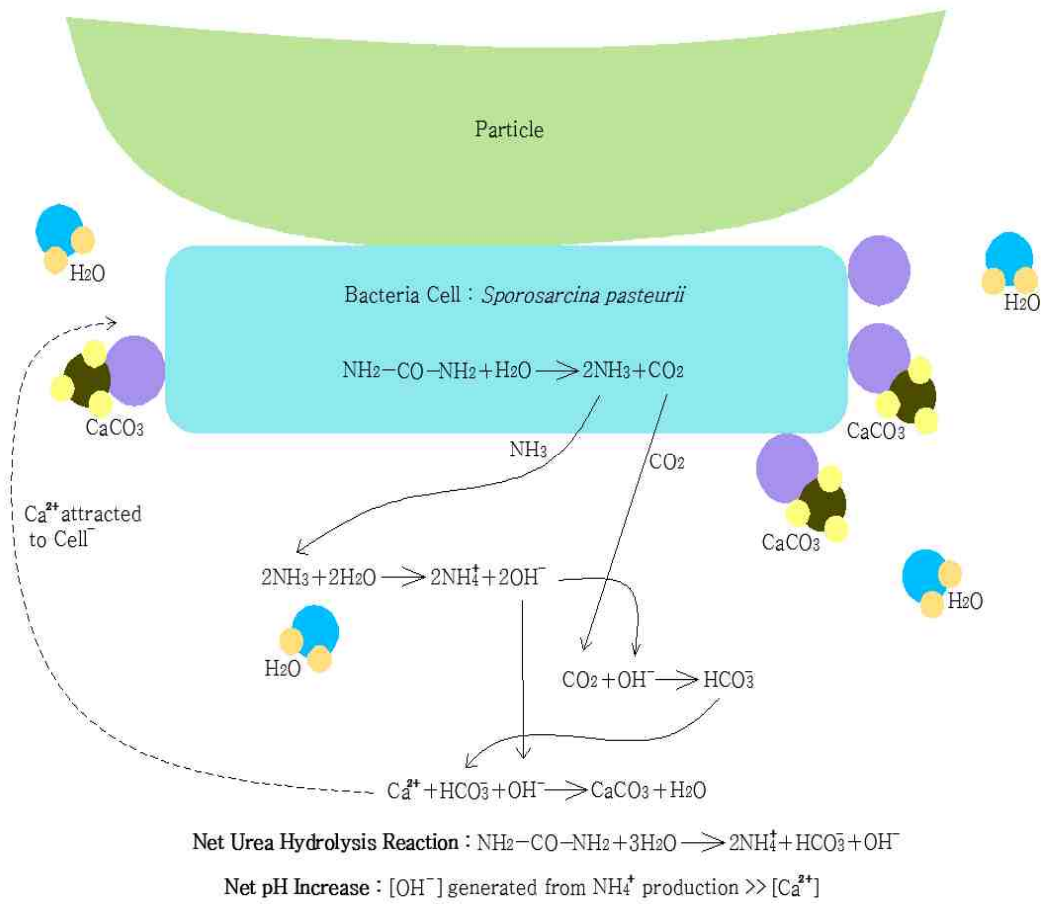


그림 2.13 미생물 고결화 메커니즘(Dejong et al., 2010)

2.3.4 최적 바이오주입재 도출

(1) 일반농도처리를 통한 미생물 용액 배양

일반농도처리에 사용되는 미생물 배양방법은 계대배양(기존의 미생물 용액에서 1%를 새로운 배양배지에 옮기는 작업)을 통한 방법을 사용하였다. 배양방법의 순서로 먼저 증류수에 영양배지 0.8%와 요소 2%를 첨가하여 배양배지를 만든 후 멸균기를 이용하여 용기 전체를 멸균시킨다. 다음으로 기존의 인큐베이터에서 배양 중인 미생물 용액을 클린벤치에서 미생물 용액의 1%를 스포이트로 집중시키는 방법을 사용하여 미생물 용액을 제작하였다. 그림 2.14는 영양배지와 요소이다.



(a) 영양배지

(b) 요소

그림 2.14 영양배지와 요소

염화칼슘은 염소(Cl)와 칼슘(Ca)이 반응하여 만들어진 이온성 화합물이다. 무수물은 조해성이 있는 사방계의 백색결정으로 약간 비틀어진 구조이며, 화학식량은 111.0, 녹는점 $772^{\circ}C$, 끓는점은 $1,935^{\circ}C$, 비중은 2.15이다.

물에 대한 용해도는 물 100g에 염화칼슘의 g수가 74.5g로 상당히 높은 편이며, 알콜, 아세톤에도 잘 녹는다. 또한 수분을 잘 흡수하므로 장마철 건조제로 많이 이용되고

있으며, 염화칼슘 무게의 14배 이상 물을 흡수할 수 있다.

겨울철 눈 위에 염화칼슘을 뿌리면 그 주변의 습기를 흡수하여 녹게 되는데, 녹으면서 내놓는 열이 주변의 눈을 다시 녹인다. 또한 의약품으로서도 링거액 등으로 알려진 바와 같이 칼슘제 중에서 가장 흡수가 빠르고, 직접 복용하면 위를 해치므로 주로 주사제로 사용된다. 그 밖에도 염화칼슘은 강력한 흡착력으로 노면상에 적당한 습기를 유지하여 먼지 발생을 방지하므로 경기장, 테니스장, 비포장도로의 방진에 뛰어난 효과를 발휘하며, 동결방지 효과는 경기장과 테니스장 등에서 서리 방지용으로서 효과가 크다.

본 연구에서 사용된 염화칼슘 용액은 물에 녹여 수용액 상태를 만들어 흙속에 넣었으며, 미생물로 생성된 탄산염과 염화칼슘을 수용액화 하여 칼슘이온과 반응함으로 반응식 (2.20)과 같이 침강하게 된다.



본 연구에서는 액체 배양방법을 사용하였으며, 배양배지를 만드는 방법(미생물 배양 배지 1L 기준)은 그림 2.15와 같다.

영양배지는 0.8%로 8g/L를 넣고, 요소는 2%로 20g/L를 증류수가 1L가 되도록 비커에 채운 후 교반한다. 교반이 끝나면 삼각플라스크에 담아 1L 배지용액을 뚜껑을 호일을 통해서 막고, 15분간 온도 121℃로 멸균기에서 멸균시킨다.



(a) 영양배지 8g/L



(b) 요소 20g/L



(c) 증류수 1L에 영양배지와 요소 교반



(d) 삼각플라스크에 호일로 막고 멸균

그림 2.15 미생물 배양배지 만드는 방법

미생물 배양에 실질적으로 사용되는 계대배양방법(100ml 기준)은 그림 2.16과 같다. 인큐베이터에서 배양된 미생물 용액을 클린벤치로 가져온 후 계대배양은 배양용액에 1% 미생물 용액을 주입하므로 100ml인 배양용액에 계대배양을 할 경우 1ml 스포이트를 맞춰 1ml의 미생물을 새로운 영양배지에 접종한다. 접종된 새로운 영양배지는 인큐베이터에 회전속도 180rpm, 온도 30℃로 하루 동안 미생물을 성장시킨다.



(a) 인큐베이터에서 미생물 용액을 가져옴



(b) 1ml를 스포이트로 맞춤



(c) 1ml를 계대배양 시킴



(d) 인큐베이터에 넣음

그림 2.16 계대배양방법

(2) 염화칼슘에 따른 몰비(M) 정량화 시험

바이오주입재의 정량화를 위해 그림 2.17과 같은 실내실험을 수행하였다. 미생물 용액 50ml와 조건이 다른 염화칼슘 수용액 각각 0.5M, 0.75M, 1M, 1.5M, 2M의 50ml를 혼합 후 5일 동안 공기건조를 시켰으며, 생성된 바이오주입재의 양을 측정하였다.



(a) 몰비(M)에 따른 염화칼슘 수용액



(b) 미생물 용액과 염화칼슘 수용액 혼합



(c) 100ml 비커에 정량적으로 분배



(d) 바이오주입재 침전 후 모습

그림 2.17 염화칼슘 몰비(M)에 따른 정량화 실험

미생물과 조건이 다른 각각 0.5M, 0.75M, 1M, 1.5M, 2M의 염화칼슘을 혼합 시킨 결과, 바이오주입재가 각각 3.4g, 4.5g, 4.8g, 5.0g, 6.4g 생성되었다. 염화칼슘 1kg 가격이 920원 일 때 1g은 0.9원이다.

그림 2.18과 표 2.11은 바이오주입재 생성량에 따른 가격 그래프 결과이다. 염화칼슘 몰비(M)에 따른 바이오주입재 생성량과 가격의 차이로 보아 0.75M이 바이오주입재 생성량과 가격비교에 가장 적합함을 값을 확인하였다.

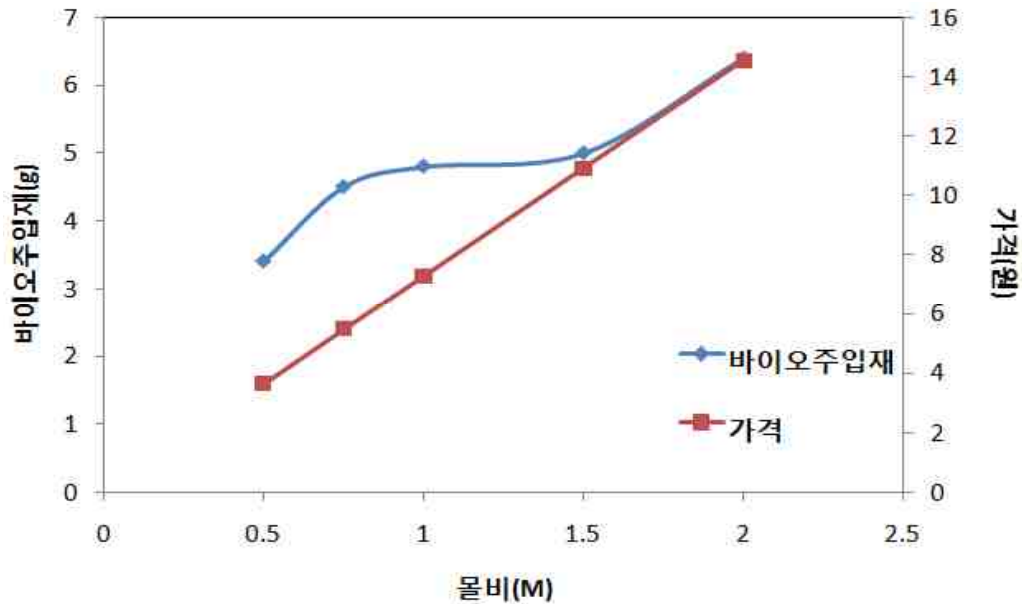


그림 2.18 염화칼슘 몰비(M)에 따른 바이오주입재 생성량과 가격 그래프

표 2.11 염화칼슘 몰비(M)에 따른 바이오주입재 생성량과 가격

몰비(M)	바이오주입재(g)	가격(₩)
0.5	3.4	36.38
0.75	4.5	54.57
1.0	4.8	72.77
1.5	5.0	109.16
2.0	6.4	145.54

(3) 바이오주입재 제작

본 연구에 사용된 바이오주입재는 일반농도처리에서 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 2.19와 같다.



(a) 미생물 용액과 염화칼슘 수용액 혼합



(b) 필터를 통해 바이오주입재 추출



(c) 건조



(d) 사발접시를 통해 분말화 함

그림 2.19 바이오주입재 추출과 제작과정

(4) 바이오주입재의 특성

미생물 용액과 염화칼슘 수용액의 반응결과, 그림 2.20과 같이 하얀색 침전물이 생겼으며, 미생물 용액에서 생성된 탄산염과 염화칼슘 수용액에서 생성된 칼슘이온이 각각 결합하여 고결물이 생성되었다. 이와 같이 생성된 고결물이 바이오주입재이다. 이러한 반응 용액을 건조기에서 증발시켜 남은 알갱이를 사용하여 SEM와 XRD 분석을 수행하였다. SEM 분석은 입자를 전자현미경으로 확대하여 입자의 구성을 확인할 수 있으며, XRD 분석은 입자의 구성 광물을 확인할 수 있다.

표 2.12와 그림 2.21은 XRD 분석결과이다. 정점 분석결과, 탄산칼슘의 정점과 일치함을 보여 분석한 광물이 탄산칼슘임을 확인하였다. 그림 2.22는 SEM 분석을 통해 백색의 가루 모양인 탄산칼슘의 정육각형 알갱이가 서로 엉겨 붙어있음을 확인하였다.



그림 2.20 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험

표 2.12 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 XRD 분석

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

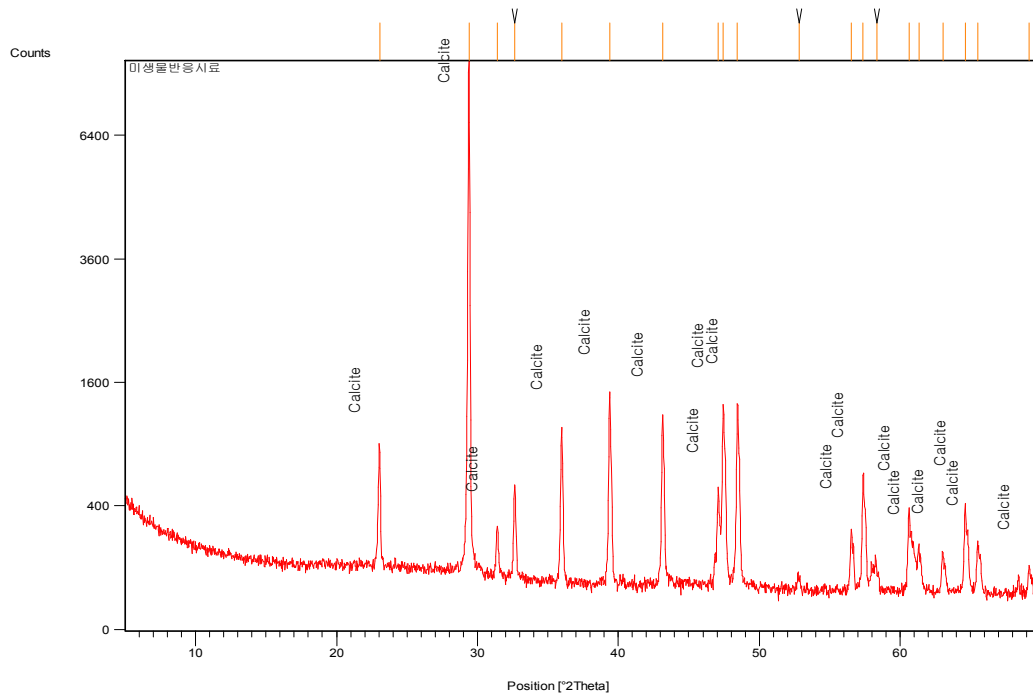
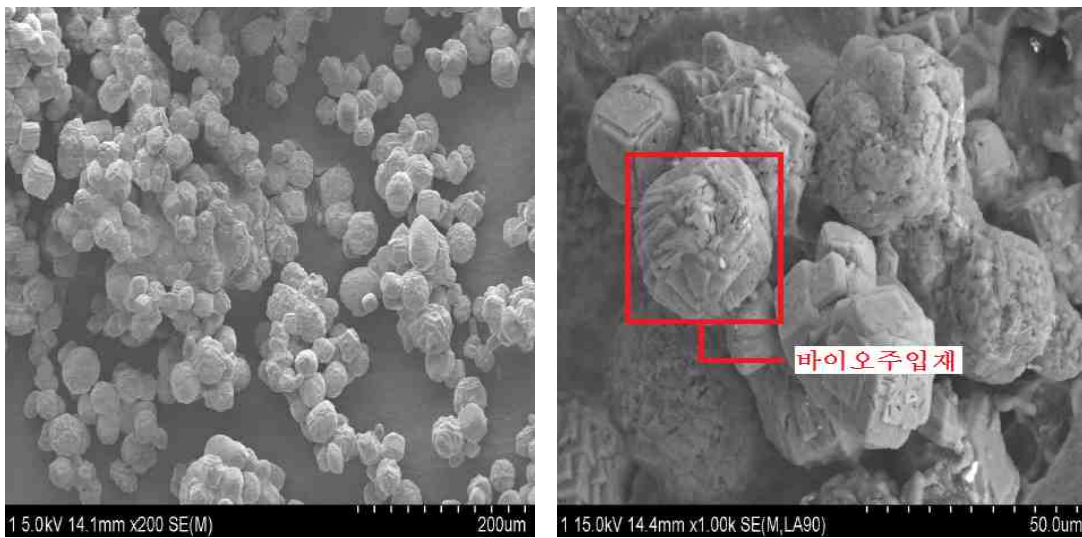


그림 2.21 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 XRD 분석



(a) 200배 확대 모습

(b) 1,000배 확대 모습

그림 2.22 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 SEM 분석

제 3 장 실내실험

3.1 MCP 공시체 일축압축강도실험

미생물 고결화 기술인 MCP 기술은 앞에서 언급한 바와 같이 입자 사이의 간극에 고결물이 침투하여 간극의 사이를 조밀하게 채움으로 강도를 증진시킨다.

본 연구에서는 친환경 소재인 미생물을 통해 생성된 바이오주입재와 시멘트를 이용하여 중량비에 대한 각각의 공시체를 제작하였으며, 재령에 따른 강도를 확인하였다. 일축압축시험을 통해 강도를 측정하였고, 실험에 필요한 시료 제작을 위해 실내실험을 수행하였다. 또한 실험에 사용된 시료의 다짐시험을 통하여 최대건조단위중량($r_{dm,ax}$)과 최적함수비(Optimum Moisture Content, OMC)를 결정하였다.

바이오주입재 공시체의 강도를 비교, 분석하기 위해 무처리, 시멘트, 바이오주입재+시멘트의 비(1:9, 3:7, 5:5)로 처리하여 공시체를 제작하였다. 바이오주입재를 시멘트와 같이 분말화하여 공시체 시료의 중량 대비 4%와 8%로 혼합하였고, 재령 7일과 28일에 따라 일축압축강도를 확인하였다. 또한 공시체의 중량대비 세립분(#200체 통과) 시료의 함유량을 0%, 5%, 15%로 혼합하여 동일한 다짐방법을 통해 공시체의 강도를 분석하였다.

세립분을 0%, 5%, 15% 첨가한 이유는 현장지반 상태가 대부분 느슨하게 고결된 상태로 존재하므로 고결된 지반 내의 실트나 점토와 같은 세립분이 현장 지반의 강도에 미치는 영향에 대한 정확한 평가가 선행되어야 할 필요성이 있기 때문에 세립분을 추가하여 현장 조건과 유사한 지반을 구성하였다(박성식과 최선규, 2013). 이는 기존 선행연구인 전상주 (2013)의 경우 세립분이 없는 SP시료만을 가지고 일축압축실험을 수행하였기 때문에 본 연구와 차별성을 가진다.

그림 3.1은 미생물을 이용한 연약지반강도를 확인하기 위한 실험과정을 개략적으로 나타낸 것으로 다음 그림과 같다.

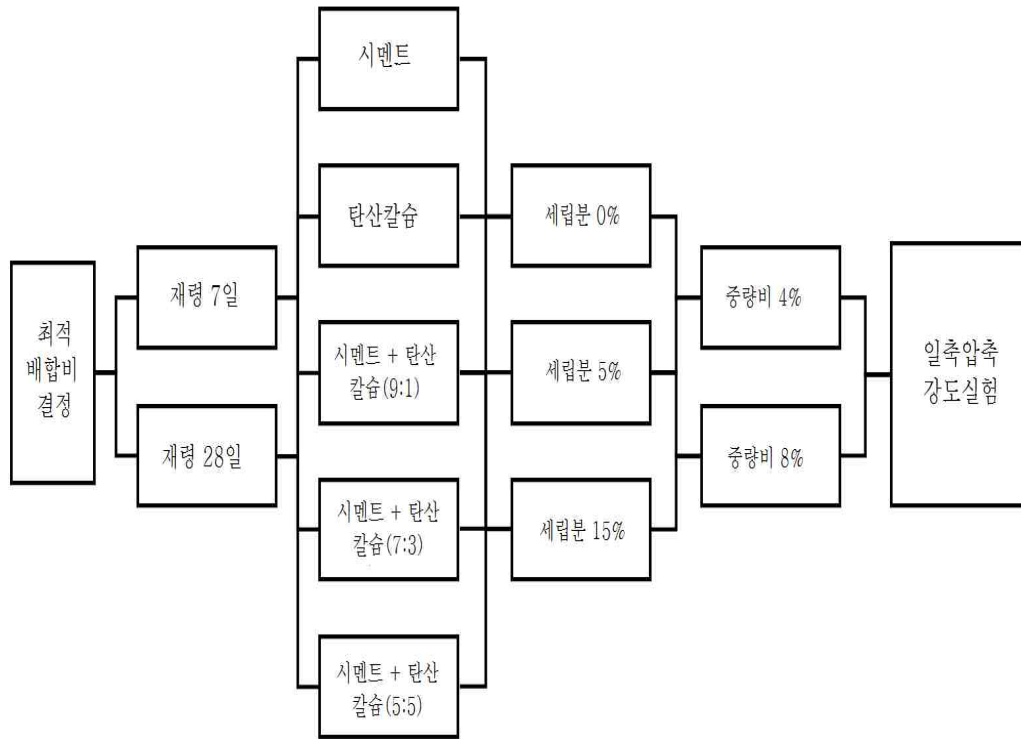


그림 3.1 미생물 고결화를 위한 실험과정

3.1.1 공시체 제작

(1) 공시체의 크기

일축압축강도실험을 위한 공시체 크기는 KS F 2331에 의해 (D)7cm와 (H)14cm로 1:2의 크기를 추천하고 있으며, 시료의 크기나 직경 대 높이의 비율을 맞추도록 하고 있다. 그러나 실질적으로 사용하는 시료의 크기나 실험에 사용된 용기에 맞추기는 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서 사용된 용기의 크기는 (D)5cm와 (H)10cm의 원형 용기로서 직경 대 높이의 비율이 1:2로 제작하였다. 실험용기는 주철로 제작하였으며, 공시체를 제작 후 용기의 탈거가 용이하도록 1/2로 분리되는 형태로 설계되었다. 탈거 과정에서 공시체의 변형을 최소화하기 위하여 용기 안쪽에 윤활제를 얇게 도포하였다. 실험에 사용할 용기는 그림 3.2와 같다.



(a) 1/2로 분리되는 공시체 몰드



(b) 윤활제 도포

그림 3.2 일축압축 실험용기

(2) 공시체 제작

본 연구에서는 미생물 반응으로 생성된 바이오주입재와 시멘트, 바이오주입재+시멘트 공시체의 일축압축강도를 측정하기 위해 동일한 다짐에너지를 가하는 방법으로 공시체를 5층으로 나누고 층당 30회로 일정하게 다짐하였다. 일축압축강도실험은 공시체에 대하여 하중제어로 0.1tf/s 수준으로 실험을 수행하였다.

무처리 시료는 7일과 28일에 해당하는 공시체를 제작하였으며, 바이오주입재, 시멘트, 바이오주입재+시멘트(1:9, 3:7, 5:5) 공시체는 중량비 4%와 8%의 공시체에 세립분 #200체 통과 시료를 0%, 5%, 15%로 제작한 후 각각의 재령에 따라 측정하였다. 제작 방법은 그림 3.3과 같다.



(a) 흙과 시멘트+ 바이오주입재에 물 50ml



(b) 손 비빔으로 혼합 성형



(c) 동일한 다짐에너지를로 제작



(d) 다짐 완료 후 온도 40℃에서 건조



(e) 용기 탈거



(f) 공시체의 일축압축강도 측정

그림 3.3 일축압축실험 공시체 제작과정

(3) 연구에 사용된 시료

본 연구에 사용된 시료는 전북 남원시 송동면에 위치하고 있는 섬진강에서 채취된 모래를 사용하여 일축압축시험용 공시체를 제작하였다. 채취된 시료는 물과 배합하여 건조했을 때 시료가 자립 가능하도록 체가름실험을 통해 #60체(0.25mm), #100체(0.15mm), #200체(0.075mm)에 잔류하는 시료를 1:1:1의 비율로 배합하였다.

토목현장에서 쓰이는 흙의 경우 실트부터 점토 성분 등 다양한 종류의 세립분이 섞여 있기 때문에 본 연구에서는 모래 입자 사이에 포함되는 세립분으로 섬진강유역에서 채취한 흙을 체가름하여 #200번체 통과 시료인 세립분 0%, 5%, 15% 혼합하였으며, 모래와 세립분을 고결시키기 위해 국내 S사의 OPC를 사용하였다.

본 연구에 사용된 흙의 물리적, 역학적 특성을 확인하기 위해 한국 산업표준규격에 기준하여 비중(KS F 2308), 체가름(KS F 2309), 입도(KS F 2302), 다짐실험(KS F 2312)을 수행하였다.

표 3.1은 모래 시료의 물리적 특성을 나타낸 것으로 비중, #200체 통과율, 최대건조 단위중량, 최적함수비를 나타내었고, 모래 시료의 입도분포곡선을 통해 식 (3.1)과 식 (3.2)로 균등계수와 곡률계수를 구하였다.

표 3.1 모래 시료 물리적 특성

시료	비중(Gs)	#200체 통과량(%)	r_{dmax} (g/cm ³)	OMC(%)	LL (액성한계)	PL (소성한계)
SP	2.67	2.4	1.608	14.92	N.P	N.P

$$\text{균등계수}(C_u) = D_{60} / D_{10} \quad (3.1)$$

$$\text{곡률계수}(C_g) = D_{30}^2 / (D_{10} D_{60}) \quad (3.2)$$

그림 3.4는 본 연구에서 사용된 모래 시료의 입도분포곡선이며, 균등계수와 곡률계수를 표 3.2와 같이 나타냈다. F0의 시료는 빈입도에 입도분포가 좋지 않은 것으로 나타났으며, F5, F15의 시료에서는 빈입도이나 입도분포가 양호한 것으로 나타났다. 3가지 시료 모두 액성한계(Liquid limit, LL)와 소성한계(Plastic limit, PL)가 비소성(Non plastic, NP)으로 나타났다.

표 3.2 세립분에 따른 균등계수와 곡률계수

시료 \ 입도분포	체분석(mm)			C _u	C _g
	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀		
F0	0.10	0.16	0.27	2.45	0.95
F5	0.094	0.15	0.24	2.55	1.00
F15	0.07	0.13	0.21	3.00	1.15

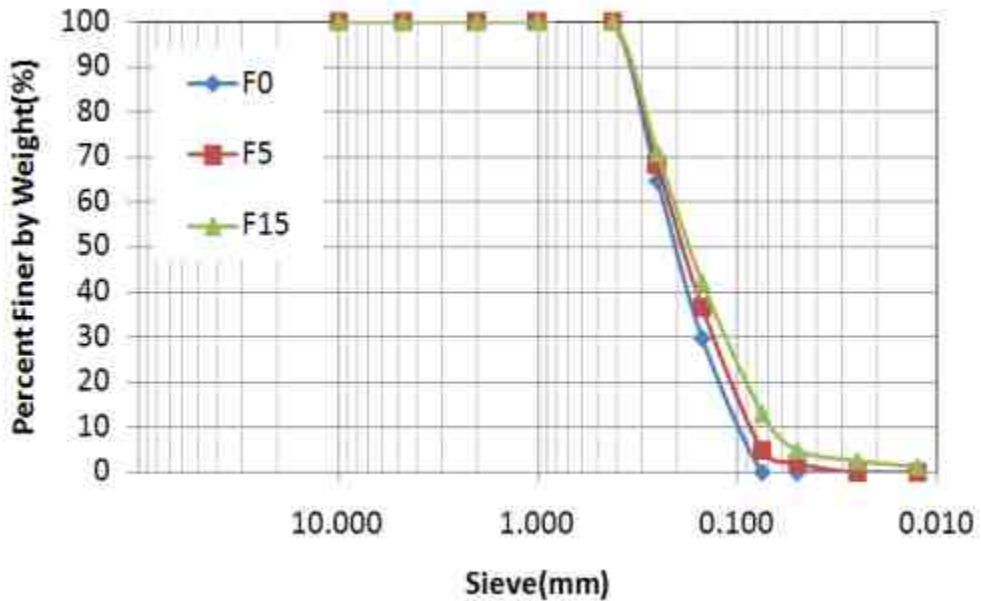


그림 3.4 모래 시료 입도분포곡선

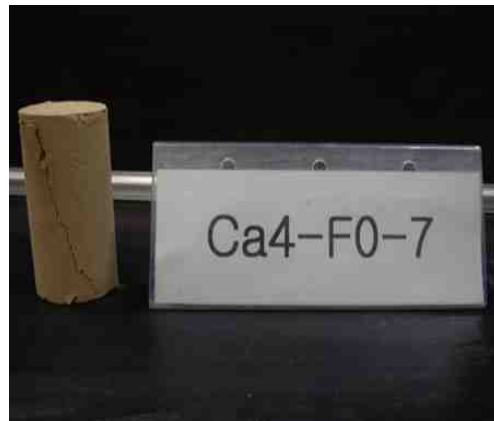
3.1.2 배합비

본 연구에서 사용된 공시체는 표 3.3과 같이 시료무게 275g에 대한 중량비 4%와 8%에 대해 바이오주입재+시멘트의 비(1:9, 3:7, 5:5)를 물 50g과 함께 혼합 성형하였다. 공시체를 5층으로 나누어 성형물드 넣고, 다짐봉으로 층당 30회로 일정한 다짐에너지로 각층을 다짐함으로써 공시체를 제작하였다. 무처리구 동일 시료 3개를 측정하여 유사한 강도를 나타냄을 확인하였고, 나머지 공시체는 1개씩 제작하여 일축압축강도를 측정하였다.

구분에서 N은 무처리, C는 시멘트, Ca는 바이오주입재이며, CaC는 바이오주입재+시멘트를 나타내었다. 주입재 뒤에 붙는 숫자 CaC4와 8은 시료 중량 대비 혼합된 혼화재의 %를 나타낸다. CaC4-F0, 5, 15는 #200체 통과량을 나타내고, 숫자 CaC4-F0-7과 28은 7일과 28일 시료의 배합비를 나타낸 것이다. 마지막으로 CaC4-F0-7-1, 3, 5는 바이오주입재+시멘트의 배합비(1:9, 3:7, 5:5)를 나타낸다.

완성된 공시체의 크기는 (D)5cm와 (H)10cm로 자립이 가능하며, 약하게 고결된 공시체는 바이오주입재와 시멘트로 제작한 공시체와 비교, 분석하기 위해 온도 40℃에서 7일과 28일까지 기중 양생 후 그림 3.5 (a)와 같이 일축압축강도실험을 수행하였다.

공시체를 온도 40℃에서 재령한 이유는 김대현 등 (2013), 전상주 (2013)의 선행연구 결과, 무처리, 바이오주입재의 경우 자체적인 수화반응과 포졸란 반응이 나타나지 않기 때문에 시멘트와 강도비교를 위해 온도 40℃에서 공시체를 재령하였다.



(a) 일축압축 실험

(b) 파괴 후 모습

그림 3.5 Ca4-F0-7 공시체 대표적인 성형 후 실험 모습

표 3.3 주입재에 따른 시료 배합비(중량비)

구분	재령	주입재	시료(g)	물(g)	바이오 주입재(g)	시멘트(g)
N-F0	7일, 28일	-	275	50	-	-
N-F5			275	50	-	-
N-F15			275	50	-	-
C4-F0		시멘트	275	50	-	11
C4-F5			275	50	-	11
C4-F15			275	50	-	11
C8-F0			275	50	-	22
C8-F5			275	50	-	22
C8-F15			275	50	-	22
Ca4-F0		바이오 주입재	275	50	11	-
Ca4-F5			275	50	11	-
Ca4-F15			275	50	11	-
Ca8-F0			275	50	22	-
Ca8-F5			275	50	22	-
Ca8-F15			275	50	22	-
CaC4-F0-1		바이오 주입재 + 시멘트	275	50	1	10
CaC4-F5-1			275	50	1	10
CaC4-F15-1			275	50	1	10
CaC4-F0-3			275	50	3	8
CaC4-F5-3			275	50	3	8
CaC4-F15-3			275	50	3	8
CaC4-F0-5			275	50	5.5	5.5
CaC4-F5-5			275	50	5.5	5.5
CaC4-F15-5			275	50	5.5	5.5
CaC8-F0-1			275	50	2	20
CaC8-F5-1			275	50	2	20
CaC8-F15-1			275	50	2	20
CaC8-F0-3			275	50	6	16
CaC8-F5-3			275	50	6	16
CaC8-F15-3			275	50	6	16
CaC8-F0-5	275		50	11	11	
CaC8-F5-5	275		50	11	11	
CaC8-F15-5	275		50	11	11	

3.2 바이오그라우팅공법 주입실험

바이오그라우팅은 환경오염에 미치는 영향이 높은 시멘트와 약액을 대신하여 바이오주입재를 흙 입자 사이의 간극에 채움으로 지반의 강도증가와 차수효과를 유도하는 공법이다.

바이오그라우팅공법은 약액 주입공법에 해당되며, 약액 주입공법은 고결시간을 기준으로 켈타임이 20분 이상 일 경우에는 1액 1공정(약액과 반응약액을 미리 혼합하여 주입), 2~10분일 경우에는 2액 1공정(약액과 반응약액을 중간에서 혼합 주입), 혼합되는 순간 반응의 경우 2액 2공정(약액과 반응약액을 각각 따로 주입)으로 구분된다(한국지반공학회, 2005). 특히 바이오그라우팅공법의 경우 기존 선행연구인 미생물 고결화 MCP 기술의 선행연구 결과를 통해 A액과 B액을 중간에 혼합 주입하는 2액 1공정과 혼합되는 순간 반응을 일으키는 2액 2공정 모두 가능한 것으로 나타났다. 현장 조건을 재현하고자 2액 1공정을 이용하여 실내실험을 수행하였다.

본 연구에서는 2액 1공정을 이용한 바이오그라우팅공법을 사용하여 주입실험을 수행하였고, 이를 통해 연약지반을 개선하고 강도를 평가하고자 하였다. 강도측정은 주입노즐 주변 4점을 결정하여 포켓관입시험기를 통해 일축압축강도실험을 수행하였다.

실험에 필요한 공시체 제작을 위해 실내실험을 수행하였으며, 다짐시험을 통하여 최대건조단위중량과 최적함수비를 결정하였다. 바이오그라우팅의 단층토, 다층토, 지반조건에 따른 적용성 평가를 위한 실험과정으로 그림 3.6과 같이 나타내었다.

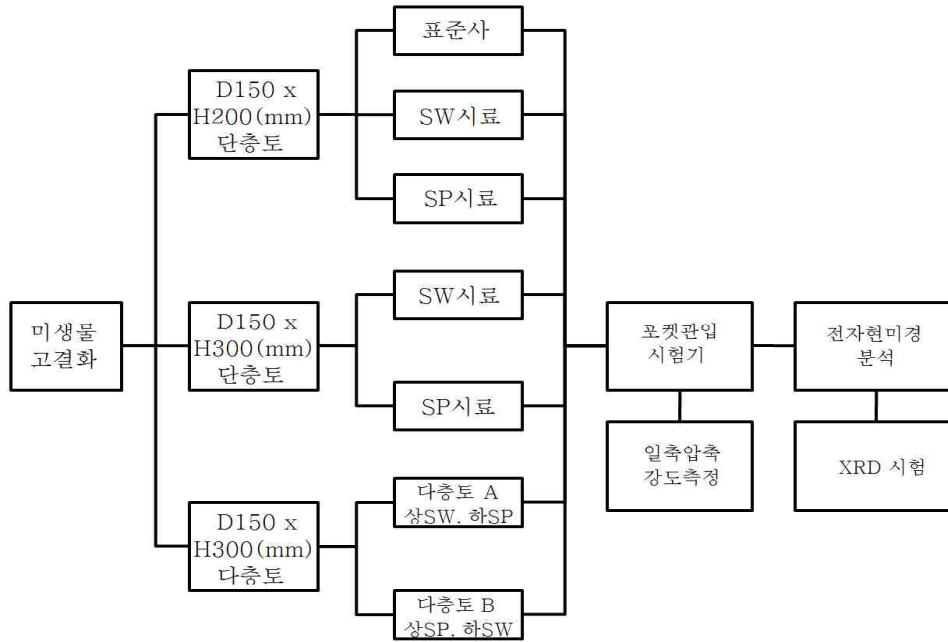


그림 3.6 바이오그라우팅공법을 위한 주입실험

3.2.1 공시체 제작

(1) 주입실험 방법

그림 3.7은 바이오그라우팅의 전경 모습이다. 그림 3.7(a)의 왼쪽 백색의 용액은 염화칼슘 수용액으로서 0.75M의 농도를 사용하였으며, 오른쪽 노란색의 용액은 미생물 용액으로 일반농도를 사용하였다. 상부의 노즐 호스를 통해 공기 압축기의 압력계이지 표기판의 150kPa를 일정한 압력으로 가하였다. LW 공법의 현장적용시 주입압력은 약 500kPa~1,000kPa의 압력을 가하나, 실험적 제약으로 인해 최대 150kPa의 압력을 사용하여 주입실험을 수행하였다. 또한 하부의 배출 노즐을 통해 Y자 노즐에서 혼합함으로써 친환경 미생물 반응으로 생성되는 고결물이 주입노즐을 따라 시료에 골고루 주입되도록 제작하였다. 그림 3.7(c)는 주입노즐 8mm관을 제작한 모습이며, 그림 3.7(d)는 주입장비로 제작된 공시체에 주입하는 모습이다. 이는 기존 Paassen et. al.(2009)와 달리 공시체 중앙부에 주입노즐을 제작하여 주입하기 때문에 본 연구와 차별성을 가진다.



(a) 열화칼슘 수용액과 미생물 용액



(b) 공시체의 성형



(c) 주입노즐



(d) 주입장비

그림 3.7 실내실험을 통한 바이오그라우팅 전경

본 연구에서는 주입액과 시료 사이에 중간 밸브를 장착하여 주입시 공기 압축기에서 150kPa의 주입압력이 동일하게 주입될 수 있도록 수동적으로 밸브를 조절하였다. 주입량은 동일한 조건을 주어 시료와 지반의 조건에 따라 고결범위와 고결강도를 측정하였다.

단층토와 다층토 공시체는 자유낙하를 통해 상대밀도(D_R) 30%로 제작하였으며, 강도를 발현시키기 위해서 바이오그라우팅 주입 후 24시간 동안 300kPa의 공기압으로 공기건조를 하였으며, 72시간 동안 자연건조를 하였다.

바이오주입재인 탄산칼슘은 자체적으로 수화반응을 나타내지 않기 때문에 공기압을

이용해 배수와 공기건조를 통하여 강도를 인위적으로 발현하였다. 또한 상대다짐도(RC)의 변화에 따라 바이오그라우팅공법의 적용범위를 설정하고자 지반조건을 다음과 같이 상대다짐도(RC) 70%, 80%, 85%, 90%, 95%로 주입실험을 수행하였다. 각각의 공시체 SW, SP 시료를 제작 후 배수가 원활히 진행될 수 있도록 공시체 하단부에 배수망을 설치하였으며, 직경 8mm의 분사관을 통해 미생물 용액과 염화칼슘 수용액을 1:1 비율로 장비를 통해 주입하였다.

(2) 주입실험에 사용된 시료의 특성

본 연구에 사용된 단층토, 다층토, 바이오그라우팅의 주입범위를 확인하기 위해 실험에 사용된 시료는 표준사, 0.42mm~0.84mm의 SP 시료, 입경이 골고루 분포하는 SW 시료를 사용하였다.

표 3.4는 주입실험 시 공시체 제작에 사용된 시료로서 물리적 특성을 확인하고자 한국 공업규격에 준하여 비중(KS F 2308), 체가름(KS F 2309), 입도(KSF 2302), 다짐(KS F 2308) 실험을 수행하였다. 물리적 특성실험 결과, 비중은 2.64~2.67, #200체 통과율은 2.4%~4.34%로 나타났으며, 액성한계와 소성한계는 비소성으로 나타났다.

Sand 시료는 주문진 표준사를 사용하였으며, SW, SP 시료는 섬진강 유역에서 채취한 모래 시료로 SP시료는 인위적으로 체 0.42mm~0.84mm 사이의 시료만을 추출하여 균등계수와 곡률계수를 수정함으로 SP시료를 제작하였다. 그림 3.8은 단층토, 다층토 실험에 사용된 시료의 입도분포곡선이다.

표 3.4 바이오그라우팅 주입실험에 사용된 시료 물리적 특성

구분	Gs	#200체 통과량(%)	r_{dmax} (g/cm ³)	LL	PL	C _u	C _g
Sand	2.55	1.24	1.608	N.P	N.P	-	-
SP	2.68	2.14	1.606	N.P	N.P	3.9	0.77
SW	2.64	4.34	1.645	N.P	N.P	7.7	1.55

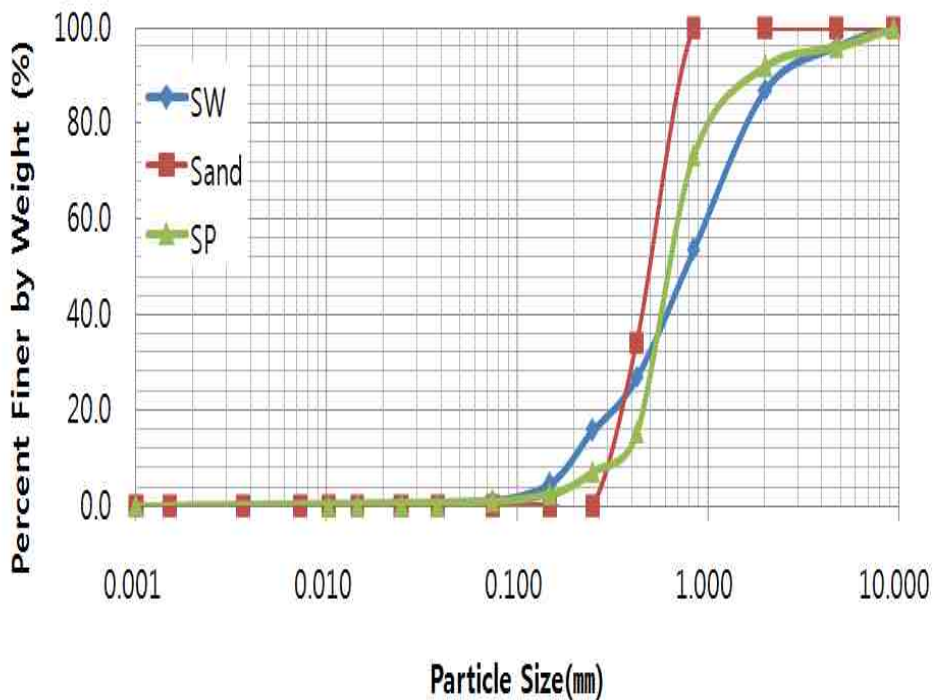


그림 3.8 바이오그라우팅 주입실험에 사용된 시료의 입도분포곡선

3.2.2 배합비

LW공법의 주입량의 산정은 식 (3.1)과 같이 결정한다.

$$Q = Vna(1 + \beta) \quad (3.1)$$

여기서, V = 주입개량범위의 총 체적, n = 지반의 간극률

α = 지반간극에 대한 주입재의 충전률, β = 주입재의 손실계수

주입개량 범위의 총 체적 $V = 2,649.36\text{cm}^3$ 이고, 지반의 간극률은 느슨한 모래로 가정하여 0.35를 적용하였으며, 충전률은 1.9, 주입재의 손실계수는 1.1을 사용하여 약 2,000ml의 주입량을 산정하였다. 본 연구에서는 주입량과 주입압력을 고정하여 지반조건에 따른 고결범위와 고결강도를 평가하고자 하였다.

(1) 단층토 주입실험

본 실험에 사용된 (D)150mm × (H)200mm 단층토 주입실험의 시료 배합비 결정은 표준사, SW, SP시료를 이용하여 각각의 상대밀도(D_R) 30%를 기준으로 느슨한 지반을 나타냈으며, 모든 실험은 배수조건으로 실험하였다.

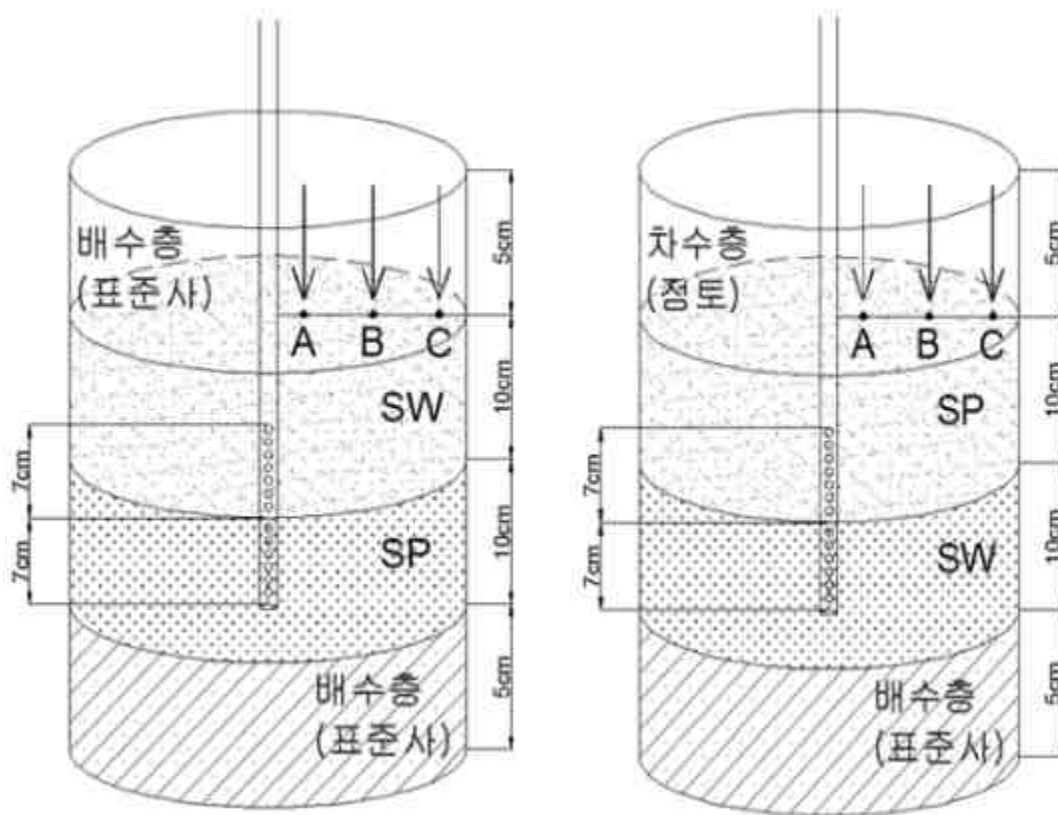
미생물 용액과 염화칼슘 수용액(0.75M)은 1:1 비율로 각각 2,000ml를 공기압 150kPa으로 1회 주입하여 실험하였다. 또한 주입액이 주입관을 타고 공시체 하단부로 배수되는 것을 방지하고자 하단부를 기준으로 차수층인 모래를 20mm 포설하였다. 표 3.5는 (D)150mm × (H)200mm 시료의 배합비를 나타내었다.

표 3.5 단층토 실험을 위한 배합비

조건		시료(g)	염화칼슘 수용액 (ml)	미생물 용액 (ml)
일반농도 미생물	Sand	1,108	2,000	2,000
	SP	1,106	2,000	2,000
	SW	1,133	2,000	2,000

(2) 다층토 주입실험

SW, SP시료를 이용하여 각각의 상대밀도(D_R) 30%를 기준으로 느슨한 지반조건을 재현하였으며, 모든 실험은 배수 조건으로 실험하였다. 다층토 A실험은 상부층에 SW시료, 하부층에는 SP시료로 제작하였고, 다층토 B실험은 상부층에 SP시료, 하부층에 SW시료로 제작하여 주입실험을 수행하였다. 미생물 용액과 염화칼슘 수용액은 1:1 비율로 각각 2,000ml를 공기압 150kPa으로 1회 주입하여 실험하였다. 실험조건은 그림 3.9와 같다.



(a) 다층토 A시료 조건

(b) 다층토 B시료 조건

그림 3.9 다층토 시료 조건

본 시료 배합비 (D)150mm × (H)300mm 공시체는 (D)150mm × (H)200mm 공시체와 달리 주입액이 원활히 배수되기 위해 A실험과 B실험 공시체 모두 하단부를 기준으로 투수계수가 높은 사질토로 배수층을 50mm를 포설하였다. A실험은 상단부로부터 50mm의 사질토 배수층을 설치하였으며, B실험의 경우 선행실험 결과, 상부층의 SP시료에 오버플로(Overflow) 현상이 발생되므로 상단부로부터 50mm의 투수계수가 낮은 점토층을 설치하여 표 3.6과 같은 배합비로 실험을 수행하였다.

표 3.6 다층토 실험을 위한 배합비

조건		시료(g)		염화칼슘 수용액 (ml)	미생물 용액 (ml)
일반농도 미생물	A	상부층	872	2,000	2,000
		하부층	851	2,000	2,000
	B	상부층	851	2,000	2,000
		하부층	872	2,000	2,000

(3) 주입률 및 주입범위 평가 실험

상대다짐도(RC)가 높아짐에 따라 주입효율과 주입범위에 대하여 확인하고자 다음과 같이 실험을 수행하였다. SP시료를 이용하여 상대다짐도(RC) 70%, 80%, 85%, 90%, 95%로 공시체를 제작하여 실험을 수행하였으며, SW시료의 경우도 동일한 상대다짐도(RC)로 공시체를 제작하여 실험을 수행하였다.

상대다짐도(RC)는 현장의 건조단위중량을 KS F 2308 실험을 통해 실험실에서 구한 최대건조단위중량으로 나눈 값을 말한다. 식 (3.2)는 상대다짐도(RC)를 구하는 식이다. 따라서 현장의 건조단위중량을 구하여 상대다짐도(RC)에 대한 시료의 무게를 결정하였다.

$$RC(\%) = \frac{\gamma_d(\text{현장})}{\gamma_{d(\text{max, 실험실})}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

공기 압축기 공기압 150kPa를 유지하여 2액 1공정 조건으로 미생물 용액rhk 염화칼슘 수용액은 1:1 비율로 각각 2,000ml를 1회 주입하여 실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 시료는 섬진강유역에서 채취한 시료로서 모형토조 (D)150mm × (H)300mm에 (H)150mm의 시료를 기준으로 하였다. 또한 모든 실험은 배수조건을 적용하기 위해 하부 50mm를 표준사로 채웠으며, 오버플로를 방지하기 위해 상부에 SW시료 100mm를 성토하여 표 3.7과 같은 배합비로 실험을 수행하였다.

표 3.7 바이오그라우팅 주입범위를 평가하기 위한 배합비

지반조건	시료(g)	염화칼슘 수용액 (ml)	미생물 용액 (ml)
SW-RC-95%	5,520	2,000	2,000
SW-RC-90%	5,229	2,000	2,000
SW-RC-85%	4,939	2,000	2,000
SW-RC-80%	4,648	2,000	2,000
SW-RC-70%	4,067	2,000	2,000
SP-RC-95%	5,389	2,000	2,000
SP-RC-90%	5,105	2,000	2,000
SP-RC-85%	4,822	2,000	2,000
SP-RC-80%	4,538	2,000	2,000
SP-RC-70%	3,971	2,000	2,000

(4) 바이오주입재와 시멘트의 투수실험

바이오그라우팅공법은 시멘트와 약액으로 사용하는 그라우팅공법과 미생물의 생화학 반응으로 생성된 바이오주입재를 접목시켜 흙 입자 사이의 간극에 바이오주입재를 주입함으로 지반의 강도 증가와 차수의 효과를 나타내는 공법이다.

표 3.8은 투수실험을 위한 시료의 배합비를 나타낸 표로 주입재인 시멘트, 바이오주입재, 바이오주입재와 시멘트의 비율 1:9, 3:7, 5:5에 대한 주입실험 후 차수효과를 확인하기 위해 다음과 같이 실험을 수행하였다.

공기 압축기로 공기압 150kPa를 이용하여 2액 1공정 조건으로 1회 주입하였으며, 본 실험에 사용된 시료는 주문진 표준사를 사용하였고, 모형토조 (D)150mm × (H)200mm 에서 (H)150mm의 시료를 기준으로 하였다.

시료는 표준사를 사용하여 자유낙하를 통해 동일한 모래의 양을 같은 높이로 포설하여 균질한 상대밀도(D_R)로 제작하였다. 시료의 하단부에 철망을 설치하여 시료가 빠져나가지 못하도록 하였으며, 그림 3.10(a)와 같이 상부의 철망은 0.5mm의 구멍을 내어 주입노즐이 들어갈 수 있도록 제작하였다. 주입실험 후 1주일 동안 자연건조를 하였고, 정수위 투수실험을 이용하여 차수효과를 확인하였다.



(a) 주입실험 모습



(b) 정수위 투수실험

그림 3.10 바이오주입재와 시멘트 투수실험 전경

표 3.8 바이오주입재와 시멘트 투수실험 배합비

주입조건	모래(g)	바이오주입재(g)	시멘트(g)	물(ml)
무처리	1,250	-	-	-
시멘트	1,250	-	100	200
바이오 주입재	1,250	100	0	200
CaC(1:9)	1,250	10	90	200
CaC(3:7)	1,250	30	70	200
CaC(5:5)	1,250	50	50	200

3.3 LW공법과 바이오그라우팅공법 비교

본 연구는 LW공법 적용시 문제가 되는 약액(규산소다 3호) 대신에 바이오주입재를 사용하는 방법과 시멘트의 사용량을 30%절감 시킬 수 있는 혼화재 개념을 적용하였다. 주입재에 따른 강도, 내구성, 주입재의 침투성, 고결범위를 호모겔 일축압축강도실험과 주입실험을 통해 분석하였으며, 주입효과를 효과적으로 검증하기 위해 주입재(OPC, Micro시멘트, 바이오주입재)를 선정하여 분석하였다.

3.3.1 일축압축강도실험 배합비

기존 LW공법에서 사용되는 주입재와 개발된 바이오주입재를 혼합하여 주입재에 대한 일축압축강도를 측정하였다. 공시체의 강도를 평가하기 위해서 (D)5cm × (H)10cm 원주형 몰드에 성형하여 호모겔 형태의 공시체를 제작하였다. 3시간 후 탈형하여 공기 건조로 양생하고, 재령 1일, 3일, 7일, 28일 강도를 평가하였다.

주입재의 혼합비율은 표 3.9와 같으며 급결재인 A액과 경화재인 B액을 부피비 1:1로 혼합 성형하여 준비된 몰드에서 양생되도록 하였다. 일축압축강도는 만능재하시험기를 이용하였으며, 압축속도는 1%/mm 수준으로 일축압축강도를 측정하였다.

표 3.9 그라우팅 주입재에 따른 일축압축강도 시료 배합비

구분	A액			B액			
	규산소다 3호(ml)	바이오 주입재(g)	물(ml)	OPC(g)	Micro 시멘트(g)	바이오 주입재(g)	물(ml)
O	-	-	-	200	-	-	200
M	-	-	-	-	200	-	200
B	-	-	-	-	-	200	200
OS	65	-	-	200	-	-	200
MS	65	-	-	-	200	-	200
BS	65	-	-	-	-	200	200
OB-1	-	65	-	200	-	-	200
OB-2	-	65	-	135	-	-	200
MB-1	-	65	-	-	200	-	200
MB-2	-	65	-	-	135	-	200

<주> O = OPC 100%, M = Micro 100%, B = Bio 100%

OS = OPC 100% + 규산소다 3호

MS = Micro 100% + 규산소다 3호

BS = 바이오주입재 100% + 규산소다 3호

MS = Micro 100% + 규산소다 3호

OB-1 = OPC 100% + 바이오주입재 30%

OB-2 = OPC 70% + 바이오주입재 30%

MB-1 = Micro 100% + 바이오주입재 30%

MB-2 = Micro 70% + 바이오주입재 30%

그림 3.11은 주입재에 따른 공시체 제작과정이다. 1/2로 분리되는 공시체 몰드에 윤활제를 도포한 다음 배합비에 따라 주입재를 혼합 성형하였다. 준비된 몰드에 주입재를 넣고 3시간 후 공시체를 탈형하여 기중 양생을 통해 공시체를 재령하였다.



(a) 공시체 몰드에 윤활제 도포



(b) 믹스된 주입재



(c) 주입재 투입



(d) 공시체 제작모습

그림 3.11 주입재에 따른 호모겔 공시체 제작 과정

완성된 공시체의 크기는 (D)5cm와 (H)10cm로 주입재에 따른 일축압축강도를 분석하기 위해 1일, 3일, 7일, 28일까지 재령하였으며, 그림 3.12와 같이 일축압축강도실험을 수행하였다.



(a) OPC 공시체의 성형



(b) 실험 장비



(c) 일축압축강도 측정 모습



(d) 일축압축실험 종료 후 모습

그림 3.12 OPC 공시체의 성형 후 실험 모습

3.3.2 그라우팅 실험 배합비

본 연구에서는 주입압력, 주입속도, 주입량은 동일하게 하여 지반조건에 따라 고결효과와 주입범위를 평가하였다. 실험에 사용된 시료는 SP시료로 상대다짐도(RC) 40%를 적용하였으며, 바이오그라우팅 실험에서 주입이 잘 되지 않은 SW시료의 경우 실내실험의 특성상 고압주입을 할 수 없기 때문에 실험 대상에서 제외하였다. LW공법의 표준 배합비는 표 3.10과 같다.

표 3.10 LW 공법 표준 배합비

(단위 = m³당)

A액		B액		
규산소다 3호(L)	물(L)	시멘트(kg)	벤토나이트(kg)	물(L)
250	250	250	25	420

표 3.10과 같이 LW공법의 표준 배합비 조건을 실내실험의 Scale로 줄여 표 3.11과 같은 주입실험의 배합비를 선정하였다. O는 OPC를 말하며, M은 Micro시멘트, B는 바이오주입재, S는 규산소다 3호를 나타낸다. 1과 2의 숫자 중 1은 규산소다 3호를 대신하여 바이오주입재를 시멘트 대비 30%를 주입함으로서 w/c비의 변경 없이 기존 LW공법과 바이오그라우팅공법을 비교하였으며, 2는 시멘트의 사용량을 30% 줄여 바이오주입재를 혼화재 개념으로 사용하여 그라우팅 실험을 수행하였다.

벤토나이트는 시멘트의 양에 10%로 벤토나이트를 사용하는 목적은 강도나 차수의 목적이 아닌 지반에 지하수가 흐를 경우 시멘트의 재료분리를 막는 목적으로 사용하기 때문에 본 실험에서는 실내실험을 기반으로 지하수 유동조건을 주기 어려워 주입재에서 제외하였다.

표 3.11 주입재에 따른 그라우팅 실험 배합비

구분	A액			B액			
	규산소다 3호(ml)	바이오 혼화제(g)	물(ml)	OPC(g)	Micro 시멘트(g)	바이오 주입재(g)	물(ml)
OS	200	-	200	200	-	-	400
MS	200	-	200	-	200	-	400
BS	200	-	200	-	-	200	400
OB-1	-	65	200	200	-	-	400
OB-2	-	65	200	135	-	-	400
MB-1	-	65	200	-	200	-	400
MB-2	-	65	200	-	135	-	400

3.3.3 전단탄성계수 측정

(1) 실험장비

본 실험은 LW공법과 바이오그라우팅공법의 주입실험을 통해 고결지반의 강성을 확인하기 위해 비파괴실험인 벤더엘리먼트로 시간경과에 따른 전단탄성계수(G_{max})를 측정하였다. 전단파속도를 측정하는 실험 장비로는 벤더엘리먼트, 함수발생기(Function generator), 신호증폭기, 오실로스코프(Oscilloscope)를 사용하였다.

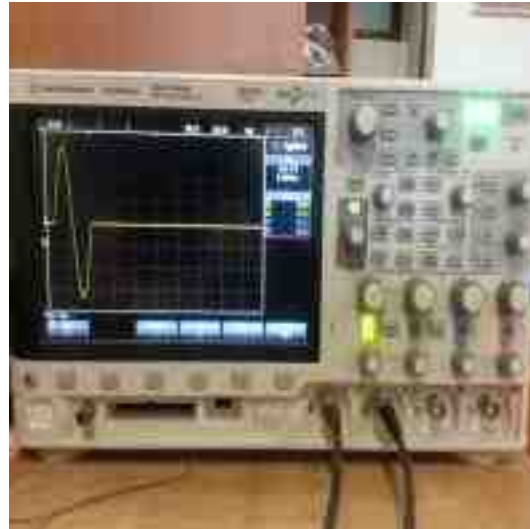
전단파 발생을 위하여 함수발생기로부터 발생된 전기적 신호는 벤더엘리먼트에 가해지게 된다. 이 때 전기적 에너지는 공시체에 전달되면서 물리적 에너지로 바뀌고 이 물리적 에너지는 반대쪽 수신용 벤더엘리먼트에 다시 전기적 에너지로 오실로스코프에 출력이 된다.

실험에 사용된 함수발생기는 정현 및 구형 파형과 램프, 삼각, 노이즈, 가변 에지 펄스 및 DC파형의 생성이 가능하다. AM, FM, PM, FSK 및 PWM 변조, 선형과 로그스윙프 및 모든 버스트를 기본 제공하며, USB, GPIB, LAN(LXI) 인터페이스를 포함한다. 그리고 신호 설정의 시각적인 검증을 위한 그래프 모드가 가능하며, 진폭의 범위는 10mVpp~10Vpp이다. 본 실험에서는 전단파속도 측정 시 10V의 전압과 3kHz의 주파수를 입력 값으로 설정하였고, 입력 파형은 단일 정현파를 사용하였다. 또한 흙이 시료를 통과함으로써 전파가 약해지기 때문에 신호를 20배 증폭 시킬 수 있는 신호증폭기를 사용하였다.

오실로스코프는 쉽게 말해 전기적인 신호를 화면에 그려주는 장치로서 시간의 변화에 따라 신호의 크기가 어떻게 변화하고 있는지를 파형으로 나타내는 장치이다. 오실로스코프를 통해 입력신호의 시간과 전압의 크기, 발진 신호의 주파수, 입력신호에 대한 회로상의 응답변화, 기능이 저하된 요소가 신호를 왜곡시키는 것, 직류신호와 교류신호의 양, 신호 중의 잡음과 그 신호 상에서 시간에 따른 잡음의 변화 등을 알 수 있다(황세훈, 2013). 그림 3.13은 본 연구에서 사용된 함수발생기와 오실로스코프이다.



(a) 함수발생기

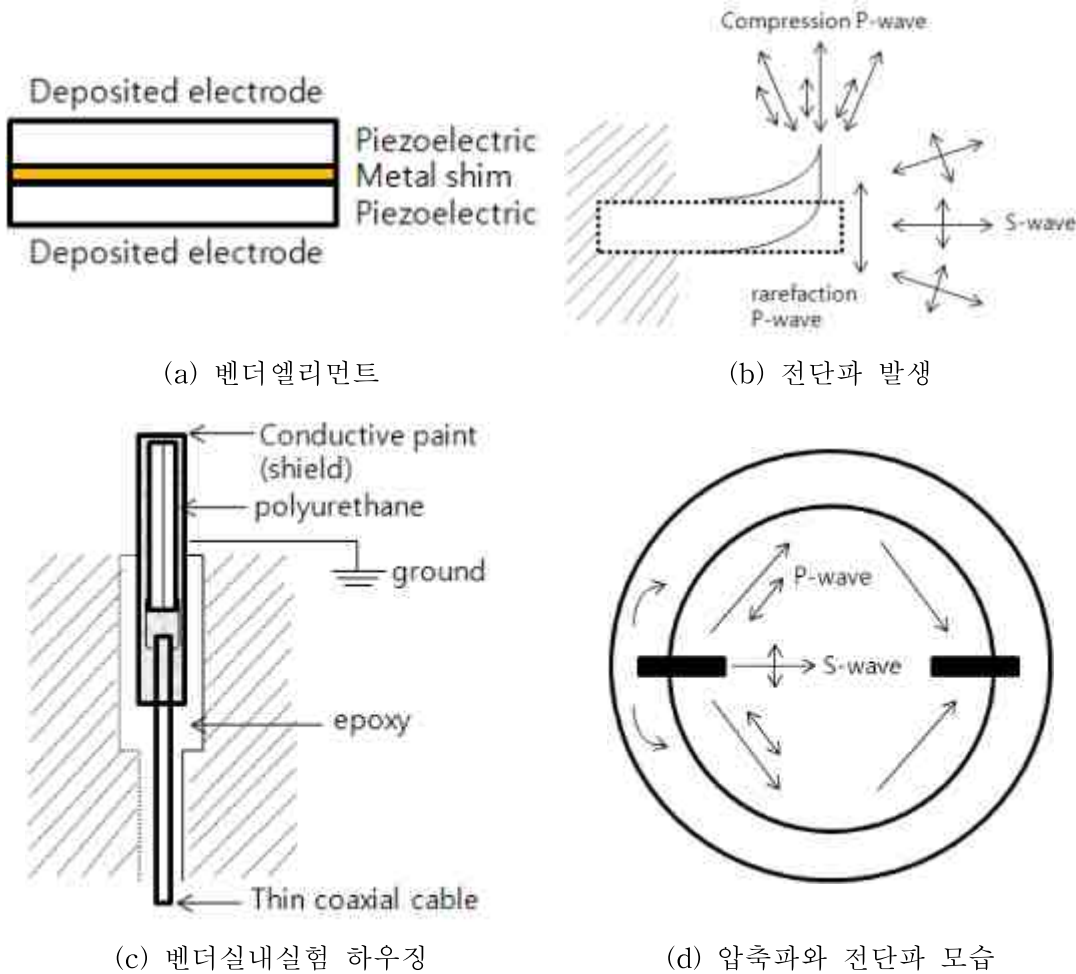


(b) 오실로스코프

그림 3.13 벤더엘리먼트 측정시 사용된 장비

(2) 벤더엘리먼트

처음 지반공학 실험에 사용된 벤더엘리먼트는 전도성의 금속 심(Conductive metal shim)의 양면에 압전 세라믹 요소(Piezoelectronic ceramic element)를 그림 3.14(a)의 샌드위치와 같은 형상으로 붙인 휨 요소를 뜻한다. 이 요소에 전압이 가해지면 금속 심에 부착된 압전 세라믹 중 한쪽 요소는 인장을, 금속 심 반대편의 다른 쪽 요소는 수축작용을 일으켜 벤더엘리먼트는 굴곡변형을 발생시키는 운동을 하게 된다. 만약 벤더엘리먼트의 한쪽 끝이 고정단처럼 작용한다면, 외팔보(Cantilever)와 같은 형상이 되어 그림 3.14(b)와 같이 벤더엘리먼트의 자유단에서 길이방향으로 전단파를 발생하고, 벤더엘리먼트의 면부에서는 압축파를 발생하게 된다. 그림 3.14(c)는 벤더엘리먼트를 실내시험에 적용시키기 위한 일반적인 하우징이며, 그림 3.14(d)는 구속된 영역에서의 압축파와 전단파의 반사 및 전파 개념도이다.



(a) 벤더엘리먼트

(b) 전단파 발생

(c) 벤더실내실험 하우징

(d) 압축파와 전단파 모습

그림 3.14 벤더엘리먼트 원리(Santamarina et. al., 2001)

벤더엘리먼트는 특별히 정해진 표준단면이나 설치법이 있는 것이 아니다. 따라서 시험 조건이나 시험 대상매질에 따라 적합하게 벤더엘리먼트 단면을 결정하여 제작하여야 한다. 벤더엘리먼트는 피에조 세라믹과 금속 심의 접합방법에 따라 일반적으로 직렬(Series)과 병렬(Parallel)의 두 가지 형태로 나뉜다. 병렬형의 경우 직렬형에 비하여 전기적 신호간섭 현상인 누화(Crosstalk)에도 그 영향이 적은 것으로 알려졌다. 따라서 직렬형의 벤더엘리먼트보다 병렬형의 벤더엘리먼트가 널리 사용하고 있으며, Yamashita et al.(2009)에 따르면 11개국의 23개소의 연구기관에서 병렬형 벤더엘리먼트를 사용하고 있는 것으로 보고된 바 있다(Chan and Ching, 2010).

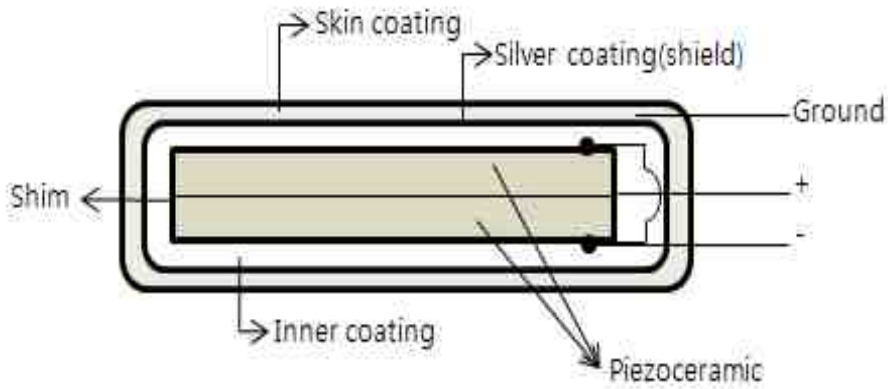
그림 3.15(a)는 병렬형 벤더엘리먼트의 구조이고, 그림 3.15(b)는 제작된 모습이다. 벤더엘리먼트의 제작은 요구 단면으로 피에조 세라믹 판을 재단하고 병렬형으로 금속 심에 접합한 후 동축케이블을 병렬형으로 연결한다. 케이블의 연결이 끝나면, 액상 폴리우레탄(Polyurethane)을 이용하여 내부코팅(Inner coating)을 실시한다.

내부 코팅은 최대한 얇게 하며, 약 3~5회 정도 벤더엘리먼트를 도포한다. 내부 코팅이 끝나면 전도성 도료를 이용하여 외부코팅(Silver coating)을 실시한다. 외부코팅을 통해 벤더엘리먼트의 전기적 차폐가 가능하다. 외부코팅에 접지선을 연결하고 최종적으로 외부코팅을 한다.

외부코팅은 내부코팅과 마찬가지로 폴리우레탄으로 코팅한다. 내부코팅과 외부코팅을 통하여 벤더엘리먼트의 차수성과 외부충격으로부터의 내구성을 확보할 수 있다.

벤더엘리먼트는 그림 3.15(b)에서와 같이 한쪽을 고정단으로 내민보처럼 거동하는 센서이다. 따라서 에폭시와 같은 단단한 접착제로 한쪽을 고정시켜야 하며, 벤더엘리먼트를 고정시키는 접착제의 강성이 전단과 측정 대상 매질에 비해 비슷하거나 작다면 신호의 전달과 수신에 양호하지 않다.

벤더엘리먼트를 설치한 대상 매질이 에폭시보다 강도가 낮은 매질이라면 전단과 신호를 전달시킬 수 있지만, 반대의 경우에는 매질을 통해서 전단과 신호를 전달시키는 양보다 벤더엘리먼트의 고정단 쪽으로 전단과 신호를 전달하는 양이 많아져 측정이 불리해진다. 따라서 벤더엘리먼트를 고정시키는 접착제는 되도록 경화 후 강성이 큰 제품을 사용하는 것이 좋다(황세훈, 2013).



(a) 병렬형 벤더엘리먼트의 구조



(b) 제작된 벤더엘리먼트의 모습

그림 3.15 벤더엘리먼트 구조와 제작된 벤더엘리먼트

(3) 전단파속도 계산방법

벤더엘리먼트를 통해 획득한 신호에서 탄성파의 전파속도를 산출해 내기 위해서는 탄성파의 전파거리를 결정해야한다. 일반적으로 전파거리는 파가 전달되는 여러 경로 중 가장 짧은 거리를 전파거리로 가정한다. 즉 벤더엘리먼트가 그림 3.16과 같이 압축파를 발생시키기 위한 배열이라면 벤더엘리먼트의 면간 거리(Face-to-face distance)

를, 전단파를 발생시키기 위한 배열이라면 벤더엘리먼트의 선단간 거리(Tip-to-tip distance)를 전파거리로 결정한다. 이 가정은 Dyvik and Madshus(1985)에 근간을 두고 있으며 현재까지 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 전단파 속도를 측정하기 위해 선단간 거리방식을 이용하여 전단파를 측정하였다.

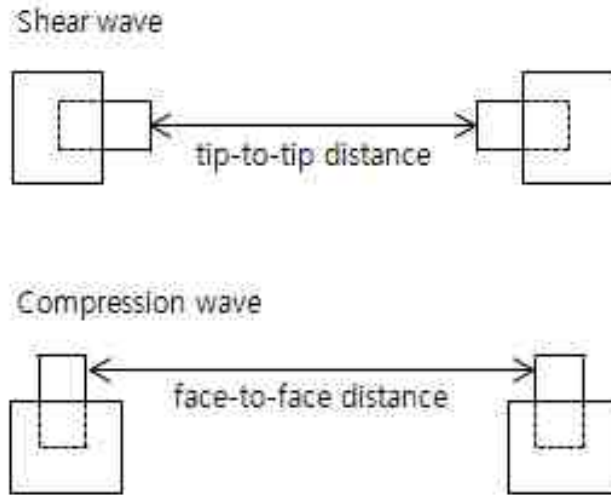


그림 3.16 벤더엘리먼트 배열에 따른 전파거리(김학성, 2011)

전단파속도 V_s 는 식 (3.3)과 같이 전단파의 이동거리 L 을 전파시간 T 로 나누어 계산하였다.

$$V_s = \frac{L}{T} \quad (3.3)$$

벤더엘리먼트를 이용하여 전단파속도를 구할 때 전단파의 이동거리는 대부분의 연구자들에 의해 벤더엘리먼트 끝단 간의 거리로 계산한다(Dyvik and Madshus, 1985; 이종섭과 이창호, 2006). Dyvik and Madshus(1985)는 벤더엘리먼트시험 결과를 공진주 시험 결과와 비교하였고, Viggiani and Atkinson(1995)은 전단파의 이동시간과 시편의 길이를 비교하여 벤더엘리먼트 끝단 간의 거리가 전단파의 이동거리임을 밝혔다. 하지만 벤더엘리먼트를 이용한 전단파 실험을 수행할 때 압축파와 근접장 효과 등으로 인하여 정확한 전단파의 전파시간(속도)을 결정하는데 어려움이 있다.

전단파의 전파시간을 결정하기 위해 입력파와 수신파 사이의 유사한 전파 특성을 보

이는 지점을 선정하여 두 점 사이의 시간차이를 전파시간으로 설정하여야 전단파속도를 산출할 수 있다. 가장 많이 사용되는 방법은 그림 3.17과 같이 입력파와 수신파의 정점값 사이의 시간 차이를 이용하여 전파시간을 계산하는 Peak to peak방법이 널리 사용된다(김학성, 2011). 본 연구에서도 Peak to peak방법으로 전파시간을 결정하고 벤더엘리먼트의 양 끝단 간의 거리를 이동거리로 하여 전단파속도를 계산하였다.

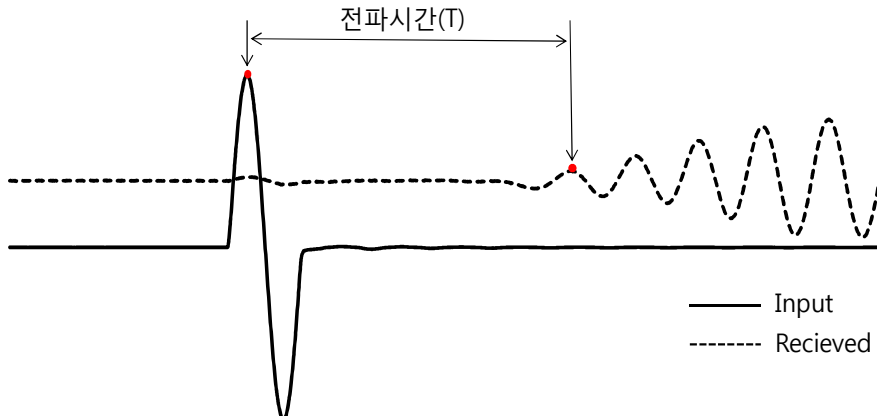


그림 3.17 전파시간 결정 방법(김학성, 2011)

(4) 전단파속도 측정방법

강도의 측정은 벤더엘리먼트를 통해 시료를 통과한 전단파속도를 구하여 측정하였다. 기존 연구 사례(조계춘과 이인모, 2002)에 의하면 건조자갈의 경우 150m/s~500m/s, 건조모래의 경우 150m/s~200m/s의 전단파속도가 측정되었다.

그림 3.18(a)와 같이 주입실험 후 7일, 14일, 21일, 28일에 따라 동일한 측정을 하고자 주입구 주변 4점을 측정하여 표시한 후 동일지점에서 주입제에 따른 전단파속도로 측정하였다. 건조밀도는 그림 3.18(b)와 같이 주입 후 3일 경과 뒤에 벤더엘리먼트의 측정을 수행하고자 주입 노즐 위치의 시료 (L)10cm 부분만을 제외하고 배수층과 상부층의 흙들을 제거하였다. 7일, 14일, 21일, 28일 경과 후의 무게를 측정하여 건조밀도를 구하였다. 측정 방법은 그림 3.19와 같이 MS의 V_s 측정 결과를 나타내었다.

오리지널 파형인 Sine파에서 처음 나타난 정점의 시간은 7.20×10^{-5} s이고, MS 7day에서 처음 나타난 정점의 시간은 5.54×10^{-4} s이다. 따라서 이 둘의 사이 차이는 4.82×10^{-4} s로 벤더엘리먼트를 통해 흙을 통과해서 전달된 전단파 시간이 된다.

시료의 거리는 10cm 이므로 이를 식 (3.3)에 대입하면 $V_s = 0.1\text{m} / (4.82 \times 10^{-4}\text{s}) = 207\text{m/s}$ 로 나타나게 된다. 전단탄성계수는 아래 식 (3.4)와 같이 흙의 밀도에 전단파속도를 제공하면 전단탄성계수를 구할 수 있다.

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (3.4)$$



(a) 측정 지점



(b) 시료성형

그림 3.18 전단파속도 실험 전경

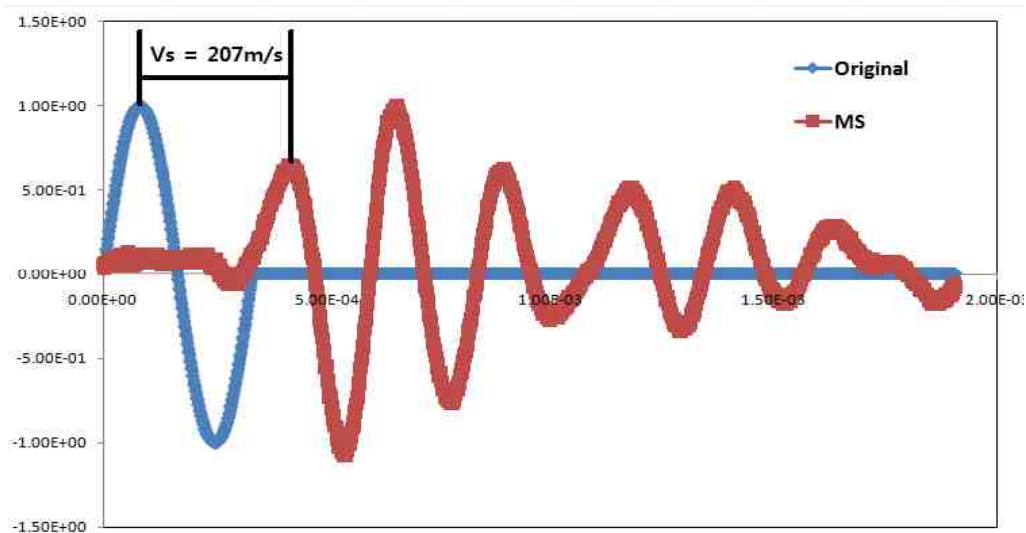


그림 3.19 전단파속도 측정 결과

3.4 환경성 평가

(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 지반개량 시 고결체로부터 약액의 성분이 용탈됨으로서 주변의 토양과 지하수를 오염시킨 사례가 보고되고 있으며, 환경오염을 고려하면서 불가피하게 약액 주입을 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 0111에 의하면 Lethal Concentration(LC)50은 어류를 급성 독물 지이 함유되어 있는 폐수의 희석액 중에 공시어를 기르고 그 사이에 공시어의 50%가 살아남는 폐수의 농도를 나타낸다. OPC, 바이오주입재, 규산소다, OPC를 혼합하여 만든 고결체를 수조의 바닥에 설치하고 용탈되는 알칼리에 의한 어독성을 측정함으로써 기존 주입재와 바이오주입재가 수질오염에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 주입재로부터 용출되는 유독성 물질로 인한 토양오염도를 측정하여 지반에 미치는 환경적인 영향을 평가하고자 하였다.

(2) 시험방법

KS M의 규정에 의한 시험방법에 의거하였으며, 시험수조의 재질은 유리와 스테인레스 스틸을 사용하였고, 용량은 50L 이상으로 제작하였다. 공기송풍+수온은 25℃ 유지하고 자동온도조절장치 부착하였다. 또한 공시어는 수질환경 및 실험실 생존조건에 적합한 금붕어를 선택하여 20마리 1개조로 사용하였고, pH 미터는 경과시간에 따라 pH 측정이 용이하도록 포터블형을 사용하여 측정하였다. 충분한 산소공급을 위해 Blower를 부착하였고, 지반 주입재 시료의 시편을 표면적으로 일정하게 유지되도록 수

조에 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) 어독성 실험 주입재의 배합비

지반보강공법으로 국내외에서 가장 많이 활용되고 있는 LW공법은 응결속도를 조절하는 A액과 경화제인 B액으로 구성되어 있다.

조합 1은 규산소다를 일반 용수 대비 1:1 부피비로 혼합한 희석액이며, B액은 시멘트계 경화제와 물을 1:2 중량비로 혼합한 현탁액으로 A액에 사용되는 규산소다는 국내 D화학에서 생산되는 제품과 시멘트는 국내 S사의 OPC를 사용하였다(천병식과 김진춘 1998). 조합 2는 순수 시멘트와 물의 비율을 1:1 혼합비로 시멘트는 국내 S사의 OPC를 사용하였다. 조합 3은 염화칼슘 수용액과 미생물 용액의 비율을 1:1 혼합비로 섞어 바이오주입재를 생성하였으며, 이때 발생하는 상층액은 제거하여 순수하게 생성된 바이오주입재를 사용하였다.

실험시료는 그림 3.20과 같이 체적 (L)5cm × (B)5cm × (H)5cm의 시편 11개 (1,375cm³)를 제작하였고, 시료는 제작 후 1일 동안 온도 40℃의 건조기에 양생시킨 다음 실험에 사용하였다. 본 실험에 적용된 주입재 조합별 배합비는 표 3.12와 같다.

표 3.12 적용된 주입재 조합별 배합비

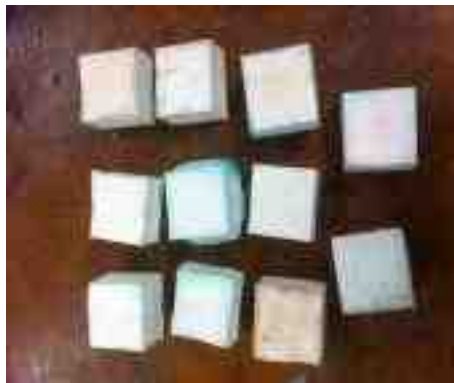
조합	주입재의 종류				
	A액		B액		
	규산소다 3호(g)	물(g)	OPC(g)	바이오주입재 (g)	물(g)
1	500	500	428	-	856
2	-	-	1,375	-	1,375
3	-	-	-	1,375	1,375



(a) 공시체 제작 모습



(b) OPC 공시체 모습



(c) 바이오주입재 공시체 모습

그림 3.20 시멘트와 바이오주입재 시편 제작

(4) 시험장치 및 방법

시험수조는 일반 어항수조(밖에서 관찰이 용이한 유리제를 사용)를 사용하였고 어항수조의 용량은 약 50L[(B) 33cm × (L) 63cm × (H) 40cm] 이상인 것으로 그림 3.21(a)와 같다. 충분한 산소를 공급하기 위해 Blower를 설치하였으며, 공기송풍이 가능한 크기의 수조를 제작하였다. 그림 3.21(b)의 공시어는 수온, 먹이, 취급 등 실험실 내의 생존조건에 적합한 것으로 공시어의 크기는 약 5cm~6cm로 금붕어를 사용하였으며, 실험당 1개조 20마리를 사용하였다. 그림 3.21(c)는 경과시간에 따라 pH를 측정하기 위해 pH 미터를 설치하였다.



(a) 어항수조

그림 3.21 어독성 실험 준비과정



(b) 1개조 20마리 공시어



(c) pH 측정

그림 3.21 어독성 실험 준비과정(계속)

공시어는 실험 전 수조에 50L의 물을 부어 실험시 수온과 수질에 적응시킨다. 수조 내의 산소가 공급되도록 Blower를 켜고 pH의 변화를 시간에 따라 측정하였다. 실험 시작 후 일정 시간 0h, 4h, 8h, 24h, 48h, 72h 마다 공시어의 상태변화를 관찰하면서 어독성 실험 일지에 기록하였고, 공시어의 치사 유무를 수시로 관찰하여 치사된 공시어는 되도록 빨리 제거하였다. 상기 실험방법에 따라 수행한 과정별 모습은 그림 3.22와 같다.



(a) 시멘트 공시체의 실험



(b) 바이오주입재 공시체의 실험



(c) 공시어 1개조 20마리



(d) 실험전경

그림 3.22 공시어 방류와 치사된 공시어

제 4 장 실험 결과 및 고찰

4.1 MCP 공시체 일축압축강도실험 결과

4.1.1 재령에 따른 일축압축강도실험 결과

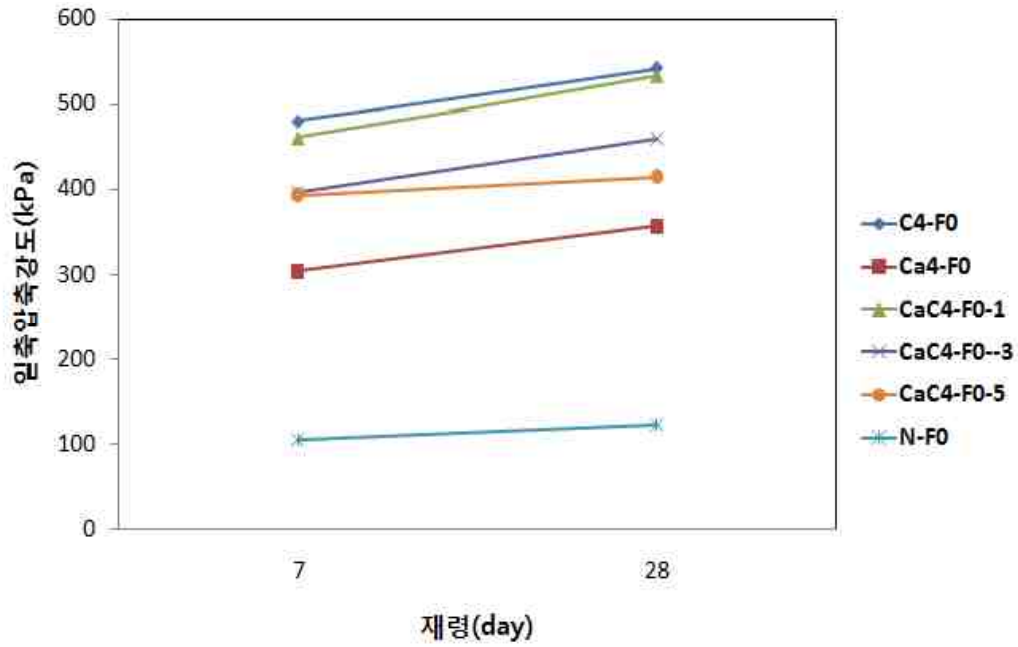
(1) 세립분이 0%일 때 재령에 따른 일축압축강도실험 결과

무처리 공시체의 일축압축강도 증가는 겔보기 점착력의 영향으로 양생기간에 따라 공시체의 일축압축강도가 약 10% 증가하였다. 표 4.1은 세립분이 0%일 때 재령에 따른 주입재 4%의 일축압축강도 분석 결과, 재령에 따라 Ca에서 15%로 가장 크게 증가하였으며, 대부분 5%~15%까지 재령에 따라 강도가 증가하였다. 주입재 8%의 일축압축강도 분석 결과, 재령에 따라 C에서 16%로 강도가 가장 크게 증가하였으며, 대부분 9%~16%까지 강도가 증가하였다. 주입재의 4%와 8% 비교결과, 주입재가 4%의 경우 바이오주입재 계열에서 강도가 크게 증가하였고, 주입재가 8%의 경우 시멘트 계열에서 강도가 증가하였다. 이는 주입재의 중량이 높을수록 시멘트에 의한 수화반응과 포졸란 반응으로 인해 강도가 크게 나타남을 확인하였다.

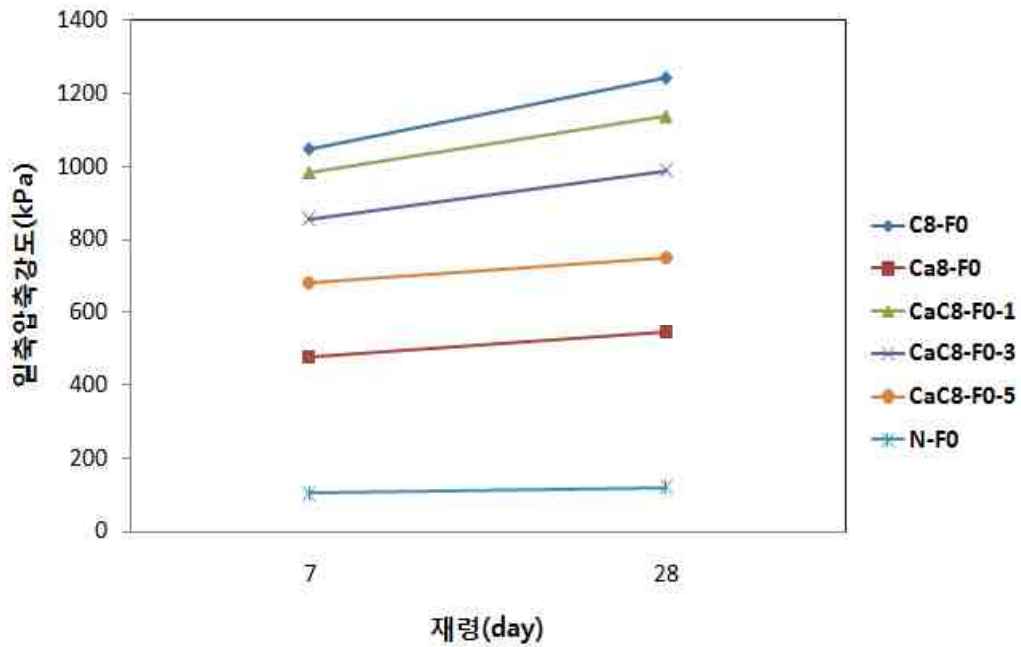
표 4.1 세립분 0% 일 때 재령에 따른 일축압축강도 결과

공시체	고결재	시료 무게 (g)	세립분 (%)	바이오주입재(g)	시멘트 (g)	7일 q_u (kPa)	28일 q_u (kPa)
N	무처리	275	-	-	-	104	121
C4	시멘트	275	-	-	11	480	542
Ca4	바이오주입재	275	-	11	-	304	357
CaC4-1	바이오주입재 + 시멘트	275	-	1	10	460	534
CaC4-3	바이오주입재 + 시멘트	275	-	3	8	396	459
CaC4-5	바이오주입재 + 시멘트	275	-	5.5	5.5	393	415
C8	시멘트	275	-	-	22	1,047	1,244
Ca8	바이오주입재	275	-	22	-	475	545
CaC8-1	바이오주입재 + 시멘트	275	-	2	20	983	1,140
CaC8-3	바이오주입재 + 시멘트	275	-	6.5	15.5	856	989
CaC8-5	바이오주입재 + 시멘트	275	-	11	11	681	748

그림 4.1(a)와 4.1(b)는 세립분이 0%일 때 주입재 4%와 8%에 대한 일축압축강도 실험결과이다. 혼합비에 상관없이 분말화한 탄산칼슘이 혼합된 공시체에서는 물과 섞여 모래입자 주변에서 건조되므로 물의 증발로 인해 모래입자와 입자를 잡아주는 수축작용이 발생함에 따라 탄산칼슘 공시체의 양생기간에 따라 최대 13%까지 강도가 증가하였다. 또한 시멘트의 경우 함유량이 높을수록 강도가 크게 증가하였다.



(a) 주입제 4% 첨가시료



(b) 주입제 8% 첨가시료

그림 4.1 세립분 0%일 때 재령에 따른 일축압축강도 결과

(2) 세립분이 5%일 때 재령에 따른 일축압축강도실험 결과

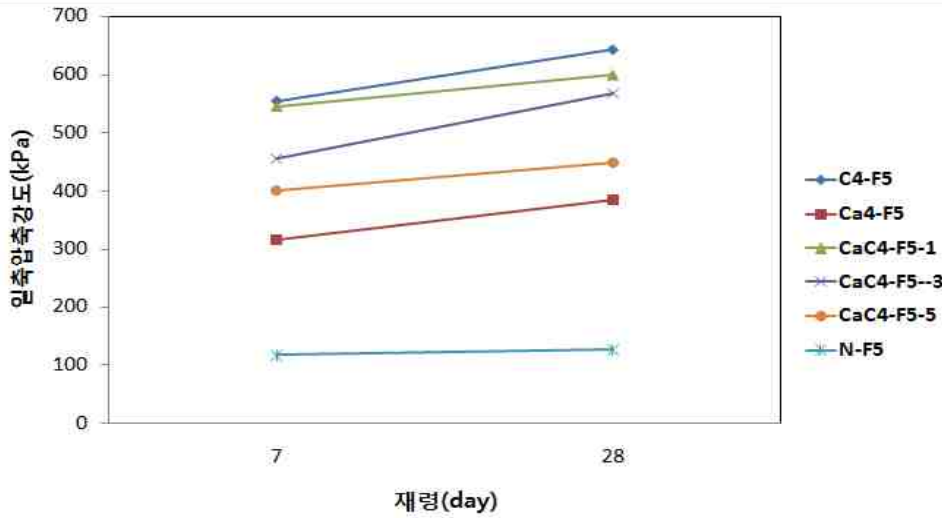
무처리 공시체에서 나타나는 일축압축강도의 증가는 겔보기 점착력의 영향으로 양생 기간에 따라 공시체의 일축압축강도가 약 7% 증가하였다. 표 4.2는 세립분이 5%일 때 재령에 따른 주입재 4%의 일축압축강도 분석결과이다. 재령에 따라 CaC4-3에서 20%로 강도가 가장 크게 증가하였으며, Ca에서 18% 강도가 증가하였다. 대부분 10%~20%까지 강도가 증가하였다. 주입재 8%의 일축압축강도 분석결과, 재령에 따라 C에서 18%로 강도가 가장 크게 증가하였으며, 대부분 5%~18%까지 강도가 증가하였다.

주입재의 4%와 8% 비교결과, 세립분이 0%인 경우와 마찬가지로 주입재가 4%의 경우 바이오주입재 계열에서 강도가 크게 증가하였고, 주입재가 8%의 경우 시멘트 계열에서 강도가 크게 증가하였다. 이는 주입재의 중량이 높을수록 시멘트에 의한 수화반응과 포졸란 반응으로 인해 강도가 크게 나타남을 확인하였다.

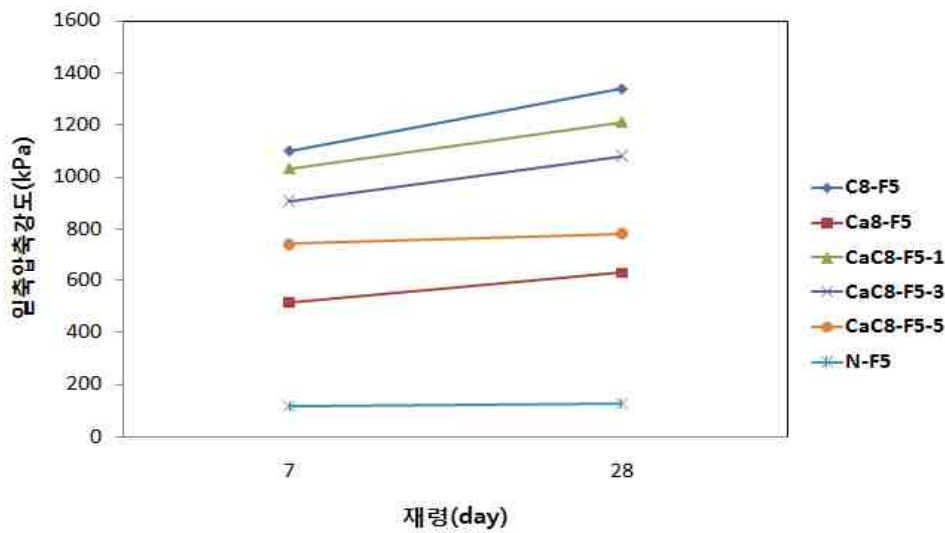
표 4.2 세립분 5% 일 때 재령에 따른 일축압축강도 결과

공시체	고결재	시료 (g)	세립분 (%)	바이오 주입재(g)	시멘트 (g)	7일 q_u (kPa)	28일 q_u (kPa)
N	무처리	275	5	-	-	117	126
C4	시멘트	275	5	-	11	554	643
Ca4	바이오주입재	275	5	11	-	317	385
CaC4-1	바이오주입재 + 시멘트	275	5	1	10	545	600
CaC4-3	바이오주입재 + 시멘트	275	5	3	8	455	567
CaC4-5	바이오주입재 + 시멘트	275	5	5.5	5.5	401	448
C8	시멘트	275	5	-	22	1,100	1,338
Ca8	바이오주입재	275	5	22	-	513	627
CaC8-1	바이오주입재 + 시멘트	275	5	2	20	1,032	1,210
CaC8-3	바이오주입재 + 시멘트	275	5	6.5	15.5	908	1,080
CaC8-5	바이오주입재 + 시멘트	275	5	11	11	742	782

그림 4.2(a)와 4.2(b)는 세립분이 5%일 때 주입재 4%와 8%에 대한 일축압축강도 실험결과이다. 혼합비에 상관없이 분말화한 탄산칼슘이 혼합된 공시체에서는 물과 섞여 모래입자 주변에서 건조되므로 물의 증발로 인해 모래입자와 입자를 잡아주는 수축작용이 발생함에 따라 탄산칼슘 공시체의 양생기간에 따라 최대 18%까지 강도가 증가하였고, 시멘트의 함유량이 높을수록 강도가 크게 증가하였다.



(a) 주입재 4% 첨가시료



(b) 주입재 8% 첨가시료

그림 4.2 세립분 5%일 때 재령에 따른 일축압축강도 결과

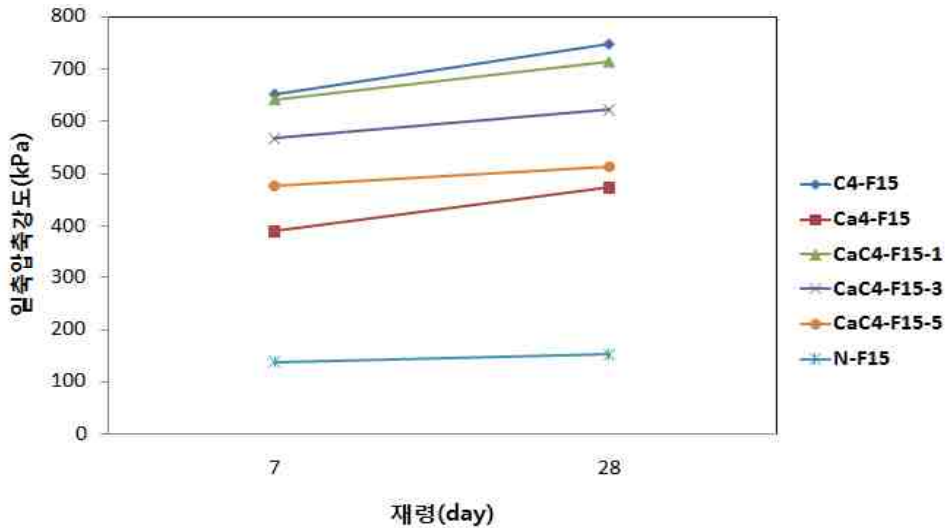
(3) 세립분이 15%일 때 재령에 따른 일축압축강도실험 결과

무처리 공시체에서 나타나는 일축압축강도의 증가는 겔보기 점착력의 영향으로 양생 기간에 따라 공시체의 일축압축강도가 약 9% 증가하였다. 표 4.3은 세립분이 15%일 때 재령에 따른 주입재 4%의 일축압축강도 분석결과이다. 재령에 따라 Ca에서 17%로 강도가 크게 증가하였고, 대부분 7%~18%까지 강도가 증가하였다. 주입재 8%의 일축압축강도 분석결과, 재령에 따라 C에서 17%로 강도가 가장 증가하였고, 대부분 7%~17%까지 강도가 증가하였다. 주입재의 4%와 8% 일축압축강도를 비교한 결과, 세립분이 0%, 5%인 경우와 마찬가지로 주입재가 4%의 경우 바이오주입재 계열에서 강도가 크게 증가하였고, 주입재가 8%의 경우 시멘트 계열에서 강도가 크게 나타남을 확인하였다.

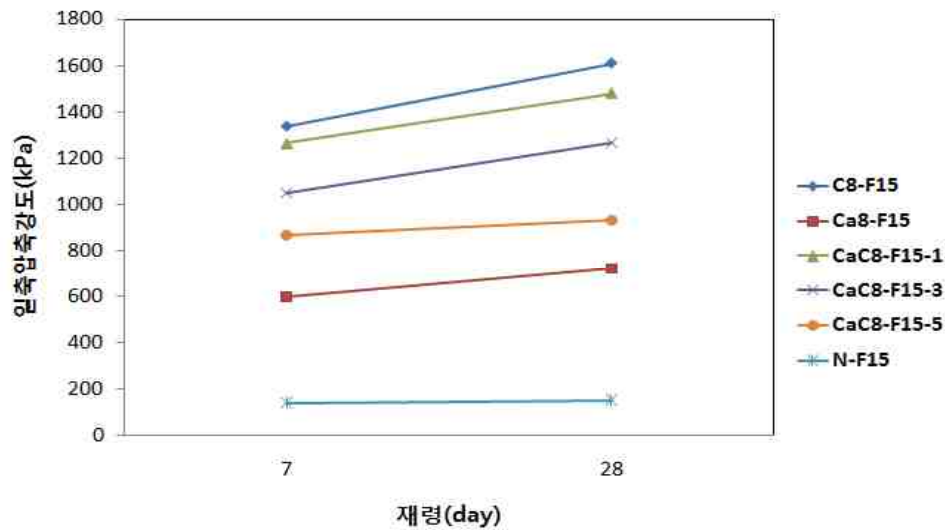
표 4.3 세립분 15% 일 때 재령에 따른 일축압축강도 결과

공시체	고결재	시료 (g)	세립분 (%)	바이오 주입재(g)	시멘트 (g)	7일 q_u (kPa)	28일 q_u (kPa)
N	무처리	275	15	-	-	137	151
C4	시멘트	275	15	-	11	652	748
Ca4	바이오주입재	275	15	11	-	389	473
CaC4-1	바이오주입재 + 시멘트	275	15	1	10	640	713
CaC4-3	바이오주입재 + 시멘트	275	15	3	8	567	622
CaC4-5	바이오주입재 + 시멘트	275	15	5.5	5.5	476	513
C8	시멘트	275	15	-	22	1,339	1,609
Ca8	바이오주입재	275	15	22	-	597	718
CaC8-1	바이오주입재 + 시멘트	275	15	2	20	1,263	1,479
CaC8-3	바이오주입재 + 시멘트	275	15	6.5	15.5	1,048	1,265
CaC8-5	바이오주입재 + 시멘트	275	15	11	11	865	931

그림 4.3(a)와 4.3(b)는 세립분이 15%일 때 주입재 4%와 8%에 대한 일축압축강도 실험결과이다. 혼합비에 상관없이 분말화한 바이오주입재가 혼합된 공시체에서는 물과 섞여 모래입자 주변에서 건조되므로 물의 증발로 인해 모래입자와 입자를 잡아주는 수축작용이 발생함에 따라 바이오주입재 공시체의 양생기간에 따라 최대 17%까지 강도가 증가하였고, 시멘트의 함유량이 높을수록 강도가 크게 증가하였다.



(a) 주입재 4% 첨가시료



(b) 주입재 8% 첨가시료

그림 4.3 세립분 15%일 때 재령에 따른 일축압축강도 결과

(4) 재령에 따른 일축압축강도실험의 종합결론

재령에 따른 종합결론을 도출하기 위해서 다중회귀분석을 사용하였다. 다중회귀분석이란 종속변수(y , 일축압축강도)와 다수의 독립변수($X_1 =$ 세립분, $X_2 =$ 바이오주입재, $X_3 =$ 시멘트)가 서로 인과관계를 가질 때 독립변수가 변화함에 따라 종속변수에 미치는 영향을 규명하는 통계기법이다. 본 연구에서 사용된 재료인 흙과 물은 모든 공시체에서 동일한 조건이기 때문에 독립변수에서 제외하였다. 따라서 흙과 물로 처리된 무처리의 시료는 종속변수에서 제외하였다.

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

재령 7일에 따른 공시체의 다중회귀분석 결과, r^2 는 0.98로 다수의 독립변수 값이 종속변수의 변동량에 98%의 높은 정확도를 나타내며, 추정된 회귀계수 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. 재령 7일에 따른 회귀분석 결과는 표 4.4와 같고 표를 통하여 식 (4.1)의 회귀식을 얻었다.

표 4.4 재령 7일에 따른 회귀분석 결과

항목 \ 통계	계수	표준오차	t값	P값
일축압축강도(kPa)	-38.57	29.19	-1.32	0.20
세립분(g)	4.3	0.51	8.47	5.99×10^{-9}
바이오주입재(g)	21.8	1.82	11.97	4.44×10^{-12}
시멘트(g)	49.1	1.67	29.32	1.89×10^{-21}

$$q_u = 4.3F + 21.8B + 49.1C - 38.57 \quad (4.1)$$

여기서, q_u = 일축압축강도(kPa)

F = 미세립분(g)

B = 바이오주입재(g)

C = 시멘트(g)

재령 28일에 따른 공시체의 다중회귀분석 결과, r^2 는 0.96으로 다수의 독립변수 값이 종속변수의 변동량에 96%의 높은 정확도를 나타내며, 추정된 회귀계수 X_1, X_2, X_3 의 P 값이 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. 재령 28일에 따른 회귀분석 결과는 표 4.5와 같고 표를 통하여 식 (4.2)의 회귀식을 얻었다.

표 4.5 재령 28일에 따른 회귀분석 결과

항목 \ 통계	계수	표준오차	t값	P 값
일축압축강도(kPa)	-71.0	47.89	-1.48	0.15
세립분(g)	5.1	0.84	6.07	2.03×10^{-6}
바이오주입재(g)	26.2	2.98	8.78	2.95×10^{-9}
시멘트(g)	58.7	2.75	21.37	5.13×10^{-18}

$$q_u = 5.1F + 26.2B + 58.7C - 71 \quad (4.2)$$

여기서, q_u = 일축압축강도(kPa)

F = 미세립분(g)

B = 바이오주입재(g)

C = 시멘트(g)

재령 7일에서 각각의 종속변수인 세립분, 바이오주입재, 시멘트의 계수는 4.3, 21.8, 49.1로 영향을 가장 크게 미치는 계수는 시멘트임을 확인하였고, 재령 28일로 시간이 경과함에 따라 세립분, 바이오주입재, 시멘트의 계수는 5.1, 26.2, 58.7로 재령 7일과 동일하게 일축압축강도에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 시멘트임을 확인하였다.

그림 4.4와 같이 재령에 따른 일축압축강도 결과, 낮은 주입재 중량에서는 바이오주입재로 재령된 공시체가 시멘트로 재령된 공시체 보다 높은 강도 증진효과를 나타내었는데, 이는 소량에서는 시멘트의 수화반응과 포졸란 반응이 미미한 것으로 나타났다 (전상주, 2013).

높은 주입재 중량에서는 바이오주입재로 재령된 공시체보다 시멘트로 재령된 공시체에서 높은 강도를 나타내었는데, 이는 시멘트에서 수화반응과 포졸란 반응에 의해 양생기간이 증가함에 따라 무처리, 바이오주입재 공시체의 강도 증가보다 높은 폭의 강도 증진효과를 나타냈다.

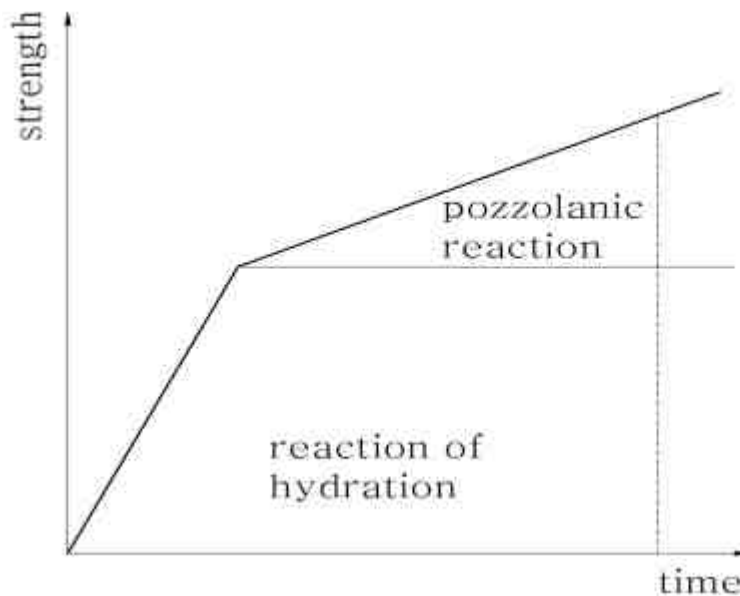


그림 4.4 시멘트의 포졸란 반응에 의한 강도 개선(Park et al., 2013)

4.1.2 세립분과 중량비에 따른 일축압축강도실험 결과

표 4.6은 세립분과 중량비에 따른 일축압축강도 측정 결과이다. 실험결과, 무처리의 경우 세립분의 함유량이 5%와 15%로 증가할수록 일축압축강도는 7일에서 10%와 24%로 증가하였고, 28일에서는 4%와 20%로 증가하였다.

시멘트비가 주입재 중량비 4%일 때 세립분의 함유량이 증가함에 따라 7일에서는 13%와 26%로 증가하였고, 28일에서는 15%와 27%로 증가하였다. 주입재 중량비 8%일 때 세립분의 함유량이 증가함에 따라 7일에서는 5%와 22%로 증가하였고, 28일에서는 7%와 22%로 증가하였다.

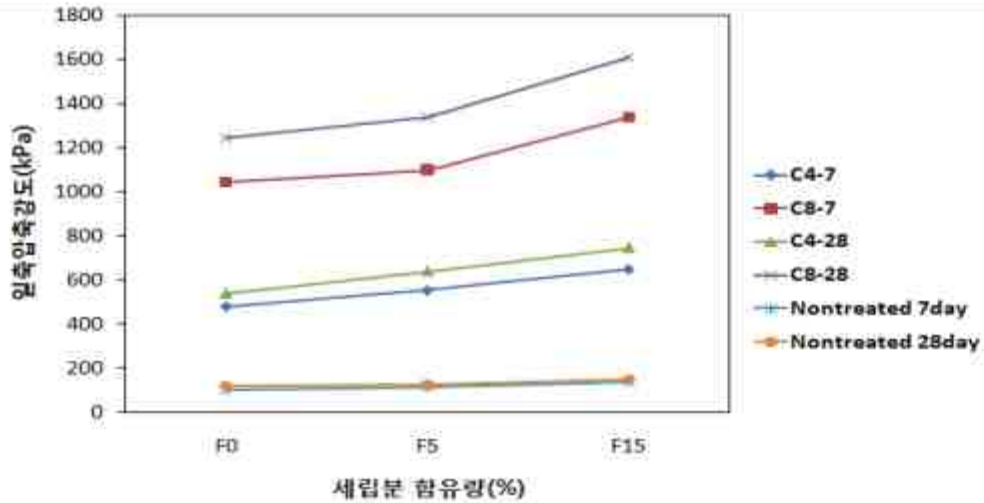
바이오주입재의 경우 주입재 중량비 4%일 때 세립분의 함유량이 증가함에 따라 7일에서는 13%와 26%로 증가하였고, 28일에서는 13%와 24%로 증가하였다. 주입재 중량비 8%일 때 세립분의 함유량이 증가함에 따라 7일에서는 4%와 22%로 증가하였고, 28일에서는 13%와 24%로 증가하였다.

이와 같은 결과는 박성식과 최선규(2011)과 유사한 경향을 확인하였고, 세립분으로 인한 강도증가는 세립분이 조립분 사이를 채우면서 단위중량이 증가한 것으로 나타났다. 또한 실트함유량이 증가함에 따라 액상화에 대한 저항강도가 증가한다는 연구가 다수 발표된 바 있다(Fei, 1991; Law and Ling, 1992; Koester, 1994).

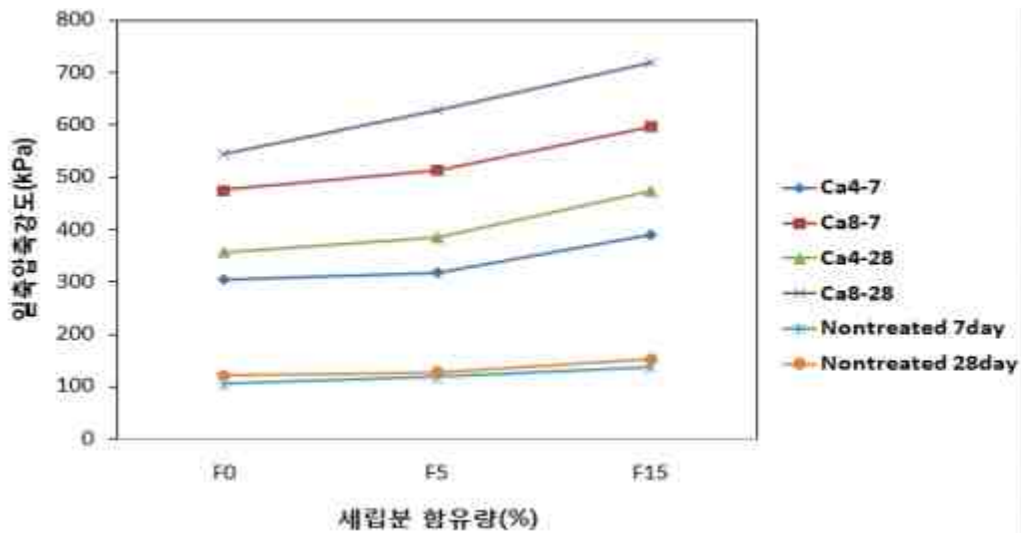
표 4.6 세립분에 따른 일축압축강도 결과

공시체	일축압축강도(kPa)			공시체	일축압축강도(kPa)		
	F0	F5	F15		F0	F5	F15
Non-7	104	117	137	Non-28	121	126	151
C4-7	480	554	652	C4-28	542	643	748
C8-7	1,047	1,100	1,339	C8-28	1,244	1,338	1,609
Ca4-7	304	317	389	Ca4-28	357	385	473
Ca8-7	475	513	597	Ca8-28	545	627	718

그림 4.5(a)와 4.5(b)의 결과와 같이 시멘트와 바이오주입재의 중량비가 4%에서 8%로 증가함에 따라 세립분 함유량에 관계없이 일축압축강도는 증가하였고, 세립분이 없는 공시체보다 세립분이 포함된 경우에서 시멘트비의 증가에 따른 강도증가율이 높게 나타났다.



(a) Cement specimens



(b) $CaCO_3$ specimens

그림 4.5 세립분 함유량에 따른 일축압축강도 비교

4.1.3 바이오주입재의 혼합 비율에 따른 일축압축강도실험 결과

중량비가 높은 시멘트의 경우 수화반응과 포졸란 반응으로 인한 강도효과가 확연히 나타나지만, 미생물에 의해 생성된 바이오주입재의 경우 수화반응과 포졸란 반응 없이 수분증발에 의한 결합 강도를 가진다. 따라서 시멘트와 혼합하여 시멘트 양을 줄이면서 최적의 효율을 갖는 혼합비를 찾고자 다음과 같이 시멘트 대비 1:9, 3:7, 5:5의 비를 혼합하여 일축압축강도를 측정하였다.

표 4.7에서 나타낸 일축압축강도는 재령에 따른 공시체의 시멘트 강도 대비 CaC4%, CaC8% 각각 F0, F5, F15의 6가지 공시체 강도를 합하여 6으로 나눈 평균값이다.

측정결과, CaC 1:9의 주입재 중량비 4%일 때 세립분의 함유량이 증가함에 따라 7일에서는 15%와 28%로 증가하였고, 28일에서는 7%와 25%로 증가하였다. 주입재 중량비 8%일 때 세립분의 함유량이 증가함에 따라 7일에서는 7%와 20%로 증가하였고, 28일에서는 6%와 23%로 증가하였다.

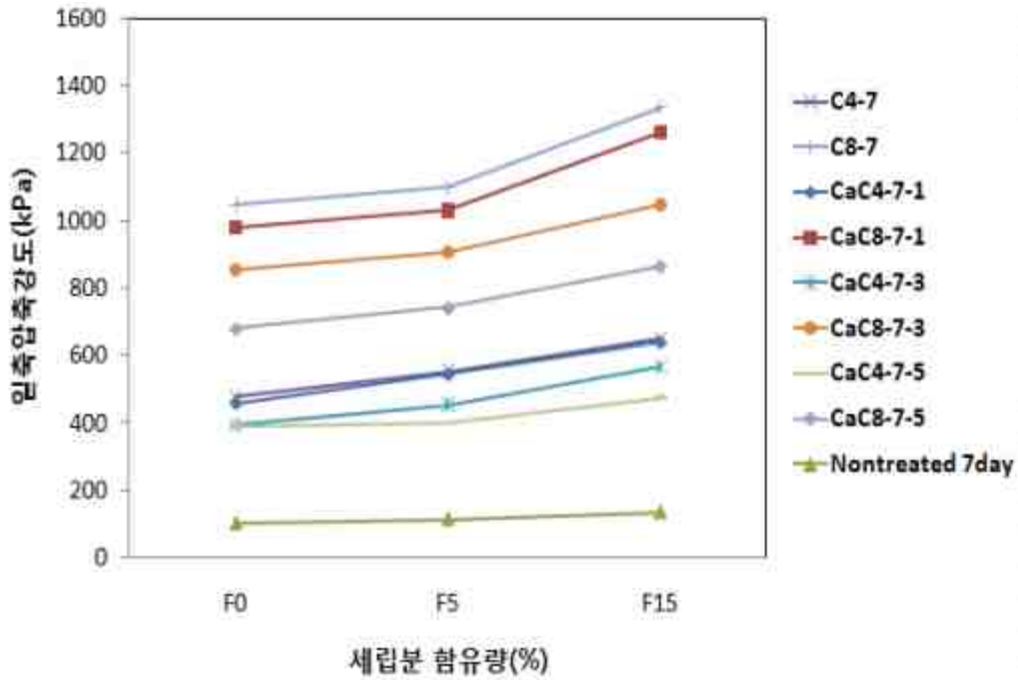
CaC 3:7의 주입재 중량비 4%일 때 세립분의 함유량이 증가함에 따라 7일에서는 6%와 18%로 증가하였고, 28일에서는 8%와 22%로 증가하였다. 주입재 중량비 8%일 때 세립분의 함유량이 증가함에 따라 7일에서는 8%와 21%로 증가하였고, 28일에서는 8%와 22%로 증가하였다.

CaC 5:5의 주입재 중량비 4%일 때 세립분의 함유량이 증가함에 따라 7일에서는 2%와 17%로 증가하였고, 28일에서는 8%와 19%로 증가하였다. 주입재 중량비 8%일 때 세립분의 함유량이 증가함에 따라 7일에서는 8%와 21%로 증가하였고, 28일에서는 4%와 20%로 증가하였다.

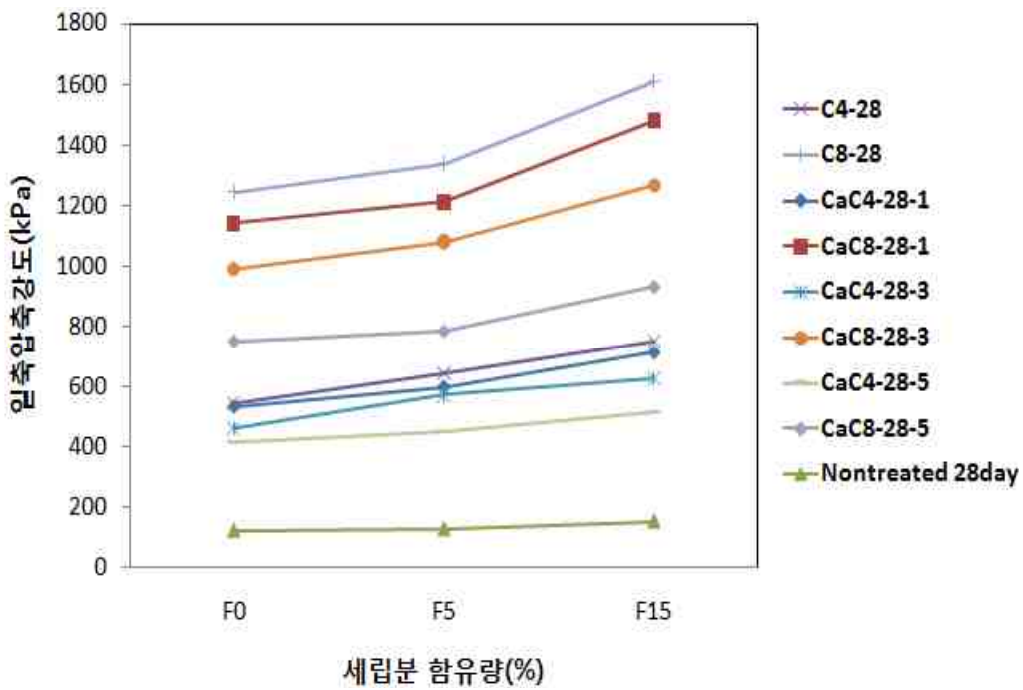
표 4.7 바이오주입재 혼합 비율에 따른 일축압축강도 결과

공시체	일축압축강도(kPa)			공시체	일축압축강도(kPa)		
	F0	F5	F15		F0	F5	F15
CaC4-7-1	460	545	640	CaC4-28-1	534	600	713
CaC4-7-3	396	455	567	CaC4-28-3	459	567	622
CaC4-7-5	393	401	476	CaC4-28-5	415	448	513
CaC8-7-1	983	1,032	1,263	CaC8-28-1	1,140	1,210	1,479
CaC8-7-3	856	908	1,048	CaC8-28-3	989	1,080	1,265
CaC8-7-5	681	742	865	CaC8-28-5	748	782	931

그림 4.6(a)와 4.6(b)에 나타난 바와 같이 재령 7일 시멘트 강도 대비 바이오주입재:시멘트의 비가 1:9일 경우 약 95.8%, 3:7일 경우 약 82.4%, 5:5일 경우 약 70.6%의 일축압축강도가 발현되었다. 재령 28일 시멘트 강도 대비 바이오주입재:시멘트 비가 1:9일 경우 약 93.5%, 3:7일 경우 약 82.5%, 5:5일 경우 약 65.2%의 일축압축강도를 나타내었다. 따라서 바이오주입재 10% 첨가시 시멘트 강도 대비 약 5% 감소하는 경향을 나타내었으며, 배합하여 사용하기 위해서는 3:7의 비가 효과적인 것으로 나타났다.



(a) 시멘트 대비 바이오주입재 혼합에 따른 7일 일축압축강도 결과



(b) 시멘트 대비 바이오주입재 혼합에 따른 28일 일축압축강도 결과
 그림 4.6 시멘트 대비 바이오주입재 혼합에 따른 일축압축강도 결과

4.2 바이오그라우팅공법 주입실험 결과

4.2.1 단층토 바이오그라우팅실험 결과

(1) 표준사

공기 압축기 주입을 통한 (D)150mm × (H)200mm 표준사 주입실험은 공시체를 제작 후 배수가 원활히 진행될 수 있도록 공시체 하단부에 배수망을 설치하였으며, 직경 8mm의 분사관을 통해 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액을 1:1 비율로 장비를 통해 주입하였다. 미생물 용액 2,000ml과 염화칼슘 수용액 2,000ml을 2액 1공정 장비를 이용하여 100kPa의 공기압으로 주입 후 24시간 동안 300kPa의 공기압으로 공기건조를 하였으며, 상온에서 72시간 동안 자연건조 후 강도를 측정하였다.

본 실험에서는 직경 8mm의 분사관에 주입장비를 통하여 주입한 결과, 그림 4.7과 같이 나타났다. 실험결과, 바이오주입재의 침전으로 인한 흙의 고결화 작용으로 약 80mm 두께의 고결범위가 나타났으며, 고결되어진 상부 표면에 포켓관입시험기 관입을 통하여 강도를 측정한 결과, 공시체의 강도는 320kPa의 강도를 나타냈다. 주입관의 하단부는 시료(모래)로 채워져 있었으며, 상단부는 주입관 주변에 많은 양의 바이오주입재가 생성됨을 확인하였다.



(a) 고결범위



(b) 강도측정

그림 4.7 표준사 시료에 대한 바이오그래우팅 결과

표 4.8 표준사에 대한 바이오그라우팅 XRD 분석표

Ref. code	Score	Compound name	Scale factor	Chemical formula
01-086-1560	66	Quartz	0.849	SiO_2
00-041-1480	50	Albite, calcian, ordered	0.121	Al_3O_8
00-022-0675	46	Microcline, intermediate	0.096	$KAlSi_3O_8$
01-072-1652	16	Calcite	0.019	$CaCO_3$

(2) SP 시료

공기 압축기 장비주입을 통한 (D)150mm × (H)200mm SP시료 주입실험은 공시체를 제작 후 배수가 원활히 진행될 수 있도록 공시체 하단부에 배수망을 설치하였으며, 직경 8mm의 분사관을 통해 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액을 1:1 비율로 장비를 통해 주입하였다. 미생물 용액 2,000ml과 염화칼슘 수용액 2,000ml을 2액 1공정 장비를 이용하여 100kPa의 공기압으로 주입 후 24시간동안 300kPa의 공기압으로 공기건조 하였으며, 상온에서 72시간 동안 자연건조 후 강도를 측정하였다.

본 실험에서는 직경 8mm의 분사관에 주입장비를 통하여 주입한 결과, 그림 4.9와 같이 나타났다. 실험결과, 바이오주입재의 침전으로 인한 흙의 고결화 작용으로 약 110mm 두께의 고결범위가 나타났으며, 포켓관입시험기를 통해 강도를 측정한 결과, 공시체의 강도는 450kPa의 강도를 나타냈다.

주입관의 하단 부는 시료(모래)로 채워져 있었으며, 표준사 시료조건 보다 많은 양의 바이오주입재가 침전됨을 확인하였다. 표준사의 경우 시료의 간극이 주입재보다 커서 바이오주입재가 배수되어 버린 반면, SP시료에서는 간극이 주입재보다 작아 바이오주입재가 많이 침전됨을 확인하였다.



(a) 고결범위



(b) 강도측정

그림 4.9 SP시료에 대한 바이오그라우팅 결과

그림 4.10과 표 4.9의 XRD 분석결과, 공시체의 시료는 주로 석영(Quartz)으로 이루어져 있으며, 기타 광물과 함께 미소량의 탄산칼슘(Calcite)의 광물의 침전을 확인하였고, 광물의 함유량에 따라 척도인자(Scale factor)가 높아짐을 확인하였다.

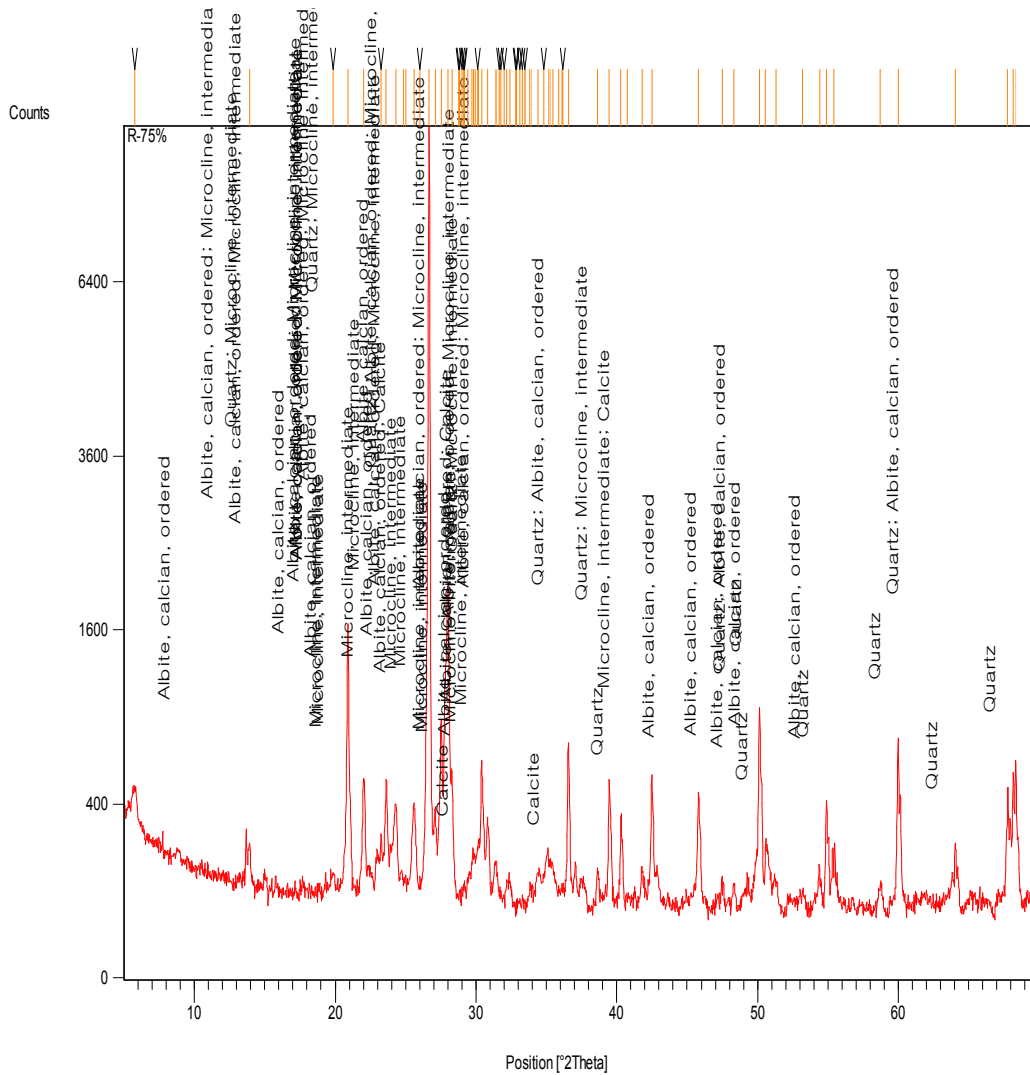


그림 4.10 SP시료에 대한 바이오그라우팅 XRD 분석 결과

표 4.9 SP시료에 대한 바이오그라우팅 XRD 분석표

Ref. code	Score	Compound name	Scale factor	Chemical formula
01-078-2315	64	Quartz	0.974	$Si O_2$
00-041-1480	51	Albite, calcian, ordered	0.179	$Al_3 O_8$
00-022-0675	42	Microcline, intermediate	0.144	$KAlSi_3 O_8$
00-047-1743	16	Calcite	0.035	$Ca CO_3$

(3) SW 시료

공기 압축기 장비주입을 통한 (D)150mm × (H)200mm SW시료 주입실험은 공시체를 제작 후 배수가 원활히 진행될 수 있도록 공시체 하단부에 배수망을 설치하였으며, 직경 8mm의 분사관을 통해 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액을 1:1 비율로 장비를 통해 주입하였다. 미생물 용액 2,000ml과 염화칼슘 수용액 2,000ml을 2액 1공정 장비를 이용하여 100kPa의 공기압으로 주입 후 24시간동안 300kPa의 공기압으로 공기건조를 하였으며, 상온에서 72시간 동안 자연건조 후 강도를 측정하였다.

본 실험에서는 직경 8mm의 분사관에 주입장비를 통하여 주입한 결과, 그림 4.11과 같이 나타났다. 실험결과, 바이오주입제의 침전으로 인한 흙의 고결화 작용으로 약 150mm 두께의 고결범위가 나타났으며, 포켓관입시험기를 통해 강도를 측정한 결과, 공시체의 강도는 400kPa의 강도를 발휘하였다.

주입관의 하단 부는 시료(모래)로 채워져 있었고, 바이오주입제의 침전은 그림 4.11(a)와 같이 공시체의 주변에 백색의 띠를 형성하며, 바이오주입제가 주입됨을 확인하였다.



(a) 주입후 바이오주입재 모습



(b) 고결범위

그림 4.11 SW시료에 대한 바이오그라우팅 결과

그림 4.12와 표 4.10의 XRD 분석결과, 공시체의 시료는 주로 석영(Quartz)으로 이루어져 있으며, 기타 광물과 함께 미소량의 탄산칼슘(Calcite)의 광물의 침전을 확인하였고, 광물의 함유량에 따라 척도인자(Scale factor)가 높아짐을 확인하였다.

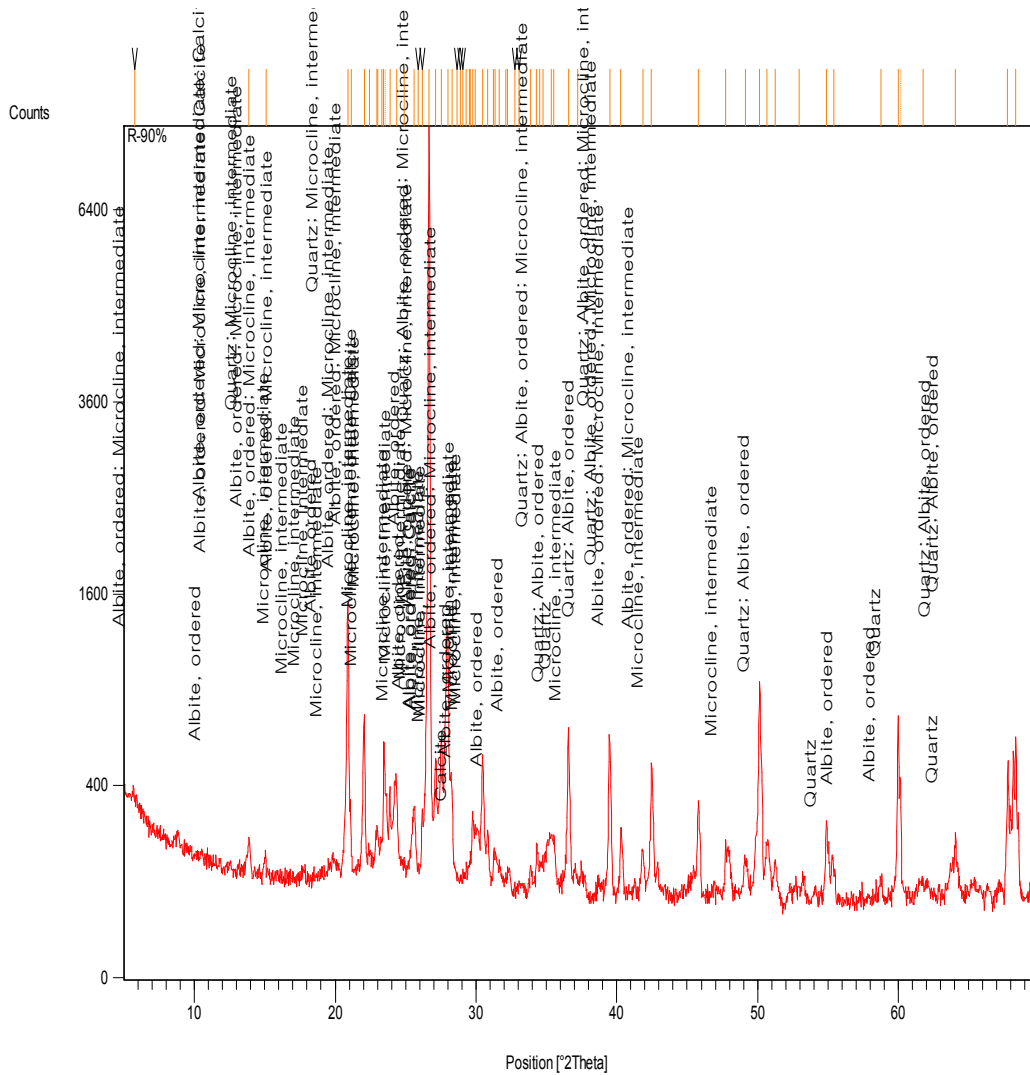


그림 4.12 SW시료에 대한 바이오그라우팅 XRD 분석 결과

표 4.10 SW시료에 대한 바이오그라우팅 XRD 분석표

Ref. code	Score	Compound name	Scale factor	Chemical formula
01-085-0794	64	Quartz	1.007	$Si O_2$
00-020-0554	49	Albite, ordered	0.130	$Na Al Si_3 O_8$
00-019-0932	52	Microcline, intermediate	0.080	$K Al Si_3 O_8$
01-072-1937	16	Calcite	0.008	$Ca CO_3$

(4) 단층토 시료에 대한 바이오그라우팅 종합결론

단층토 바이오그라우팅 실험결과를 표 4.11과 같이 요약하였다. SW시료의 경우 구근형성의 고결범위가 큰 이유는 바이오그라우팅 효과가 아닌 겔보기 점착력으로 건조가 완전히 되지 않아 구근이 형성된 것으로 나타났다. Sand시료의 경우 바이오주입재가 상당히 미립하고 공시체의 간극이 주입재보다 크기 때문에 주입되는 즉시 배수되어 버리는 현상을 나타내었다.

Sand, SW, SP시료 중 SP시료에서 주입 효율성이 가장 높은 것으로 분석되었다. 이는 바이오그라우팅 기술이 지반의 간극상태와 크기에 밀접한 관련이 있음을 확인하였고, 흙 입자가 비교적 일정하고 지반의 간극이 고른 SP지반에서 주입효율이 높음을 확인하였다.

표 4.11 단층토에 대한 고결범위와 고결강도 측정 결과

공시체	고결범위(cm)	고결강도(kPa)
Sand	8	320
SW	15	400
SP	11	450

4.2.2 다층토 바이오그라우팅실험 결과

(1) 다층토 A실험(상 SW, 하 SP)

장비주입을 통한 (D)150mm × (H)300mm 다층토 A실험은 상층에는 SW시료, 하층에는 SP시료를 이용하여 공시체를 제작하였으며, 원활한 배수를 위해 공시체 상, 하단을 기준으로 50mm에 사질토를 이용한 배수층을 그림 4.13과 같이 각각 포설하였다.



(a) 단면도



(b) 시료설치

그림 4.13 다층토 A실험 공시체 전경

직경 8mm의 분사관을 통해 미생물 용액 2,000ml과 염화칼슘 수용액 2,000ml을 2액 1공정 장비를 이용하여 100kPa의 공기압으로 주입하였다. 24시간 동안 300kPa의 공기압으로 공기건조 후 상온에서 72시간 동안 자연건조하여 강도를 측정하였다.

본 연구에서는 직경 8mm의 분사관에 주입장비를 통하여 주입한 결과, 그림 4.14와 같이 바이오주입제의 침전으로 인한 흙의 고결화 작용으로 약 170mm 두께의 고결범위가 나타났다. 포켓관입시험기를 통해 강도를 측정한 결과, 공시체의 분사관에서 15mm 떨어진 지점에서는 500kPa의 강도가 나타났고, 35mm지점에서는 200kPa, 55mm 지점에서는 100kPa의 강도가 나타났다. 이는 분사관 주변에서 가까울수록 강도는 높아

지며 멀어질수록 강도는 낮아졌다.

다층토 A실험은 하층이 SP시료로 배수가 원활히 진행되어 바이오그라우팅 주입은 어려움 없이 진행되었다. 단층토와 같이 분사관 주변에 바이오주입재가 침전됨을 확인하였고, 보다 많은 양을 주입한다면 고결범위와 고결강도가 더욱 증가할 것으로 나타났다.



(a) 고결범위



(b) 상부 표층 강도측정



(c) 하부 시료 강도측정



(b) 바이오주입재 침전 모습

그림 4.14 다층토 A실험에 대한 바이오그라우팅 결과

(2) 다층토 B실험(상 SP, 하 SW)

장비주입을 통한 (D)150mm × (H)300mm 다층토 B실험은 상층에는 SP시료, 하층에는 SW시료를 이용하여 공시체를 제작하였다. 원활한 배수를 위해 공시체 하단을 기준으로 50mm에 사질토를 이용한 배수층을 설치하여 실험을 수행하였으나, 오버플로 현상과 상부층 SP시료의 과포화 현상으로 주입시 어려움을 확인하였다.

오버플로 현상, 상층 SP시료의 과포화 현상, 배수가 원활히 되지 않는 문제점을 보완하기 위해 그림 4.15와 같이 상단에는 점토를 차수층으로 포설하였으며, 공시체 하단에는 보다 원활한 배수를 위해 자갈층을 배수층으로 포설하였다.



(a) 단면도



(b) 시료설치

그림 4.15 다층토 B실험 공시체 전경

실험결과, 그림 4.16과 같이 약 150mm 두께의 고결범위가 나타났다. 포켓관입시험기를 통해 강도를 측정된 결과, 공시체의 분사관에서 15mm, 35mm, 55mm 떨어진 지점에서 모두 500kPa의 강도가 나타났다. 이는 하부층이 SW시료로 주입이 원활하지 않고, 바이오주입재가 상당부분 오버플로 되어 상부층 전단면에 바이오주입재가 분사되면서 전체적으로 일축압축강도가 크게 나타났다.



(a) 고결범위



(b) 상부 표면 강도측정 A지점



(c) 상부 표면 강도측정 B지점



(d) 상부 표면 강도측정 C지점

그림 4.16 다층토 B실험에 대한 바이오그라우팅 결과

(3) 다층토 시료에 대한 바이오그라우팅 종합결론

다층토 바이오그라우팅 실험결과를 표 4.12와 같이 요약하였다. SP/SW의 다층토에서 SW/SP의 다층토 보다 높은 일축압축강도를 나타내었으나, 이는 하부층 SW시료의 간극이 작아 상부층 SP시료로 바이오주입재가 오버플로 되어 상부층 시료의 전단면에 강도가 나타났다.

하부층이 SP시료인 다층토의 경우 배수가 원활히 진행되어 바이오그라우팅 주입이 원활함을 확인하였고, 보다 많은 바이오주입재를 주입한다면 고결층 두께를 더욱 넓은 범위로 나타낼 수 있음을 확인하였다. 또한 SW/SP 다층토에서 주입노즐로부터 멀어지면 멀어질수록 강도의 효과는 감소하였는데, 이를 통해 다층토에서도 바이오그라우팅 기술이 지반의 간극상태와 크기에 밀접한 관련이 있음을 확인하였다.

표 4.12 다층토에 대한 고결범위와 고결강도 측정 결과

공시체	고결범위(cm)	일축압축강도(kPa)		
		A	B	C
SP/SW	15	500	500	500
SW/SP	17	500	200	100

4.2.3 바이오그라우팅의 주입률과 주입범위 결과

(1) 바이오그라우팅 후 시료의 고결화

주입률과 주입범위 측정은 주입노즐 주변으로 형성된 고결화 작용으로 고결범위를 평가하였다. 공기 압축기를 이용하여 150kPa의 압력으로 미생물 용액과 염화칼슘 수용액을 주입하였다. SP시료에서는 바이오주입재의 침전이 공시체 옆 표면으로 많은 양이 발생하여 그림 4.17(a)와 같이 아크릴 표면에 백색의 띠를 나타냄을 확인하였다. 그림 4.17은 SP시료의 상대다짐도(RC)에 따른 주입 후 고결모습을 나타냈다.

SW시료에서는 그림 4.18(a)와 같이 바이오주입재인 백색의 띠는 아크릴 표면에서 확인할 수 없었고, 주입이 원활하지 않아 바이오주입재가 오버플로 되어 시료 표면 상부에 쌓이는 현상을 확인하였다. 그림 4.18은 SW시료의 상대다짐도(RC)에 따른 주입 후 고결모습을 나타냈다.



(a) 주입 후 모습



(b) SP-70%



(c) SP-80%



(d) SP-85%



(e) SP-90%



(f) SP-95%

그림 4.17 SP시료에 대한 바이오그라우팅 결과



(a) 주입 후 모습



(b) SW-70%



(c) SW-80%

그림 4.18 SW시료에 대한 바이오그라우팅 결과

(2) 지반조건에 따른 주입률 평가

미생물 용액 2,000ml와 염화칼슘 용액 2,000ml로 총 4,000ml의 용액을 2액 1공정을 통해 공시체에 주입 후 주입이 되지 않은 용액의 무게를 측정하여 4,000ml에서 나눈 후 주입률을 백분율(%)로 측정하였다. 현장의 경우 500kPa~1,000kPa로 주입압력을 사용하지만 실험상 어려움이 있어 공기 압축기로 낮은 주입압인 150kPa로 주입하였다.

지반조건에 따른 주입률을 측정된 결과, 그림 4.19와 같이 나타났다. SW시료에서는 상대다짐도(RC) 70%에서 약 77%의 주입률을 보였고, 상대다짐도(RC) 80% 이상의 경우 주입률이 확연히 떨어짐을 확인하였으며, 상대다짐도(RC) 85%이상에서는 주입률이 10% 이하로 주입이 거의 불가능하였다. SP시료에서는 상대다짐도(RC) 70%~85%까지 100% 주입률을 나타내었고, 상대다짐도(RC) 85% 이상에서 주입률이 낮아짐을 확인하였다.

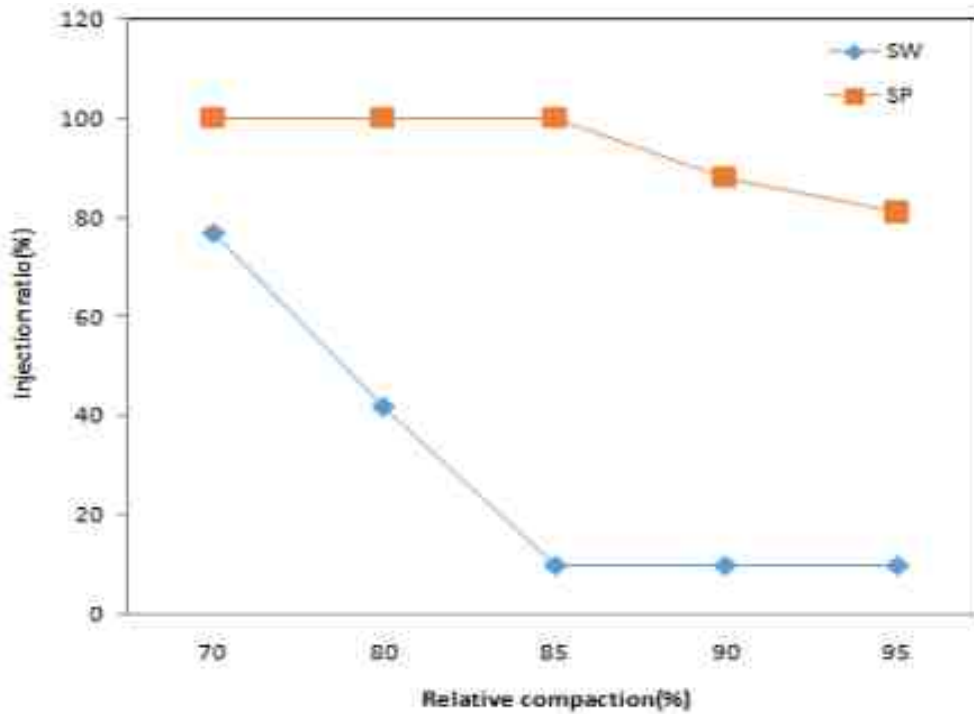


그림 4.19 지반조건에 따른 주입률 평가

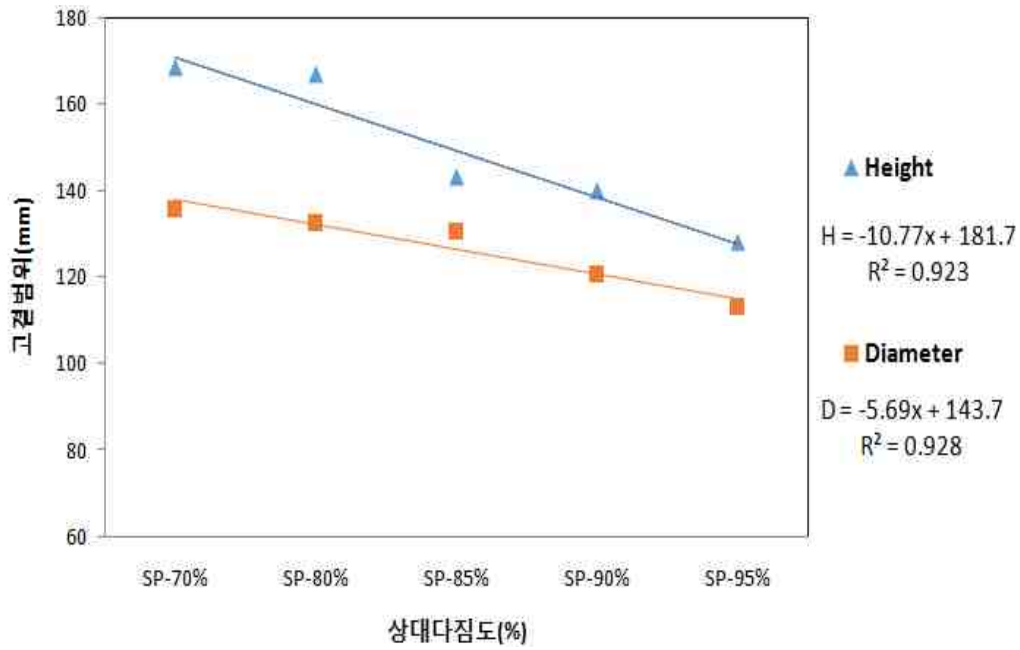
(3) 지반조건에 따른 고결범위와 강도평가

지반조건에 따른 바이오그라우팅 실험결과, 그림 4.20과 같이 포켓관입시험기를 통해 주입구 주변의 상부 표면에서 강도를 측정하였다.

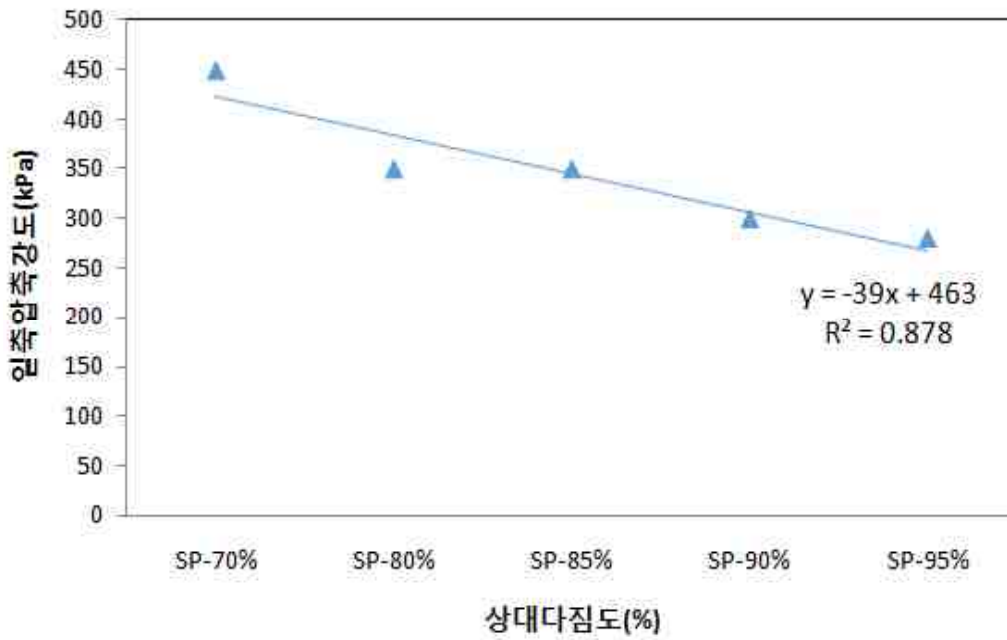


그림 4.20 일축압축강도 측정 모습

SP시료의 경우 그림 4.21(a)와 같이 상대다짐도(RC) 95%대비 상대다짐도(RC) 70%로 감소할수록 고결범위의 직경 $R^2 = 0.928$ 로 전체적인 지름은 약 20% 증가하였고, 고결범위의 높이 $R^2 = 0.923$ 으로 약 30% 증가하였다. 또한 그림 4.21(b)와 같이 포켓관입시험기를 통해 주입 노즐 상부 표면의 동일한 위치에서 강도를 측정한 결과, 고결강도의 경우 상대다짐도(RC) 95%대비 상대다짐도(RC) 70%로 감소할수록 고결강도 $R^2 = 0.878$ 로 약 40%로 강도가 증가하였다.



(a) 고결범위 측정 결과



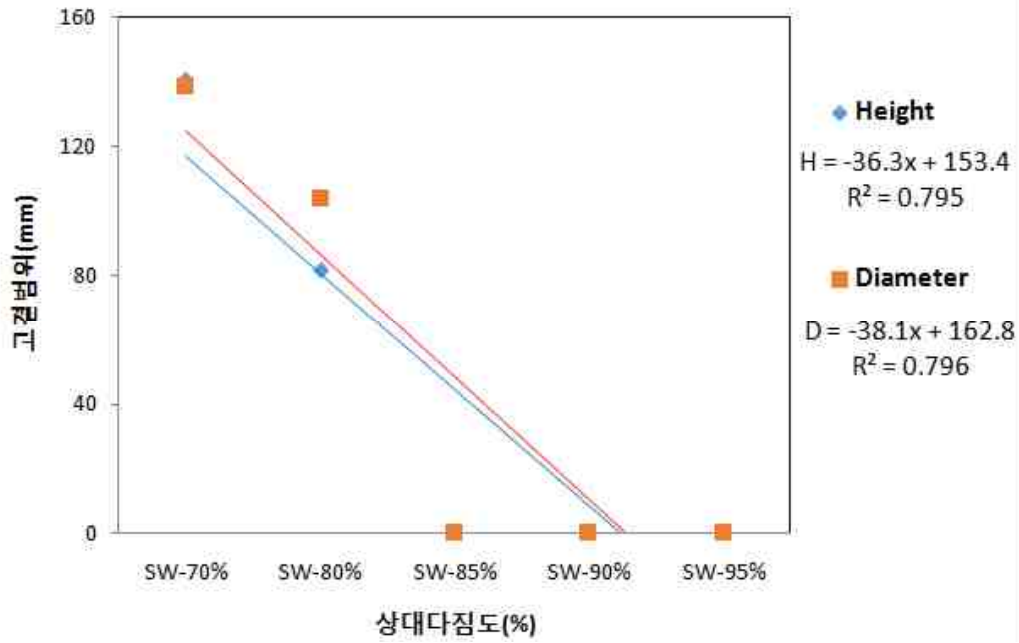
(b) 고결강도 측정 결과

그림 4.21 SP시료의 지반조건에 따른 고결범위와 고결강도 결과

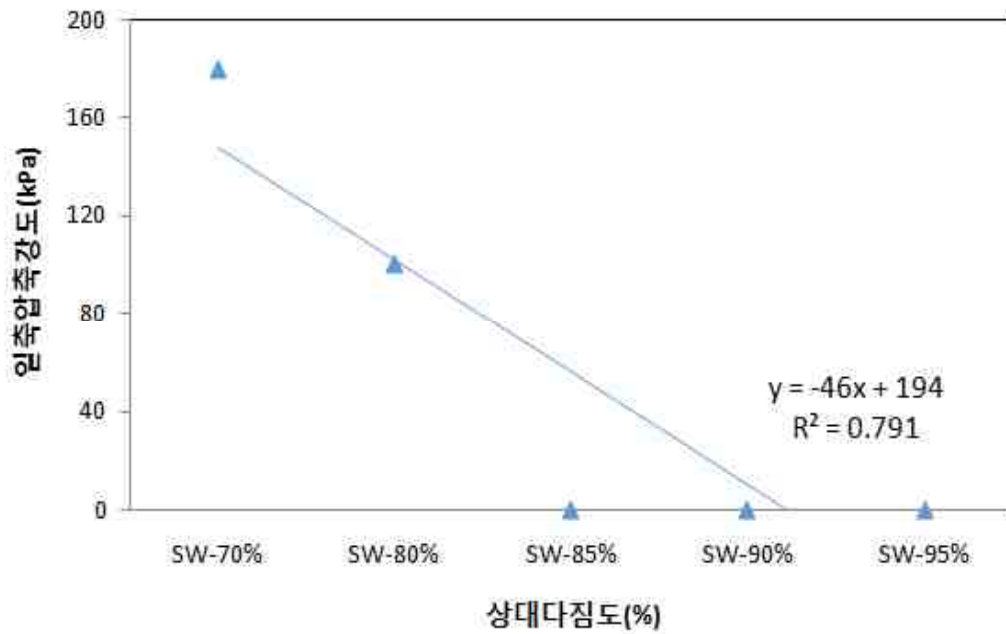
SW시료의 경우 그림 4.22(a)와 같이 상대다짐도(RC) 70% 공시체에서 바이오주입체의 침전으로 인한 흙의 고결화 작용으로 약 (D)138.5mm와 (H)140.5mm의 고결범위를 나타냈고, 일축압축강도 측정결과, 180kPa으로 SP시료에 비해 강도가 낮게 나타났다. 상대다짐도(RC) 80%의 공시체에서도 고결범위는 (D)104mm와 (H)82mm로 나타났고, 일축압축강도 측정결과, 100kPa의 강도를 나타내어 SP시료와 동일하게 상대적으로 상대다짐도(RC)가 감소할수록 고결범위의 직경은 약 25%, 높이는 약 60%로 증가하였다.

일축압축강도는 약 80%로 증가하였고, 상대다짐도(RC) 85% 이상에서는 주입률이 10%가 되지 않아 고결범위와 일축압축강도의 측정이 불가능하였다.

표 4.13은 지반조건에 따라 150kPa 주입압으로 바이오그라우팅을 수행할 경우 적용 가능한 지반에 대하여 나타내었다. 낮은 주입압에도 불구하고 SW시료의 상대다짐도(RC) 70% 이하에서 주입이 가능하였으며, SP시료의 경우 상대다짐도(RC) 95% 이하에서 주입이 가능함을 확인하였다. 사질토의 경우 침투주입이 가능하나, 점토의 경우 맥상주입을 하기 때문에 고압으로 사용하여야 하며 세립분이 많은 지역에서 바이오그라우트재를 사용할 경우 맥상주입이나 치환, 혼합하여 연약지반을 처리할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 고결범위 측정 결과



(b) 고결강도 측정 결과

그림 4.22 SW시료의 지반조건에 따른 고결범위와 고결강도 결과

표 4.13 바이오그라우팅 적용성 평가

구분		고결범위		일축압축강도 (kPa)	바이오그라우팅 적용성 평가
		직경 D(mm)	높이 H(mm)		
사 질 토	SP-70%	135.9	167.0	450	O
	SP-80%	132.5	167.1	350	O
	SP-85%	130.7	140.2	350	O
	SP-90%	120.8	143.1	300	O
	SP-95%	113.3	128.1	250	O
	SW-70%	138.5	140.5	180	O
	SW-80%	104	82	100	O
	SW-85%	-	-	-	X
	SW-90%	-	-	-	X
	SW-95%	-	-	-	X
실트, 점토		-	-	-	맥상주입, 치환, 혼합

4.2.4 바이오주입재와 시멘트 투수실험 결과

투수실험결과를 살펴보면, 표 4.14와 같이 무처리리 경우 약 $4.91 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 로 투수계수가 높음을 확인하였고, 시멘트의 경우 약 $6.98 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 로 무처리리 보다 약 60% 차수효과가 나타났다. 바이오주입재의 경우 약 $9.54 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 로 무처리리 보다 약 30% 차수효과가 나타났다.

바이오주입재(비표면적 $70,000 \text{cm}^2/\text{g}$)의 경우 시멘트(비표면적 $3,200 \text{cm}^2/\text{g}$)에 비해 상당히 미립한 입자이기 때문에 표준사의 간극을 통과하여 바이오주입재가 주입되는 즉시 배출되는 문제점이 있었다. 따라서 표준사의 경우 바이오주입재가 시멘트보다 낮은 차수효과를 나타냈으나, 무처리에 비해 약 30%의 차수효과를 나타내었고, 이는 Kim and Park(2013)과 유사한 결과를 나타냈다.

표 4.14 바이오주입재와 시멘트 투수실험 결과

시 료	처 리 방 법	통과량 (cm^3)	수두차 (cm)	시간 (s)	투수계수 (cm/s)
모 래	무처리리	280	10	300	4.91×10^{-2}
		283	10	300	4.93×10^{-2}
		275	10	300	4.88×10^{-2}
	시멘트	110	10	300	6.92×10^{-3}
		113	10	300	7.11×10^{-3}
		110	10	300	6.92×10^{-3}
	바이오주입재	205	10	300	9.75×10^{-3}
		200	10	300	9.44×10^{-3}
		200	10	300	9.44×10^{-3}
	CaC 1:9	125	10	300	7.86×10^{-3}
		125	10	300	7.86×10^{-3}
		120	10	300	7.54×10^{-3}
	CaC 3:7	135	10	300	8.49×10^{-3}
		140	10	300	8.81×10^{-3}
		140	10	300	8.81×10^{-3}
	CaC 5:5	165	10	300	1.04×10^{-2}
		168	10	300	1.06×10^{-2}
		165	10	300	1.04×10^{-2}

4.3 LW공법과 바이오그라우팅공법 비교

4.3.1 일축압축강도실험 결과

(1) OPC, Micro, 바이오주입재에 따른 일축압축강도 평가

OPC의 경우 1일 경과 후 630kPa로 나타났고, 7일 경과 후 1,350kPa, 28일 경과 후 1,680kPa로 나타났으며, Micro시멘트의 경우 초기 강도는 1,230kPa, 7일 경과 후 1,980kPa, 28일 경과 후 2,650kPa로 나타나 OPC보다 약 2배정도 높은 강도를 나타내었다. OPC와 Micro시멘트의 경우 시간경과에 의한 강도증가는 시멘트의 수화반응을 통하여 강도가 증가하였다.

바이오주입재의 경우 1일 경과 후 공시체 성형은 되지 않았으며, 7일 경과 후 110kPa, 28일 경과 후 350kPa로 나타났다. 자체적인 수화반응은 없으나 앞서 샌드궤에서와 마찬가지로 함수비가 증발함에 따라 바이오주입재의 수축으로 인해 강도가 나타났다. 이를 통해 바이오그라우팅을 사용하기 위해서는 차수의 목적을 가진 그라우팅으로 사용되어야 하며, 강도발현을 위해서는 추가적인 화학반응을 일으킬 수 있는 혼화재를 사용해야 한다. OPC, Micro, 바이오주입재의 시간 경과에 따른 일축압축강도를 비교한 결과, 그림 4.23과 표 4.15와 같다.

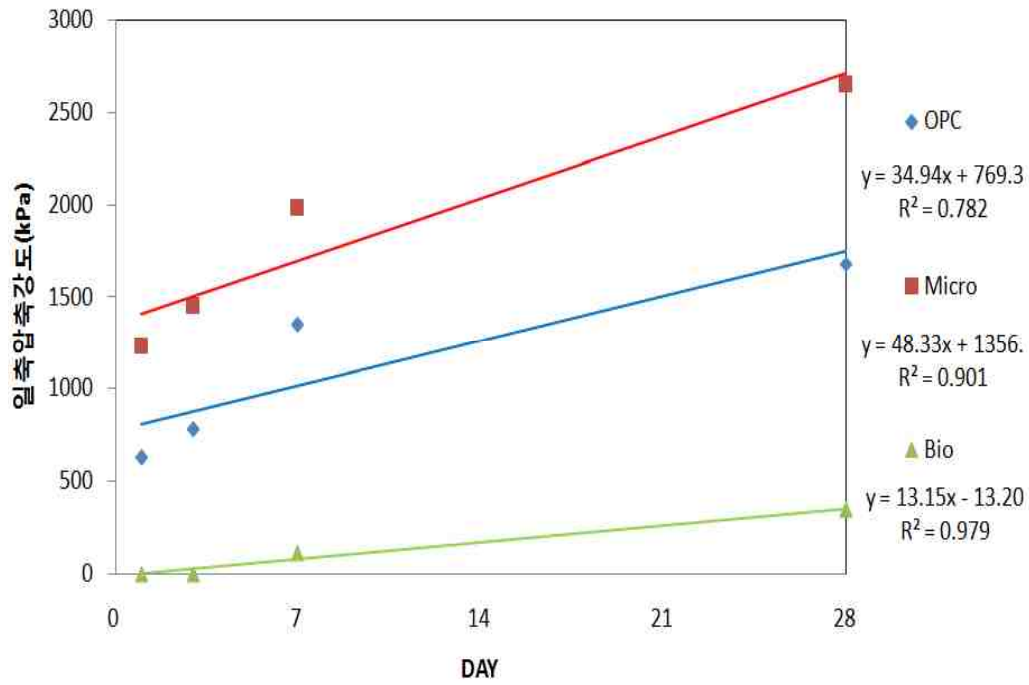


그림 4.23 OPC, Micro, 바이오주입재의 일축압축강도

표 4.15 OPC, Micro, 바이오주입재의 일축압축강도 결과

Curing time(day)	일축압축강도(kPa)		
	OPC	Micro	바이오주입재
1	630	1,230	-
3	780	1,450	100
7	1,350	1,980	110
28	1,680	2,650	300

(2) 규산소다 3호의 함유에 따른 OS, MS, BS의 일축압축강도 평가

OS의 경우 1일 경과 후 190kPa로 나타났고, 7일 경과 후 560kPa, 28일 경과 후 780kPa로 나타났으며, MS의 경우 1일 경과 후 420kPa, 7일 경과 후 1,050kPa, 28일 경과 후 1,730kPa로 나타나 OS보다 약 2배정도 높은 강도를 나타냈다. OS와 MS의 경우 시간경과에 따른 강도증가는 시멘트의 수화반응을 통하여 강도가 증가하였다. 그러나 OPC, Micro시멘트와의 강도를 비교하면 규산소다 3호가 들어간 공시체에서 확연히 강도가 낮아지는 결과를 확인하였다. 이는 규산소다 3호는 강도증진이 아닌 급결을 통해 차수의 목적으로 사용하는 재료이기 때문에 고결속도는 매우 빠르나, 수화반응으로 인해 공시체에 균열이 생겨 강도의 효과는 미미한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 이강호(2013)와 유사한 결과를 나타냈다.

바이오주입재의 경우 1일 경과 후 공시체 성형은 되지 않았으며, 7일 경과 후 580kPa, 28일 경과 후 980kPa로 나타나 자체적인 수화반응 반응은 없으나, 타 주입재에 비해 매우 미립한 바이오주입재가 규산소다 3호로 인하여 점착력이 생기는 것으로 확인되었으며, 재령에 따라 바이오주입재가 수축하면서 강도가 증가하는 것을 확인하였다. OPC, Micro, 바이오주입재에 규산소다 3호(S)를 넣은 주입재의 시간 경과에 따른 일축압축강도를 비교한 결과, 그림 4.24와 표 4.16과 같다.

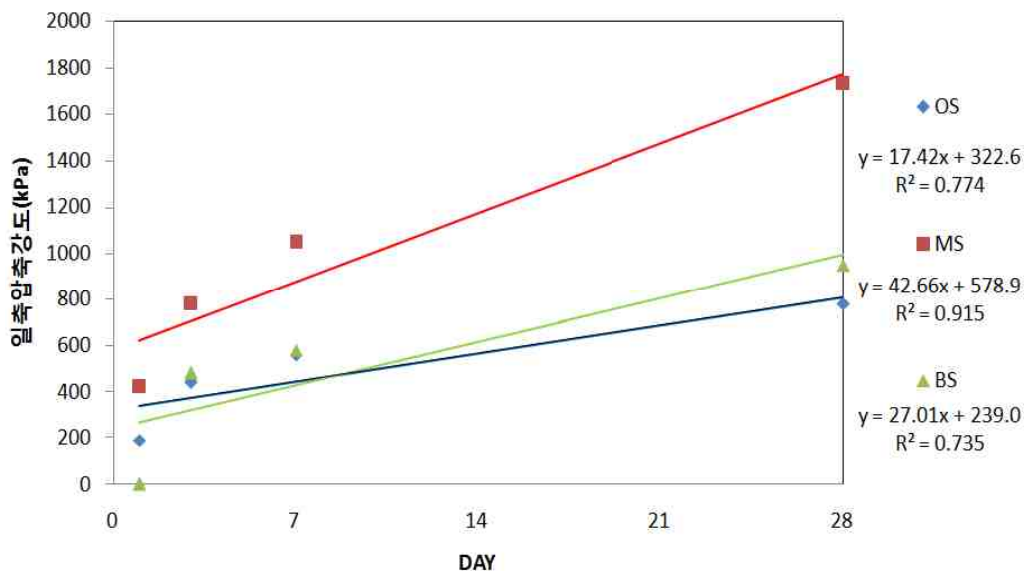


그림 4.24 규산소다 3호의 함유에 따른 OS, MS, BS의 일축압축강도

표 4.16 규산소다 3호의 함유에 따른 OS, MS, BS 일축압축강도 결과

Curing time(day)	일축압축강도(kPa)		
	OS*	MS**	BS***
1	190	420	-
3	440	780	480
7	560	1,050	580
28	780	1,730	950

<주> *OS = OPC 100% + 규산소다 3호

**MS = Micro 100% + 규산소다 3호

***BS = 바이오주입재 100% + 규산소다 3호

(3) OPC와 바이오주입재에 따른 일축압축강도 평가

일축압축강도 측정결과, OB-1(OPC+바이오주입재)에서 가장 큰 강도를 나타냈으며, OPC는 OB-1에 비해 약 15%의 강도가 감소하였다. 또한 OB-2[OPC(70%)+바이오주입재(30%)]를 사용한 경우 OPC의 강도 대비 약 15% 낮음을 확인하였다. 이런 결과는 샌드겔 측정결과와 유사한 결과로 바이오주입재 30%를 통해 약 15%의 강도증가를 나타냈다. OS의 경우 강도가 매우 낮았다.

바이오주입재의 경우 시멘트에 첨가 시 응결시간 촉진, 초기 강도가 증가하는 경향을 보이는데 이는 바이오주입재의 주성분인 탄산칼슘이 시멘트의 칼슘 실리케이트와 미소수화발열 반응을 통해 촉진되기 때문이다. 이러한 결과는 김도수와 노재성(2000)이 나타낸 결과와 유사함을 확인하였다. OPC와 OS, OB-1, OB-2의 일축압축강도를 비교한 결과, 그림 4.25와 표 4.17과 같다.

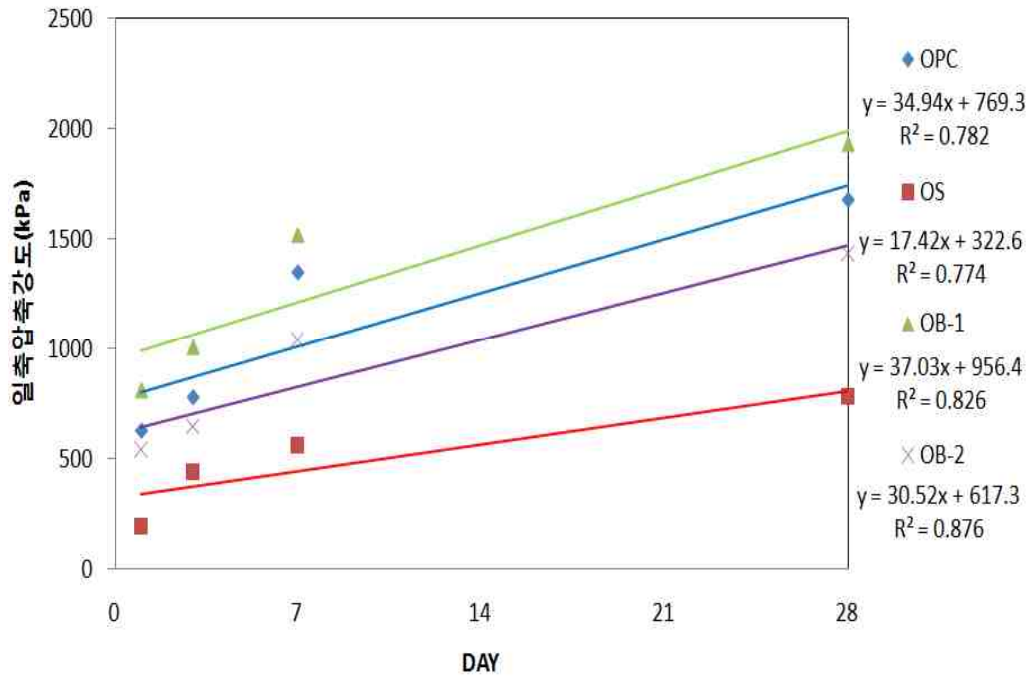


그림 4.25 OPC 개선에 따른 일축압축강도

표 4.17 OPC 개선에 따른 일축압축강도 결과

Curing time(day)	일축압축강도(kPa)			
	OPC*	OS**	OB-1***	OB-2****
1	630	190	810	540
3	780	440	1,010	650
7	1,350	560	1,520	1,040
28	1,680	780	1,930	1,430

<주> *OPC = OPC 100%

**OS = OPC 100% + 규산소다 3호

***OB-1 = OPC 100% + 바이오주입제 30%

****OB-2 = OPC 70% + 바이오주입제 30%

(4) Micro와 바이오주입재에 따른 일축압축강도 평가

일축압축강도 측정결과, MB-1(Micro+바이오주입재)에서 가장 큰 강도를 나타냈으며, Micro시멘트는 MB-1에 비해 약 15%의 강도가 감소하였다. 또한 MB-2[Micro(70%)+바이오주입재(30%)]를 사용한 경우 Micro시멘트의 강도 대비 약 15% 강도가 낮음을 확인하였다. 이런 결과는 샌드겔 측정 결과와 유사한 결과로 바이오주입재 30%를 통해 약 15%의 강도증가를 나타내었다. MS의 경우 강도가 매우 낮았다.

바이오주입재의 경우 시멘트에 첨가 시 응결시간 촉진, 초기 강도가 증가하는 경향을 보이는데 이는 바이오주입재의 주성분인 탄산칼슘이 시멘트의 칼슘 실리케이트와 미소수화발열 반응을 통해 촉진되기 때문이다. Micro와 MS, MB-1, MB-2의 일축압축강도를 비교한 결과, 그림 4.26과 표 4.18과 같다.

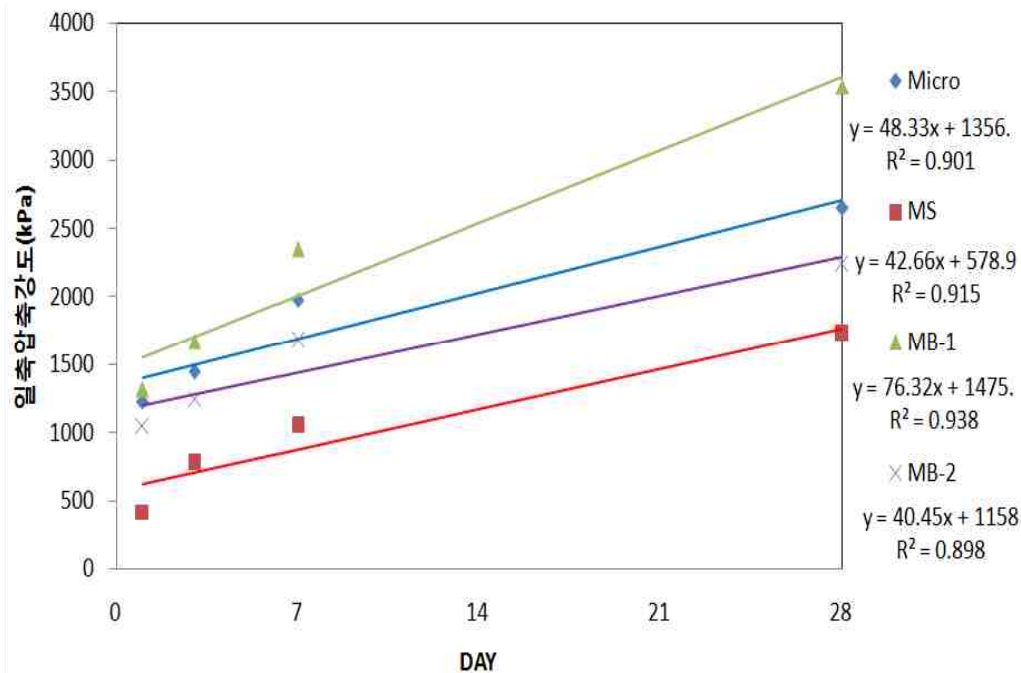


그림 4.26 Micro시멘트 개선에 따른 일축압축강도

표 4.18 Micro시멘트 개선에 따른 일축압축강도 결과

Curing time(day)	일축압축강도(kPa)			
	Micro*	MS**	MB-1***	MB-2****
1	1,230	420	1,320	1,040
3	1,450	780	1,670	1,250
7	1,980	1,050	2,350	1,680
28	2,650	1,730	3,540	2,240

<주> *Micro = Micro 100%

**MS = Micro 100% + 규산소다 3호

***MB-1 = Micro 100% + 바이오주입재 30%

****MB-2 = Micro 70% + 바이오주입재 30%

4.3.2 그라우팅실험 결과

본 실험에서는 바이오주입재와 기존 LW공법에서 사용되는 주입재의 혼합을 통해 SP시료에 대한 주입 적용성을 분석하였다. LW공법 적용시 문제가 되는 약액주입(OS와 MS) 대신에 바이오주입재를 사용하는 방법(OB-1과 MB-1)과 시멘트의 사용량을 30%절감 시킬 수 있는 혼화재(OB-2와 MB-2)를 사용하여 주입재별 시간경과에 따른 전단탄성계수를 측정하였다. 전단탄성계수를 측정하고자 비파괴 측정인 벤더엘리먼트를 사용하였으며, 전단탄성계수를 통해 고결정도를 분석하였다.

전단탄성계수란 탄성률의 일종으로 횡탄성계수, 횡탄성률, 강성률이라고도 하고, 탄성체에서는 전단응력에 대하여도 훅의 법칙이 성립하기 때문에 전단응력의 전단 휨에 대한 비를 말한다. 따라서 전단탄성계수로 훅에 대한 강성을 예측할 수 있다.

전단탄성계수는 벤더엘리먼트를 통해 시료를 통과한 전단파속도를 구하여 측정하였다. 기존 연구 사례(조계춘과 이인모, 2002)에 의하면 건조자갈의 경우 150m/s~500m/s, 건조모래의 경우 150m/s~200m/s의 전단파속도가 측정되었고, 상대밀도(D_R) 60%일 때 표준사의 경우 전단탄성계수는 80MPa의 전단탄성계수를 나타내었다. 주입재에 따른 전단파속도 대한 실험결과는 표 4.19와 같다.

표 4.19 주입재에 따른 전단파속도 측정 결과

주입 재료	양생기간 (day)	건조밀도 (kg/m ³)	전단파 속도 Vs(m/s)	전단탄성계수, G _{max} (MPa)
OS	7	1,673	179	54
	14	1,664	200	67
	21	1,660	269	120
	28	1,653	291	140
MS	7	1,681	207	72
	14	1,676	300	151
	21	1,672	321	172
	28	1,664	347	200
BS	7	1,667	176	12
	14	1,661	184	56
	21	1,658	204	69
	28	1,651	275	125
OB-1	7	1,627	289	136
	14	1,620	294	140
	21	1,613	318	163
	28	1,608	380	232
OB-2	7	1,616	181	53
	14	1,612	229	85
	21	1,610	309	154
	28	1,604	370	220
MB-1	7	1,658	325	175
	14	1,653	435	313
	21	1,647	483	384
	28	1,641	511	428
MB-2	7	1,644	265	115
	14	1,639	372	227
	21	1,631	450	330
	28	1,626	505	415

(1) 시간에 따른 전단탄성계수 측정 결과

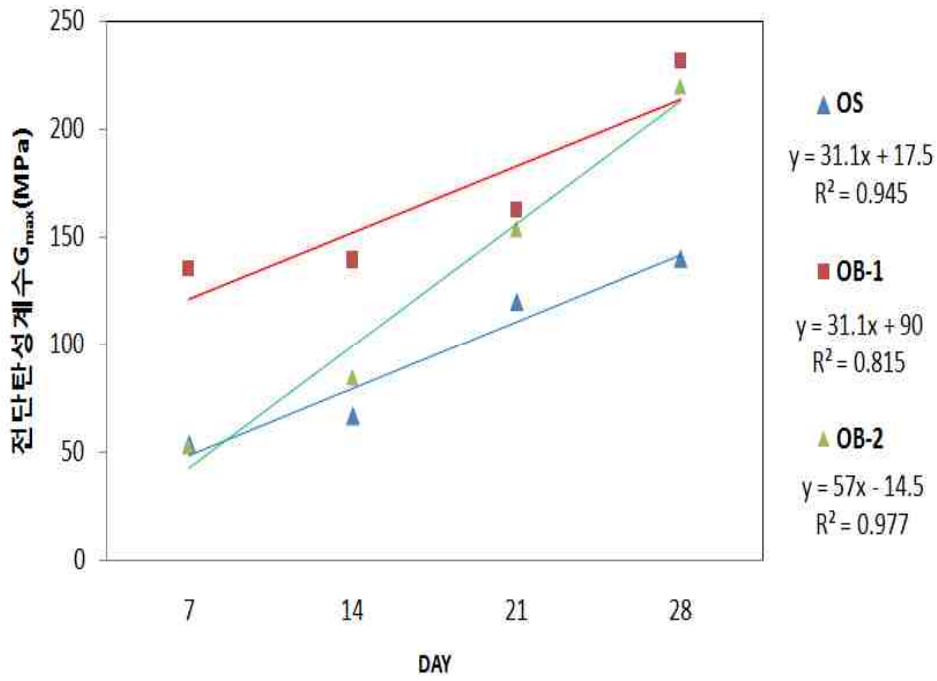
그림 4.27(a)는 OPC 주입재에 대한 전단탄성계수 분석결과이다. 시간이 경과함에 따라 전단탄성계수는 OS의 경우 약 30%, OB-1의 경우 10%, OB-2의 경우 약 40%의 전단탄성계수가 증가하였다.

그림 4.27(b)는 Micro 주입재에 대한 전단탄성계수 분석결과이다. 시간이 경과함에 따라 전단탄성계수는 MS의 경우 약 35%, MB-1의 경우 30%, MB-2의 경우 약 60%의 전단탄성계수가 증가하였다.

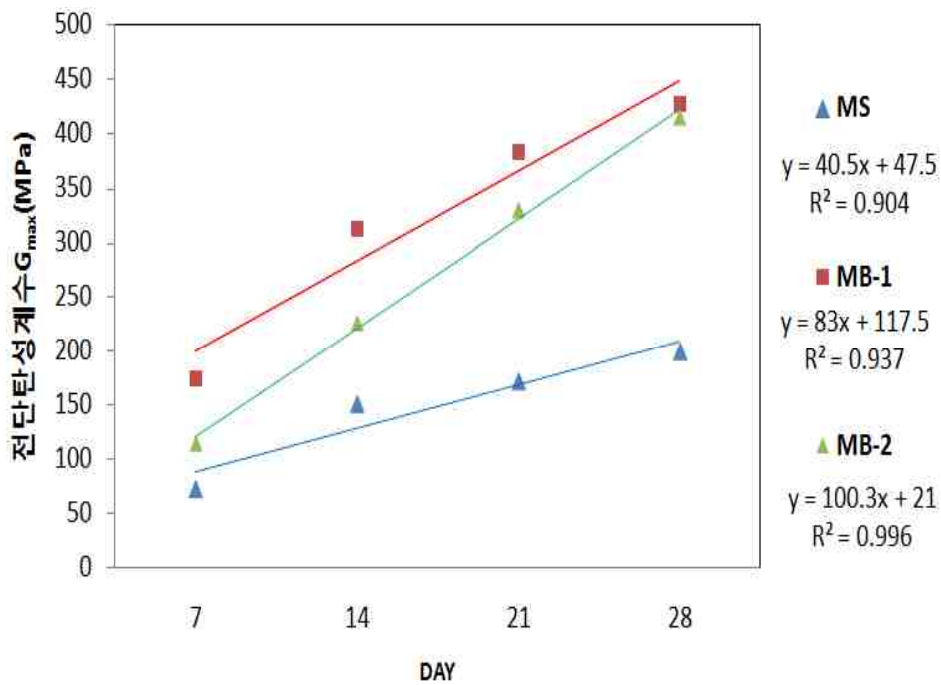
전단탄성계수 측정결과, 호모결의 결과와 마찬가지로 OB-1과 MB-1에서 가장 높은 전단탄성계수를 확인하였고, OS와 BS의 경우 가장 낮은 전단탄성계수를 확인하였다. 이는 규산소다 3호의 역할이 강도증진이 아닌 차수의 목적으로 사용되기 때문이며, OB-1과 MB-1의 경우 바이오주입재를 통해 높은 전단탄성계수를 확인하였다.

전단과 속도는 입자의 표면을 타고 지나가는 속도를 나타내며 따라서 입자의 고결화로 인해 공시체의 간극이 감소함에 따라 전단과 속도가 높아졌다. 또한 미립성분인 바이오주입재가 포함된 OB-1, MB-1에서 높은 전단탄성계수를 확인하였는데 이는 바이오주입재의 주성분인 탄산칼슘이 시멘트에 첨가됨에 따라 기공 분포변화에서 1 μ m 이상의 기공량이 감소되어 나타난 결과임을 김도수와 노재성(2000)을 통해 확인하였다.

따라서 바이오주입재만을 사용할 때에 전단탄성계수 증가는 미미하였으나, 시멘트, Micro시멘트에 혼화재로 사용될 경우 시멘트와 Micro시멘트에서 발생하는 수화반응과 바이오주입재의 주성분인 탄산칼슘과 시멘트의 성분인 칼슘 실리케이트의 미소수화발열 반응으로 인해 기존 주입재에 비해 높은 전단탄성계수를 나타냈다. 본 실험결과를 통하여 LW공법에 사용되는 규산소다 3호 대체재로 친환경재료인 바이오주입재의 적용성을 확인하였다.



(a) OPC 주입제에 따른 전단탄성계수 측정 결과



(b) Micro 주입제에 따른 전단탄성계수 측정 결과
 그림 4.27 전단탄성계수 측정 결과

(2) 주입실험의 전단파속도와 주입재의 일축압축강도의 상관관계

그림 4.28은 7일, 28일 양생 후 주입실험을 통한 전단파속도(m/s)와 주입재의 일축압축강도(kPa)의 상관관계를 나타내고 있다. 여섯 종류의 주입재에 대한 배합비는 양생 기간 동안 전단파속도와 일축압축강도의 관계가 비선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 식 (4.3)은 주입재에 따른 전단파속도(m/s)와 일축압축강도(kPa)의 상관관계를 수식으로 나타내었다.

$$\text{일축압축강도 (kPa)} = 0.019 V_s^{1.92} (m/s) \quad (4.3)$$

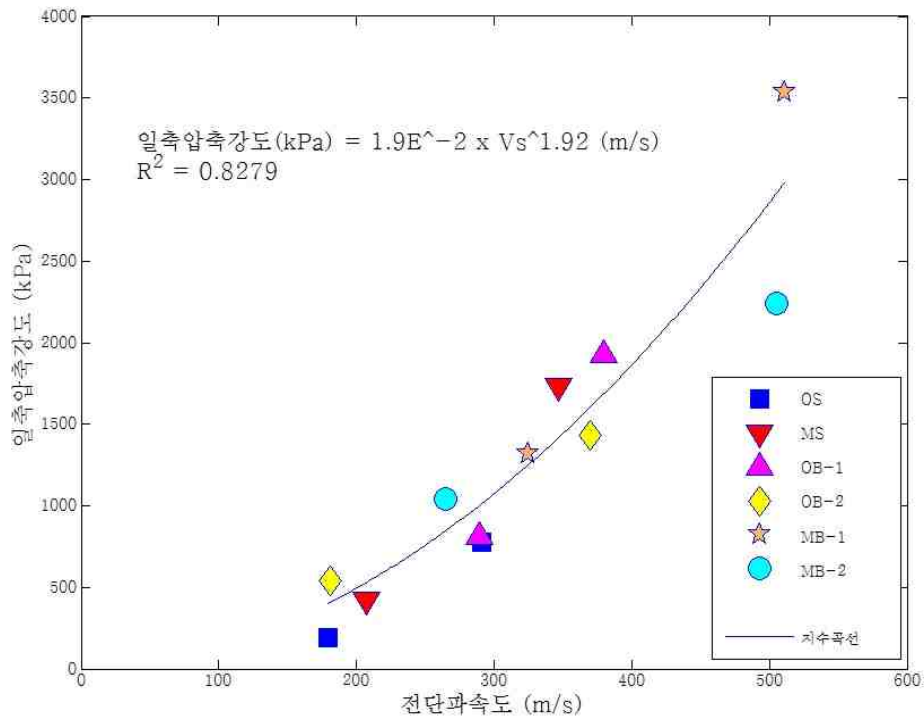


그림 4.28 주입재에 따른 전단파속도와 일축압축강도의 상관관계

(3) 기존 주입재와 바이오주입재의 주입비

점토나 실트질이 섞인 지반의 경우 투수계수가 낮아 현장에서 주로 사용하는 OPC로 양호한 주입효과를 발휘하지 못하는 경우가 발생한다. 본 실내실험에서도 주입압력 조건의 한계로 인해 제한된 시료에서 주입실험을 수행하였으나, 바이오그라우팅 실험을 통해 지반조건에 맞는 주입재를 선택하는 것이 대상지반의 흙 입자와 주입재의 입자의 구조적, 물리적 특성이 침투성의 중요한 요소가 된다고 판단되므로 Kravetz(1985)의 주입비 관계식을 이용하여 주입비를 분석하였다(표 4.20 참조).

이 때 Micro시멘트의 경우 입도분포곡선상 $G_{85} = 0.008\text{mm}$, $G_{95} = 0.015\text{mm}$ 이며, OPC의 경우 $G_{85} = 0.037\text{mm}$, $G_{95} = 0.05\text{mm}$ 정도이다(건설교통부, 1997). 바이오주입재의 경우 평균입자는 $1\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ 이므로 $G_{85} = 0.00255\text{mm}$, $G_{95} = 0.00285\text{mm}$ 로 나타났다. 또한 투수계수에 의해 OPC의 경우 $K = 10^{-4}\text{cm/s}$ 이하이면 주입이 불가능하며, Micro시멘트는 $K = 10^{-5}\text{cm/s}$ 이하이면 주입이 불가능하다.

표 4.20 대상지에 따른 주입비 N_1, N_2

대 상 시 료		흙 입자 입경 (mm)		주 입 비					
				$N_1 = D_{15}/G_{85} > 15, N_2 = D_{10}/G_{95} > 8$					
				OPC		Micro시멘트		바이오주입재	
		D_{10}	D_{15}	N_1	N_2	N_1	N_2	N_1	N_2
사 질 토	굵은 모래	0.5	0.53	14	10	66	35	208	175
	가는 모래	0.25	0.29	8	5	36	19	114	88
실트		0.03	0.04	1	0.6	5	3	16	11

주입비 분석결과, 바이오주입재는 사질토나 실트에서도 완전한 침투주입이 가능한 것으로 나타났으며, Micro시멘트는 사질토 지반에서만 침투주입이 가능한 것으로 나타났다. OPC의 경우 가는 모래와 실트에서는 침투주입이 불가능하고 굵은 모래에서는 침투여부가 가능한 것으로 나타났다.

같은 대상토에서 간극율이 증가할수록 주입성능은 다소 개선되지만 그보다 주입재 입자의 크기가 작을수록 주입성이 좋아진다. 바이오주입재의 비표면적은 $70,000\text{cm}^2/\text{g}$ 으로 Micor 시멘트의 비표면적의 $7,000\text{cm}^2/\text{g}$ 보다 약 10배 이상 세립분이며, OPC의 비표면적인 $3,200\text{cm}^2/\text{g}$ 보다 세립분이다. 따라서 균등한 입자로 구성되어 있기 때문에 기타 주입재보다 바이오주입재의 침투성이 우수한 것으로 나타났다.

4.3.3 기존 고결제와 경제성 비교

바이오주입제를 사용함으로써 시멘트량을 줄일 수 있을 때에 나타나는 환경적 비용을 측정하는 것이 어려운 이유는 크게 2가지로 요약할 수 있다. 먼저 환경적 비용은 그 종류가 다양하고 미치는 영향의 범위가 광범하다. 다음으로 환경제는 거의 대부분 비시장제의 성격을 가지므로 화폐가치로 측정하는 것에 어려움이 있다.

사회적 편익을 다음과 같이 간략히 계산하여 나타냈다. 석회석 채광 시 생기는 환경절감 가능액을 산정하면, 임야 1ha 당 1,284만원(광산 개발기간동안 지속 될 것으로 가정) 정도이고, 수원함양기능의 총 가치 22,554만원, 이산화탄소흡수량을 채광면적 1ha 당 환산한 이산화탄소 흡수량 약 5만원, 토사 1m³당 유출방지 비용은 공사비용으로 계산해서 3,403원으로 추정되며, 산림 휴양기능(한 사람이 산에 한 번 가기 위해서 지불할 용의가 있는 평균금액)은 68,109원 × 횟수 = 총비용으로 산정할 수 있다. 또한 산림 정수 기능(부유물질 제지를 위한 비용)은 658.3원/ha × 총 산림면적 = 총비용으로 나타난다. 석회석 채광을 위한 생산시설 가동 및 운영에 소요되는 비용은 일반비용 = 273,620만원, 투자비용 = 23,000만원, 부두시설 사용료 = 671만원으로 나타났다(Kwak and Kim, 2003).

따라서 본 연구에서 기존 고결제인 시멘트와 미생물에 의해 생성된 바이오주입제와의 경제성을 비교해보면 공시체 제작에 사용된 시멘트 22g을 사용할 경우 비용은 약 3원(5,500원/40kg)이고, 초조강 시멘트 22g을 사용할 경우 약 28원(25,000/20kg), Micro 시멘트 22g을 사용할 경우 약 18원(16,000/20kg)이다. 또한 CO₂ 배출금의 경우 CO₂ 1톤당 22달러 부과(Vetris, 2010, Grubb and Neuhoff, 2006)를 고려하면 시멘트 22g 제조시 CO₂는 약 1원이 발생된다.

미생물에 의한 바이오주입제 22g 제조시 비용은 Urea 0.5g, 7원(15,000원/1,000g), NB 0.2g, 44원(110,000/500g), 염화칼슘 2.85g, 3원(920원/1,000g)으로 약 54원이 소요되므로 시멘트 약 13배, 초조강 시멘트 약 2배 정도의 차이가 나타났으며, Micro시멘트 약 2.5배 정도 차이가 났지만, 앞서 언급한 것과 같이 유해성 물질 절감, 약액의 대체 및 사회적 비용을 감안한다면 바이오주입제의 경제성은 충분이 있는 것으로 나타났다.

4.4 환경성 평가 결과

본 실험에서는 4, 8, 24, 48, 72 시간의 pH와 치사율을 구하고, 공시어가 치사하는 pH를 검토하였다. 이 결과 여러 주입약액의 알칼리 용탈로 인한 pH 변화를 확인하여 환경오염 정도를 나타내는 지표가 될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 시멘트 생산 시 발생하는 CO_2 (약 890kg)를 절감하기 위해서 시멘트를 대체할 수 있는 바이오주입재를 활용하여 그라우팅에 사용되는 시멘트를 줄이고자 하였다. 초기 pH는 공시체의 알칼리 용탈이 거의 없는 시점에서의 수조내의 물의 pH를 측정하였으며, pH는 7.5~7.8 정도이다. 주입재 조합별로 시간에 따른 pH 변화 및 치사하는 공시어 수를 측정하였다.

그리고 주입재로부터 용출되는 유독성 물질로 인한 토양오염도를 측정하여 지반에 미치는 환경적인 영향을 평가하고자 하였다.

(1) 고결체에 따른 pH 측정

그림 4.29는 LW, 시멘트, 바이오주입재의 고결체에 따른 용출된 pH변화를 나타냈다. LW는 시멘트와 규산소다 3호를 섞어 사용하였으며, 결과는 천병식과 김진춘(1998)의 결과를 참조하였다. 실험결과, 4시간 경과 후 pH는 10.3이상 나타났고, 최대 pH 10.8까지 나타냈다. 또한 72시간 경과 후에도 동일한 pH를 나타냈다. OPC를 사용하여 제작한 고결체의 시간에 따른 pH는 초기 7.57에서 24시간 경과 후 최대 pH 10.22를 나타냈고, 이후 약간 감소하여 72시간이 지난 후 pH는 9.47로 수렴하였다. 미생물에 의해 생성된 바이오주입재를 사용하여 제작한 고결체의 시간에 따른 pH는 초기 7.55에서 8시간 경과 후 최대 pH 9.11을 나타냈고, 9시간 경과 후 점차 pH가 감소하기 시작하여 초기 pH 값으로 회복였다.

LW의 경우 급결제인 규산소다 3호의 주성분인 물유리($Na_2O \cdot 3SiO_2$) 성분 내의 Na_2O 성분이 물(H_2O)과 결합하면 $2NaOH$ 로 되어 수조내의 OH^- 이온의 농도가 짙어져서 pH를 높이는 결과를 나타내었다.

시멘트와 바이오주입재에서의 시간의 경과에 따라 pH 감소는 LW와 달리 알칼리 용탈이 적고, 어독성시험 시 수조내의 pH변화량이 수조생태의 완충작용에 의해 pH가 감소함을 나타내었다.

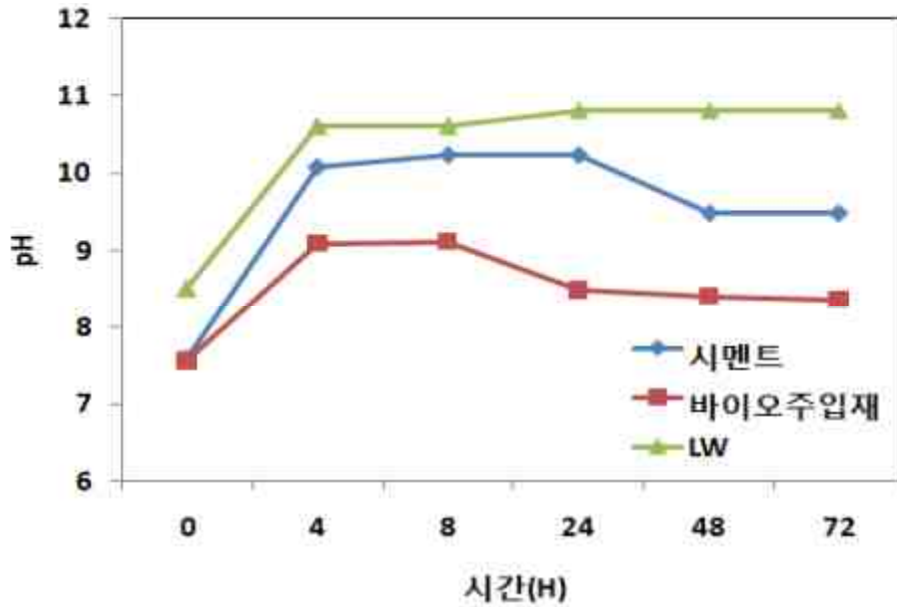


그림 4.29 고결체에 따른 pH 측정 결과

(2) 고결체에 따른 치사어

그림 4.30은 LW, 시멘트, 바이오주입재의 고결체에 따른 치사어 수의 변화를 나타내었다. LW 결과는 천병식과 김진춘(1998)의 결과를 참조하였다. 실험결과, 공시체를 넣은 후 8시간에 최대 pH에 도달하였으며 이후 24시간 경과 후 17마리 치사되었고, 28시간 경과 후 20마리가 모두 치사되었다. 이는 규산소다 3호의 주성분인 물유리가 물과 결합하면서 $2NaOH$ 로 되어 수조내의 OH^- 이온의 농도가 짊어져 공시어의 생존율을 감소시키는 요인으로 나타났다.

OPC를 사용하여 제작한 고결체의 시간에 따른 치사어 수의 변화를 측정한 결과, 24시간 경과 후 최대 pH 10.22를 나타내어 공시어의 활동이 느려지고 배를 뒤집은 공시어를 2~3마리를 확인하였으나, 최종적으로 치사된 공시어는 1마리로 나타났다.

미생물에 의해 생성된 바이오주입재를 사용하여 제작한 고결체의 시간에 따른 pH는 초기 7.55에서 8시간 경과 후 최대 pH 9.11을 나타내었고, 공시어는 일반적인 활동경향을 나타내었으며, 최종적으로 치사된 공시어는 없었다.

본 실험을 통하여 규산소다 3호의 영향으로 pH가 자연정화 되지 않고 계속적으로 높은 pH를 유지함을 확인하였으며, pH가 10이상 지속될 경우 공시어의 활동이 느려지

고 하루이상 경과시 치사됨을 확인하였다. 또한 바이오주입재의 경우 최대 pH는 9.11로 치사될 정도의 pH의 용출은 없는 것으로 나타났으며, 하루 경과시 초기 pH로 회복되어 바이오주입재가 수질오염에 미치는 환경적 영향이 미미한 것으로 나타났다.

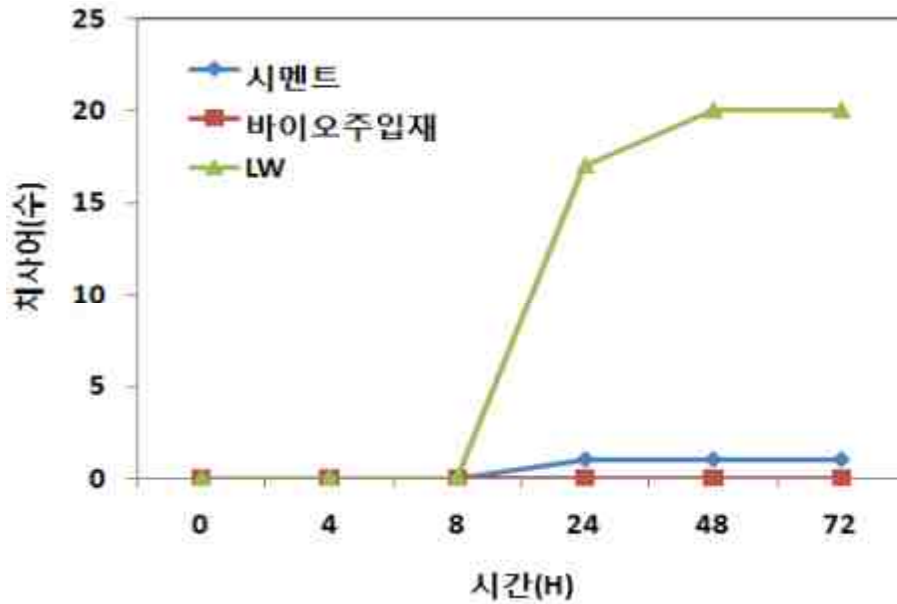


그림 4.30 고결체에 따른 치사어 측정 결과

(3) 토양오염분석 결과

본 연구에서 사용된 토양오염분석 결과는 주입재에 따른 그라우팅 실험 종료 후(28일) 주입재 주변의 흙을 채취하여 토양오염분석을 수행하였다. 토양오염분석 항목은 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 납(Pb), 육가크롬(Cr^{6+})을 수행하였으며, 표 4.21과 같다.

실험결과, 모든 공시체에서 1지역 우려/대책기준 허용범위에 해당하여 오염도가 높지 않음을 확인하였고, 육가크롬과 카드뮴은 모든 시료에서 나타나지 않았다. 그러나 무처리 시료에 비해 구리나 납 성분이 증가함을 확인할 수 있었으며 특히 Micro시멘트의 경우 오염도가 높음을 확인하였다. 바이오주입재+규산소다 3호로 처리된 BS의 경우 무처리와 비슷한 수준으로 구리나 납의 함유량이 적음을 나타내었고, 기존 주입재인 시멘트와 Micro시멘트 보다 비교적 토양오염이 적음을 나타내었다. 따라서 바이오주입재가 토양오염에 미치는 영향이 미미함을 확인하였다.

표 4.21 주입재에 따른 토양오염분석 결과

시료명	Cd(mg/kg)	Cu(mg/kg)	Pb(mg/kg)	Cr ⁶⁺ (mg/kg)
무처리	-	1.577	5.369	-
OS	-	8.849	5.592	-
BS	-	3.555	5.316	-
MS	-	12.542	10.508	-
OB-1	-	8.662	7.023	-
OB-2	-	4.618	6.645	-
MB-1	-	8.345	10.811	-
MB-2	-	10.987	13.158	-
1지역 (우려/대책기준)	4/12	150 / 450	200 / 600	5 / 15
2지역 (우려/대책기준)	10/30	500 / 1,500	400 / 1,200	15 / 45
3지역 (우려/대책기준)	60/180	2,000 / 6,000	700 / 2,100	40 / 120

제 5 장 결론

본 연구에서는 MCP 기술을 이용하여 친환경 소재인 바이오주입재를 분말 형태로 제작하였으며, 무처리, 바이오주입재, 시멘트, 바이오주입재+시멘트의 비(1:9, 3:7, 5:5)의 공시체를 7일, 28일로 재령하여 일축압축실험을 통해 강도를 분석하였다. 또한 바이오그라우팅을 SP, SW시료 각각 상대다짐도(RC) 70%, 80%, 85%, 90%, 95%로 제작하여 주입실험을 통해 바이오그라우팅이 가능한 범위를 결정하였다. LW공법과 바이오그라우팅공법을 적용 후 시간경과에 따라 진단탄성계수를 분석하여 개략적인 현장의 적용성을 평가하였다. 마지막으로 환경성 평가를 위해 어독성 실험과 토양오염분석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. MCP를 이용한 일축압축 실험결과, 재령 7일 바이오주입재:시멘트 비 1:9의 경우 시멘트 강도 대비 약 95.8%, 3:7의 경우 약 82.4%, 5:5의 경우 약 70.6%의 일축압축강도를 나타내었고, 재령 28일 바이오주입재:시멘트 비 1:9의 경우 약 93.5%, 3:7의 경우 약 82.5%, 5:5의 경우 약 65.2%의 일축압축강도로 나타나 바이오주입재 10% 첨가시 시멘트 강도 대비 약 5% 감소하였으며, 배합하여 사용하기 위해서는 3:7의 비가 효과적인 것으로 나타났다.
2. 바이오주입재와 시멘트의 투수실험결과, 시멘트 주입시료의 경우 무처리 시료보다 약 60% 차수효과가 나타났으며, 바이오주입 시료의 경우 무처리 시료보다 약 30% 차수효과가 나타났다. 이는 바이오주입재의 경우 시멘트에 비해 상당히 미립한 입자이므로 표준사의 간극을 통과하여 바이오주입재가 주입되는 즉시 배출되는 문제점이 있었다. 추후 지반조건에 따라 투수실험을 수행하여 보완해야할 필요성이 있다.
3. 지반조건에 따라 150kPa 주입압으로 바이오그라우팅을 주입한 결과, 낮은 주입압에도 불구하고 SW시료의 상대다짐도(RC) 70% 이하에서, SP시료의 경우 상대다짐도(RC) 95% 이하에서 주입이 가능함을 확인하였다. 사질토의 경우 침투주입이 가능하나, 점토의 경우 맥상주입을 하기 때문에 고압으로 사용하여야 하며 세립분이 많은 지역에서 바이오그라우트재를 사용할 경우 맥상주입이나, 치환, 혼합하여

연약지반을 처리할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 호모겔 일축압축 측정결과, OPC 100% + 바이오주입재 30%와 Micro 100% + 바이오주입재 30%에서 가장 큰 강도를 나타냄을 확인하였으며, OPC 100%와 Micro 100%는 OPC 100% + 바이오주입재 30%와 Micro 100% + 바이오주입재 30%에 비해 약 15%의 강도가 감소함을 확인하였다. 또한 OPC 70% + 바이오주입재 30%와 Micro 70% + 바이오주입재 30%를 사용한 경우 Micro 100%의 강도 대비 약 15% 낮음을 확인하였다. 이런 결과는 앞선 샌드겔 측정 결과와 유사한 결과로 바이오주입재의 주성분인 탄산칼슘이 시멘트의 칼슘 실리케이트와 미소수화반열 반응을 일으켜 강도가 증가함을 확인하였다. 바이오그라우팅을 사용하기 위해서는 차수의 목적을 가진 그라우팅으로 사용되어야 하며, 강도발현을 위해서는 바이오주입재를 혼화재의 역할로 사용되어야 한다.
5. 주입재에 따른 전단탄성계수를 측정한 결과, 시간경과에 따라 모든 공시체에서 전단탄성계수가 증가하였으며, 샌드겔과 마찬가지로 OPC 100% + 바이오주입재 30%와 Micro 100% + 바이오주입재 30%에서 가장 높은 전단탄성계수를 나타내었고, OPC 100% + 규산소다 3호 30%와 Micro 100% + 규산소다 3호 30%의 경우 전단탄성계수가 감소하였다. 이를 통해 기존에 사용되는 OPC, Micro, 규산소다 3호의 주입재 보다 바이오주입재를 혼합한 OPC 100% + 바이오주입재 30%와 Micro 100% + 바이오주입재 30%에서 적용성이 높은 것으로 나타났다.
6. 주입재에 크기에 따른 주입비를 분석한 결과, 바이오주입재의 비표면적은 $70,000\text{ cm}^2/\text{g}$ 으로 Micro시멘트의 비표면적인 $7,000\text{ cm}^2/\text{g}$ 보다 약 10배 이상 세립분이며, OPC의 비표면적인 $3,200\text{ cm}^2/\text{g}$ 보다 세립분이다. 따라서 미세한 주입이 가능한 바이오주입재의 경우 기존 주입재보다 침투성이 우수한 것으로 나타났다.
7. 기존 고결제인 시멘트계의 주입재와 바이오주입재의 경제성을 분석한 결과, 일반 시멘트 보다 약 13배로 높은 가격 차이를 나타내었으며, 초조강 시멘트 약 2배, Micro시멘트의 경우 약 2.5배 정도 가격차이가 났으나, 약액의 대체와 자연환경 훼손 등 사회적비용을 고려하면 경쟁력은 충분히 있는 것으로 나타났다.

8. 어독성과 토양오염분석 결과, 바이오주입제가 기존 주입재인 시멘트에 비해 수질 오염과 토양오염에 미치는 영향이 낮음을 확인할 수 있었다. 따라서 규산소다 3호와 기존 주입재를 사용할 경우 지하수와 토양으로 유출시 2차, 3차의 환경오염을 발생시킬 것으로 나타났다.

9. 본 연구는 한정된 지반에서 바이오그라우팅을 사용하였으며 실제지반의 경우 깊이 에 따른 지중응력이 변화하므로 이에 대한 검토와 실제 현장에서의 주입압력과 주입량이 모사될 수 있도록 추후 상재압을 가하여 현장지반과 유사한 모형토조를 제작함으로 연구할 필요성이 있다.

참고문헌

1. 건설교통부(2003), *마이크로시멘트 현장제조 및 시리간 시공모니터링을 이용한 최적 그라우팅 시스템 개발연구*, 한국건설기술연구원 보고서
2. 건설교통부(1997), *지반보강용 마이크로시멘트 및 실리카졸의 실용화 연구*, 연구개발 사업 보고서
3. 국토해양부(2009), *전문건설업통계조사*, 2009년도 국토해양 통계연보
4. 권지연(2012), *실내실험을 통한 알칼리성 실리카졸-시멘트 주입재의 공학적 특성에 관한 연구*, 석사학위논문, 한양대학교
5. 김대현, 김호철, 박경호(2010), *미생물을 이용한 연약 지반의 고결화 방법*, 특허 제 10-1030761 호
6. 김대현, 박경호, 김호철, 이용희(2012), “미생물 처리 방법이 바이오그라우트에 미치는 영향”, *한국지반환경공학회논문집*, 제 13권, 제 5호 pp.51-57.
7. 김대현, 박경호(2013), *연약지반 개량용 조성물 및 이러한 조성물을 사용하는 바이오 그라우트 방법*, 특허 제 10-1380354호
8. 김대현, 사공명, 박경호(2013a), “친환경 바이오그라우팅을 이용한 모래지반 개량 공법”, *한국철도학회논문집*, 제 16권, 제 6호, pp.473-481.
9. 김대현, 이광기, 박경호(2013b), *박테리아를 이용한 준설토의 침강 속도 및 자중 압밀 속도 향상 방법*, 특허 제 10-1317865호
10. 김대현, 정두희, 정경환(2010), “셸드 TBM 뒤택움용 무기계 가소성 그라우트의 공학적 특성 및 현장적용성 평가”, *한국터널공학회논문집*, 제 12권, 제 1호, pp.75-85.
11. 김도수, 노재성(2000), “개질 탄산칼슘을 첨가한 시멘트 모르타르의 특성”, *한국양회공업협회 시멘트심포지엄*, pp.14-20.
12. 김선태, 도종남, 조현수, 천병식(2011), “다당류 친환경 지반개량재를 이용한 지반강도 증대 효과”, *한국지반환경공학회논문집*, 제 12권, 제 11호, pp.13-21.
13. 김종선, 이인모, 이문선, 최향석(2009), “점도변화와 흡착현상을 고려한 시멘트계 그라우트재의 새로운 침투 기준”, *한국지반공학회 학술발표회 논문집*, pp.154-163.
14. 김종선, 최용기, 박종호, 이상백, 이인모(2007), “점도변화와 폐색 현상을 고려한 그라우트재의 침투 특성”, *한국지반공학회논문집*, 제 23권, 제 4호, pp.5-13.
15. 김진춘(1999), *지반개량용 초미립자시멘트의 주입특성에 관한 연구*, 박사학위논문, 한양대학교, pp.6-32.
16. 김진춘(2007), *MSG공법 : 설계-시공 지침서*, MSG공법협의회 보고서
17. 김학성(2011), *연약 점성토의 전단파 속도 현장 측정을 위한 압전소자 관입 프로브의 개발 및 적용*, 박사학위논문, 경희대학교

18. 김화중, 김성태, 박성진, 김사열, 천우영(2009), “미생물의 생체광물형성작용을 이용한 자기치유 스마트 콘크리트 개발에 관한 기초연구”, *콘크리트공학회논문집*, Vol. 21, No. 4, pp.501-511.
19. 김호철(2011), *미생물 이용한 흙의 고결화 특성*, 석사학위논문, 조선대학교
20. 박경호(2011), *미생물 반응에 의한 연약지반의 강도 개선*, 석사학위논문, 조선대학교
21. 박경호, 김대현(2012), “Bacteria를 이용한 실트와 모래의 고결화에 따른 탄산칼슘 확인”, *한국지반공학회논문집*, 제 28권, 제 6호, pp.53-61.
22. 박경호, 김대현(2013), “Bacteria로 처리된 모래지반의 강도 및 주입효과”, *한국지반공학회논문집*, 제29권, 제 2호, pp.65-73.
23. 박병기, 이광찬(1999), “국내 화강풍화토 지반의 풍화도 평가방법”, *한국지반공학회 논문집*, 제 15권, 제 1호, pp.127-140.
24. 박성식, 김화중, 이준철(2011), “미생물에 의해 생성된 광물질이 고결모래의 강도에 미치는 영향”, *한국지반공학회논문집*, 제 27권, 제 5호, pp.75-84.
25. 박성식, 최선규(2011), “세립분이 고결모래의 일축압축강도에 미치는 영향”, *대한토목학회논문집*, 제 31권, 제 6호, pp.213-220.
26. 박성식, 최선규(2013), “고로슬래그와 알칼리 활성화제를 이용한 모래 고결 및 조기 강도에 관한 연구”, *한국지반공학회논문집*, 제 29권, 제 4호, pp.45-56.
27. 박성식, 최선규, 남인현(2012), “식물추출액을 이용한 지반 고결제 개발”, *한국지반공학회논문집*, 제 28권, 제 3호, pp.67-75.
28. 박승균(2010), *세립분의 차이에 따른 Soil-Cement의 특성 연구*, 박사학위논문, 전남대학교
29. 송기준, 최은희, 한수연(2013), *엑셀 2010을 이용한 쉬운 통계학*, 진샘미디어
30. 양형철, 김건호, 김보석, 김승희, 김영섭, 김창근, 김호열, 류연길, 엄귀만, 유일형, 이상열, 이오형, 정지현, 한산용(2012), *그라우팅환경공학*, 구미서관
31. 안진현(2009), *공동터널에서 부분 노출 프로펠러의 모형시험을 위한 선행 연구*, 석사학위논문, 한양대학교
32. 오명현(2015), *알칼리 활성 슬래그 기반 그라우트재의 성능에 관한 연구*, 석사학위논문, 전남대학교
33. 오종신(2008), *미생물 고결토의 공학적 특성 연구*, 석사학위논문, 전남대학교
34. 이강호(2013), *슬래그 시멘트를 이용한 터널보강용 주입제에 관한 연구*, 박사학위논문, 배재대학교
35. 이종섭, 이창호(2006), “벤더엘리먼트 시험의 원리와 고려사항”, *한국지반공학회논문집*, 제 22권, 제 5호, pp.47-57.

36. 전상주(2013), *미생물 반응으로 생성된 탄산칼슘의 흡의 강도 개선 효과*, 석사학위 논문, 조선대학교
37. 조계춘, 이인모(2002), “탄성파를 이용한 흡의 특성연구”, *한국지반공학회논문집*, 제 18권, 제 6호, pp.83-101.
38. 천병식(1998), *최신 지반주입 : 이론과 실제*, 구미서관
39. 천병식, 김진춘(1998), “어독성시험에 의한 지반주입제의 공해성 평가”, *대한토목학회 논문집*, Vol. 18, No. 4, pp.531-538.
40. 천병식, 정중주, 오민열(1994), “동수지반에서 주입된 물유리계 약액의 내구성에 관한 실험적 연구”, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, pp.685-688.
41. 최상민(2012), *미생물을 혼입한 시멘트 페이스트의 압축강도 특성*, 석사학위논문, 경북대학교
42. 한국시멘트협회(2011), *2010 시멘트 통계연보*, 한국시멘트협회 보고서
43. 한국지반공학회(2005), *지반공학시리즈 6, 연약지반*, 한국지반공학회 저
44. 황세훈(2013), *고결모래의 일축압축강도와 전단파속도의 상관관계*, 석사학위논문, 경북대학교
45. Boquet, E., Boronat, A. and Ramos-Cormenzana, A. (1973) “Production of Calcite Crystals by Soil Bacteria is a General Phenomenon”, *Nature (Lond.)*, Vol. 246, pp.527-529.
46. Chan, C. M. and Ching, S., S. (2010), “Preliminary Study of S-Wave Velocity and Unconfined Compressive Strength of Cement- Palf Stabilised Kaolin”, *International Journal of Intergrated Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp.27-34.
47. 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.
48. Deere, D. U. (1982), “Cement-bentonite Grouting”, *Proceedings of Conference Sponsored by the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, New Orleans, USA, pp.279-300.
49. Dejong, J. T., Fritzes, 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.
50. 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.

51. De Muynck, W., De Belie, N. and Verstraete, W. (2010), "Microbial Carbonate Precipitation in Construction Materials : A Review", *Ecological Engineering*, Vol. 36, pp.118-136.
52. Dyvik, R. and Madshus, C. (1985), "Laboratory Measurement of Gmax Using Bender Elements", *Proceedings ASCE Annual Convention, Advances in the Art of Testing Soil Under Cyclic Conditions*, Detroit, Michigan.
53. Fei, H., C. (1991), *The Characteristics of Liquefaction of Silt Soil*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering V, Computational Mechanics Publications and Elsevier Applied Science, London, pp. 293-302.
54. Ferrer, M. R., Quevedo-Sarmiento, J., Rivadeneyra, M. A., Bejar, V., Delgado, R. and Ramos-Cormenzana, A. (1988) "Calcium Carbonate Precipitation by Two Groups of Moderately Halophilic Microorganisms at Different Temperatures and Salt Concentrations", *Current Microbiology*, Vol. 17, pp.221-227.
55. Frederik. H. and Willy, V. (2002), "Key Roles of pH and Calcium Metabolism in Microbial Carbonate Precipitation", *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, Vol. 1, pp.3-7.
56. Gurb, M. and Neuhoff, K. (2006), "Allocation and Competitiveness in the EU Emissions Trading Scheme : *Policy Overview, Climate Policy*, Vol. 6, No. 1, pp.7-30.
57. Harkes, M. P., Paassen, L. A., Booster, J. L., Whiffin, V. S. and Loosdrecht, M. C. M. (2010), "Fixation and Distribution of Bacterial activity in Sand to Induce Carbonate Precipitation for Ground Reinforcement", *Ecological Engineering*, Vol. 36, pp.112-117.
58. Iler, R. K. (1979), *The Chemistry of Silica*, John Wiley and Sons
59. 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.
60. Ivanov, V. and Chu J. (2008), "Applications of Microorganisms to Geotechnical Engineering for Bioclogging and Biocementation of Soil in Situ", *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, Vol. 7, No. 2, pp.139-153.
61. Karol, R. H. (1960), *Oil & Soil Engineering*, Prentice Hall Engineering Mechanics Series, Englewood Cliffs, New York.
62. Karol, R. H. (2003), *Chemical Grouting and Soil Stabilization*, Marcel Dekker, New York.
63. Kim, D. H. and Park, K. H. (2013), "Injection Effect of Bio-Grout for Soft

- Ground”, *Advanced Science Letters*, Vol. 19, pp.468-472.
64. 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.
 65. Kim, D. H., Park, K. H., Kim, S. W. and Mun, S. H. (2012), “A Novel Approach to Induce Cementation of Loose Soils”, *Advanced Science Letters*, Vol. 5, pp.1-6.
 66. 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.
 67. Koester, J., P. (1994), *The Influence of Fine Type and Content on Cyclic Strength*, Ground Failure under Seismic conditions, Geotechnical Special Publication No. 44, pp. 17-33.
 68. Kravetz G. A. (1958), “Cement and Clay Grouting of Foundation : The Use of Clay in Pressure Grouting”, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, pp.1546-1576.
 69. Kwak, T. W. and Kim, H. G. (2003), *Social Cost-benefit Analysis of Lapaz-Hanla Limestone Development Project*, Ministry of Environment Report. pp. 1-49.
 70. Law, K., T. and Ling, Y., H. (1992), “Liquefaction of Granular Soils with Non-cohesive and Cohesive Fines”, *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, Rotterdam, pp. 1491-1496.
 71. Leonard, M. W. and Moller, K. (1963), “Grouting for Support with Particular Reference to the Use of Some Chemical Grouts”, *Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice*, pp.156-163.
 72. Liang, C. and Ralf, C. (2012), “In Situ Soil Cementation with Ureolytic Bacteria by Surface Percolation”, *Ecological Engineering*, Vol. 42, pp.64-72.
 73. Michell, J. K., and Santamarina, J. C. (2005), “Biological Considerations in Geotechnical Engineering” *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, pp. 1222-1233.
 74. Nakayama, T. and Okano, N. (2013), “Prediction Method of Ground Displacement Caused by Chemical Grouting”, Railway Technical Research Institute Report, Vol. 27, No. 6, pp. 19-24.
 75. Paassen, L. A., Harkes, M. P., Zwieten, 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.
76. Paassen, L. A., Montano, C. M., Kleerebezem, R., Loosdrecht, M. C., Star, W. R. L. and Zon, W. H. (2008), *Microbiologically Induced Carbonate Precipitation*, EP 1978 100 A1
 77. Paassen, L. A., Whiffin, V. S. and Harkes, M. P. (2007), *Immobilisation of Vacteria to A Geological Material*, WO 2007/069884 A1
 78. 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.
 79. Ramachandran, S. K., Ramakrishnan, V. and Bang, S. S. (2001), “Rededication of Concrete using Micro-organisms”, *ACI Materials Journal*, Vol. 1, pp.3-9.
 80. Rivadeneyra, M. A., Delgado, R., Quesada, E. and Ramos-Cormenzana, A. (1991) “Precipitation of Calcium Carbonate by *Deleya Halophila* in Media Containing NaCl as Sole Salt”, *Current Microbiology*, Vol. 22, pp.185-190.
 81. Santamarina, J. C., Klein, K. A. and Fam, M. A. (2001), “Soil and Waves”, John Wiley and Sons, pp. 280-283.
 82. Scholl, M. A., Mills, A. L., Herman, J. S. and Hornberger, G. M. (1990), “The Influence of Mineralogy and Solution Chemistry on the Attachment of Bacteria to Representative Aquifer Materials.” *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 6, No. 4, pp.321-336.
 83. 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.
 84. Stocks-Fisher, S. Galinat, J. K and Bang S. S. (1999). “Microbiological Precipitation of $CaCO_3$ ” *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 31, pp. 1563~1571.
 85. Torkzaban, S., Tazehkand, S. S., Walker S. L. and Bradford, S. A. (2008), “Transport and Fate of Bacteria in Porous Media : Coupled Effects of Chemical Conditions and Pore Space Geometry”, *Water Resources Research*, Vol. 44 No. 4 pp.12-18.
 86. Vetrís (2010), *Carbon Newsletter 17 February 2010*, Budapest : Vertis Environmental Finance, p. 2.
 87. Viggiani, G., and Atkinson, J. H. (1995), “Interpretation of Bender Element Tests”, *Geotechnique*, Vol. 45, No. 1, pp.149-154.

88. Whiffin, V. S. (2004), "Microbial CaCO₃ Precipitation for the Production of Biocement", PhD thesis, Murdoch University, Perth, Australia.
89. 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.
90. Yamashita, S., Kawaguchi, T., Nakata, Y., Mikami, T., Fujiwara, T. and Shibuya, S.(2009), "Interpretation of International Parallel Test on Measurement of Gmax Using Bender Elements", *Soil and Foundation*, Vol. 49, No. 4, pp.631-650.

감사의 글

지난 시간을 돌아보면 모든 것 하나님께서 하셨음을 감사하며 모든 영광드립니다.

박사학위 논문을 완성하면서 학부생 때부터 박사과정까지 조선대학교에서 생활하였던 12년의 시간을 정리하고 돌아보는 계기가 되었습니다. 학부과정을 졸업할 때에는 세상의 모든 것이 내 것 같아 보였고 무엇이랴도 노력하면 얻을 수 있다는 자신만만한 생각을 하였지만, 정작 제가 무엇을 하면서 살아가야 하고, 무엇을 원하는지 알 수 없었습니다. 그리고 마음의 열정은 높았지만 학부생 때의 생각이 우물 안 개구리였음을 석사과정을 접하면서 깨닫게 되었습니다.

석사과정을 하면서 지반공학이라는 전문분야를 택하게 되었고, 다양한 연구를 접하면서 학문을 알아가는 기쁨과 내가 연구하는 분야에서 최고가 되어야겠다고 생각을 처음 하였던 것 같습니다. 그래서 학문에 대한 욕심이 생기게 되었고, 지도교수님이신 김대현 교수님께서 늘 말씀하셨던 것처럼 ‘내가 연구한 분야에서 내가 최고가 되어야 한다는 생각으로 하라’고 말씀하신 뜻을 알아가는 시간이었습니다.

박사과정을 하면서 학문의 깊이를 깨우쳐야하는 고통 속에 끊임없이 고뇌하고 노력하며 치열하게 살았던 것 같지만, 돌아보니 아쉬움만 가득히 남는 것 같습니다. 박사학위 논문을 준비하면서 잘 되지 않아 좌절하며 흘렸던 눈물과 계속적으로 발전하고 뛰어넘어야 하는 문제들을 넘지 못할 때의 상실감과 답답함, 주어진 문제를 한 단계 뛰어오를 때의 희열과 기쁨, 이제 이 모든 것이 저의 삶에서 위로이자 추억이 되는 것 같습니다.

꿈을 가진 사람은 그것을 이미 이룬 사람보다 더 행복한 사람이라고 합니다. 대학원에 처음 진학하였을 때 가졌던 마음과 5년이 지난 지금의 마음이 많이 달라진 것은 사실이지만 언제나 꿈을 가지고 있었다는 사실은 변치 않았습니다. 12년이라는 시간이 이제는 헛되지 않게 더욱 도약하는 발걸음으로, 다음 단계를 향해 시작하는 발걸음으로 나아가야겠다는 마음을 본 계기를 통해 다짐하게 됩니다.

그리고 이 시간까지 때로는 힘이 들고 지칠 때가 많았지만 포기하지 않고 박사학위과정을 마칠 수 있었던 것은 혼자만의 힘이 아니라 주변의 많은 도움이 없이는 할 수 없었음을 깨닫게 됩니다. 늘 한결같이 제 곁에서 용기 잃지 않게 격려해주시고, 위로하여 주신 교수님과 선·후배님 모두 감사드립니다.

먼저 이렇게 부족한 저에게 박사학위 과정을 할 수 있도록 이끌어 주시고 좋은 환경 속에서 연구할 수 있도록 허락하여 주신 김대현 지도교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 늘 아버지 같이 연구실 학생들을 생각하여 주시고 교수님과 학생 사이에 벽 없이 고민도 들어주시는 교수님을 모시면서 지난 5년이라는 시간이 제게 정말 감사한 시간이었음을 깨닫게 되었습니다.

연구를 할 때에도 제가 생각하지 못한 새로운 방향을 늘 제시하여 주시고, 생각의 깊이를 더해주시는 교수님을 보면서 제가 아직도 연구자로서 부족한 점이 많음을 항상 느꼈습니다. 그러기에 더욱 교수님을 존경하며 교수님의 이름 아래 부끄럽지 않은 박사가 되어야겠다는 생각을 하게 됩니다. 저의 모든 문제를 아버지와 같은 마음으로 걱정해주시고, 위로해 주신 교수님께 다시 한 번 감사드립니다.

또한 토목공학과 학부생 때부터 박사학위를 마칠 때 까지 도움을 주신 많은 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

먼저 본 연구가 좋은 방향으로 나아갈 수 있도록 많은 지도와 격려를 아끼지 않았던 지도교수님께 감사드립니다. 석·박사 학위논문 심사위원장이 되어주시고 바쁘신 와중에도 시간을 내주셔서 논문 수정에 열정으로 도와주신 박길현 교수님, 새로운 방법과 관점으로 해석을 할 수 있도록 도와주시고 박사 후 행동처신에 대해 말씀하여 주신 김성홍 교수님, 실험에 필요한 장비를 아낌없이 지원하여 주시고 많은 조언과 격려를 통해 논문의 기초를 다질 수 있도록 만들어 주신 강성승 교수님, 마지막으로 국외 출장 중에도 시간을 내어 논문의 전반적인 내용을 꼼꼼하게 살펴주시고, 제가 오히려 부끄러울 정도로 보지 못한 부분들을 검토하여 주셔서 지금의 논문이 완성될 수 있도록 신경써주신 김동욱 교수님께 더욱 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

또한 학부생 때부터 12년 동안 수리학 학문에 대해 알려주신 장로님이시자 믿음의 선배님이신 김운중 교수님, 박사학위 논문을 쓰면서 부족한 저에게 격려와 도움을 주신 박정웅 교수님, 그리고 늘 죄송한 마음이 있었지만 그 마음을 풀어주시는 박상준 교수님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 대학원 생활 동안에 늘 정신적 지주와 같이 의지하게 되고 논문과 대학원 생활에 많은 도움을 주신 김선학 교수님께도 감사를 드립니다.

무엇보다도 우리 토질연구실 많은 선·후배님들께 감사드립니다. 선임 박사이신 임재춘 박사님, 김현태 박사님, 허홍균 박사님께 좋은 연구실 문화를 만들어 주시는 것에 대해 정말 감사함을 느끼며, 저 또한 부끄럽지 않은 토질연구실의 일원으로 후배님들에게 그런 사랑을 베풀 수 있는 마음이 넉넉한 자가 되도록 노력하겠습니다. 또한 토

질연구실의 원로이신 최영 선배님과 이수옥 선배님께도 한결같이 토질연구실을 위해 힘써주심에 감사의 말씀을 전합니다. 그리고 저의 앞길을 자신의 일 같이 걱정하여 주신 강경호 선배님, 김성현 선배님, 위준수 선배님께 감사의 말씀을 전합니다.

또한 친구로서 정신적으로 많이 힘들고 지칠 때, 무엇을 해야 할지 결정하지 못 할 때 많은 격려와 도움을 준 호철이와 광기에게도 늘 감사합니다. 함께 토질연구실을 만들어 나갔던 성우형, 일훈이와 박사과정을 할 때 무척이나 고생하였지만 좋은 추억이 된 신규, 상주, 태광이, 지금은 다른 공부를 하고 있는 홍욱이에게도 이 기회를 통해 감사의 말을 전합니다.

그리고 토질연구실의 추억이 될 민우, 민석 석사과정 후배님에게도 감사의 말씀을 드립니다. 늘 부족한 제가 도움이 되지 못해 안타깝지만, 그럼에도 못한 형 믿고 꺾끗이 함께하여 준 것에 많은 고마움을 느낍니다. 우리의 꿈과 희망이 될 완민, 승주, 열호 학·석사 연계과정 학생들에게도 새벽까지 실험 도와주느라 고생하였는데, 감사의 마음을 다 표현하지 못해 아쉬움만 남는 것 같습니다. 이 기회를 통해 감사의 말을 전합니다. 마지막으로 저와 함께 박사학위 논문을 쓰면서 힘들고 지칠 때 제가 포기하지 않도록 믿고 기다려 주신 김문채 선배님께 더욱 깊은 감사를 드립니다.

그리고 늘 기도로 동역하여 준 충청교회 성도님들이 있어서 지금의 결실이 더욱 값진 것 같습니다. 대학원 생활동안 충청교회를 집처럼 사용하게 도와주시고 믿음이 약한 저를 끝까지 붙들어 주셔서 지금도 여전히 부족하지만 제가 예수님을 믿고 의지할 수 있도록 인도하여주신 최세호 목사님께 깊은 감사의 말씀을 전합니다. 그리고 새벽마다 하나님의 말씀을 보내주시고 기도로 동역하여 주시는 이영애 사모님께도 감사를 드립니다. 또한 유초등부 교사를 하면서 유초등부 부장 집사님으로 계셨던 이혜옥 집사님께 그동안 얼마나 많은 수고와 희생을 하셨는지 다시 한 번 깨닫게 됩니다. 박사과정 시간 동안 함께 기도하여 주시고, 기도제목을 나눌 수 있도록 도와주셔서 감사의 말씀을 전합니다. 그리고 윤병섭 장로님, 신정님 전도사님, 허용자 권사님, 장인숙 집사님, 이혜진 집사님, 최동민 집사님, 서평 집사님, 윤환이 이하 많은 분들에게 제 삶의 기도의 동역자가 되어주심을 감사드립니다.

그리고 자신의 어려움 속에서도 항상 곁에서 조언을 아끼지 않은 승태, 충청교회로 인도하여 예수님과 기도의 동역자 분들을 만나도록 인도하여 준 현석이, 대학교 때부터 사회에 대한 새로운 시각을 깨닫게 해준 영민이형 그리고 제가 박사학위를 하는 동안에 어려울 때마다 한결같이 도와주시고 언제나 함께하고 싶은 김봉현 이사님, 벤더 엘리먼트에 대해 친절히 도와주셨던 한양대학교 유진권 박사님께도 감사를 드립니다.

또한 몸의 건강이 좋지 않은 상황에서도 아들을 위하여 전적으로 헌신하여 주시고, 대학원 생활에 전념할 수 있도록 믿고 기다려 주신 아버지, 어머니께 이 기쁨을 함께 나누고 싶습니다. 부족한 아들이 그동안 해보지 못한 효도를 할 수 있도록 제 곁에서 오래오래 건강하게 함께 하셨으면 좋겠습니다. 그리고 아버지께서 예수님을 믿고 예수님 안에서 기쁨이 넘치는 가정이 되었으면 좋겠습니다. 아버지와 어머니를 위해서 날마다 기도하는 아들이 되겠습니다. 또한 장인어른, 장모님이 되어주신 선혜씨 부모님께도 박사과정을 하는 동안 늘 함께 기도하여 주시고 선혜씨와 한 가정을 이룰 수 있도록 허락하여 주심을 감사드립니다. 언제나 저희 곁에서 오래오래 건강하게 함께하셔서 선혜씨가 다 해드리지 못한 그 마음을 저도 함께 공유하고 저의 친아버지, 어머니처럼 모시며 지낼 수 있도록 오래토록 저희와 함께 계셨으면 좋겠습니다. 그리고 이은혜 처형과 박경영 형님께도 선혜씨를 어머니, 아버지처럼 보살피 주시고 기도해 주셔서 감사를 드립니다. 저도 아원이와 아론이의 건강과 앞길을 위해서 함께 기도하겠습니다.

마지막으로 먼 타지에서부터 나를 사랑해주고 언제나 한결같은 믿음으로 믿어준 선혜에게 감사의 말씀을 드립니다. 아직 뚜렷한 직업을 가진 것도 아니고 내세울 것 하나 없는 부족한 나지만 부끄럽지 않은 남편이 되어 평생 당신 곁에서 그대만을 가장 사랑하는 사람이 되겠습니다. 우리 삶의 주인 되신 예수님께 종속되어진 자로, 낙인찍힌 자로 살아가는 삶을 그대와 함께 약속하고, 결혼반지에 새겼던 Stigma처럼 저 또한 당신에게 종속되어진 자로 살아가는 평범한 남자 중에 그대를 가장 사랑하는 한 남자가 되겠습니다. 우리의 모든 것이 하나님께 기쁨이 되고 영광이 되는 가정이 되었으면 좋겠습니다.

이 논문이 나오기까지 도움을 주신 모든 분에게 다시 한 번 머리 숙여 감사의 말씀을 드리며, 나의 Vison 보다 하나님의 Vison을 생각하며 살아가는 사람이 되도록 노력하겠습니다.

2015년 8월
박경호 배상