



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#) 

2013年 8月
석사학위논문

미생물 반응으로 생성된
탄산칼슘의 흡의 강도 개선 효과

조선대학교 대학원

토목공학과

전 상 주

미생물 반응으로 생성된
탄산칼슘의 흙의 강도 개선 효과

Effect of Strength Evaluation of Soil Treated with
Calcium Carbonate Created by Microbial Reaction

2013년 8월 23일

조선대학교대학원

토목공학과

전상주

미생물 반응으로 생성된
탄산칼슘의 흡의 강도 개선 효과

지도교수 김 대 현

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2013년 4월

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

전 상 주

전상주의 석사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 박길현 (인)

위 원 조선대학교 교수 이원희 (인)

위 원 조선대학교 교수 김대현 (인)

2013년 5월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제 1 장 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 국내·외 연구 동향	2
1.2.1 국내 연구 동향	3
1.2.2 국외 연구 동향	6
1.3 연구방법 및 범위	11
제 2 장 미생물 고결화 특성	13
2.1 미생물 고결화 개념	13
2.2 미생물 고결화 시 고려해야 할 요인	14
2.2.1 미생물 용액의 pH	14
2.2.2 미생물의 크기 및 공극비의 관계	15
2.2.3 흡 입자의 크기	16
2.2.4 수분함량 및 온도	16
2.2.5 Urea의 함량에 따른 미생물 성장곡선	17
2.3 미생물에 의한 탄산칼슘 생성 이론	18
2.3.1 미생물과 요소(Urease)의 반응	18
2.3.2 탄산칼슘 생성 이론	19
2.3.2.1 광합성에 의한 탄산칼슘 생성	19
2.3.2.2 미생물에 의한 탄산칼슘 생성	19

제 3 장 미생물 고결화 실내시험	22
3.1 개요	22
3.2 미생물 배양 방법	23
3.2.1 일반농도처리	23
3.2.2 탄산칼슘 제작	27
3.3 시험용기 및 시험시료 배합비	28
3.3.1 공시체 제작	28
3.3.1.1 시험용기	28
3.3.1.2 공시체 제작방법	29
3.3.2 연구에 사용된 시료	29
3.3.2.1 탄산칼슘 공시체 배합비	32
3.3.2.2 시멘트 공시체 배합비	34
3.3.2.3 탄산칼슘+시멘트 공시체 배합비	36
3.4 실험 방법 및 장비	37
3.4.1 일축압축시험(KS F2314)	37
3.4.2 전자현미경의 원리 및 특징	38
3.4.2.1 전자현미경의 원리	38
3.4.3 X-회절분석(XRD) 시험	39
3.4.3.1 X-선의 성질	39
3.4.4 열중량분석(TGA) 시험	40
3.4.4.1 열중량분석의 성질 및 특징	40
제 4 장 실험 결과 및 고찰	42
4.1 미생물 용액, 염화칼슘 용액 반응 실험	42
4.2 일축압축시험 분석 결과	44
4.2.1 탄산칼슘 공시체 일축압축강도 분석 결과	44
4.2.1.1 탄산칼슘 공시체 3일 강도 평가	44

4.2.1.2 탄산칼슘 공시체 7일 강도 평가	46
4.2.1.3 탄산칼슘 공시체 14일 강도 평가	49
4.2.1.4 탄산칼슘 공시체 21일 강도 평가	51
4.2.1.5 탄산칼슘 공시체 28일 강도 평가	53
4.2.1.6 양생기간에 대한 탄산칼슘 공시체 강도 평가	56
4.2.2 시멘트 공시체 일축압축강도 분석 결과	58
4.2.2.1 시멘트 공시체 3일 강도 평가	58
4.2.2.2 시멘트 공시체 7일 강도 평가	60
4.2.2.3 시멘트 공시체 14일 강도 평가	62
4.2.2.4 시멘트 공시체 21일 강도 평가	65
4.2.2.5 시멘트 공시체 28일 강도 평가	67
4.2.2.6 양생기간에 대한 시멘트 공시체 강도 평가	69
4.2.3 탄산칼슘+시멘트 공시체 일축압축강도 분석 결과	72
4.2.3.1 탄산칼슘+시멘트 공시체 3일 강도 평가	72
4.2.3.2 탄산칼슘+시멘트 공시체 7일 강도 평가	74
4.2.3.3 탄산칼슘+시멘트 공시체 14일 강도 평가	77
4.2.3.4 탄산칼슘+시멘트 공시체 21일 강도 평가	80
4.2.3.5 탄산칼슘+시멘트 공시체 28일 강도 평가	82
4.2.3.6 양생기간에 대한 탄산칼슘+시멘트 공시체 강도 평가	84
4.2.4 일축압축시험 분석 결과	87
4.3 전자현미경(SEM) 분석	90
4.3.1 전자현미경(SEM) 분석 결과	90
4.3.2 EDX 분석 결과	95
4.4 X-회절 분석(XRD)	101
4.5 열중량분석(TGA) 시험	105
제 5 장 결론	109
참고문헌	111

표 목 차

표 1.1 모르타르 공시체 배합비	4
표 3.1 모래 시료의 물리적 특성	30
표 3.2 탄산칼슘 시료 배합비	32
표 3.3 시멘트 시료 배합비	34
표 3.4 탄산칼슘+시멘트 시료 배합비	36
표 4.1 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 XRD 분석	43
표 4.2 탄산칼슘 공시체의 3일 강도평가 결과	44
표 4.3 탄산칼슘 공시체의 7일 강도평가 결과	47
표 4.4 탄산칼슘 공시체의 14일 강도평가 결과	49
표 4.5 탄산칼슘 공시체의 21일 강도평가 결과	51
표 4.6 탄산칼슘 공시체의 28일 강도평가 결과	54
표 4.7 양생기간에 대한 탄산칼슘 강도 평가	56
표 4.8 시멘트 공시체의 3일 강도평가 결과	58
표 4.9 시멘트 공시체의 7일 강도평가 결과	60
표 4.10 시멘트 공시체의 14일 강도평가 결과	63
표 4.11 시멘트 공시체의 21일 강도평가 결과	65
표 4.12 시멘트 공시체의 28일 강도평가 결과	67
표 4.13 양생기간에 대한 시멘트 강도 평가	70
표 4.14 탄산칼슘+시멘트 공시체의 3일 강도평가 결과	72
표 4.15 탄산칼슘+시멘트 공시체의 3일 강도평가 결과	75
표 4.16 탄산칼슘+시멘트 공시체의 14일 강도평가 결과	78
표 4.17 탄산칼슘+시멘트 공시체의 21일 강도평가 결과	80
표 4.18 탄산칼슘+시멘트 공시체의 21일 강도평가 결과	82
표 4.19 양생기간에 대한 탄산칼슘+시멘트 강도 평가	85
표 4.20 무처리 모래 전자현미경(SEM)	91
표 4.21 4% 공시체 3일 양생 후 SEM 분석 결과	91
표 4.22 4% 공시체 7일 양생 후 SEM 분석 결과	92

표 4.23 4% 공시체 14일 양생 후 SEM 분석 결과	93
표 4.24 4% 공시체 21일 양생 후 SEM 분석 결과	94
표 4.25 4% 공시체 28일 양생 후 SEM 분석 결과	95
표 4.26 4% 공시체 3일 양생 후 EDX 분석 결과	96
표 4.27 4% 공시체 7일 양생 후 EDX 분석 결과	97
표 4.28 4% 공시체 14일 양생 후 EDX 분석 결과	98
표 4.29 4% 공시체 21일 양생 후 EDX 분석 결과	99
표 4.30 4% 공시체 28일 양생 후 EDX 분석 결과	100
표 4.31 탄산칼슘 공시체 XRD 분석 결과	102
표 4.32 시멘트 공시체 XRD 분석 결과	103
표 4.33 탄산칼슘+시멘트 공시체 XRD 분석 결과	105
표 4.34 탄산칼슘 4% 공시체 TGA 분석 결과	106
표 4.35 시멘트 4% 공시체 TGA 분석 결과	107
표 4.36 탄산칼슘+시멘트 4% 공시체 TGA 분석 결과	108

그림 목 차

그림 1.1 미생물 반응 실험을 통한 흡의 변화	4
그림 1.2 미생물을 이용한 콘크리트 균열 치료	5
그림 1.3 SEM 분석결과	7
그림 1.4 SEM 분석 및 압축강도 시험 결과	8
그림 1.5 무처리된 모래시료 및 일반농도로 처리된 모래시료의 반응 실험 비교	9
그림 1.6 PVC 모형실험 장치 모식도	10
그림 2.1 흡입자 공극 사이의 탄산칼슘 모식도	14
그림 2.2 초기 미생물 용액의 pH 값	15
그림 2.3 미생물 크기에 따른 박테리아 종류	16
그림 2.4 수분함량, 온도, 호흡속도와의 관계	17
그림 2.5 Urea의 양에 따른 미생물 성장곡선	18
그림 2.6 미생물 고결화 메커니즘	21
그림 3.1 미생물 고결화를 위한 시험과정	23
그림 3.2 미생물 배양배지 만드는 방법	25
그림 3.3 계대배양방법	26
그림 3.4 탄산칼슘 추출 및 제작	27
그림 3.5 일축압축 시험용기	28
그림 3.6 시료 배합 및 공시체 제작	29
그림 3.7 모래 시료의 입도분포곡선	31
그림 3.8 탄산칼슘 공시체	33
그림 3.9 시멘트 공시체	35
그림 3.10 양생기간 3일 탄산칼슘+시멘트 공시체	37
그림 3.11 일축압축강도 시험기	38
그림 3.12 SEM 장비 및 결과사진	39
그림 3.13 X-선 회절분석기	40
그림 3.14 열중량분석기(TGA)	41
그림 4.1 미생물 용액과 염화칼슘 용액 방응 실험	42
그림 4.2 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 XRD 분석	43

그림 4.3 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 SEM 분석	44
그림 4.4 양생기간 3일에 대한 탄산칼슘 압축응력 비교	45
그림 4.5 양생기간 3일에 대한 탄산칼슘 압축응력 증가	45
그림 4.6 양생기간 3일에 대한 탄산칼슘 변형률	46
그림 4.7 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘 압축응력 비교	47
그림 4.8 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘 압축응력 증가	48
그림 4.9 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘 변형률	48
그림 4.10 양생기간 14일에 대한 탄산칼슘 압축응력 비교	50
그림 4.11 양생기간 14일에 대한 탄산칼슘 압축응력 증가	50
그림 4.12 양생기간 14일에 대한 탄산칼슘 변형률	51
그림 4.13 양생기간 21일에 대한 탄산칼슘 압축응력 비교	52
그림 4.14 양생기간 21일에 대한 탄산칼슘 압축응력 증가	52
그림 4.15 양생기간 21일에 대한 탄산칼슘 변형률	53
그림 4.16 양생기간 28일에 대한 탄산칼슘 압축응력 비교	54
그림 4.17 양생기간 28일에 대한 탄산칼슘 압축응력 증가	55
그림 4.18 양생기간 28일에 대한 탄산칼슘 변형률	55
그림 4.19 양생기간에 대한 탄산칼슘 압축응력	57
그림 4.20 양생기간 3일에 대한 시멘트 압축응력 비교	59
그림 4.21 양생기간 3일에 대한 시멘트 압축응력 증가	59
그림 4.22 양생기간 3일에 대한 시멘트 변형률	60
그림 4.23 양생기간 7일에 대한 시멘트 압축응력 비교	61
그림 4.24 양생기간 7일에 대한 시멘트 압축응력 증가	61
그림 4.25 양생기간 7일에 대한 시멘트 변형률	62
그림 4.26 양생기간 14일에 대한 시멘트 압축응력 비교	63
그림 4.27 양생기간 14일에 대한 시멘트 압축응력 증가	64
그림 4.28 양생기간 14일에 대한 시멘트 변형률	64
그림 4.29 양생기간 21일에 대한 시멘트 압축응력 비교	66
그림 4.30 양생기간 21일에 대한 시멘트 압축응력 증가	66
그림 4.31 양생기간 21일에 대한 시멘트 변형률	67
그림 4.32 양생기간 28일에 대한 시멘트 압축응력 비교	68
그림 4.33 양생기간 28일에 대한 시멘트 압축응력 증가	68

그림 4.34 양생기간 28일에 대한 시멘트 변형률	69
그림 4.35 양생기간에 대한 시멘트 압축응력	71
그림 4.36 양생기간 3일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 비교	73
그림 4.37 양생기간 3일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 증가	73
그림 4.38 양생기간 3일에 대한 탄산칼슘+시멘트 변형률	74
그림 4.39 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 비교	76
그림 4.40 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 증가	76
그림 4.41 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘+시멘트 변형률	77
그림 4.42 양생기간 14일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 비교	78
그림 4.43 양생기간 14일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 증가	79
그림 4.44 양생기간 14일에 대한 탄산칼슘+시멘트 변형률	79
그림 4.45 양생기간 21일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 비교	81
그림 4.46 양생기간 21일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 증가	81
그림 4.47 양생기간 21일에 대한 탄산칼슘+시멘트 변형률	82
그림 4.48 양생기간 28일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 비교	83
그림 4.49 양생기간 28일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 증가	83
그림 4.50 양생기간 28일에 대한 탄산칼슘+시멘트 변형률	84
그림 4.51 양생기간에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력	86
그림 4.52 중량비 2% 공시체의 일축압축 강도	87
그림 4.53 중량비 4% 공시체의 일축압축 강도	88
그림 4.54 중량비 6% 공시체의 일축압축 강도	89
그림 4.55 중량비 8% 공시체의 일축압축 강도	89
그림 4.56 탄산칼슘 4% 공시체 14일 양생 후 시료 XRD 분석	101
그림 4.57 시멘트 4% 공시체 14일 양생 후 시료 XRD 분석	103
그림 4.58 탄산칼슘+시멘트 4% 공시체 14일 양생 후 시료 XRD 분석	104
그림 4.59 탄산칼슘 4% 공시체 TGA 분석 결과	106
그림 4.60 공시체에 시멘트 4% 배합실험 TGA 분석 결과	107
그림 4.61 탄산칼슘+시멘트 4% 공시체 TGA 분석 결과	108

ABSTRACT

Effect of Strength Evaluation of Soil Treated with Calcium Carbonate Created by Microbial Reaction

Jeon, Sang Joo

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

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

A Several studies have recently been conducted on the great potential of biological treatments for geotechnical applications, in particular for ground improvement. Microbial Calcite Precipitation(MCP) has been achieved using the microorganism *Bacillus Pasteurii*, an aerobic bacterium pervasive in natural soil deposits.

The purpose of this thesis is to study the mechanism of cementation of soil induced by bacteria and strength improvement of soft ground. In order to understand the mechanism of cementation of soft soils treated with bacteria, six types of specimens(untreated, normal bacteria concentration treated, high bacteria concentration treated, supernatant high bacteria concentration treated, double high bacteria concentration treated, and 25% specimen high bacteria concentration treated) were made.

Additionally, Scanning Electron Microscope(SEM) and X-ray Diffraction(XRD) analyses were performed for reaction mechanism analysis of materials, which allowed for the identification of crystal, shape, particle size, chemical formula and mineral components for each condition.

In Scanning Electron Microscope(SEM), *Ca* mineral has been found in the voids between the soil particles. Also, $CaCO_3$ through X-ray Diffraction(XRD) analyses. This has been confirmed that microorganism may play an important role in the strength of soft ground.

제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 목적

최근 원자재 값 상승과 천연소재의 고결, 건설 재료의 부족으로 인해 건설산업발전은 날이 갈수록 어려워지고 있으며, 급속한 산업발전에 따라 국가 기간산업의 양적, 질적 확대에 의하여 넓은 대지를 가지고 있는 나라에 비해 국내에서는 부지확보에 어려움을 겪고 있다. 이에 효율적인 토지 이용을 위해 그동안 건설부지로 고려하지 않았던 느슨한 사질토나 연약한 실트질로 구성된 연약지반 개량 공법에 대한 관심이 상당히 높아지고 있다. 그리고 해외수주 등으로 중동지역에 많은 건설업체가 진출하고 있어 연약지반의 개량을 위한 새로운 공법 개발이나, 신소재의 개발이 필요한 실정이다.

느슨한 사질토나 연약한 실트지반은 압축성이 크며, 지지력이 작고, 보일링 및 히빙 등이 발생되어 기초지반으로서 안정성 확보가 매우 어렵다. 기존의 연약지반 공법을 살펴보면 연약지반의 연장조건을 고려하여 연직배수체인 샌드 드레인 및 페이퍼 드레인을 사용한 압밀배수공법, 동적하중을 이용하여 연약지반을 개량하는 다짐공법, 연약지반의 원지반 토사 자체를 치환하는 치환공법, 시멘트나 약액 등 화학약품을 이용하여 지반을 고결화 시키는 주입공법과 혼합공법 등이 주로 사용되어 왔다. 그러나 이러한 시멘트나, 석회의 경우 지반의 강도 증진에만 중점을 두었으며, 이산화탄소 배출 및 지하수 오염 등 환경문제에 대한 구체적인 해결방안은 제시하지 못하고 있는 실정이다.

한국시멘트협회(2005)에 따르면 2005년, 2006년 국내 시멘트의 생산량은 약 48,000천 톤으로 세계 시멘트 생산량 7위에 위치해 있다. 1톤의 시멘트를 생산하기 위해서는 약 0.9톤의 이산화탄소가 배출 되어야 하는데, 연간 4조원대인 시멘트 시장의 1%를 새로운 물질로 대체할 경우 280억 원의 이산화탄소 배출량 감축 효과를 가져 올 수 있다고 한다. 선진국의 경우 시멘트의 생산량을 한정하고 점차 줄여 나가고 있는 추세이며, 이산화탄소 배출금이라는 국제적인 법적 세금을 만드는 방안을 추진하고 있다. 따라서 친환경 신소재를 개발하여 저탄소, 지구 온난화 방지 등의 녹색성장 정책에 기여할 필요가 있고, 신소재의 개발을 통해 원자재 값 상승과 건설재료 부족 등의 문제를 해결해 나갈 필요가 있다.

이에 지반공학적으로 문제가 되고 있는 연약한 점토지반, 느슨한 모래지반에 친환경 신소재인 미생물을 첨가하여 생·화학적 반응을 통해 흙의 고결화(Cementation) 특성을 규명하고 새로운 공법을 개발하고자 하는데 국내·외 소수의 연구자들이 많은 노력을

하고 있다. 특히 미생물을 이용한 지반공학 분야의 연구로 국내에서는 김대현(2010) 등이 최초로 지반공학 분야에 적용 하였으며, 국외에서는 미국과 네덜란드를 중심으로 Dejong(2010), Paassen(2010) 등의 연구자들을 통하여 활발한 연구가 진행되고 있다. 또한 건축공학 분야의 연구로는 Muynck(2010) 등이 콘크리트 균열 개선에 미생물을 이용한 탄산칼슘 침전에 관한 연구가 진행되고 있다. 미생물을 이용한 연약지반 개량 공법이 개발되기 위해서는 흡입자와 미생물 용액의 생·화학적 고결화 발생 메커니즘의 규명이 매우 중요하다 할 수 있다.

본 연구에서는 새로운 메커니즘인 미생물을 연약지반에 교반하여 생장을 통해 탄산칼슘($CaCO_3$)을 생성하여 흡입자와 흡입자 간의 공극을 채워줌으로서, 연약지반의 고결화(Cementation)를 일으키는 이른바 MCP(Microbial Calcite Precipitation)기술을 적용하여 연약지반의 강도를 살펴보았다. 본 연구에서 사용되어지는 미생물은 인체에 무해하며, 일반적으로 흙 속에 존재하는 미생물 균을 선정하여 연약지반의 강도를 개선하고, 친환경적인 재료를 사용하기 때문에 환경적인 측면에서도 긍정적인 효과를 나타낼 수 있도록 하는데 기여하고자 한다.

본 연구에서는 탄산칼슘, 탄산칼슘+시멘트, 시멘트를 적용한 연약지반의 강도를 양생일 3일, 7일, 14일, 21일, 28일에 대해 측정하였으며, 연약지반 처리 후 시료의 성분 분석을 TGA, SEM을 통해 실시하였다.

1.2 국내·외 연구 동향

미생물을 이용한 흙의 고결화(Cementation)에 관한 연구는 최근 십여 년에 걸쳐 다양한 국내·외 연구가 진행 중에 있다. 미생물의 고결화 공법은 지반공학적인 분야 뿐만 아니라 미생물학적인 분야, 건축공학적인 분야와 환경적인 분야 등 다방면에 걸쳐서 MCP기술을 활용하고 있다. 각 분야의 선행연구는 다음과 같다.

국내 지반공학적인 분야에서는 김대현(2011) 등이 국내 최초로 순수한 미생물 작용에 의한 연약지반의 고결화 실험을 진행하였다. 국외에서는 Mitchell(2005) 등이 미생물의 크기와 시료의 입경크기에 따른 적용성 등을 분석하였고, Dejong(2009) 등이 연약지반의 MCP이론을 확립시켰으며, Paassen(2010) 등은 모형 토조 실험($0.9m \times 1.1m \times 1.0 m$)을 통해 주입공법을 사용함으로써 느슨한 모래지반에 적용하여 강도를 나타내는 등 지반공학 분야의 공법을 적용한 다양한 연구가 진행되고 있다.

건축공학적인 분야에서 Ramakrishnan(2005) 등은 콘크리트의 강도 개선을 위해 미

생물을 사용하였으며, Graef(2005) 등은 콘크리트 구조물 표면에 발생한 이끼 등에 의한 찌꺼기를 미생물의 사용으로 제거하는 방법 등 미생물의 적용성에 대한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 김화중(2010) 등은 모르타르의 균열에 자기치유 스마트 콘크리트 개발에 대한 기초연구가 진행되고 있다.

미생물학적인 분야에서 Aydilek(2008)은 흙 표면에 서식하면서 성장하는 미생물의 모습을 선처리를 통해 전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscope)으로 확인하였다.

1.2.1 국내 연구 동향

미생물을 이용한 흙의 고결화에 관한 국내 연구는 소수의 연구자에 의해 시도되고 있으며, 시간이 지날수록 미생물 고결화 공법에 대한 관심이 점차적으로 높아지고 있다.

김대현(2011)은 느슨한 사질토와 실트질 지반에 MCP를 적용하여 국내에서 처음으로 지반공학 분야에 순수한 미생물의 효과를 확인하고자 실험을 진행하였다. 실험에 사용한 느슨한 사질토는 주문진 표준사를 사용하였으며, 실트질 시료는 광주 호천 2지구 LH 주택공사 현장에서 채취한 시료를 사용하였다. 시험 시료는 No.10체를 통과한 시료를 사용하였으며, 시료의 물리적 성질을 파악하기 위해 비중(KS F 2308), 체가름(KS F 2309), 입도(KS F 2302), 다짐시험(KS F 2312)을 실시하였다. 침강제는 염화칼슘 수용액 25ml 0.75M을 사용하였는데, 이는 순수한 미생물의 침전 반응을 통해 흙의 고결화를 이루기 위함이었다.

시험 결과 무처리된 시료와 일반농도처리 시료, 고농도처리 시료를 느슨한 사질토와 실트질 시료를 최적 함수비를 설정하여 미생물 용액과 reaction 용액 1:1 비율로 각각 7일, 14일, 28일 간격으로 비교를 하였다. SEM, EDX와 Mapping 분석을 통해 Ca계열의 함유가 높아짐에 따라 칼슘계열의 증가를 확인 할 수 있었고, 그림 1.1과 같이 무처리 시료와 고농도처리 시료를 육안 상으로 고결화를 비교 할 수 있었다. 그러나 XRD 분석을 통해 미생물로 처리된 시료의 탄산칼슘($CaCO_3$) Peak를 확인하지 못하였고, 그 이유로는 calcite의 결정구조가 5% 미만이거나, 결정성이 좋지 못함을 보였기 때문이었다. 또한, 포켓관입시험기로 측정할 수 없을 정도의 느슨함을 가지고 있어서 강도시험을 할 수 없었으나, 국내 처음으로 순수한 미생물 고결화의 메커니즘을 규명하였고, 미생물을 통한 연약지반의 고결화의 가능성을 볼 수 있었다.



그림 1.1 미생물 반응 실험을 통한 흄의 변화(김호철, 2010)

건축공학분야로는 김화중(2009) 등이 콘크리트 구조물의 장기 수명화를 목적으로 변 잡한 검사나 보수작업을 필요로 하지 않고 콘크리트에 발생하는 미세한 균열에 대한 수시의 점검 등이 필요 없는 미생물의 생체 광물 형성 작용을 이용한 콘크리트 그 자체에 자기치유 기능을 목적으로 기초연구를 진행 하였다. 표 1.1은 모르타르 공시체의 배합비를 나타내었다.

표 1.1 모르타르 공시체 배합비

단위 : g/(256cm³ × 3EA)

Name	Cement	Sand	Water	Phosphate buffer/C	Target flow (mm)
SP-15	390	12229	175.5	58.5	180 ± 10
SP-30	390	12229	175.5	117	
SP-45	390	12229	175.5	175.5	
SP-60	390	12229	175.5	234	

- 김화중 등, 2009

실험 방법으로는 C:S = 1:3으로 하고, 물+인산 완충액을 시멘트에 60%로, pH의 변화를 위해 인산염 완충액(Phosphate buffer)사용하여 모르타르 공시체를 제작하였다. 3일간 수중양생을 실시, 절건 상태에서 균열을 만들어 균열부에 10ml 주사기를 이용,

그림 1.2와 같이 콘크리트의 인공균열 부분에 미생물용액과 반응용액을 주입하였다. 각각의 공시체 중심부에 1ml씩 30분 간격으로 1일 기준 총 10회 투입하였으며, 이를 3일 동안 반복 실시하였다. 투입한지 7일이 지난 후 XRD 분석을 통하여 탄산칼슘의 석출을 확인 하였다.

실험결과 탄산칼슘이 전체 시료 중 13%인 반면에 균열부의 경우 탄산칼슘이 29%로서 분석결과, 표면부에 비해 균열부에서 약 2.23배 정도 많은 탄산칼슘을 확인 할 수 있었다. 이로서 시멘트 환경에서도 미생물에 의한 탄산칼슘 침전 반응이 활발히 일어남을 알 수 있었다. 그러나 균열의 충전 및 보수 가능성에 대한 기초 연구로서 공시체의 강도적인 문제는 언급되지 않았다.

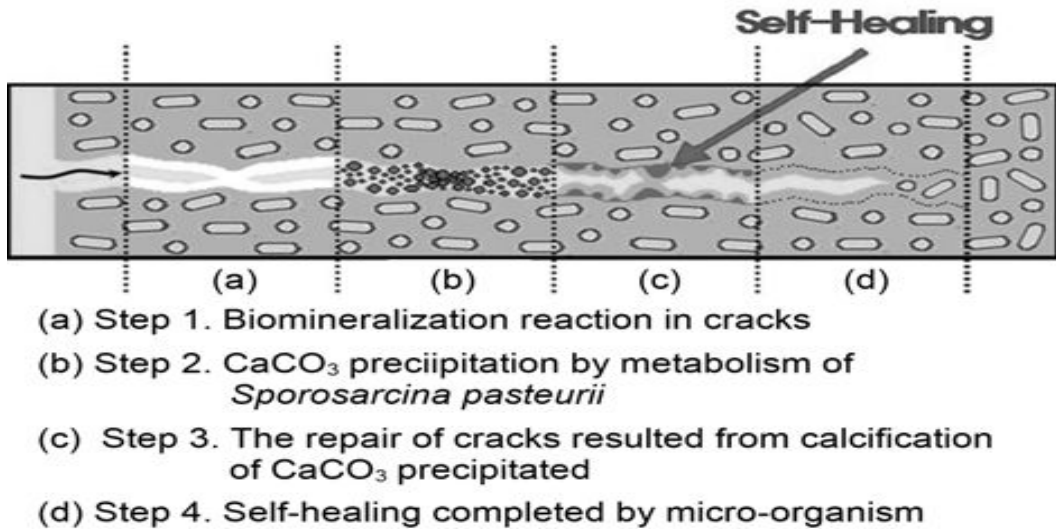


그림 1.2 미생물을 이용한 콘크리트 균열 치료(김화중 등, 2009)

김대현(2011)에서는 투수시험 분석결과를 통해 모래시료, 모래질 실트시료에 미생물 처리시 차수효과를 확인하였으며, 모래시료에서는 약 35% 정도, 모래질 실트시료의 경우 약 35% 정도 차수효과를 각각 확인하였다.

김화중(2011)등이 사질토 지반에 미생물을 활용하여 탄산칼슘과 같은 물질의 침전을 유도할 경우 지반을 친환경적으로 메우거나 차단등과 같은 효과를 기대하였다.

박성식(2011)에서는 미생물에 의해 생성된 탄산칼슘은 지반 내의 공극에 침전되어 수밀성을 높이거나 지반을 고결함을 증명하기 위해 일축압축시험을 실시하였으나. 모래질로 제작한 공시체에 미생물을 주입한 결과 오히려 강도저하가 발생하였다.

김대현(2013)에서는 현장조건과 유사한 방법으로 1.5 Shot 주입(약액과 반응약액을 중간에서 혼합 주입) 장치를 제작하여 바이오 그라우팅 공법의 효과를 확인하였으며, 수질오염에 미치는 영향이 적은 것과 시멘트와 결합성이 상당히 높아 현장에서도 충분히 실용성이 있음을 입증하였다.

장일환(2013)에서는 바이오폴리머를 이용한 흙 처리방법을 제안하였으며, 대표적 고분자 다당류계열 바이오폴리머인 베타글루칸을 이용한 흙의 강도증진 실험결과 흙 내부에 고강성의 매트릭스를 형성하여 강도를 증진시킴을 확인하였다.

1.2.2 국외 연구 동향

미생물을 이용한 국외연구는 유럽, 미국, 일본 등에서 활발히 연구가 진행되고 있으며, 이러한 연구 동향을 통하여 현재 사용되어지는 MCP와 새로운 미생물 주입공법인 bio-grout라는 용어가 공통적으로 사용되고 있다. 또한 미생물 공법의 특허가 2008년, 2009년, 2010년 등록됨으로써 미생물의 연구가 활발히 진행되고 있다는 것을 알 수 있다. 국외의 연구 동향을 살펴보면 다음과 같다.

미생물학분야로는 Aydilek(2008) 등이 미생물의 탄산칼슘 침전을 발생시키는 것은 Urea의 분해를 통해 발생한다는 것을 입증하기 위해 미생물이 흙입자에 실제로 존재하는지를 알아보기 위해 실험을 실시하였다. 실험된 공시체에 선 처리(Mounting, Coating)를 통해 아래 그림 1.3에서 보이는 것과 같이 흙 속에 미생물의 존재 가능성을 입증하였다.

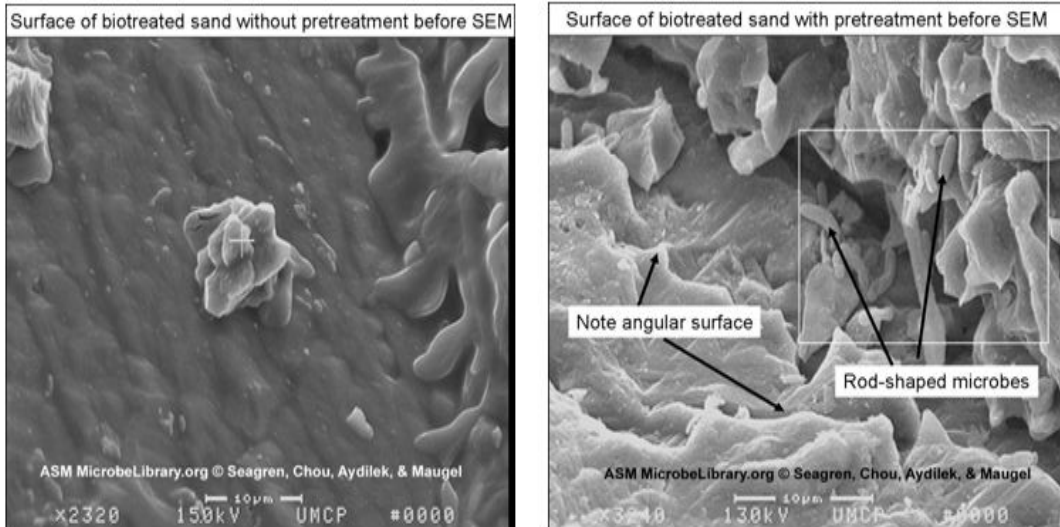


그림 1.3 SEM 분석결과(Aydilek 등, 2008)

건축공학분야로는 Ramakrishnan(1998), Ramachandran(2001) 등이 콘크리트 구조물의 균열을 보강하기 위한 재료로서 미생물의 사용을 연구해왔다.

시멘트 표준 비에 사용된 혼합방법과 박테리아(*Bacillus Pasteurii*) 성장제의 현탁액을 모래에 결합하여 모르타르 기둥을 만들었다. 인공적인 균열은 대안적인 재료(예를 들면 모래, 석회가루, 실리카 흙)들과 박테리아 혼합재료로 28일 동안 보강되어졌는데, 아래 그림 1.4와 같이 균열부분의 SEM 조사로 방해석 결정체의 존재를 확인하였고, 살아있는 박테리아 $7.6 \times 10^2(\text{cells}/\text{cm}^2)$ 일 때 압축강도가 높음을 확인 할 수 있었다.

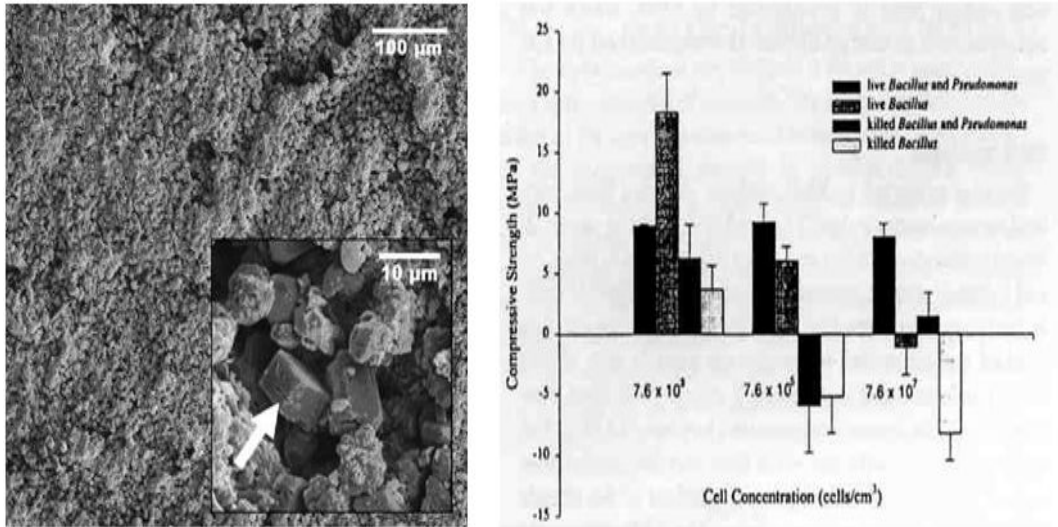


그림 1.4 SEM 분석 및 압축강도 시험 결과(Ramachandran 등, 2001)

지반공학 분야로 Dejong(2009) 등은 Ottawa 50-70 모래를 이용하여 무처리된 모래 시료, 석고 시멘트로 처리된 모래시료, 박테리아로 처리된 모래시료에 대해 각각 입자 간의 고결화 정도를 확인하였다.

시험에 사용된 Ottawa 50-70 모래는 천연 상태의 모래를 사용하였으며, 온도 180°C 에서 24시간 멸균되었고, 각각의 모래 시료는 상대밀도 40%로 맞추어 실험이 실시되었고, 시험에서 석고 시멘트로 처리된 모래시료는 탄산칼슘 고결 작용과 가장 비슷하게 반응한다. 이러한 석고 시멘트로 처리된 모래 시료 및 미생물로 처리된 모래 시료는 시료의 구성 성분을 평가하기 위해서 삼축압축시험을 실시하였다.

미생물로 처리된 모래 시료의 삼축압축시험 방법은 다음과 같이 실시되었다.

- ① *Bacillus Pasteurii*는 고체 영양배지(한천)에서 배양되어 졌으며, 배양의 순도를 확보하기 위해서 새로운 배양액에 두 번 옮겨졌다. 하나의 균체는 액체 배양액에 옮겨져 온도 37°C에서 19시간 동안 배양되어 졌다.
- ② 액체 미생물 배양액은 10분 동안 4°C의 원심분리에서 농축되어 졌다.
- ③ 원심분리가 끝난 후 표면에 뜨는 상층액은 제거되고 농축된 세포들은 다시 액체 배양액에 옮겨져 배양되고, 초기 세포 제거를 위해 다시 원심작용을 받게 된다.
- ④ 이렇게 나온 요소 성장 매개물은 20ml에서 다시 옮겨지게 된다.
- ⑤ 미생물 주입액과 미리 식혀진 요소 성장 매개물이 동시에 준비되어지며, 400ml의 요소 성장 매개물에 미생물 주입 액은 혼합되어 공기 중에 노출되어 휘저어진 결

과 pH는 약 6.5 ~ 7.5가 되었다.

- ⑥ 그 후 25.2mM의 Ca^{2+} 가 농축되기 위하여, 10mg/L 염화칼슘 용액이 호기성 요소에 더해졌다. 그리고 염화칼슘과 미생물을 미리 섞어 시편에 넣는다.
- ⑦ 반응되어진 용액은 모든 세포들의 부유를 위해서 부드럽게 교반되어지고, 미생물 용액은 연동펌프를 사용하여 삼축압축시험 시편에 주입되어 졌으며, 요소, 염화칼슘 용액 그리고 *Bacillus Pasteurii* 균으로 이루어져 있는 40ml 용액은 공기에 노출이 된다.
- ⑧ 용액은 20분 동안 분당 20ml의 속도로 시편의 바닥으로 뽑아 올려졌다.
- ⑨ 이러한 실험은 반복적으로 시멘트 결합의 일정한 수준이 달성 될 때까지 시편을 통과해 흘러보내졌으며, 시편 내 충분한 알칼리 조건이 존재하는지 확인하기 위하여 유출되는 용액의 pH는 정기적으로 측정되어졌다.

시험결과, 미생물로 처리된 모래 시료에서 며칠 사이에 감지할 수준의 고결화가 발생하였다. 그림 1.5는 무 처리 된 모래 시료(왼쪽)와 미생물로 처리된 모래 시료(오른쪽)를 나타내고 있으며, 미생물의 생장으로 인해 흡입자와 흡입자 사이에 고결화가 발생되었음을 나타내고 있다. 그러나 실험과정이 복잡하여 적용성에 있어서 어려움이 있었다.

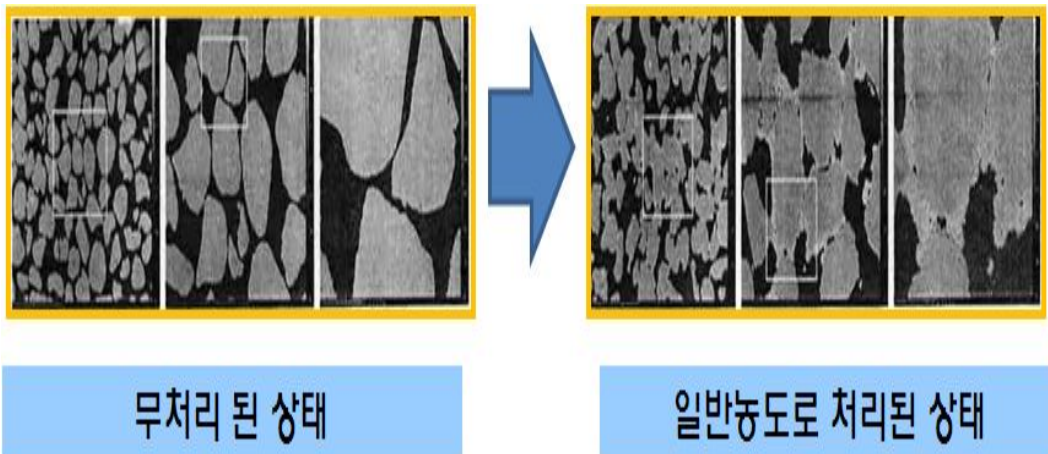


그림 1.5 무처리된 모래시료 및 일반농도로 처리된 모래시료의 반응 실험 비교
(Dejong 등, 2006)

Whiffin(2004)은 Itterbeck sand(D60/D10 = 1.64)를 사용하여 PVC 원기둥(66mm 지름, 5m 길이)을 수직으로 고정시키고 원기둥 속에 모래로 동일한 밀도를 유지하여 채움으로 공극의 체적은 6L로 맞추었다. 처음으로 6L의 박테리아 용액을 주입하여 통과시키고, 다음으로 모래 기둥 전체에 걸쳐서 분포 및 고정시키기 위해서 0.05M의 염화칼슘 수용액 6L을 주입시켰다. 마지막으로 1M Urea와 염화칼슘 수용액으로 만들어진 9L의 시약용액을 배수구로 나오는 용액에서 Urea의 반응이 멈출 때까지 주입시켰다. 그 후에 모래 기둥은 24시간동안 반응하게 두었고, 탁도계를 사용하여 농도를 측정 하였다. 박테리아 용액과 시약용액 둘 다 낮은 압력(약 7m/day)으로 기둥 길이 전체에 걸쳐 막힘없이 주입이 되어졌다.

시험의 결과로는 비파괴 시험인 초음파 속도로 강도 변형 식을 사용하여 100kg/cm^2 정도의 큰 값을 얻었으나, 이 일축압축강도의 값은 정량적인 분석이 아닌 추정치에 의한 값으로 얻어지는 것이다.

그림 1.6은 PVC 원기둥(66mm 지름, 5m 길이)의 모형실험 장비의 모식도이다. 미생물과 반응용액을 주기적으로 주입한 결과 탄산칼슘의 침전이 5m 모래기둥 전반에 걸쳐서 생성이 되었으나, 주입구 부분에서 많은 침전이 이루어 졌으며, 시료의 길이가 길어 질수록 탄산칼슘 침전의 양은 적어졌다. 이를 통해 미생물의 침전효과는 반응용액과 혼합된 직후 탄산칼슘의 침전이 일어남을 알 수 있었고, 탄산칼슘 침전의 양에 따라 강도의 효과가 높은 것으로 나타남을 알 수 있었다.

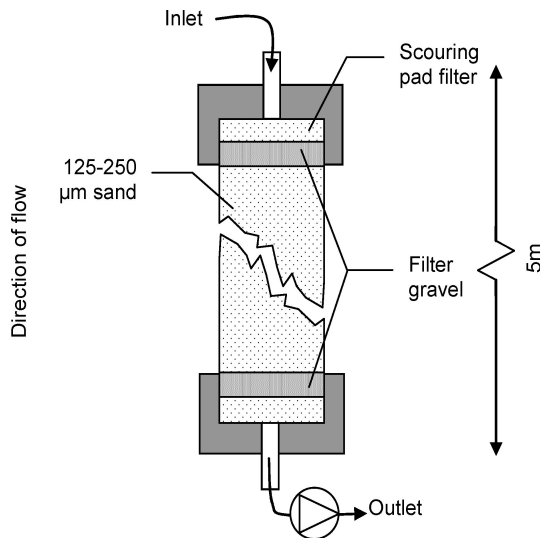


그림 1.6 PVC 모형실험 장치 모식도(Whiffin, 2004)

Paassen(2009) 등은 현장 적용성을 검토하고자 0.9m × 1.1m × 1m의 컨테이너 박스에 모래를 채워 실험을 하였다. 실험방법을 살펴보면 컨테이너 박스의 안쪽 옆면에는 배수거름장치 설치하고 밑으로는 배수장치를 만들었고 Mass river sand(D60/10 = 1.6)와 Ilterbeck sand(D60/D10 = 1.64)를 각각 사용하였다.

① Mass river sand는 0.9m × 1.1m × 1m 컨테이너 박스의 안에 동일한 밀도를 유지하도록 지게차를 사용하여 동일한 높이에서 자연 낙하로 시료를 채웠다. 100L 박테리아 현탁액과 시료용액(0.5M Urea, 염화칼슘)은 일정한 흐름율과 옆면에서 일정한 수위로 박스 중앙에서 옆면을 따라 주입률(50L/hr)로 주입 되어졌다. 50일 동안에 3,500L의 시약용액은 8번에 주입되어 약 12%의 효율로 200M의 탄산칼슘(20kg/m³)은 침전되어졌다. 이 실험에서는 탄산칼슘은 코너와 바닥에서 옆면을 따라 존재함을 확인 할 수 있었다.

② Ilterbeck sand는 0.9m × 1.1m × 1m 컨테이너 박스의 안에 동일한 밀도를 유지하도록 지게차를 사용하여 동일한 높이에서 자연 낙하로 시료를 채웠다. 주입압력은 점차적으로 증가를 시켜 40일 동안에 4,000L의 시약용액은 16번 주입되었다. 이것으로 50%의 효율로 1,000M의 탄산칼슘(100kg/m³)이 침전되어졌다.

시험결과로는 Manual cone penetration test를 통하여 표면에서 50kg/cm²보다 높은 저항을 나타냈고, 탄산칼슘의 수량화를 통해 탄산칼슘의 양에 따라 강도의 효과를 보았다. 그러나 강도의 증가는 표면이 닿는 부분과 공기가 닿을 수 있는 걸 표면부분을 따라서 강도가 증가되었고, 공기가 통과하지 못하거나, 존재하지 않는 가운데 부분의 강도 증가는 미미함을 알 수 있어 호기성 미생물에 대한 연구가 필요하다.

1.3 연구방법 및 범위

국내에서는 공사비 절감과 국토의 효율적인 이용을 위해 연약지반 및 해안 준설 매립 지반을 기초지반으로 활용하여 시공하는 공사현장이 증가하고 있는 추세이다. 이러한 연약지반 및 준설 매립지반은 초기 지지력이 낮고, 함수비가 높아 기초지반으로 활용하는데 많은 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 대책공법들이 개발되어 현장에 적용되고 있으나, 단순히 지반을 개량하는 데에만 중점을 두고 있어 발생하는 환경문제를 개선에 많은 문제점이 있다. 하지만 미생물을 연약지반에 적용하여 미생물 성장을 통해 탄산칼슘을 생성시켜 입자 간의 공극을 채워줌으로써 연약지반의 환경적 피해 없이 강도를 개선 할 수 있다.

본 연구에서는 미생물을 연약지반에 적용하여 미생물 성장을 통해 탄산칼슘($CaCO_3$)을 생성시켜 입자 간의 공극을 채워줌으로써 연약지반의 강도를 개선한 지반의 강도를 확인하고자 한다. 미생물 성장을 통해 생성된 탄산칼슘($CaCO_3$)을 추출하여 연약지반을 개량시 지반을 구성하는 흙의 중량비, 양생일에 따른 강도를 일축압축시험을 통해 확인 하였으며, 미생물을 이용한 연약지반의 강도와 현재 연약지반의 개량에서 널리 이용되는 시멘트를 이용한 연약지반에서의 강도를 측정하여 비교 분석하고자 한다. 또한 탄산칼슘과 시멘트를 같은 비율로 교반한 연약지반의 강도를 추가적으로 실시하여, 시멘트의 양을 줄여 주변 환경의 피해를 최소화 할 수 있는 방안을 모색하였다. 그리고 미생물 Urease에 의한 탄산칼슘 고결화 메커니즘을 규명하기 위해 흙입자 표면을 200~10,000배 확대하여 표면의 결정을 확인하는 전자현미경(SEM) 분석, 흙입자에 생성된 광물을 원소기호로 표시하여 백분율로 나타내는 EDX 분석, X선을 이용한 파동성과 결정내 원자의 규칙적인 배열을 Scale Factor로 나타내어 정량적인 분석, 열중량분석법(TGA)을 이용하여 미생물의 생체광물형성작용으로 인해 생성된 탄산칼슘($CaCO_3$)의 양을 정량적으로 확인하고자 한다.

제 2 장 미생물 고결화 특성

2.1 미생물 고결화 개념

흙의 고결화(Cementation)는 고결작용, 또는 퇴적물이 퇴적암으로 되는 속성작용이라고 한다. 이러한 고결화는 공극을 통하여 고결물(Cement)이라 부르는 고형물질들이 공극 내에 침전되어 퇴적물 입자들을 서로 묶어 주어 흙입자들을 단단하게 형성하도록 한다.(김호철, 2010)

미생물에 의한 흙의 고결화는 친환경 신소재인 미생물 용액 속의 Urease(요소가수분해효소)를 통해 이산화탄소(CO_2)와 암모늄(NH_4)을 생성하여 탄산염(HCO_3)를 만들고, 반응용액인 염화칼슘 수용액($CaCl_2$)의 혼합으로 탄산칼슘($CaCO_3$)이 흙 속의 공극 내에 침전되어 흙입자들을 단단한 고결물로 형성하도록 하는 것이다. 이러한 방법으로 연약지반의 고결화를 이루는 공법으로는 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 걸어서 지반 속의 간극, 공동, 균열 등을 메워 강도증가와 차수성을 높이고자 하는 연약지반 개량공법의 하나이다. 비배수 그라우팅의 중요한 특성은 자연성질을 이용한 것이다. 이러한 비배수 그라우팅 방법은 흙 퇴적물의 원상태가 파괴되지 않는 특성이 있어 흙이 자연성질 그대로를 가지게 된다. 화학적 그라우팅은 보통 $10^{-1} \sim 10^{-4}$ cm/sec 범위의 침투성을 가진 토양을 처리하는데 사용된다(Karol 2003, Leonard 와 Moller 1963). 화학적인 그라우팅은 일단 한번 주입되면 침전물 입자의 축진에 의해서 퇴적물에 굳어 응고되거나 긴 결정체로 채워져 얽히게 되는데, 침전물이 응고되고 굳어지는 시간은 활성화제, 흡입제, 축매제의 밀도에 따라 다르며, 범위는 1~300min 까지 할 수 있다(Karol 2003).

아래의 그림 2.1은 흙 입자 주변에 탄산칼슘이 어떤 형태로 존재하는지 보여주고 있다. 탄산칼슘의 침전이 흙 입자 주변에 균일한 두께의 모습으로 존재하고 있음을 나타내고 있으며, 탄산칼슘에 의한 두 입자 사이의 결합은 비교적 작음을 알 수 있다. 이렇게 빈 공간을 중합된 젤로 채움으로써 강도가 증가 되었으며, 이러한 강도 증가는 흙의 안정성을 증가시킴과 동시에 침하로 인한 붕괴 가능성을 줄이고, 흙 입자를 고정시키는 결과를 가져온다.

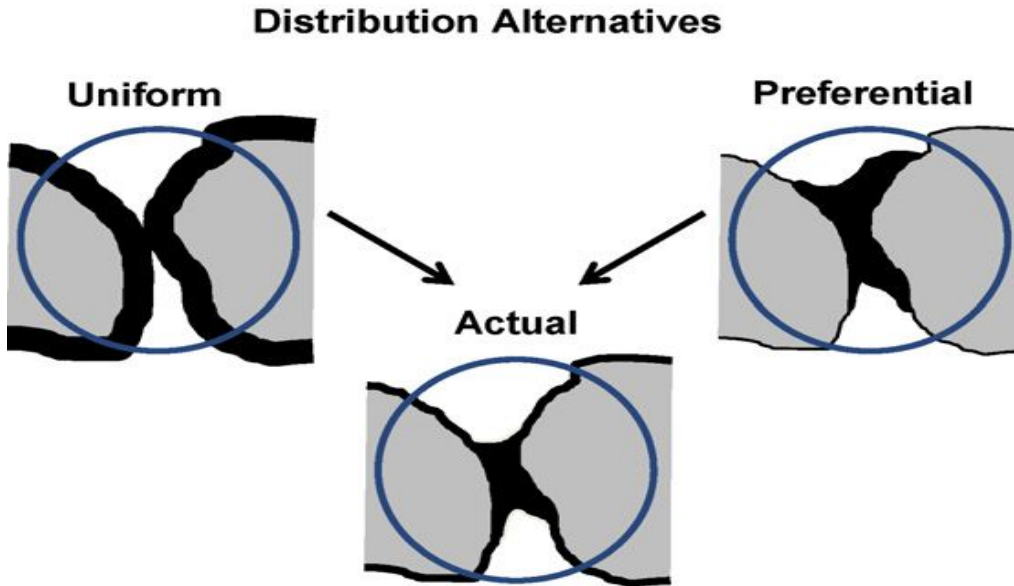


그림 2.1 흉 입자 공극 사이의 탄산칼슘 모식도(Dejong 등, 2010)

2.2 미생물 고결화 시 고려해야 할 요인

2.2.1 미생물 용액의 pH

pH의 환경은 MCP 기술에 의한 고결화에 매우 중요한 요인 중의 하나이다. 미생물 반응으로 생성되는 탄산칼슘결정 침전은 그림 2.2와 같이 pH 8.3에서 시작하며, 탄산칼슘 결정 침전이 증가하는 비율은 pH 9이상에서 발생된다고 하였다(Stock-Fischer 1999). 이에 본 연구에서는 최초 미생물 용액의 pH를 8.5로 맞추어서 염화칼슘 용액과 섞어 탄산칼슘 결정의 침전이 최대로 이루어 질 수 있도록 설정하여 실험을 하였으며, 시료와 미생물용액, 염화칼슘용액이 혼합된 시료를 일회용 pH 측정 paper에 문지르면 무처리 된 시료의 경우 6.5, 일반농도 처리된 경우는 7.0으로 나타났다. 이는 미생물, 염화칼슘 용액을 흉에 적용 시 pH가 낮아짐을 알 수 있다.

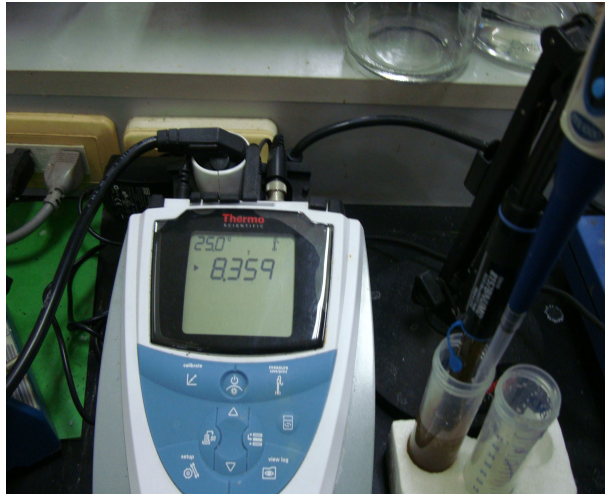


그림 2.2 초기 미생물 용액의 pH 값

2.2.2 미생물의 크기 및 공극비의 관계

미생물 초기의 크기는 0.001~0.003mm 정도로 실트 및 모래 입자보다 상대적으로 작으므로 많은 흙의 종류에 적용성이 좋다. 미생물이 공극 공간을 자유롭게 움직일 수 있는지에 대한 단위체적당 충분한 입자 간의 접촉에 달려 있으므로 미생물의 침전이 일어나기 위해서는 공극의 사이를 반드시 반응용액과 미생물 용액이 지나갈 수 있는 정도의 크기를 가져야 하며, 그렇지 못한 연약지반의 경우 효과가 감소 할 수 있다. 실험에 사용된 미생물은 투입당시에 자유로운 통과가 이루어지나 세포 밖에서 방해석 침전이 일어날 경우 미생물의 크기는 탄산칼슘과 흡착하여 입자크기를 상승시키며, 결과적으로 약 20배정도 커진 0.06mm~0.1mm의 크기가 된다. 이에 미생물 반응을 통해 미생물 성장 시 미생물이 충분히 움직일 수 있는 공극이 확보 되어야 한다(Mitchell 등, 2005). 그림 2.3은 미생물의 크기와 흙의 크기 등을 비교하여 적용 될 수 있는 범위를 나타내고 있다.

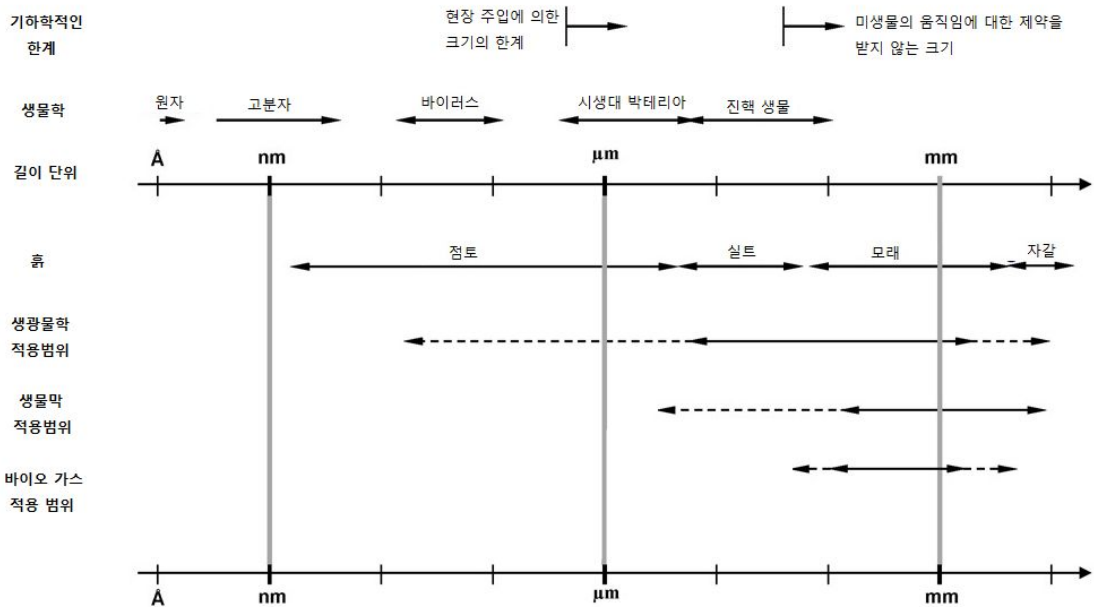


그림 2.3 미생물 크기에 따른 박테리아 종류(Mitchell 등, 2005)

2.2.3 흙 입자의 크기

흙 입자의 크기 및 공극비는 미생물 반응 실험이 실질적으로 이루어 질 수 있는 조건으로 미생물 성장에 중요한 요인이라고 할 수 있다. 통일 분류법을 참고하여 흙을 분류 했을 때 자갈의 경우 4.75mm 이상의 입자들을 말하며, 모래의 경우 0.075mm 이상~4.75mm 미만의 입자들을 나타내고, 실트의 경우 0.002mm 이상~0.075mm 미만의 입자들이며, 점토의 경우 0.002mm 미만의 입자들을 나타낸다(박경호, 2011).

2.2.4 수분함량 및 온도

미생물의 생장은 수분의 함량과 온도의 영향을 받는다. 아래 그림 2.4는 수분함량과 미생물의 호흡속도의 관계를 나타내는 것으로 최적의 온도에서 가장 활발한 호흡속도를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 미생물의 호흡속도는 실질적으로 생성되는 탄산칼슘의 양을 증가시켜주는 역할을 하며, 그림 2.4에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 사용된 미생물 최적의 성장 온도는 30°C이며, 이에 본 연구에서는 온도 조건을 30°C로 하여 미생물을 인큐베이터에서 배양하였다.

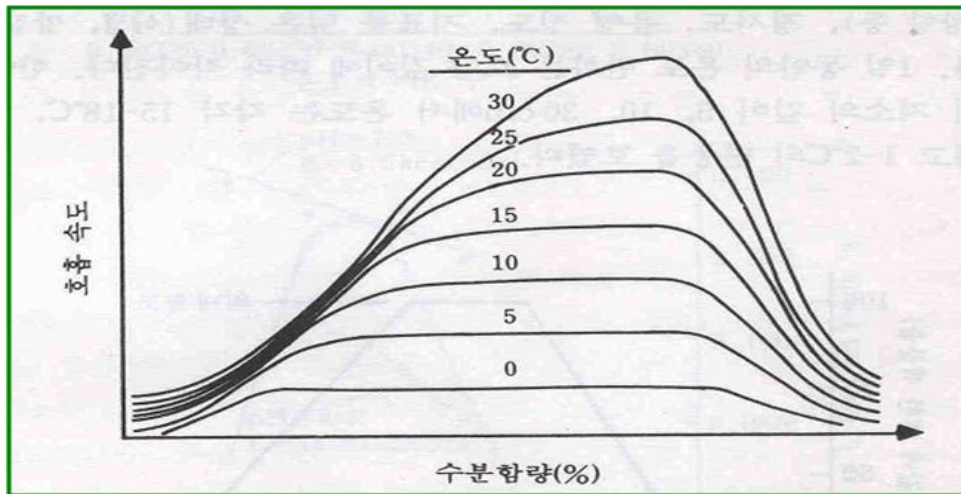


그림 2.4 수분함량, 온도, 호흡속도와의 관계(김호철, 2010)

2.2.5 Urea의 함량에 따른 미생물 성장곡선

미생물 활성화를 알아보려고 미생물의 성장곡선을 측정하여 늦은 성장기의 시간을 파악 하였고, 배양액의 Urea 조건 만을 변경하여 그림 2.5와 같이 성장곡선 그래프를 작성 하였다. 그래프를 통해 미생물은 30시간이 넘을 때까지 사생기를 거치지 않고 1일 간의 지속기간을 가짐으로서 상당히 오랫동안 성장이 가능함을 확인 할 수 있었다. 또한 현재 사용하고 있는 Urea 2%가 가장 높은 활성화를 보이는 것으로 나타났으며, 24 시간이 지나고 나서부터는 1%이상의 Urea 미생물만이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 마지막으로 계대배양을 하고 약 10~12시간 후 정도가 미생물의 최대 활성화 기간 인 늦은 성장기 시간대로 볼 수 있다.

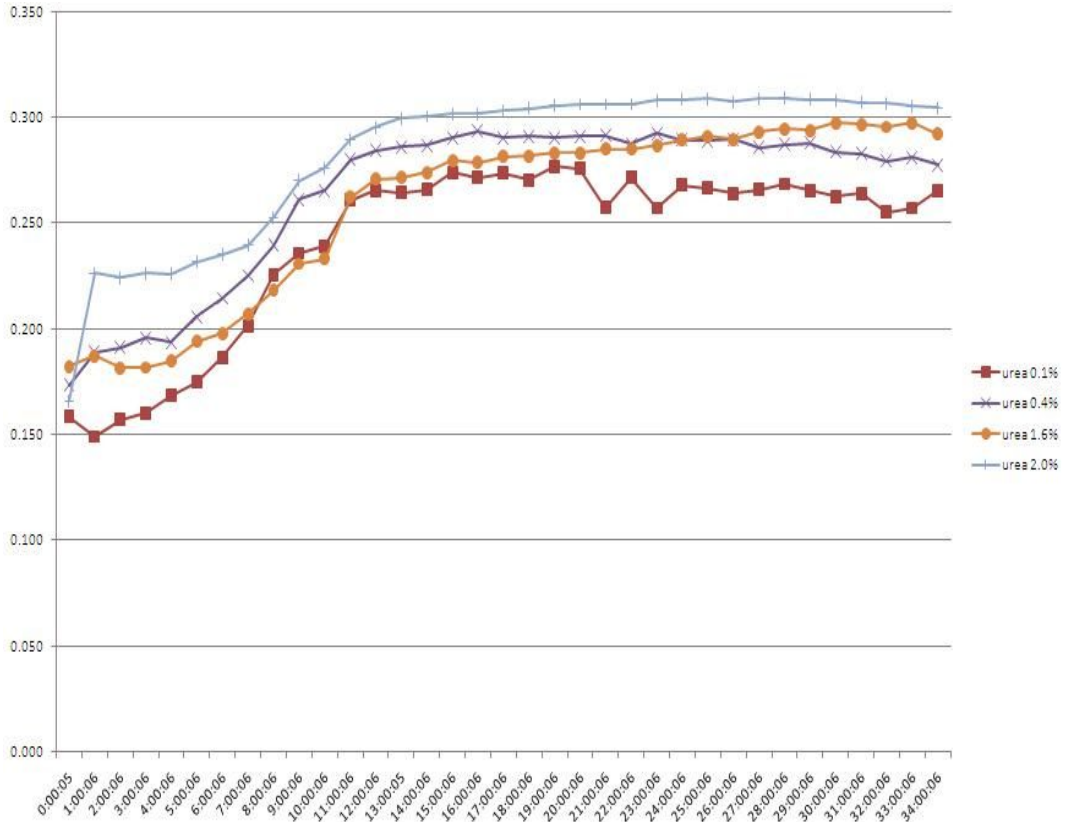


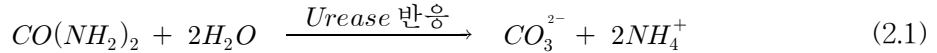
그림 2.5 Urea의 양에 따른 미생물 성장곡선(박경호, 2011)

2.3 미생물에 의한 탄산칼슘 생성 이론

2.3.1 미생물과 요소(Urease)의 반응

미생물을 이용한 흙의 고결화(Cementation) 가능성은 미생물의 성장 반응을 통한 결과라고 할 수 있다. 본 연구에서는 미생물을 배양하기 위해서 배양배지를 만들었으며, NB(Nutrient Broth)와 요소 혼합액을 사용하였다. 미생물 성장 요소 중 하나인 NB는 식물의 성장에 필요한 물질을 용해시킨 수용액이다. 또한 요소는 Urea라고도 하며, 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 관여한

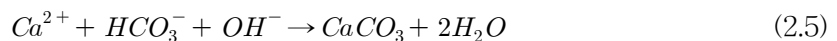
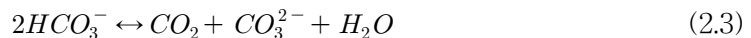
다. 이러한 요소분해효소는 미생물 및 고등식물, 하등식물, 고등동물의 위정액과 적혈구에 널리 분포하며 식물에도 존재하기도 한다. 미생물과 요소의 반응식은 아래 식 2.1과 같으며, 미생물 성장을 통해 아래와 같이 탄산이온(CO_3^{2-})과 두 개의 암모니아이온(NH_4^+)로 가수분해 된다.(김호철, 2010)



2.3.2 탄산칼슘 생성 이론

2.3.2.1 광합성에 의한 탄산칼슘 생성

물속에서 성장하는 광합성 생물에 의해서 미생물의 Urease 같은 현상이 발생하기도 한다(McConnaughey 등, 1997). 생물의 신진대사 진행은 식 2.2와 같이 이산화탄소를 용해시키면서 성장하고, 이러한 이산화탄소가 물과 결합하여 식 2.3과 같이 HCO_3^- 와 CO_3^{2-} 을 동등한 식으로 나타 낼 수 있다. 이산화탄소의 제거로 식을 치환하면 식 2.4와 같은 식을 완성할 수 있고, 그 결과 pH의 증가가 됨을 알 수 있다(Ehrlich, 1998). 이때 탄산염과 반응 할 수 있는 칼슘 이온의 용액을 주입시키면 식 2.5와 같이 탄산칼슘($CaCO_3$)이 생성될 수 있다(Hammes 등, 2002).

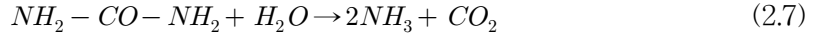


2.3.2.2 미생물에 의한 탄산칼슘 생성

미생물 요소를 먹잇감으로 삼아 성장을 통해 생성된 탄산이온(CO_3^{2-})과 염화칼슘($CaCl_2$)을 수용액화 하여 생성된 칼슘이온(Ca^{2+})의 반응이라고 할 수 있다. 이러한 미생물을 이용한 탄산칼슘($CaCO_3$) 침전의 전체 반응식은 아래 식 2.6과 같다.



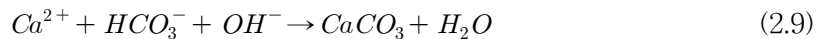
Sporosaricina pasteurii 미생물은 요소($CO(NH_2)_2$)와 물(H_2O)과 반응하여 2개의 암모늄($2NH_3$)과 이산화탄소(CO_2)로 분해되는 반응식은 아래 식 2.7과 같다.



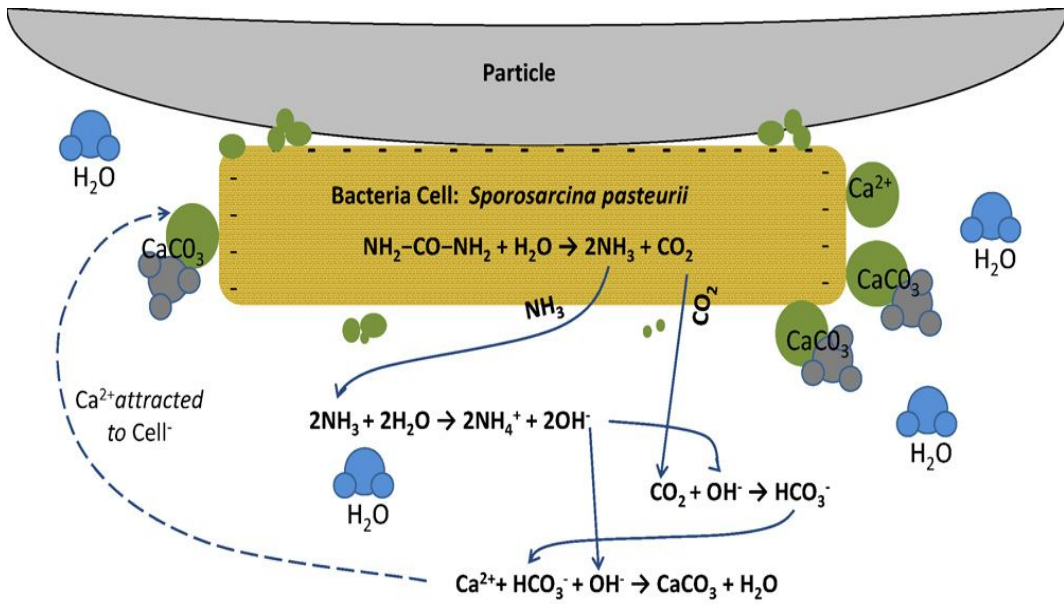
이때 발생하는 2개의 암모늄은 수용액 상태인 물과 다시 결합하여 2개의 수산화이온(OH^-)가 발생한다. 이러한 수산화이온(OH^-)은 이산화탄소(CO_2)와 결합하여 본 연구의 핵심적인 요소 탄산염(HCO_3^-)을 생성하게 된다. 탄산염의 생성 과정은 아래 식 2.8과 같다.



탄산염은 물과 반응 시 세 가지 상태로 존재 할 수 있다. 즉, 탄산이온(CO_3^{2-}), 탄산 수소이온(HCO_3^-), 탄산(H_2CO_3)로 각각 존재 할 수 있으며, 미생물로 인해 발생하는 탄산칼슘 침전은 탄산염 반응에 따라 다르게 발생한다(Ramakrishnan 등, 2001). 이러한 탄산염의 생성 정도가 높을수록 칼슘이온(Ca^{2+})과 결합하여 결과적으로 탄산칼슘($CaCO_3$)을 만들어 내는 것이다. 탄산칼슘의 생성 과정은 아래 식 2.9와 같다.



pH의 감소로 인한 변화는 미생물의 활성을 유발시키며, 요소의 분해는 높은 pH 환경에서 발생됨을 위 식을 통해서 알 수 있다. 결국, 미생물 반응을 통해서 생성된 탄산칼슘($CaCO_3$)은 지반 내의 공극을 채워 주고 결합력을 높여주어 지반의 고결화(Cementation)가 형성된다. 그림 2.6은 각각의 식들을 알기 쉽게 탄산칼슘 생성과정 및 흙 입자에 붙는 모습의 Cycle을 도식화 한 것이다.



Net Urea Hydrolysis Reaction: $\text{NH}_2\text{-CO-NH}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_4^+ + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$

Net pH increase: $[\text{OH}^-]$ generated from NH_4^+ production \gg $[\text{Ca}^{2+}]$

그림 2.6 미생물 고결화 메커니즘(Dejong 등, 2010)

제 3 장 미생물 고결화 규명을 위한 실내시험

3.1 개요

미생물을 이용한 흙의 고결화(Cementation)는 국내·외 극소수의 연구자에 의해서 지반공학 분야에 대한 연구가 진행되고 있으며, 지반공학 분야 외에도 미생물 고결화에 적용 가능한 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있다. 미생물의 고결화는 앞에서 언급한 바와 같이 입자와 입자 사이의 공간에 미생물이 직접 침투하여 공극의 사이를 보다 조밀하게 채워주어 강도를 증진하는 역할을 한다. 이러한 미생물이 적용될 지반은 연약지반으로서 초기 함수비가 높고 하중에 대한 지지력이 낮아 역학적으로 많은 문제를 안고 있는 연약지반에 적용한다. 기존의 연약지반을 개량하는 개량공법의 종류는 원 지반 토사 자체를 치환하거나 양질의 토사로 바꾸는 치환공법, 지반 자체에 배수재를 사용하여 압밀을 촉진 시키는 압밀공법, 다짐 해머를 이용하여 지반을 다져 고결시키는 다짐공법 등으로 나누어지고 있으나, 강도의 보강만을 중점으로 다루고 있어 환경에 대한 문제의 심각성이 날이 갈수록 높아지고 있다. 이에 친환경적인 공법과 신소재의 개발의 필요성이 요구되어 지고 있다.

본 연구에서는 친환경 소재인 미생물을 통해 생성된 탄산칼슘과 시멘트를 이용하여 중량 비에 대한 각각의 의 공시체를 제작하여 양생일에 따른 강도 변화를 확인하였다. 이러한 강도측정을 위한 실험으로 일축압축시험을 통해 일축압축강도를 실시하였으며, 양생일에 따라 탄산칼슘의 변화를 관찰하고자 SEM 분석, EDX 분석, XRD 분석 및 TGA 분석을 실시하였다. 또한 시험에 필요한 시료 제작을 위해 실내시험을 실시하였으며, 다짐시험을 통하여 최대건조단위중량($r_{d(max)}$) 및 최적함수비(OMC)를 결정하였고, 0.75M의 염화칼슘($CaCl_2$)을 첨가하여 탄산칼슘($CaCO_3$) 생성하여 공시체 시료의 275g의 중량비 (2%, 4%, 6%, 8%)를 이용하여 공시체를 제작하여 양생일에 따라 강도를 확인 하였으며, 탄산칼슘 공시체의 강도를 비교분석하기 위해 탄산칼슘과 같은 방법으로 시멘트 공시체, 탄산칼슘+시멘트 공시체의 강도를 확인하였다. 그림 3.1은 미생물을 이용한 연약지반강도를 확인하기 위한 시험과정을 나타낸 그림으로 시험과정에 대해 개략적으로 다음과 같이 나타내었다.

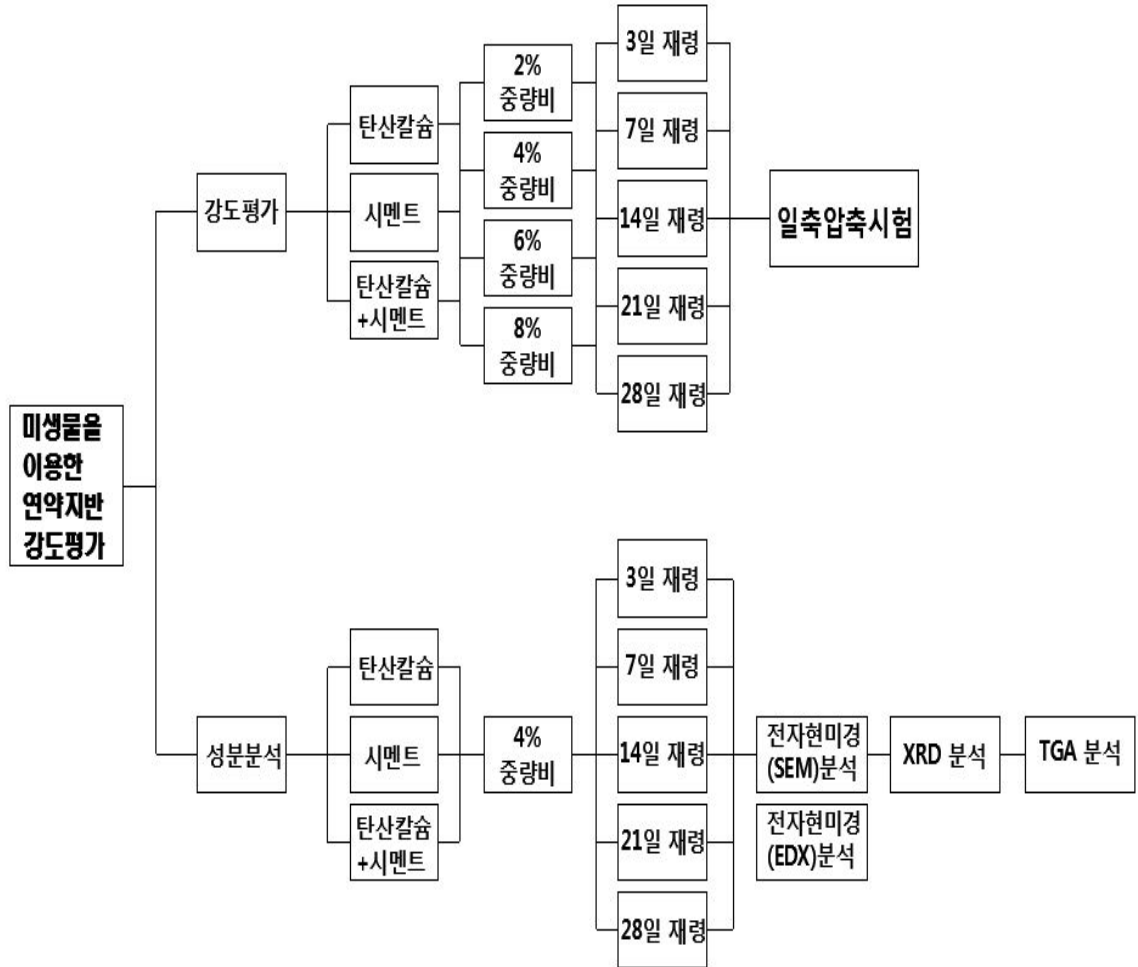


그림 3.1 미생물 고결화를 위한 시험과정

3.2 미생물 배양 방법

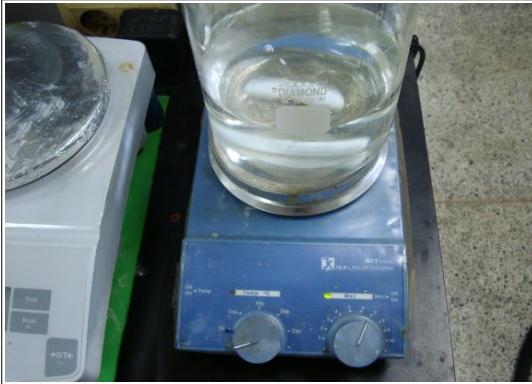
3.2.1 일반농도처리

일반농도 처리에 사용되는 미생물 배양방법은 계대배양(기존의 미생물 용액에서 1%를 새로운 배양배지에 옮기는 작업)을 통한 방법을 사용하였으며, 배양방법의 순서로 배양배지는 NB(Nutrient Broth) 0.8%와 요소(Urea) 2%를 첨가하여 배양배지를 만들고 멸균기를 이용하여 용기 전체를 멸균시키고, 그 후 기존의 인큐베이터에서 배양 중인 미생물 용액을 클린벤치에서 미생물 용액의 1%를 스포이트를 이용하여 계대배양을

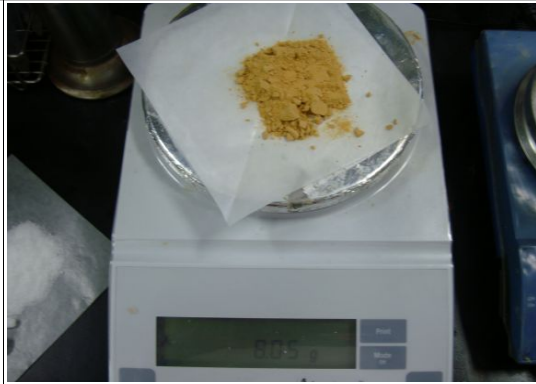
접종시키는 방법으로 일반적인 미생물의 농도를 얻었다.

본 연구에서는 액체 배양방법을 사용하였으며, 미생물 배양방법은 크게 두 가지로 나누어지며, 배양배지를 만드는 방법과 계대배양방법으로 다음과 같다. 우선은 배양배지를 만드는 방법(미생물 배양배지 1,000ml 기준)부터 정리해보면 그림 3.2와 같다.

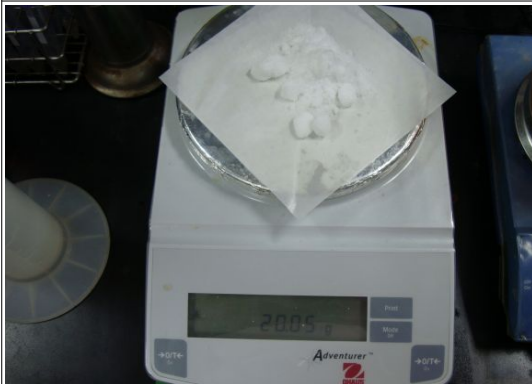
- ① 증류수를 900ml를 매스실린더에 담아서 비커에 넣고 시료 교반기 위에 놓고 속도를 조절한다.
- ② NB(영양배지) 0.8%(1,000ml 기준으로 8g를 넣음)을 비커에 넣고 섞는다.
- ③ 요소(Urea) 2%(1,000ml 기준으로 20g를 넣음)를 비커에 넣고 섞는다.
- ④ 섞어진 미생물 배지용액을 1,000ml 삼각플라스크에 담는다.
- ⑤ 삼각플라스크에 담아진 1,000ml 배지용액을 뚜껑을 막고 호일을 통해서 막는다.
- ⑥ 멸균기를 이용하여 15분간 멸균을 실시한다.



1. 증류수 1,000ml를 비커 넣음



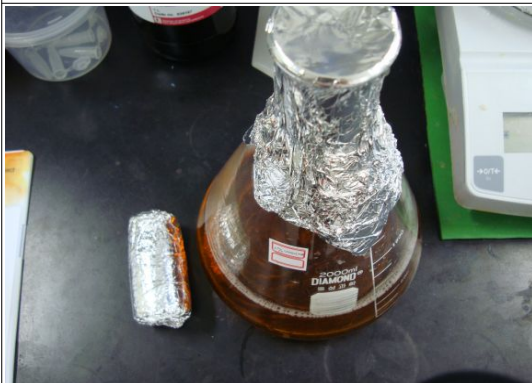
2. NB 0.8%를 넣고 비커에 섞음



3. Urea제 2%를 넣고 비커에 섞음



4. 삼각플라스크에 각각 나누어서 담음



5. 삼각플라스 뚜껑을 막고 호일로 감음



6. 멸균기를 이용하여 멸균함

그림 3.2 미생물 배양배지 만드는 방법

미생물 배양에 실질적으로 사용되는 계대배양방법(100ml 기준)은 그림 3.3과 같다.

- ① 인큐베이터에서 배양 되고 있는 미생물 용액을 클린벤츠로 가져온다.
- ② 계대배양(100ml이므로 1%인 1ml)을 위해 스포이트로 맞춘다.
- ③ 1ml의 미생물 용액을 새로운 영양배지에 계대배양 시킨다.
- ④ 배양된 미생물 용액은 다시 인큐베이터에 넣어 미생물을 성장 시킨다.



그림 3.3 계대배양방법

3.2.2 탄산칼슘 제작

본 논문에 사용된 탄산칼슘의 제작과정은 다음 그림 3.4와 같다.



그림 3.4 탄산칼슘 추출 및 제작

본 논문에 사용된 탄산칼슘은 일반농도 처리에 사용되는 미생물 용액과 동일한 방법으로 제작하였다. 미생물 용액과 염화칼슘 수용액(0.75M)을 1:1 배합하여 하얀색 침전물이 생기며, 필터를 통해 탄산칼슘만을 추출하였다. 추출되어지는 탄산칼슘은 40°C에서 24시간 건조시킨 후에 사발접시를 이용하여 분말로 제작하였다.

3.3. 공시체 제작 및 시험시료 배합비

3.3.1 공시체 제작

3.3.1.1 시험용기

미생물을 이용한 흙의 고결화(Cementation)의 변수 중의 하나는 미생물 반응이 실질적으로 이루어지는 시험용기의 선정이라고 할 수 있다. 일반적으로 일축압축강도 시험을 위한 공시체 크기는 KSF 2331에 의하면 직경 7cm, 높이 14cm로 1:2의 크기를 추천하고 있으며, 시료의 크기나 직경 대 높이의 비율을 맞추도록 하고 있으나, 실질적으로 사용하는 시료의 크기나 시험에 사용된 용기 및 공시체에 각각 맞추기는 어려움이 있다.(김호철, 2010)

이에 본 연구에서는 1:2의 비율에 맞추어 시험 용기를 제작하여 사용하였으며, 시험에 사용된 용기는 직경 5cm, 높이 10cm의 원형 용기로써 직경 대 높이의 비율이 1:2로 제작하였다. 시험용기는 주철로 제작되었으며, 공시체를 제작 후 용기의 탈거가 용이하도록 1/2로 분리되는 형태로 설계되었으며, 탈거 과정에서 공시체의 변형을 최소화하기 위하여 용기 안쪽에 윤활제를 얇게 도포하였다. 시험에 사용할 용기는 그림 3.5와 같다.



그림 3.5 일축압축 시험용기

3.3.1.2 공시체 제작방법

본 연구에서는 미생물 반응으로 생성된 탄산칼슘과 시멘트, 시멘트+탄산칼슘의 공시체를 중량비 2%, 4%, 6%, 8%의 공시체를 각각 제작하였다. 제작 방법은 다음과 같다.

		
<p>1. 흙과 탄산칼슘(시멘트+탄산칼슘)에 물 50ml를 넣는다.</p>	<p>2. 손 비빔을 통해 흙을 잘 교반한다.</p>	<p>3. 공시체는 3층 다짐으로 제작한다.</p>
		
<p>4. 다짐을 완료한 공시체는 40℃에서 건조한다.</p>	<p>5. 건조된 공시체는 용기를 조심스럽게 탈거한다.</p>	<p>6. 제작이 완료된 공시체의 일축압축강도를 측정한다.</p>

그림 3.6 시료 배합 및 공시체 제작

3.3.2 연구에 사용된 시료

미생물 고결화의 구성 요소로는 시료, 미생물, 염화칼슘이 있다. 본 연구에 사용된 모래는 전북 남원시 송동면에 위치하고 있는 섬진강변에서 추출한 모래를 사용하였으며, 이러한 모래는 일축압축의 공시체를 제작하기 위하여 체가름시험을 #60 체(0.25mm), #100 체(0.15mm), #200 체(0.075mm)에 잔류하는 시료를 1:1:1의 비율로 배합한 시료를 사용하였으며, 이러한 모래는 포화되어 있을 때 액상화 현상을 발생시켜, 연약한 지반에 지진하중 및 동하중 등을 받도록 하여 갑작스럽게 지반의 강도를 저하시키며, 보일링 현상 등으로 구조물의 불안정성을 초래한다. 이러한 문제를 해결하기

위해서 느슨한 모래지반의 경우 Cement의 주입으로 구조물을 시공 전에 충분히 개량해서 사용하는 방법이 주로 이용된다.

본 연구에 사용된 흙의 물리적, 역학적 특성을 파악하였다. 시료의 물리적 성질을 파악하기 위해 한국 산업표준규격에 기준하여 비중(KS F 2308), 체가름(KS F 2309), 입도(KS F 2302), 다짐시험(KS F 2312)을 실시하였다. 이에 본 연구에서는 탄산칼슘, 시멘트, 탄산칼슘+시멘트 처리한 공시체를 제작하여 일축압축시험을 통해 양생일에 따른 강도를 살펴보았다.

표 3.1 모래 시료의 물리적 특성

시료	비중(G_s)	# 200(%)	$r_{(d_{max})}$ (g/cm ³)	OMC(%)
모래(SP)	2.67	2.4	1.608	14.92

표 3.1은 모래 시료의 물리적 특성을 나타낸 것으로 비중, # 200체 통과율, 최대건조단위중량($r_{(d_{max})}$), 최적함수비(OMC)를 나타내었고, 모래 시료의 입도분포곡선을 통해 다음 식 3.1과 식 3.2와 같은 식으로 균등계수 및 곡률계수를 구해 보면,

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

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

균등계수(C_u) = $0.58 / 0.33 = 1.76$, 곡률계수(C_c) = $(0.45)^2 / (0.33 \times 0.58) = 1.06$ 값을 얻을 수 있다. 그림 3.7에서 볼 수 있듯이 입경 가적 곡선이 매우 급경사이고, 균등계수가 6보다 작으므로 입도 분포가 나쁜 빈입도(poor grading)임을 알 수 있다.

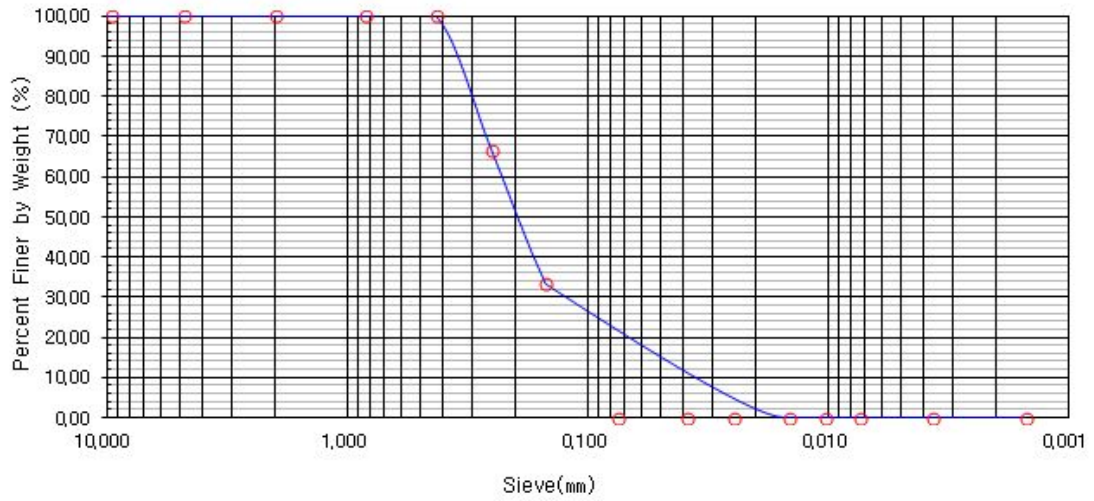


그림 3.7 모래 시료의 입도분포곡선

3.3.2.1 탄산칼슘 공시체 시료 배합비

본 연구에서 사용된 탄산칼슘 공시체는 표 3.2와 같은 배합비로 제작 하였다.

표 3.2 탄산칼슘 시료 배합비

시료	공시체	시료무게 (g)	중량비 (%)	탄산칼슘 (g)	물 (g)
탄산칼슘	C3-2%A	275	2	5.5	50
	C3-2%B	275	2	5.5	50
	C3-4%A	275	4	11	50
	C3-4%B	275	4	11	50
	C3-6%A	275	6	16.5	50
	C3-6%B	275	6	16.5	50
	C3-8%A	275	8	22	50
	C3-8%B	275	8	22	50
	C7-2%	275	2	5.5	50
	C7-4%	275	4	11	50
	C7-6%	275	6	16.5	50
	C7-8%	275	8	22	50
	C14-2%	275	2	5.5	50
	C14-4%	275	4	11	50
	C14-6%	275	6	16.5	50
	C14-8%	275	8	22	50
	C21-2%	275	2	5.5	50
	C21-4%	275	4	11	50
	C21-6%	275	6	16.5	50
	C21-8%	275	8	22	50
C28-2%	275	2	5.5	50	
C28-4%	275	4	11	50	
C28-6%	275	6	16.5	50	
C28-8%	275	8	22	50	

본 연구에 사용된 탄산칼슘시험 시료의 배합비는 표 3.2와 같이 시료무게 275g에 대한 중량비 2%, 4%, 6%, 8%에 대한 탄산칼슘 5.5g, 11g, 16.5g, 22g를 물 50g과 함께 교반하여 성형몰드 1/3씩 나누어 넣고 다짐봉으로 각 층을 다짐하여 공시체를 완성하

였다. 완성된 공시체의 크기는 직경 5cm, 높이 10cm로 자립이 가능하며, 약하게 고결된 공체는 시멘트로 제작한 공시체와 비교분석하기 위해 40°C에서 3일, 7일, 14일, 21일, 28일 각각의 공시체를 그림 3.8과 같이 제작하여 시험을 실시하였다.

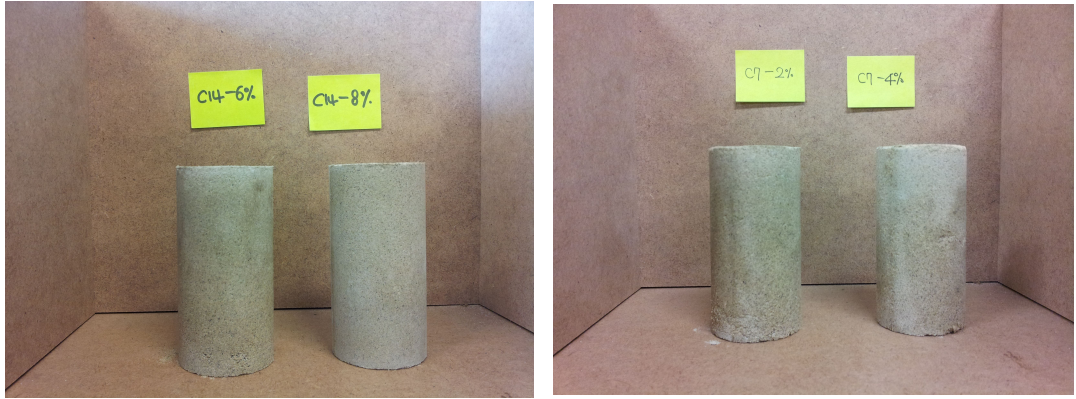


그림 3.8 탄산칼슘 공시체

3.3.2.2 시멘트 공시체 시료 배합비

본 연구에서 사용된 시멘트 공시체는 표 3.3과 같은 배합비로 제작 하였다.

표 3.3 시멘트 시료 배합비

시료	공시체	시료무게 (g)	중량비 (%)	탄산칼슘 (g)	물 (g)
시멘트	S3-2%A	275	2%	5.5	50
	S3-2%B	275	2%	5.5	50
	S3-4%A	275	4%	11	50
	S3-4%B	275	4%	11	50
	S3-6%A	275	6%	16.5	50
	S3-6%B	275	6%	16.5	50
	S3-8%A	275	8%	22	50
	S3-8%B	275	8%	22	50
	S7-2%	275	2%	5.5	50
	S7-4%	275	4%	11	50
	S7-6%	275	6%	16.5	50
	S7-8%	275	8%	22	50
	S14-2%	275	2%	5.5	50
	S14-4%	275	4%	11	50
	S14-6%	275	6%	16.5	50
	S14-8%	275	8%	22	50
	S21-2%	275	2%	5.5	50
	S21-4%	275	4%	11	50
	S21-6%	275	6%	16.5	50
	S21-8%	275	8%	22	50
	S28-2%	275	2%	5.5	50
	S28-4%	275	4%	11	50
	S28-6%	275	6%	16.5	50
	S28-8%	275	8%	22	50

본 연구에 사용된 시멘트시험 시료의 배합비는 표 3.3과 같이 시료무게 275g에 대한 중량비 2%, 4%, 6%, 8%에 대한 시멘트 5.5g, 11g, 16.5g, 22g를 물 50g과 함께 교반하여 성형몰드 1/3씩 나누어 넣고 다짐봉으로 각층을 다짐하여 공시체를 완성하였다. 완

성된 공시체의 크기는 직경 5cm, 높이 10cm로 자립이 가능하며, 약하게 고결된 공체는 40℃에서 3일, 7일, 14일, 21일, 28일 각각의 공시체를 그림 3.9와 같이 제작하여 시험을 실시하였다.

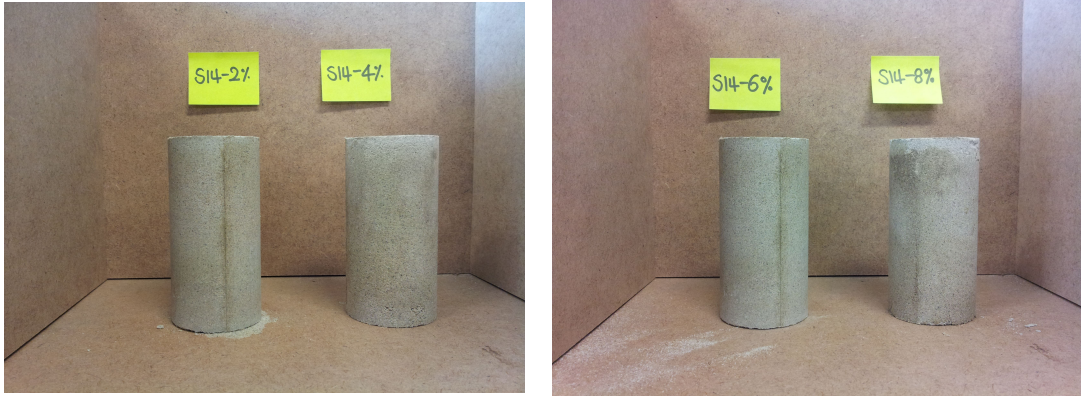


그림 3.9 시멘트 공시체

3.3.2.3 탄산칼슘+시멘트 공시체 시료 배합비

본 연구에서 사용된 탄산칼슘+시멘트 공시체는 표 3.4와 같은 배합비로 제작 하였다.

표 3.4 탄산칼슘+시멘트 시료 배합비

(단위 : g)

시료	공시체	시료무게 (g)	중량비 (%)	탄산칼슘 (g)	시멘트 (g)	물 (g)
시멘트	CS3-2%A	275	2	2.75	2.75	50
	CS3-2%B	275	2	2.75	2.75	50
	CS3-4%A	275	4	5.5	5.5	50
	CS3-4%B	275	4	5.5	5.5	50
	CS3-6%A	275	6	8.25	8.25	50
	CS3-6%B	275	6	8.25	8.25	50
	CS3-8%A	275	8	11	11	50
	CS3-8%B	275	8	11	11	50
	CS7-2%	275	2	2.75	2.75	50
	CS7-4%	275	4	5.5	5.5	50
	CS7-6%	275	6	8.25	8.25	50
	CS7-8%	275	8	11	11	50
	CS14-2%	275	2	2.75	2.75	50
	CS14-4%	275	4	5.5	5.5	50
	CS14-6%	275	6	8.25	8.25	50
	CS14-8%	275	8	11	11	50
	CS21-2%	275	2	2.75	2.75	50
	CS21-4%	275	4	5.5	5.5	50
	CS21-6%	275	6	8.25	8.25	50
	CS21-8%	275	8	11	11	50
CS28-2%	275	2	2.75	2.75	50	
CS28-4%	275	4	5.5	5.5	50	
CS28-6%	275	6	8.25	8.25	50	
CS28-8%	275	8	11	11	50	

본 연구에 사용된 탄산칼슘+시멘트시험 시료의 배합비는 표 3.4와 같이 시료무게 275g에 대한 중량비 2%, 4%, 6%, 8%에 대한 탄산칼슘+시멘트 2.75+2.75g, 5.5+5.5g,

8.25+8.25g, 11+11g를 물 50g과 함께 교반하여 성형몰드 1/3씩 나누어 넣고 다짐봉으로 각 층을 다짐하여 공시체를 완성하였다. 완성된 공시체의 크기는 직경 5cm, 높이 10cm로 자립이 가능하며, 약하게 고결된 공체는 탄산칼슘, 시멘트로 제작한 공시체와 비교분석하기 위해 40°C에서 3일, 7일, 14일, 21일, 28일 각각의 공시체를 그림 3.10과 같이 제작하여 시험을 실시하였다.



그림 3.10 탄산칼슘+시멘트 공시체

3.4 실험 방법 및 장비

3.4.1 일축압축시험(KS F2314)

본 연구에서는 시료에 각각 탄산칼슘, 시멘트, 탄산칼슘+시멘트를 첨가하여 고결화(Cementation)의 정도 및 강도를 평가하기 위해서 각각의 공시체에 대해서 한국산업규격 KS F2314에 의거하여 시험을 실시하였다. 측정방법은 지름에 대한 높이비가 1:2(지름 5cm, 높이10cm)인 시료에 수직하중만을 재하하고 재하속도는 1mm/min로 하였다. 파괴는 최대 강도가 발생한 후 일축압축강도가 5kN이하로 측정되면 시험을 중단하였다. 본 연구에서 사용된 일축압축강도 시험기는 그림 3.11과 같다.



그림 3.11 일축압축강도 시험기

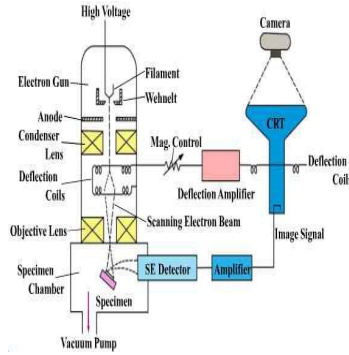
3.4.2 전자현미경의 원리 및 특징

3.4.2.1 전자현미경의 원리

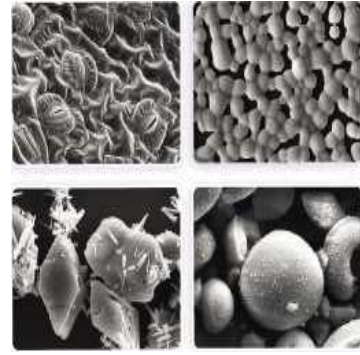
텅스텐 필라멘트를 사용하는 일반 주사전자현미경에 비해 전계방사형 주사전자현미경은 분해 능력이 뛰어나므로, 관찰이 어려운 시료나 전자빔에 의해 쉽게 손상되는 생물 시료 등에 주로 이용되는 분석 장비이다. 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)은 전자의 발생부인 전자총 부분과 전자를 모아서 조사해 주는 렌즈가 있는 기둥, 그리고 시료가 놓이고 검출기가 있는 공간, 영상을 보여주는 모니터와 전체를 조정하는 패널로 구성된다. SEM은 전자총 부분의 필라멘트에 전원을 가하여 방출된 전자를 높은 전압으로 가속하여(10~40kV)집속 렌즈로 모아 시료 표면에 조사시켜 시료에서 방출되는 2차 전자를 검출하여 영상을 만드는 원리를 이용하였다. 즉 전자가 표본을 통과하는 것이 아니라, 전자 광선을 시료 위에 주사시켜 시료로부터 튀어나온 2차 전자를 모아 검출한 후 CRT에 영상화시키는 전자 현미경을 사용하는 분석 방법이다. 초점이 높은 심도를 이용하여 비교적 큰 표본의 입체적 관찰이 가능하며, 시료 위를 주사된 상을 관찰하므로 3차원적인 입체상 관찰이 가능하다. 그림 3.12는 시험에 사용된 SEM 장비 사진과 촬영 사진의 형태를 나타낸 것이다.



(a) SEM 장비



(b) SEM 원리



(c) 결과 사진

그림 3.12 SEM 장비 및 결과사진(조민재, 2012)

3.4.3 X-회절분석(XRD) 시험

3.4.3.1 X-선의 성질

X-선(“주사 전자현미경 분석과 X선 미세분석” 윤준도, 청문각, 2005)은 고속의 전자가 무거운 원소의 원자에 충돌할 때 발생한다. 가열된 음극 filament로 부터 나온 열전자는 양극표적을 향해서 가속된다. 이때 전자의 종속도는 전자가 얻은 운동 에너지가 전기장에 의해서 전자에 한 일과 같다고 놓음으로써 계산할 수 있다. 이 전자의 운동 에너지는 충돌 시 대부분 열로 전환되어지며 단지 1% 미만의 에너지만이 X-선을 발생시키는데 이용된다. 양극의 역할을 하는 Target Material(표적)로는 보통 Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Mo, W등이 사용된다. 표적에 도달한 고속의 전자는 원자핵의 coulomb장에 의해서 강하게 굴곡 되어 저지당한다. 이때 전자의 운동에너지 중 일부가 전자기파의 형태로 방사하는데 이것이 X-선이다. 이 X-선은 보통 연속적인 파장을 가지고 있기 때문에 연속 X-선 혹은 제동 X-선(bremsstrahlung)이라 한다. 한편 운동에너지의 일부는 표적원자의 궤도전자를 쫓아내든지 아니면 높은 준위로 들뜨게 함으로써 에너지를 잃는다. 이때도 높은 궤도로부터 낮은 궤도로 전자가 떨어지면서 X-선이 방사되는데, 이 X-선은 궤도간의 에너지 차에 의해 주어지는 특정한 파장을 가진다. 그러므로 이 X-ray를 특성 X-선이라 부른다. 만일 하나의 전자가 coulomb힘에 의해서 완전히 저지되어 그의 운동에너지 E가 하나의 X광자로 변환한다면 그 X-선은 최대의 에너지를 가질 것이다. 보통 연속 X-선과 특성 X-선은 함께 나타난다. 특성 X-선은 전자 궤도간의 에너지 차에 관계되는 것으로, 그 파장은 표적으로 사용된 원소에 특유하며 X-

선관에 걸어진 전압과는 관계없다. 특성 X-선의 스펙트럼은 파장이 짧은 쪽으로부터 K, L, M등의 계열이 있다(박경호, 2011). 그림 3.13은 시험에 사용된 X-선 회절분석기 장비 사진이다.



그림 3.13 X-선 회절분석기(조민재, 2012)

3.4.4 TGA 시험

3.4.4.1 열중량분석의 성질 및 특징

열중량분석기(Thermo Gravimetric Analysis, TGA)는 시료에 온도프로그램을 가하여 시료의 질량 변화를 시간이나 온도의 함수로써 측정한다. 재료의 질량손실은 증발이나 가스상 산물을 생성하는 화학반응에 의해 발생된다. 특히 실험시 재료는 가스상 분위기에 민감하여 사용된 purge gas가 불활성(N_2 , He, Ar)이 아닌 경우 시료는 가스(O_2 , air)와 반응하므로 산화분해거동의 연구 시에는 산소를 purge하여 이용할 수 있다. 일반적으로 TGA는 불활성 환경(inertatmosphere)에서 분해온도와 분해 반응과정에 대한 정보뿐만 아니라 공기나 산소 환경 하에서 연소 과정에 대한 연구가 가능하다.

열중량분석은 휘발성 물질(수분, 용매 등), 고분자, carbon black, carbonfiber, ash(회분), filler(충진재)등의 함량을 검출하는데 이상적인 조성분석(compositional analysis) 법이며, 고분자가 연소되는 온도영역에서는 분해 속도가 고분자마다 서로 다르기 때문에 가치 있는 고분자의 정량적 분석이 가능하며, TGA에 DTA를 겸하고 있는 경우 중량 변화는 물론 흡열(endothermic)반응과 발열(exothermic)반응을 측정할 수 있다. 그

림 3.26은 TGA장비의 diagram에 대해 나타내었다(조민재, 2012).

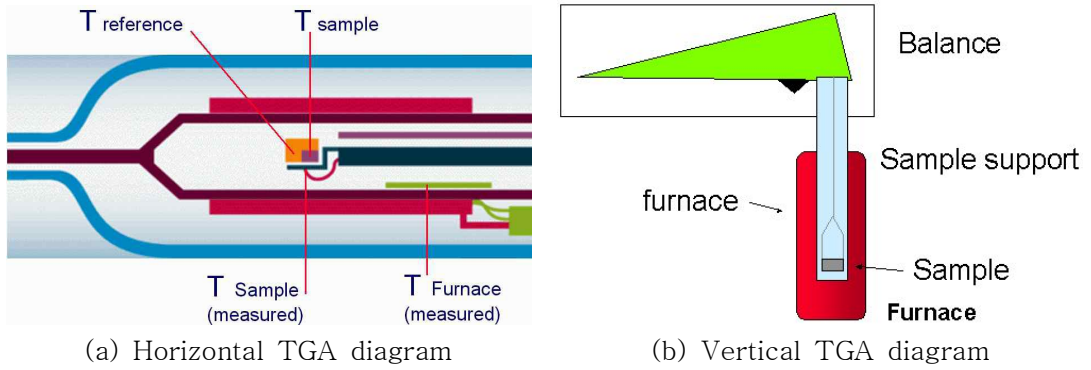


그림 3.14 열중량분석기(TGA)(조민재, 2012)

제 4 장 실험 결과 및 고찰

4.1 미생물 용액, 염화칼슘 용액 반응 실험

미생물 용액과 염화칼슘 용액의 반응 결과는 그림 4.1과 같이 하얀색 침전물이 생기며, 미생물 용액에서 생성된 탄산염과 염화칼슘 용액에서 생성된 칼슘이온이 각각 결합하여 탄산칼슘이 생성 되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이 용액을 건조기에 증발시켜 얻은 백색 침전 가루가 전자현미경 SEM 분석 및 XRD 분석 결과 탄산칼슘($CaCO_3$)임을 알 수 있었다. 그림 4.2 XRD 분석 결과를 Peak로 나타내었으며, 실험 결과를 통해 Peak와 탄산칼슘 Peak가 일치함을 알 수 있어 탄산칼슘($CaCO_3$)의 생성을 확인할 수 있었고, 그림 4.3의 SEM 분석을 통해 그 백색의 가루모양인 정육각형 덩어리가 서로 엉겨 붙어서 생성됨을 육안으로 확인할 수가 있었다.



그림 4.1 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험

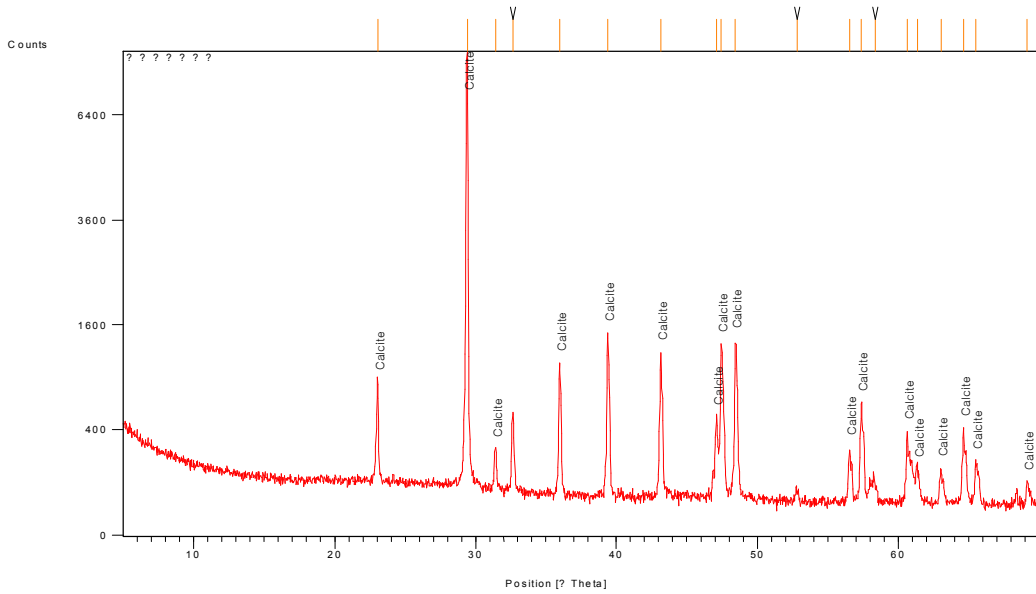


그림 4.2 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 XRD 분석

표 4.1 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 XRD 분석

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

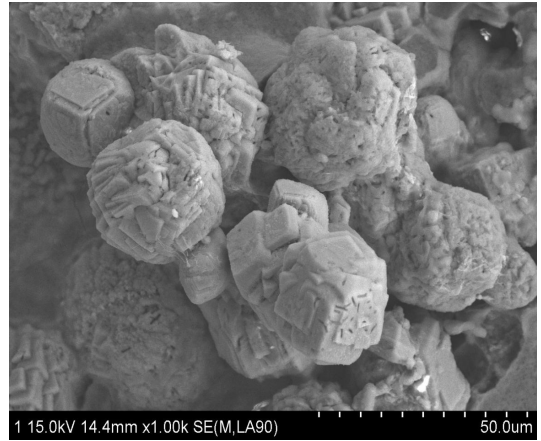
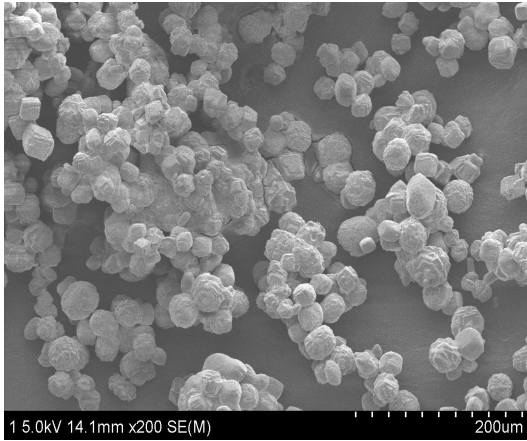


그림 4.3 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 SEM 분석

4.2 일축압축시험 분석 결과

4.2.1 탄산칼슘 공시체 일축압축강도 분석 결과

4.2.1.1 탄산칼슘 공시체 3일 강도 평가

탄산칼슘을 중량비 2%, 4%, 6%, 8%의 비율로 공시체의 신뢰도를 확인하기 위해 각각의 양생일 3일에 대한 공시체는 각각 2개씩 제작하였으며, 제작한 공시체는 양생기간 3일 후 일축압축시험을 통해 표 4.2와 같은 실험결과를 나타내었다.

표 4.2 탄산칼슘 공시체의 3일 강도평가 결과

공시체	고결체	양생 기간 (일)	시료 무게 (g)	중량비 (%)	탄산 칼슘 (g)	일축압축 강도 (kPa)	변형률 (%)
C3-2%A	탄산칼슘	3	275	2	5.5	84.57	0.44
C3-2%B	탄산칼슘	3	275	2	5.5	80.38	0.49
C3-4%A	탄산칼슘	3	275	4	11	120.69	0.52
C3-4%B	탄산칼슘	3	275	4	11	135.08	0.57
C3-6%A	탄산칼슘	3	275	6	16.5	152.48	0.44
C3-6%B	탄산칼슘	3	275	6	16.5	158.88	0.57
C3-8%A	탄산칼슘	3	275	8	22	199.95	0.61
C3-8%B	탄산칼슘	3	275	8	22	196.09	0.93

탄산칼슘으로 제작한 공시체를 3일간 40°C의 온도로 양생시켜 일축압축시험을 통해 측정된 결과는 표 4.2와 같은 결과가 나왔으며, 실험결과 탄산칼슘 2% 공시체의 일축 압축강도는 80.38~84.57kPa, 4% 공시체에서는 120.69~135.08kPa, 6% 공시체에서는 152.48~158.88kPa, 8% 공시체에서는 196.09~199.09kPa로 측정 되었다.

그림 4.4는 양생기간 3일에 대한 탄산칼슘 중량비에 따라 제작된 공시체를 일축압축 시험을 통해 각각의 공시체에 따른 일축압축강도와 변형률을 응력-변형률 곡선으로 나타내었으며, 그림 4.5에서는 3일 양생한 탄산칼슘 공시체 각각의 일축압축강도를 공 시체(중량비)에 따라 나타내었다.

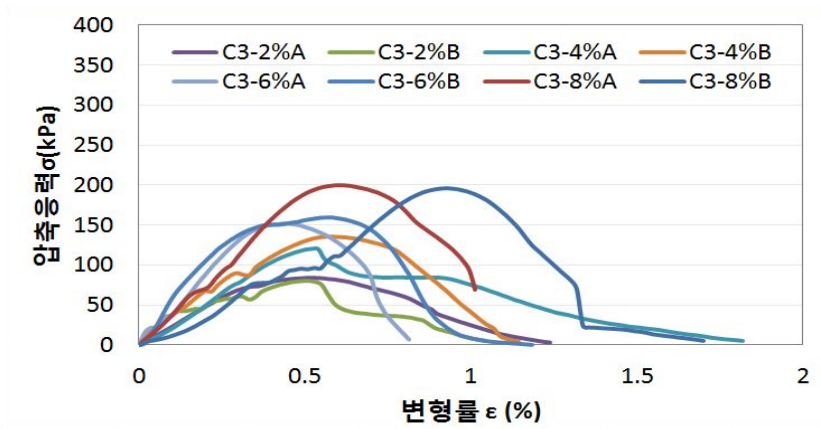


그림 4.4 양생기간 3일에 대한 탄산칼슘 압축응력 비교

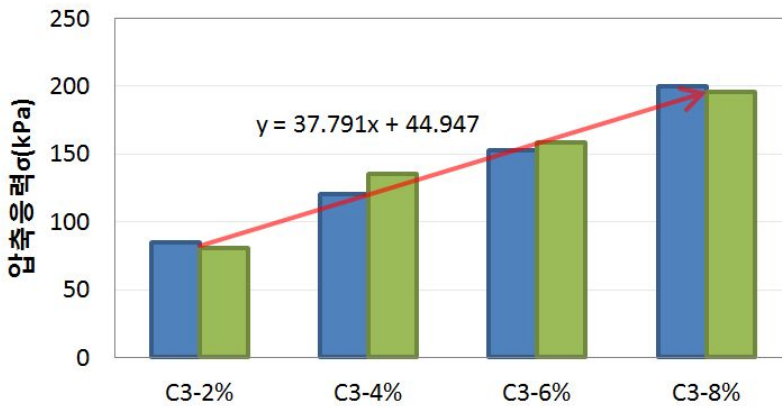


그림 4.5 양생기간 3일에 대한 탄산칼슘 압축응력 증가

탄산칼슘을 첨가하여 제작한 공시체를 건조기 40℃에서 3일 동안 양생 후 일축압축 시험을 측정한 결과 중량비가 증가할수록 즉, 탄산칼슘의 양이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였으며, 이는 3일 양생한 중량비 2% 탄산칼슘 공시체의 최대 일축압축강도는 84.57kPa, 중량비 8% 탄산칼슘 공시체의 최대 일축압축강도는 199.95kPa로 약 2.3배 증가함을 확인하였다. 또한 3일 양생한 탄산칼슘의 공시체의 일축압축강도는 그림 4.5를 통해 같은 중량비의 공시체는 비슷한 강도를 나타냄을 확인하였다.

그림 4.5는 양생기간 3일에 대한 탄산칼슘 공시체의 변형률을 나타내었다.

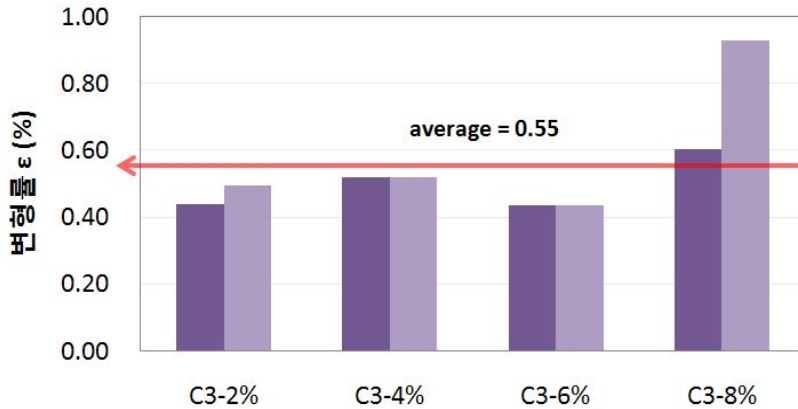


그림 4.6 양생기간 3일에 대한 탄산칼슘 변형률

양생기간 3일에 대한 탄산칼슘 공시체의 변형률은 탄산칼슘의 양이 증가 할수록 뚜렷한 변형률의 차이를 나타내지는 않았지만, C3-2%와 C3-8%의 변형률간의 차이를 나타내므로 탄산칼슘의 양이 증가할수록 3일 양생한 탄산칼슘 공시체의 변형률이 증가한 것으로 판단된다.

4.2.1.2 탄산칼슘 공시체 7일 강도 평가

탄산칼슘을 중량비 2%, 4%, 6%, 8%의 비율로 공시체를 제작하였다. 앞서 탄산칼슘 3일 강도평가를 통해 공시체의 신뢰도를 확인 하였으므로 탄산칼슘 7일 공시체는 1개씩 제작하여 강도를 평가하였다. 양생기간 7일 후 일축압축시험을 통해 다음과 같은 실험결과를 나타내었다.

표 4.3 탄산칼슘 공시체의 7일 강도평가 결과

공시체	고결제	양생기간 (일)	시료무게 (g)	중량비 (%)	탄산칼슘 (g)	일축압축강도 (kPa)	변형률 (%)
C7-2%	탄산칼슘	7	275	2	5.5	92.44	0.48
C7-4%	탄산칼슘	7	275	4	11	142.10	0.52
C7-6%	탄산칼슘	7	275	6	16.5	158.88	0.57
C7-8%	탄산칼슘	7	275	8	22	251.43	0.76

탄산칼슘으로 제작한 공시체를 7일간 40°C의 온도로 양생시켜 일축압축시험을 통해 측정된 결과는 표 4.3과 같은 결과가 나왔으며, 실험결과 탄산칼슘 2% 공시체의 일축 압축강도는 92.44kPa, 4% 공시체에서는 142.10kPa, 6% 공시체에서는 158.88kPa, 8% 공시체에서는 251.43kPa로 측정 되었다.

그림 4.7은 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘 중량비에 따라 제작된 공시체를 일축압축 시험을 통해 각각의 공시체에 따른 일축압축강도와 변형률을 응력-변형률 곡선으로 나타내었으며, 그림 4.7에서는 7일 양생한 탄산칼슘 공시체 각각의 일축압축강도를 중량비에 따라 나타내었다.

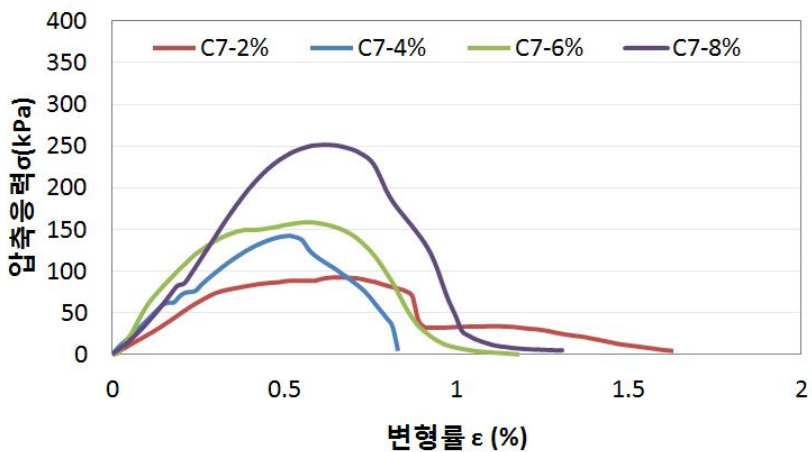


그림 4.7 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘 압축응력 비교

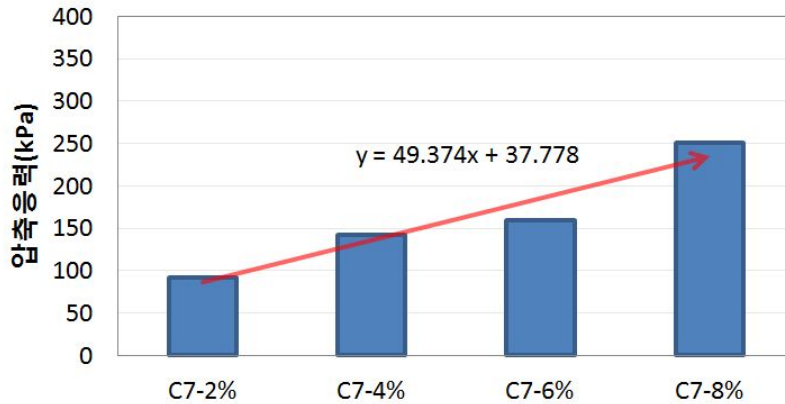


그림 4.8 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘 압축응력 증가

탄산칼슘을 첨가하여 제작한 공시체를 건조기 40℃에서 7일 동안 양생 후 일축압축 시험을 측정한 결과 중량비가 증가할수록 즉, 탄산칼슘의 양이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였으며, 이는 3일 양생한 중량비 2% 탄산칼슘 공시체의 최대 일축압축강도는 94.44kPa, 중량비 8% 탄산칼슘 공시체의 최대 일축압축강도는 251.43kPa로 약 2 배 증가함을 확인하였다.

그림 4.9는 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘 공시체의 변형률을 나타내었다.

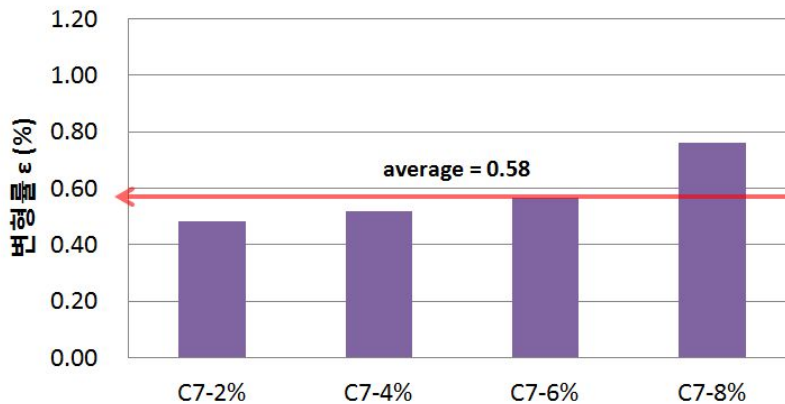


그림 4.9 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘 변형률

양생기간 7일에 대한 탄산칼슘 공시체의 변형률은 탄산칼슘의 양이 증가 할수록 뚜렷한 변형률의 차이를 나타내었으며, C7-2%와 C7-8%의 변형률간의 차이를 나타내므로 탄산칼슘의 양이 증가할수록 7일 양생한 탄산칼슘 공시체의 변형률이 증가한 것으로 판단된다.

4.2.1.3 탄산칼슘 공시체 14일 강도 평가

탄산칼슘을 중량비 2%, 4%, 6%, 8%의 비율로 공시체를 제작하였다. 앞서 탄산칼슘 3일 강도평가를 통해 공시체의 신뢰도를 확인 하였으므로 탄산칼슘 14일 공시체는 1개씩 제작하여 강도를 평가하였다. 양생기간 14일 후 일축압축시험을 통해 다음과 같은 실험결과를 나타내었다.

표 4.4 탄산칼슘 공시체의 14일 강도평가 결과

공시체	고결제	양생기간 (일)	시료무게 (g)	중량비 (%)	탄산칼슘 (g)	일축압축강도 (kPa)	변형률 (%)
C14-2%	탄산칼슘	14	275	2	5.5	98.35	0.67
C14-4%	탄산칼슘	14	275	4	11	159.60	0.60
C14-6%	탄산칼슘	14	275	6	16.5	173.12	0.68
C14-8%	탄산칼슘	14	275	8	22	254.20	0.47

탄산칼슘으로 제작한 공시체를 14일간 40° C의 온도로 양생시켜 일축압축시험을 통해 측정된 결과는 표 4.4와 같은 결과가 나왔으며, 실험결과 탄산칼슘 2% 공시체의 일축압축강도는 98.35kPa, 4% 공시체에서는 159.60kPa, 6% 공시체에서는 173.12kPa, 8% 공시체에서는 254.20kPa로 측정 되었다.

그림 4.10은 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘 중량비에 따라 제작된 공시체를 일축압축시험을 통해 각각의 공시체에 따른 일축압축강도와 변형률을 응력-변형률 곡선으로 나타내었으며, 그림 4.11에서는 14일 양생한 탄산칼슘 공시체 각각의 일축압축강도를 중량비에 따라 나타내었다.

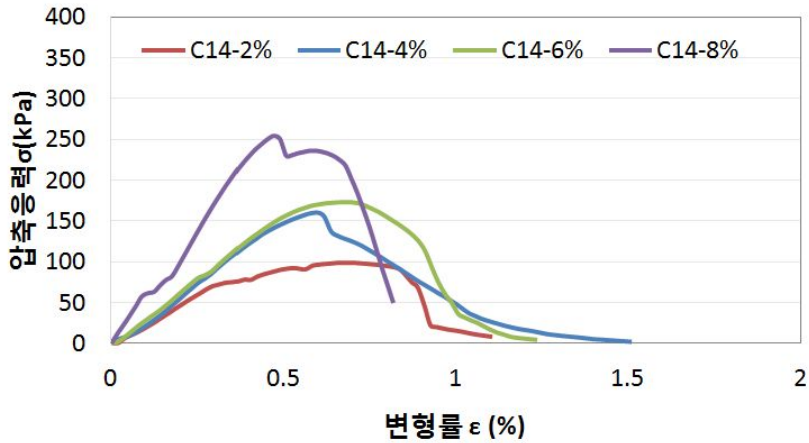


그림 4.10 양생기간 14일에 대한 탄산칼슘 압축응력 비교

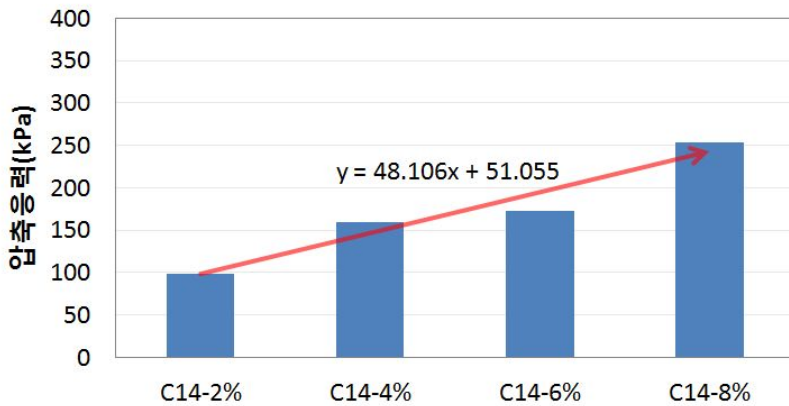


그림 4.11 양생기간 14일에 대한 탄산칼슘 압축응력 증가

탄산칼슘을 첨가하여 제작한 공시체를 건조기 40℃에서 7일 동안 양생 후 일축압축 시험을 측정한 결과 중량비가 증가할수록 즉, 탄산칼슘의 양이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였으며, 이는 3일 양생한 중량비 2% 탄산칼슘 공시체의 최대 일축압축강도는 98.35kPa, 중량비 8% 탄산칼슘 공시체의 최대 일축압축강도는 254.20kPa로 약 2배 증가함을 확인하였다.

그림 4.12는 양생기간 14일에 대한 탄산칼슘 공시체의 변형률을 나타내었다.



그림 4.12 양생기간 14일에 대한 탄산칼슘 변형률

양생기간 14일에 대한 탄산칼슘 공시체의 변형률은 탄산칼슘의 양에 따라 변형률의 추세를 판단할 수 없었다. C14-2%에서 C14-6%까지 변형률은 비슷한 양상을 보였으나 C14-8%에서는 다른 양생기간의 공시체와 달리 작은 변형률을 나타냈으며, 14일 양생한 공시체의 평균 변형률은 0.6으로 산정되었다.

4.2.1.4 탄산칼슘 공시체 21일 강도 평가

탄산칼슘을 중량비 2%, 4%, 6%, 8%의 비율로 공시체를 제작하였다. 앞서 탄산칼슘 3일 강도평가를 통해 공시체의 신뢰도를 확인 하였으므로 탄산칼슘 21일 공시체는 1개씩 제작하여 강도를 평가하였다. 양생기간 21일 후 일축압축시험을 통해 다음과 같은 실험결과를 나타내었다.

표 4.5 탄산칼슘 공시체의 21일 강도평가 결과

공시체	고결제	양생기간 (일)	시료무게 (g)	중량비 (%)	탄산칼슘 (g)	일축압축강도 (kPa)	변형률 (%)
C21-2%	탄산칼슘	21	275	2	5.5	103.34	0.50
C21-4%	탄산칼슘	21	275	4	11	168.16	0.55
C21-6%	탄산칼슘	21	275	6	16.5	237.24	0.76
C21-8%	탄산칼슘	21	275	8	22	281.71	0.82

탄산칼슘으로 제작한 공시체를 21일간 40°C의 온도로 양생시켜 일축압축시험을 통해 측정된 결과는 표 4.5와 같은 결과가 나왔으며, 실험결과 탄산칼슘 2% 공시체의 일축압축강도는 103.34kPa, 4% 공시체에서는 168.16kPa, 6% 공시체에서는 237.24kPa, 8% 공시체에서는 281.71kPa로 측정 되었다.

그림 4.13은 양생기간 21일에 대한 탄산칼슘 중량비에 따라 제작된 공시체를 일축압축시험을 통해 각각의 공시체에 따른 일축압축강도와 변형률을 응력-변형률 곡선으로 나타내었으며, 그림 4.14에서는 21일 양생한 탄산칼슘 공시체 각각의 일축압축강도를 중량비에 따라 나타내었다.

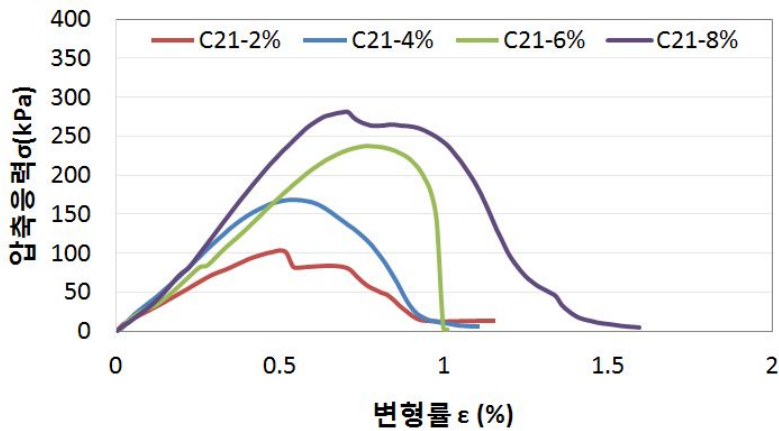


그림 4.13 양생기간 21일에 대한 탄산칼슘 압축응력 비교

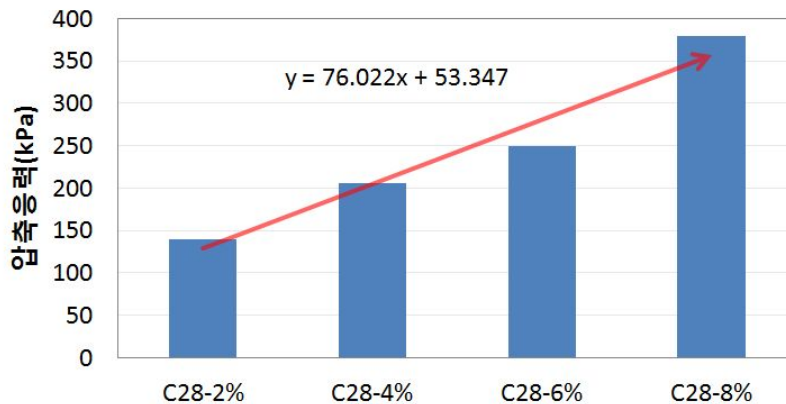


그림 4.14 양생기간 21일에 대한 탄산칼슘 압축응력 증가

탄산칼슘을 첨가하여 제작한 공시체를 건조기 40℃에서 21일 동안 양생 후 일축압축시험을 측정한 결과 중량비가 증가할수록 즉, 탄산칼슘의 양이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였으며, 이는 3일 양생한 중량비 2% 탄산칼슘 공시체의 최대 일축압축강도는 103.34kPa, 중량비 8% 탄산칼슘 공시체의 최대 일축압축강도는 281.71kPa로 약 3배 증가함을 확인하였다.

그림 4.15는 양생기간 21일에 대한 탄산칼슘 공시체의 변형률을 나타내었다.

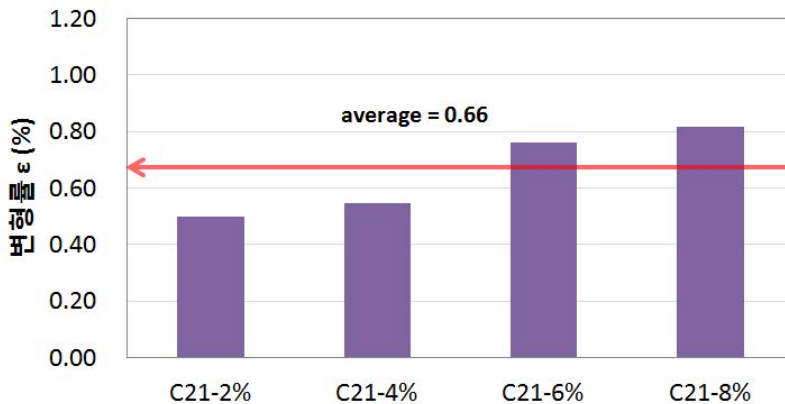


그림 4.15 양생기간 21일에 대한 탄산칼슘 변형률

양생기간 21일에 대한 탄산칼슘 공시체의 변형률은 탄산칼슘의 양이 증가 할수록 뚜렷한 변형률의 차이를 나타내지는 않았지만 전체적인 양상은 증가함을 알 수 있었다. C21-2%와 C21-8% 변형률간의 차이를 나타내므로 탄산칼슘의 양이 증가할수록 21일 양생한 탄산칼슘의 공시체의 변형률이 증가한 것으로 판단된다.

4.2.1.5 탄산칼슘 공시체 28일 강도 평가

탄산칼슘을 중량비 2%, 4%, 6%, 8%의 비율로 공시체를 제작하였다. 앞서 탄산칼슘 3일 강도평가를 통해 공시체의 신뢰도를 확인 하였으므로 탄산칼슘 28일 공시체는 1개 씩 제작하여 강도를 평가하였다. 양생기간 28일 후 일축압축시험을 통해 다음과 같은 실험결과를 나타내었다.

표 4.6 탄산칼슘 공시체의 28일 강도평가 결과

공시체	고결제	양생기간 (일)	시료무게 (g)	중량비 (%)	탄산칼슘 (g)	일축압축강도 (kPa)	변형률 (%)
C28-2%	탄산칼슘	28	275	2	5.5	139.88	0.48
C28-4%	탄산칼슘	28	275	4	11	205.78	0.76
C28-6%	탄산칼슘	28	275	6	16.5	249.08	0.76
C28-8%	탄산칼슘	28	275	8	22	378.86	1.16

탄산칼슘으로 제작한 공시체를 28일간 약 40°C의 온도로 양생시켜 일축압축시험을 통해 측정된 결과는 표 4.6과 같은 결과가 나왔으며, 실험결과 탄산칼슘 2% 공시체의 일축압축강도는 139.88kPa, 4% 공시체에서는 205.78kPa, 6% 공시체에서는 249.08kPa, 8% 공시체에서는 378.86kPa로 측정 되었다.

그림 4.16은 양생기간 28일에 대한 탄산칼슘 중량비에 따라 제작된 공시체를 일축압축시험을 통해 각각의 공시체에 따른 일축압축강도와 변형률을 응력-변형률 곡선으로 나타내었으며, 그림 4.17에서는 28일 양생한 탄산칼슘 공시체 각각의 일축압축강도를 중량비에 따라 나타내었다.

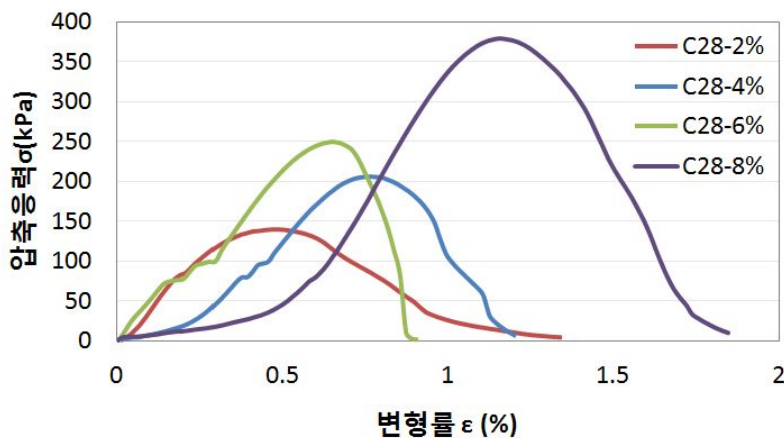


그림 4.16 양생기간 28일에 대한 탄산칼슘 압축응력 비교

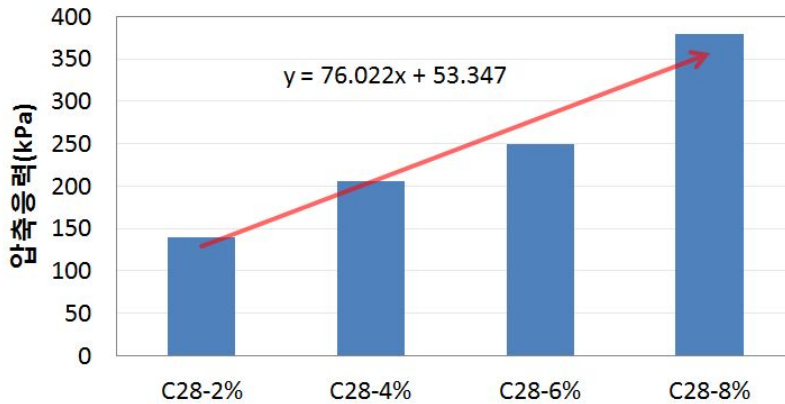


그림 4.17 양생기간 28일에 대한 탄산칼슘 압축응력 증가

탄산칼슘을 첨가하여 제작한 공시체를 건조기 40℃에서 28일 동안 양생 후 일축압축시험을 측정된 결과 중량비가 증가할수록 즉, 탄산칼슘의 양이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였으며, 이는 3일 양생한 중량비 2% 탄산칼슘 공시체의 최대 일축압축강도는 139.88kPa, 중량비 8% 탄산칼슘 공시체의 최대 일축압축강도는 378.86kPa로 약 2.7배 증가함을 확인하였다.

그림 4.18은 양생기간 28일에 대한 탄산칼슘 공시체의 변형률을 나타내었다.

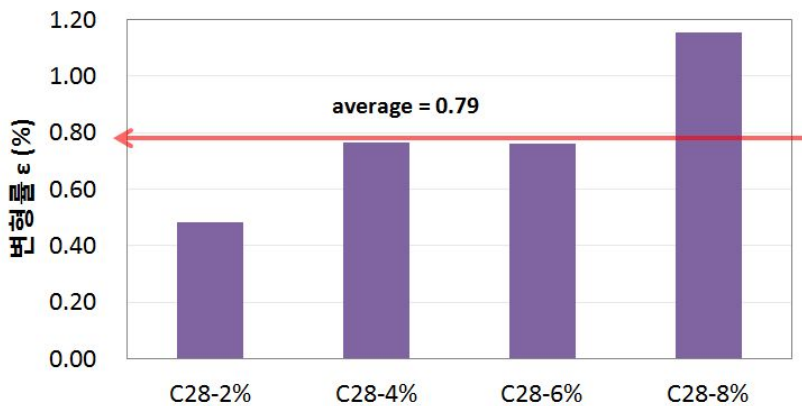


그림 4.18 양생기간 28일에 대한 탄산칼슘 변형률

양생기간 28일에 대한 탄산칼슘 공시체의 변형률은 탄산칼슘의 양이 증가 할수록 뚜렷한 변형률의 차이를 나타내지는 않았으나 C28-2%와 C28-8%의 변형률간의 차이를 나타내므로 탄산칼슘의 양이 증가할수록 28일 양생한 탄산칼슘의 공시체의 변형률이 증가한 것으로 판단된다.

4.2.1.6 양생기간에 대한 탄산칼슘 공시체 강도 평가

탄산칼슘을 중량비(2%, 4%, 6%, 8%)에 따라 공시체를 제작하여 각각 3일, 7일, 14일, 21일, 28일간 양생하여 일축압축시험을 통해 측정된 일축압축강도는 다음과 같다.

표 4.7 양생기간에 대한 탄산칼슘 강도 평가 (단위 : kPa)

공시체	양생기간에 따른 탄산칼슘 공시체 비교					
	3일		7일	14일	21일	28일
	A	B				
C-2%	84.57	80.38	92.44	98.35	103.34	139.88
C-4%	120.69	135.08	142.10	159.60	168.16	205.78
C-6%	152.48	158.88	158.88	173.12	237.24	249.08
C-8%	199.95	196.09	251.43	254.20	281.71	378.86

표 4.7은 양생기간에 따른 탄산칼슘 공시체 비교분석 결과이다. 중량비 2% 탄산칼슘 공시체(C-2%)의 압축강도는 80.38~139.88kPa로 측정, 중량비 4% 탄산칼슘 공시체(C-4%)에서는 120.69kPa~205.78kPa로 측정, 중량비 6% 탄산칼슘 공시체(C-6%)에서는 152.48kPa~249.08kPa로 측정, 중량비 8% 탄산칼슘 공시체(C-8)에서는 196.09~378.86kPa로 측정되었다.

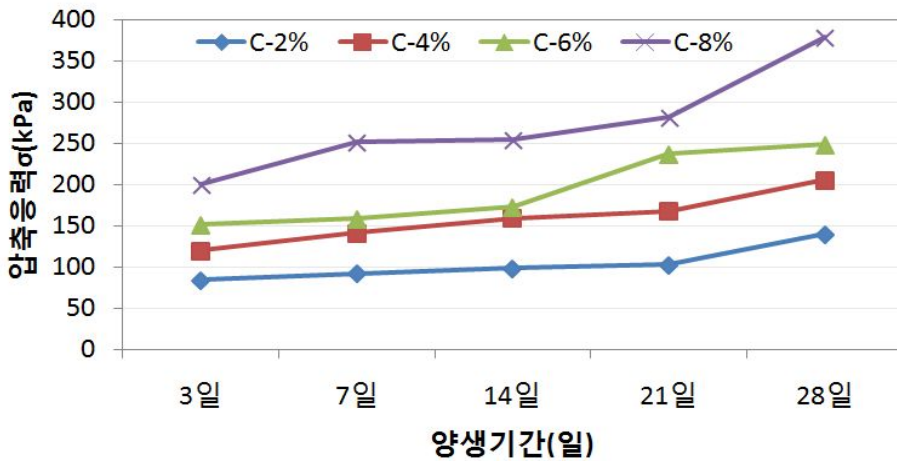
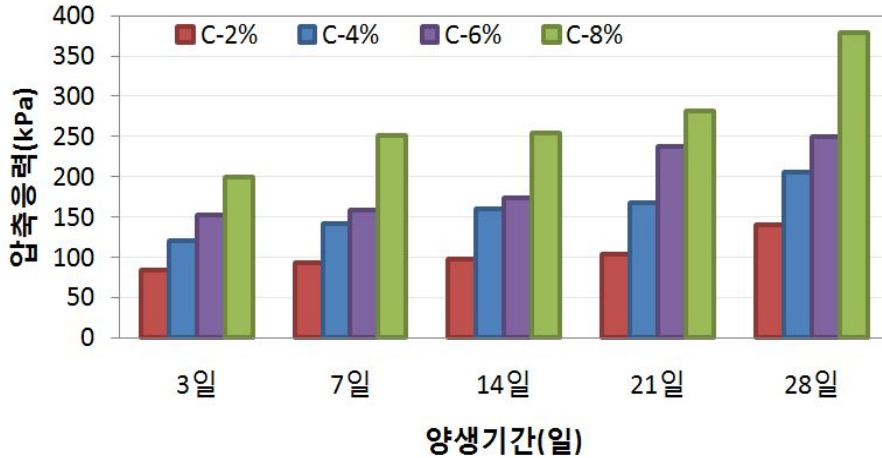


그림 4.19 양생기간에 대한 탄산칼슘 압축응력

그림 4.19는 양생기간에 대한 탄산칼슘 압축응력을 비교 분석하였다. 분석 결과 탄산칼슘 공시체의 강도는 중량비가 증가할수록 강도는 증가하였으나, 양생일이 증가할수록 강도변화는 미미하다. 이러한 경향은 탄산칼슘의 중량비의 증가에 따라 공시체의 강도를 증진시키는 효과가 있으며, 양생일에 대한 영향은 미미하였지만, 중량비 8% 탄산칼슘의 공시체는 양생일 3일에서 196.09kPa, 28일에서는 378.86kPa로 양생일이 증가함에 따라 약 2배의 강도증진을 확인하였다. 따라서 미생물에 의해 생성된 탄산칼슘은 첨가량과 양생일이 증가할수록 강도는 증가되는 것으로 판단된다.

4.2.2 시멘트 공시체 일축압축강도 분석 결과

4.2.2.1 시멘트 공시체 3일 강도 평가

시멘트를 중량비 2%, 4%, 6%, 8%의 비율로 공시체의 신뢰도를 확인하기 위해 각각의 양생일 3일에 대한 공시체는 각각 2개씩 제작하였다. 양생기간 3일 후 일축압축시험을 통해 다음과 같은 실험결과를 나타내었다.

표 4.8 시멘트 공시체의 3일 강도평가 결과

공시체	고결제	양생 기간 (일)	시료 무게 (g)	중량비 (%)	시멘트 (g)	일축압축 강도 (kPa)	변형률 (%)
S3-2%A	시멘트	3	275	2	5.5	128.45	0.44
S3-2%B	시멘트	3	275	2	5.5	125.50	0.56
S3-4%A	시멘트	3	275	4	11	268.47	0.82
S3-4%B	시멘트	3	275	4	11	264.77	0.87
S3-6%A	시멘트	3	275	6	16.5	618.13	0.95
S3-6%B	시멘트	3	275	6	16.5	578.18	0.96
S3-8%A	시멘트	3	275	8	22	876.06	0.89
S3-8%B	시멘트	3	275	8	22	906.03	0.98

시멘트로 제작한 공시체를 3일간 약 40°C의 온도로 양생시켜 일축압축시험을 통해 측정된 결과는 표 4.8과 같은 결과가 나왔으며, 실험결과 시멘트 2% 공시체의 일축압축강도는 125.5~128.45kPa, 4% 공시체에서는 264.77~268.47kPa, 6% 공시체에서는 578.18~618.13kPa, 8% 공시체에서는 876.06~906.03kPa로 측정 되었다.

그림 4.20은 양생기간 3일에 대한 시멘트 중량비에 따라 제작된 공시체를 일축압축시험을 통해 각각의 공시체에 따른 일축압축강도와 변형률을 응력-변형률 곡선으로 나타내었으며, 그림 4.21에서는 3일 양생한 시멘트 공시체 각각의 일축압축강도를 공시체(중량비)에 따라 나타내었다.

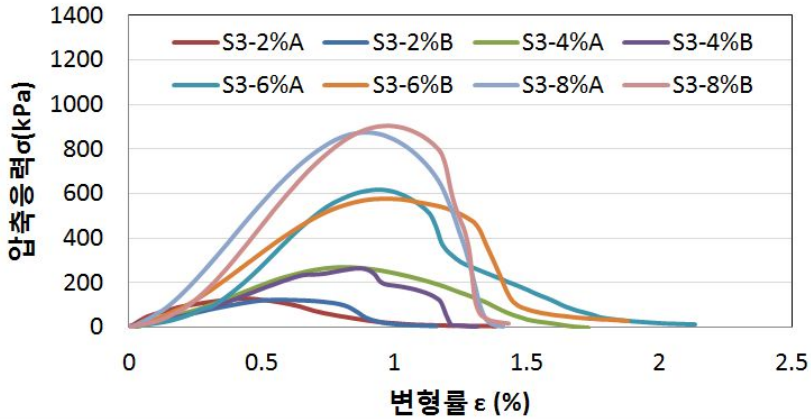


그림 4.20 양생기간 3일에 대한 시멘트 압축응력 비교

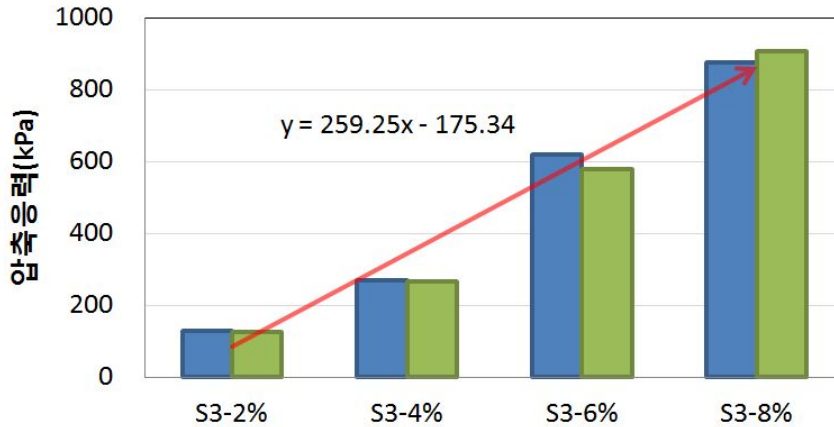


그림 4.21 양생기간 3일에 대한 시멘트 압축응력 증가

시멘트 첨가하여 제작한 공시체를 건조기 40℃에서 3일 동안 양생 후 일축압축시험을 측정한 결과 중량비가 증가할수록 즉, 시멘트의 양이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였으며, 이는 3일 양생한 중량비 2% 시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 128.45kPa, 중량비 8% 시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 906.03kPa로 약 7.1배 증가함을 확인하였다. 또한 3일 양생한 시멘트 공시체의 일축압축강도는 그림 4.5를 통해 같은 중량비의 공시체는 비슷한 강도를 나타냄을 확인하였다.

그림 4.22는 양생기간 3일에 대한 시멘트 공시체의 변형률을 나타내었다.

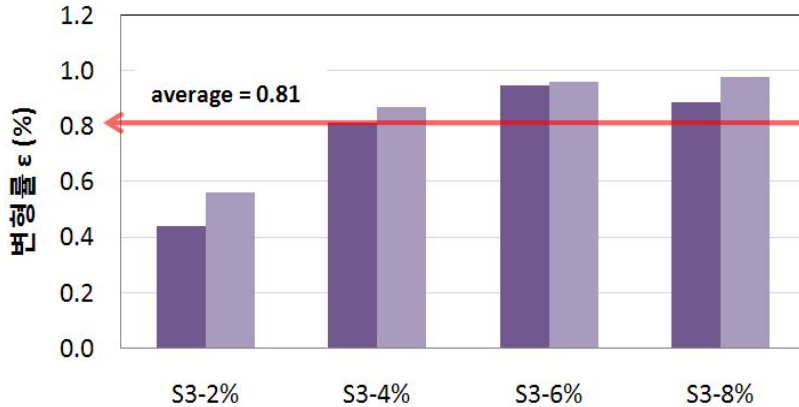


그림 4.22 양생기간 3일에 대한 시멘트 변형률

양생기간 3일에 대한 시멘트 공시체의 변형률은 시멘트의 양이 증가 할수록 뚜렷한 변형률의 차이를 나타내지는 않았지만, S3-2%와 S3-8%의 변형률간의 차이를 나타내므로 시멘트의 양이 증가할수록 3일 양생한 시멘트 공시체의 변형률이 증가한 것으로 판단된다.

4.2.2.2 시멘트 공시체 7일 강도 평가

시멘트를 중량비 2%, 4%, 6%, 8%의 비율로 공시체를 제작하였다. 앞서 시멘트 3일 강도평가를 통해 공시체의 신뢰도를 확인 하였으므로 시멘트 7일 공시체는 1개씩 제작하여 강도를 평가하였다. 양생기간 7일 후 일축압축시험을 통해 다음과 같은 실험결과를 나타내었다.

표 4.9 시멘트 공시체의 7일 강도평가 결과

공시체	고결제	양생기간 (일)	시료무게 (g)	중량비 (%)	시멘트 (g)	일축압축강도 (kPa)	변형률 (%)
S7-2%	시멘트	7	275	2	5.5	134.17	0.69
S7-4%	시멘트	7	275	4	11	330.15	0.87
S7-6%	시멘트	7	275	6	16.5	641.79	0.98
S7-8%	시멘트	7	275	8	22	1050.73	1.05

시멘트로 제작한 공시체를 7일간 40°C의 온도로 양생시켜 일축압축시험을 통해 측정된 결과는 표 4.9와 같은 결과가 나왔으며, 실험결과 시멘트 2% 공시체의 일축압축강도는 134.17kPa, 4% 공시체에서는 330.15kPa, 6% 공시체에서는 641.79kPa, 8% 공시체에서는 1050.73kPa로 측정 되었다.

그림 4.23은 양생기간 7일에 대한 시멘트 중량비에 따라 제작된 공시체를 일축압축시험을 통해 각각의 공시체에 따른 일축압축강도와 변형률을 응력-변형률 곡선으로 나타내었으며, 그림 4.24에서는 7일 양생한 시멘트 공시체 각각의 일축압축강도를 중량비에 따라 나타내었다.

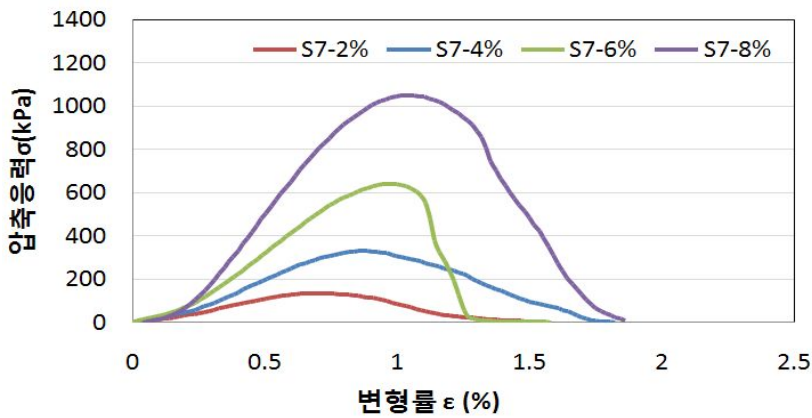


그림 4.23 양생기간 7일에 대한 시멘트 압축응력 비교

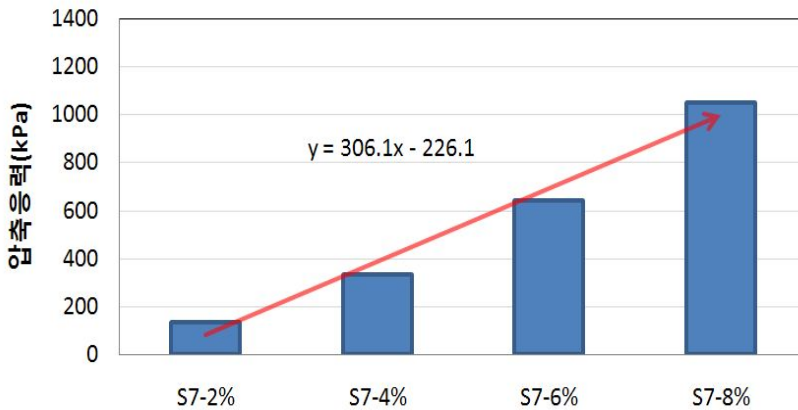


그림 4.24 양생기간 7일에 대한 시멘트 압축응력 증가

시멘트 첨가하여 제작한 공시체를 건조기 40℃에서 7일 동안 양생 후 일축압축시험을 측정한 결과 중량비가 증가할수록 즉, 시멘트의 양이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였으며, 이는 7일 양생한 중량비 2% 시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 134.17kPa, 중량비 8% 시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 330.15kPa로 약 2.5배 증가함을 확인하였다.

그림 4.25는 양생기간 7일에 대한 시멘트 공시체의 변형률을 나타내었다.

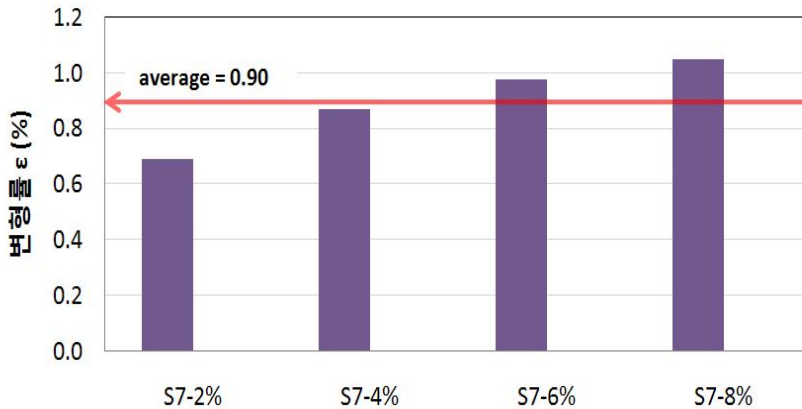


그림 4.25 양생기간 7일에 대한 시멘트 변형률

양생기간 7일에 대한 시멘트 공시체의 변형률은 시멘트의 양이 증가 할수록 뚜렷한 변형률의 차이를 나타내지는 않았지만, S7-2%와 S7-8%의 변형률간의 차이를 나타내므로 시멘트의 양이 증가할수록 7일 양생한 시멘트 공시체의 변형률이 증가한 것으로 판단된다.

4.2.2.3 시멘트 공시체 14일 강도 평가

시멘트를 중량비 2%, 4%, 6%, 8%의 비율로 공시체를 제작하였다. 앞서 시멘트 3일 강도평가를 통해 공시체의 신뢰도를 확인 하였으므로 시멘트 14일 공시체는 1개씩 제작하여 강도를 평가하였다. 양생기간 14일 후 일축압축시험을 통해 다음과 같은 실험 결과를 나타내었다.

표 4.10 시멘트 공시체의 14일 강도평가 결과

공시체	고결제	양생기간 (일)	시료무게 (g)	중량비 (%)	시멘트 (g)	일축압축강도 (kPa)	변형률 (%)
S14-2%	시멘트	14	275	2	5.5	137.58	0.71
S14-4%	시멘트	14	275	4	11	342.26	0.82
S14-6%	시멘트	14	275	6	16.5	666.99	1.02
S14-8%	시멘트	14	275	8	22	1111.40	1.06

시멘트로 제작한 공시체를 14일간 40°C의 온도로 양생시켜 일축압축시험을 통해 측정된 결과는 표 4.10과 같은 결과가 나왔으며, 실험결과 시멘트 2% 공시체의 일축압축강도는 137.58kPa, 4% 공시체에서는 342.26kPa, 6% 공시체에서는 666.99kPa, 8% 공시체에서는 1,111.40kPa로 측정 되었다.

그림 4.26은 양생기간 14일에 대한 시멘트 중량비에 따라 제작된 공시체를 일축압축시험을 통해 각각의 공시체에 따른 일축압축강도와 변형률을 응력-변형률 곡선으로 나타내었으며, 그림 4.27에서는 14일 양생한 시멘트 공시체 각각의 일축압축강도를 중량비에 따라 나타내었다.

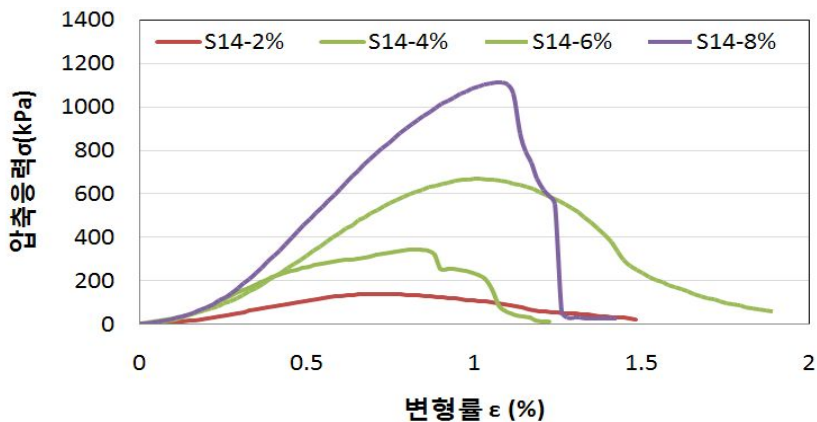


그림 4.26 양생기간 14일에 대한 시멘트 압축응력 비교

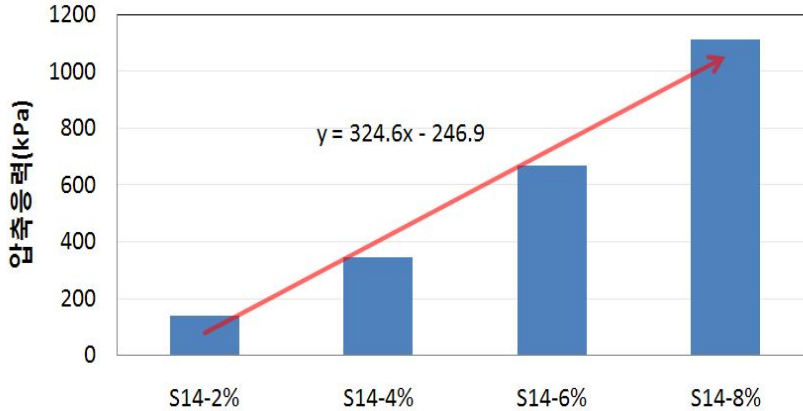


그림 4.27 양생기간 14일에 대한 시멘트 압축응력 증가

시멘트를 첨가하여 제작한 공시체를 건조기 40℃에서 7일 동안 양생 후 일축압축시험을 측정한 결과 중량비가 증가할수록 즉, 시멘트의 양이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였으며, 이는 3일 양생한 중량비 2% 시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 137.58kPa, 중량비 8% 시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 1,111.40kPa로 약 8.1배 증가함을 확인하였다.

그림 4.28은 양생기간 14일에 대한 시멘트 공시체의 변형률을 나타내었다.

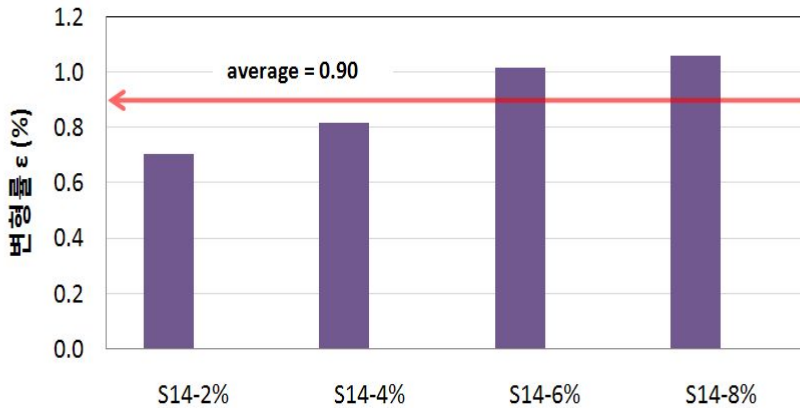


그림 4.28 양생기간 14일에 대한 시멘트 변형률

양생기간 14일에 대한 시멘트 공시체의 변형률은 시멘트의 양이 증가 할수록 뚜렷한

변형률의 차이를 나타내지는 않았지만, S14-2%와 S14-8%의 변형률간의 차이를 나타내므로 시멘트의 양이 증가할수록 14일 양생한 시멘트 공시체의 변형률이 증가한 것으로 판단된다.

4.2.2.4 시멘트 공시체 21일 강도 평가

시멘트를 중량비 2%, 4%, 6%, 8%의 비율로 공시체를 제작하였다. 앞서 시멘트 3일 강도평가를 통해 공시체의 신뢰도를 확인 하였으므로 시멘트 21일 공시체는 1개씩 제작하여 강도를 평가하였다. 양생기간 21일 후 일축압축시험을 통해 다음과 같은 실험 결과를 나타내었다.

표 4.11 시멘트 공시체의 21일 강도평가 결과

공시체	고결제	양생기간 (일)	시료무게 (g)	중량비 (%)	시멘트 (g)	일축압축강도 (kPa)	변형률 (%)
S21-2%	시멘트	21	275	2	5.5	161.41	0.66
S21-4%	시멘트	21	275	4	11	456.78	0.94
S21-6%	시멘트	21	275	6	16.5	695.76	0.96
S21-8%	시멘트	21	275	8	22	1,184.69	1.13

시멘트로 제작한 공시체를 21일간 40°C의 온도로 양생시켜 일축압축시험을 통해 측정한 결과는 표 4.11과 같은 결과가 나왔으며, 실험결과 시멘트 2% 공시체의 일축압축강도는 161.41kPa, 4% 공시체에서는 456.78kPa, 6% 공시체에서는 695.76kPa, 8% 공시체에서는 1,184.69kPa로 측정 되었다.

그림 4.29는 양생기간 21일에 대한 시멘트 중량비에 따라 제작된 공시체를 일축압축시험을 통해 각각의 공시체에 따른 일축압축강도와 변형률을 응력-변형률 곡선으로 나타내었으며, 그림 4.30에서는 21일 양생한 시멘트 공시체 각각의 일축압축강도를 중량비에 따라 나타내었다.

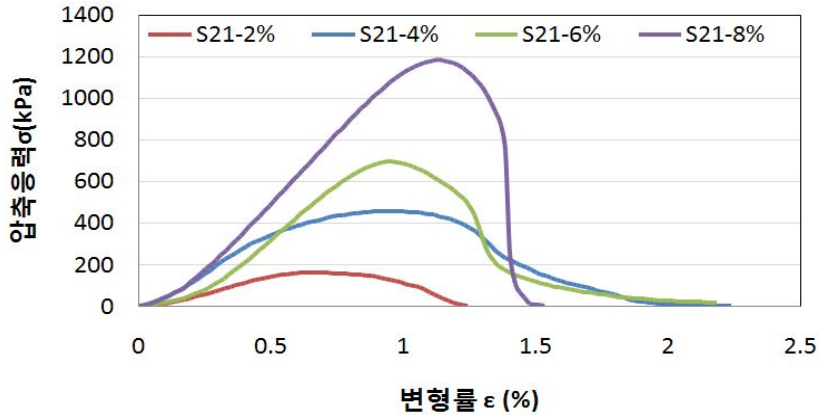


그림 4.29 양생기간 21일에 대한 시멘트 압축응력 비교

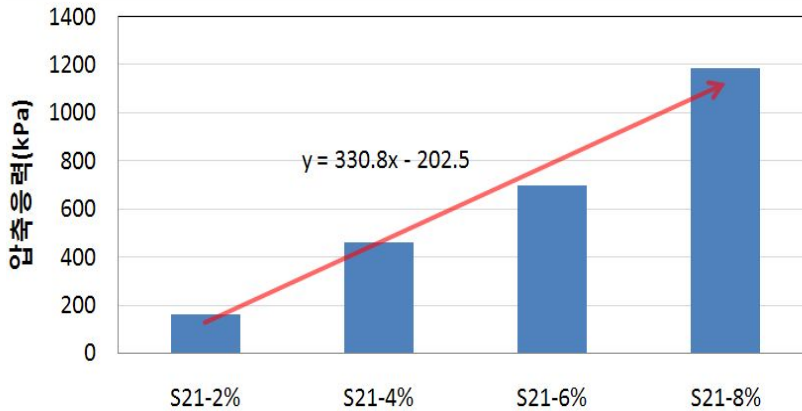


그림 4.30 양생기간 21일에 대한 시멘트 압축응력 증가

시멘트를 첨가하여 제작한 공시체를 건조기 40℃에서 21일 동안 양생 후 일축압축 시험을 측정한 결과 중량비가 증가할수록 즉, 시멘트의 양이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였으며, 이는 21일 양생한 중량비 2% 시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 161.41kPa, 중량비 8% 시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 1,184.69kPa로 약 7.3배 증가함을 확인하였다.

그림 4.31은 양생기간 21일에 대한 시멘트 공시체의 변형률을 나타내었다.

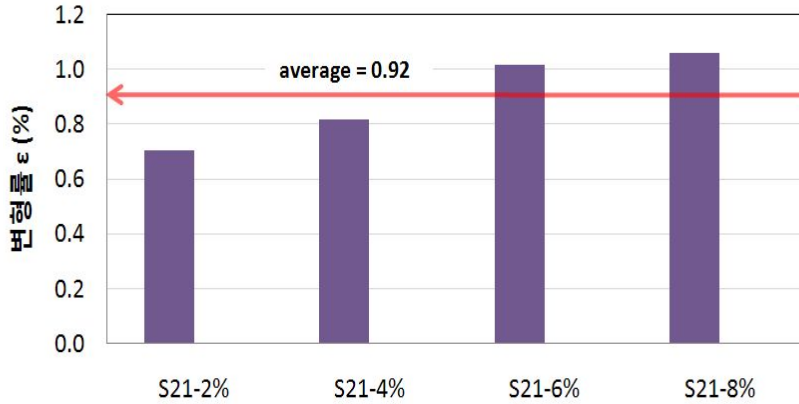


그림 4.31 양생기간 21일에 대한 시멘트 변형률

양생기간 21일에 대한 시멘트 공시체의 변형률은 시멘트의 양이 증가 할수록 뚜렷한 변형률의 차이를 나타내지는 않았지만, S21-2%와 S21-8%의 변형률간의 차이를 나타내므로 시멘트의 양이 증가할수록 21일 양생한 시멘트 공시체의 변형률이 증가한 것으로 판단된다.

4.2.2.5 시멘트 공시체 28일 강도 평가

시멘트를 중량비 2%, 4%, 6%, 8%의 비율로 공시체를 제작하였다. 앞서 시멘트 3일 강도평가를 통해 공시체의 신뢰도를 확인 하였으므로 시멘트 28일 공시체는 1개씩 제작하여 강도를 평가하였다. 양생기간 28일 후 일축압축시험을 통해 다음과 같은 실험 결과를 나타내었다.

표 4.12 시멘트 공시체의 28일 강도평가 결과

공시체	고결제	양생기간 (일)	시료무게 (g)	중량비 (%)	시멘트 (g)	일축압축강도 (kPa)	변형률 (%)
S28-2%	시멘트	28	275	2	5.5	170.99	0.56
S28-4%	시멘트	28	275	4	11	459.06	0.73
S28-6%	시멘트	28	275	6	16.5	738.54	0.81
S28-8%	시멘트	28	275	8	22	1206.69	1.02

시멘트로 제작한 공시체를 28일간 40°C의 온도로 양생시켜 일축압축시험을 통해 측정된 결과는 표 4.12와 같은 결과가 나왔으며, 실험결과 시멘트 2% 공시체의 일축압축강도는 170.99kPa, 4% 공시체에서는 459.06kPa, 6% 공시체에서는 738.54kPa, 8% 공시체에서는 1,206.69kPa로 측정 되었다.

그림 4.32는 양생기간 28일에 대한 시멘트 중량비에 따라 제작된 공시체를 일축압축시험을 통해 각각의 공시체에 따른 일축압축강도와 변형률을 응력-변형률 곡선으로 나타내었으며, 그림 4.33에서는 28일 양생한 시멘트 공시체 각각의 일축압축강도를 중량비에 따라 나타내었다.

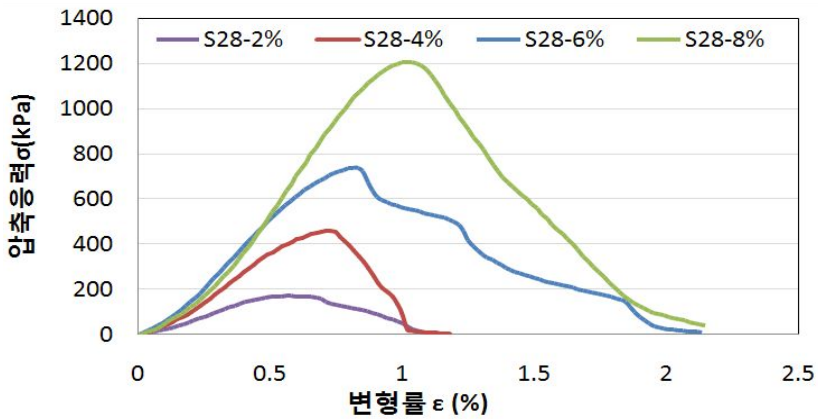


그림 4.32 양생기간 28일에 대한 시멘트 압축응력 비교

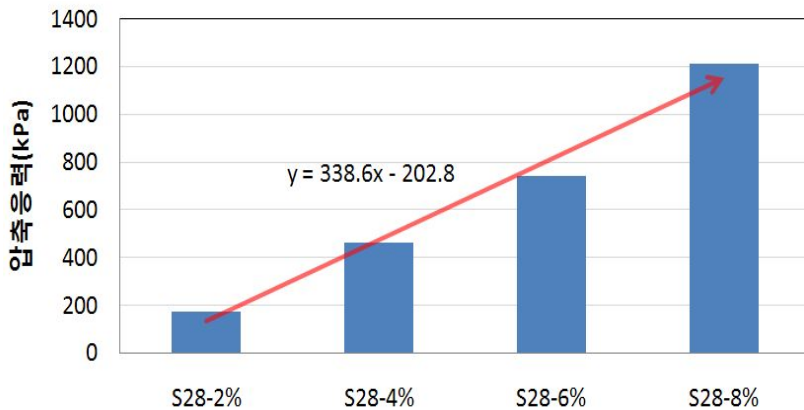


그림 4.33 양생기간 28일에 대한 시멘트 압축응력 증가

시멘트를 첨가하여 제작한 공시체를 건조기 40℃에서 28일 동안 양생 후 일축압축 시험을 측정한 결과 중량비가 증가할수록 즉, 시멘트의 양이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였으며, 이는 28일 양생한 중량비 2% 시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 170.99kPa, 중량비 8% 시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 1,206.69kPa로 약 7.1배 증가함을 확인하였다.

그림 4.34는 양생기간 28일에 대한 시멘트 공시체의 변형률을 나타내었다.

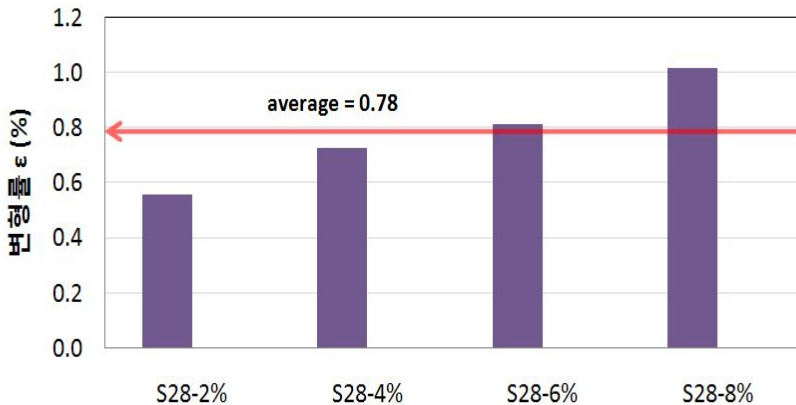


그림 4.34 양생기간 28일에 대한 시멘트 변형률

양생기간 28일에 대한 시멘트 공시체의 변형률은 시멘트의 양이 증가 할수록 뚜렷한 변형률의 차이를 나타내지는 않았지만, S28-2%와 S28-8%의 변형률간의 차이를 나타내므로 시멘트의 양이 증가할수록 28일 양생한 시멘트 공시체의 변형률이 증가한 것으로 판단된다.

4.2.2.6 양생기간에 대한 시멘트 공시체 강도 평가

시멘트를 중량비(2%, 4%, 6%, 8%)에 따라 공시체를 제작하여 각각 3일, 7일, 14일, 21일, 28일간 양생하여 일축압축시험을 통해 측정한 일축압축강도는 다음과 같다.

표 4.13 양생기간에 대한 시멘트 강도 평가

(단위 : kPa)

공시체	양생기간에 따른 시멘트 공시체 비교					
	3일		7일	14일	21일	28일
	A	B				
S-2%	128.45	125.50	134.17	137.58	161.41	170.99
S-4%	268.47	264.77	330.15	342.26	456.78	459.06
S-6%	618.13	578.18	641.79	666.99	695.76	738.54
S-8%	876.06	906.03	1050.73	1111.40	1184.69	1206.69

표 4.13은 양생기간에 따른 시멘트 공시체 비교분석 결과이다. 중량비 2% 시멘트 공시체(S-2%)의 압축강도는 125.5~170.99kPa, 중량비 4% 시멘트 공시체(S-4%)에서는 264.77kPa~459.06kPa, 중량비 6% 시멘트 공시체(S-6%)에서는 618.13kPa~738.54kPa, 중량비 8% 시멘트 공시체(S-8)에서는 876.06~1,206.69kPa로 측정되었다.

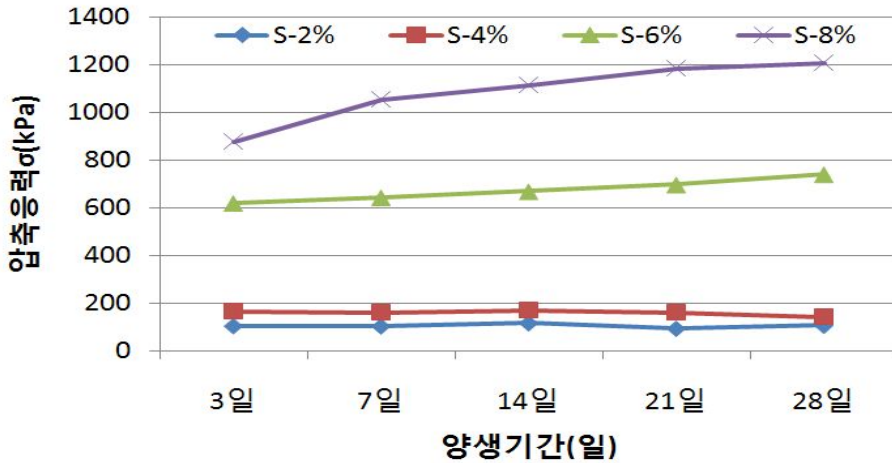
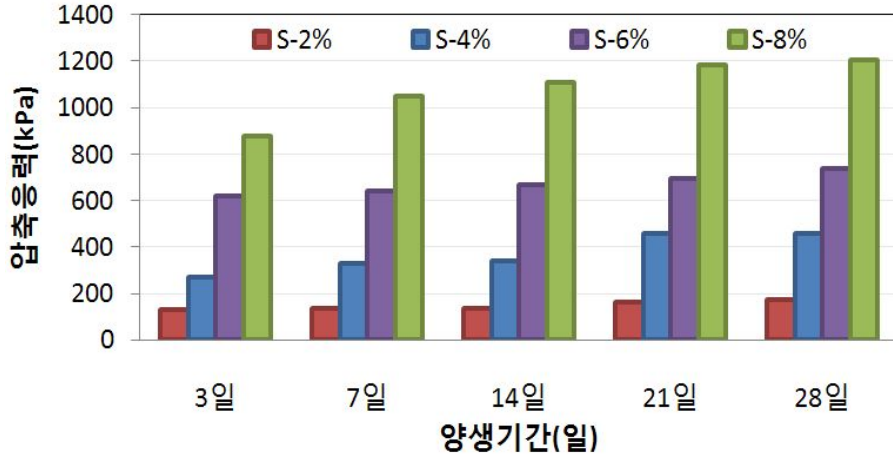


그림 4.35 양생기간에 대한 시멘트 압축응력

그림 4.29는 양생기간에 대한 시멘트 압축응력을 비교 분석하였다. 분석 결과 시멘트 공시체의 강도는 중량비가 증가할수록 강도는 증가하였으나, 양생일이 증가할수록 강도변화는 미미하다. 이러한 경향은 시멘트의 중량비의 증가에 따라 공시체의 강도를 증진시키는 효과가 있으며, 중량비 8% 시멘트의 공시체는 양생일 3일에서 $870.06kPa$, 28일에서는 $1206.69kPa$ 로 양생일이 증가함에 따라 약 1.5배의 강도증진을 확인하였다. 이는 시멘트 고유의 수화반응에 의해 양생기간이 증가할수록 강도가 증진한 것으로 판단된다.

4.2.3 탄산칼슘+시멘트 공시체 일축압축강도 분석 결과

4.2.3.1 탄산칼슘+시멘트 공시체 3일 강도 평가

탄산칼슘+시멘트를 중량비 2%, 4%, 6%, 8%의 비율로 공시체의 신뢰도를 확인하기 위해 각각의 양생일 3일에 대한 공시체는 각각 2개씩 제작하였으며, 제작한 공시체는 양생기간 3일 후 일축압축시험을 통해 표 4.14와 같은 실험결과를 나타내었다.

표 4.14 탄산칼슘+시멘트 공시체의 3일 강도평가 결과

공시체	고결제	양생 기간 (일)	시료 무게 (g)	중량비 (%)	시멘트 (g)	탄산 칼슘 (g)	일축압축 강도 (kPa)	변형률 (%)
CS3-2%A	탄산칼슘 +시멘트	3	275	2	2.75	2.75	36.80	0.38
CS3-2%B	탄산칼슘 +시멘트	3	275	2	2.75	2.75	43.50	0.64
CS3-4%A	탄산칼슘 +시멘트	3	275	4	5.5	5.5	56.93	0.48
CS3-4%B	탄산칼슘 +시멘트	3	275	4	5.5	5.5	62.79	0.65
CS3-6%A	탄산칼슘 +시멘트	3	275	6	8.25	8.25	275.26	0.71
CS3-6%B	탄산칼슘 +시멘트	3	275	6	8.25	8.25	296.35	1.03
CS3-8%A	탄산칼슘 +시멘트	3	275	8	11	11	367.78	0.65
CS3-8%B	탄산칼슘 +시멘트	3	275	8	11	11	372.01	0.72

탄산칼슘+시멘트로 제작한 공시체를 3일간 40°C의 온도로 양생시켜 일축압축시험을 통해 측정한 결과는 표 4.14와 같은 결과가 나왔으며, 실험결과 탄산칼슘+시멘트 2% 공시체의 일축압축강도는 36.80~43.50kPa, 4% 공시체에서는 56.93~62.79kPa, 6% 공시체에서는 275.26~296.35kPa, 8% 공시체에서는 367.78~372.01kPa로 측정 되었다.

그림 4.36은 양생기간 3일에 대한 탄산칼슘+시멘트 중량비에 따라 제작된 공시체를 일축압축시험을 통해 각각의 공시체에 따른 일축압축강도와 변형률을 응력-변형률 곡

선으로 나타내었으며, 그림 4.37에서는 3일 양생한 탄산칼슘+시멘트 공시체 각각의 일축압축강도를 공시체(중량비)에 따라 나타내었다.

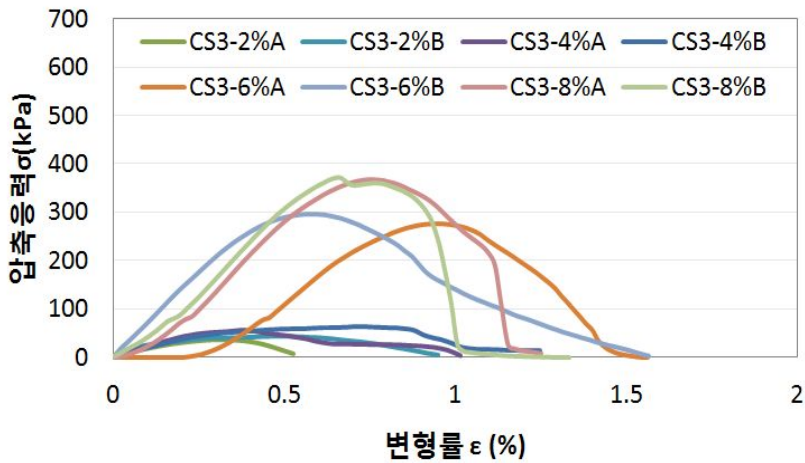


그림 4.36 양생기간 3일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 비교

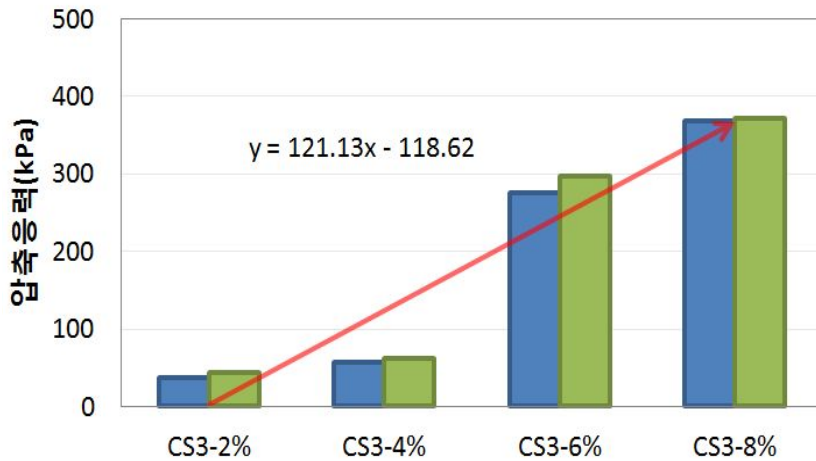


그림 4.37 양생기간 3일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 증가

탄산칼슘+시멘트를 첨가하여 제작한 공시체를 건조기 40℃에서 3일 동안 양생 후 일축압축시험을 측정된 결과 중량비가 증가할수록 즉, 탄산칼슘+시멘트의 양이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였으며, 이는 3일 양생한 중량비 2% 탄산칼슘+시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 43.50kPa, 중량비 8% 탄산칼슘+시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 372.01kPa로 약 8.5배 증가함을 확인하였으며, 탄산칼슘 및 시멘트의 공

시체와 달리 탄산칼슘+시멘트 공시체는 중량비 2%와 4%에서는 강도의 큰 변화가 발생하지 않았으나 중량비 6%에서 급격한 증가를 보였다. 이는 탄산칼슘과 시멘트의 비율은 1:1배합이므로 중량비 2%에서는 탄산칼슘 1%, 시멘트 1%를 첨가한 것과 같으므로 소량으로 큰 강도는 발현되지 않았으나, 탄산칼슘과 시멘트의 중량비가 6%에서부터 탄산칼슘과 시멘트의 강도발현이 중량비 2%에서 보다 큰 효과가 있는 것으로 판단된다. 또한 3일 양생한 탄산칼슘+시멘트의 공시체의 일축압축강도는 그림 4.31을 통해 탄산칼슘 및 시멘트의 공시체와 같이 동일한 중량비의 공시체에서 비슷한 강도를 나타냄을 확인하였다.

그림 4.38은 양생기간 3일에 대한 탄산칼슘+시멘트 공시체의 변형률을 나타내었다.

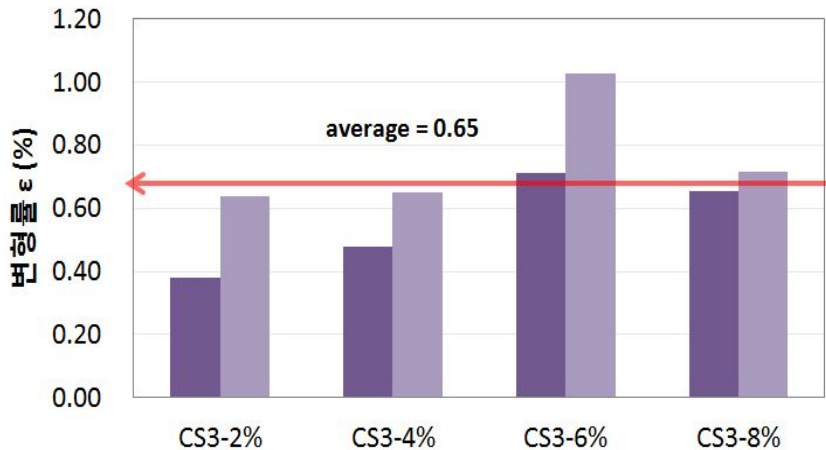


그림 4.38 양생기간 3일에 대한 탄산칼슘+시멘트 변형률

양생기간 3일에 대한 탄산칼슘+시멘트 공시체의 변형률은 탄산칼슘+시멘트의 양이 증가 할수록 뚜렷한 변형률의 차이를 나타내지는 않았지만, CS3-2%와 CS3-6%의 변형률간의 차이를 나타내므로 탄산칼슘+시멘트의 양이 증가할수록 3일 양생한 탄산칼슘+시멘트의 공시체의 변형률이 증가한 것으로 판단된다.

4.2.3.2 탄산칼슘+시멘트 공시체 7일 강도 평가

탄산칼슘+시멘트를 중량비 2%, 4%, 6%, 8%의 비율로 공시체를 제작하였다. 앞서 탄산칼슘+시멘트 3일 강도평가를 통해 공시체의 신뢰도를 확인 하였으므로 탄산칼슘+시멘트 7일 공시체는 1개씩 제작하여 강도를 평가하였다. 양생기간 7일 후 일축압축시

험을 통해 다음과 같은 실험결과를 나타내었다.

표 4.15 탄산칼슘+시멘트 공시체의 7일 강도평가 결과

공시체	고결제	양생 기간 (일)	시료 무게 (g)	중량비 (%)	시멘트 (g)	탄산 칼슘 (g)	일축압축 강도 (kPa)	변형률 (%)
CS7-2%	탄산칼슘 +시멘트	7	275	2	2.75	2.75	61.12	0.39
CS7-4%	탄산칼슘 +시멘트	7	275	4	5.5	5.5	94.78	0.60
CS7-6%	탄산칼슘 +시멘트	7	275	6	8.25	8.25	333.96	0.63
CS7-8%	탄산칼슘 +시멘트	7	275	8	11	11	407.14	0.79

탄산칼슘+시멘트로 제작한 공시체를 7일간 40°C의 온도로 양생시켜 일축압축시험을 통해 측정된 결과는 표 4.15와 같은 결과가 나왔으며, 실험결과 탄산칼슘+시멘트 2% 공시체의 일축압축강도는 61.12kPa, 4% 공시체에서는 94.78kPa, 6% 공시체에서는 333.96kPa, 8% 공시체에서는 407.14kPa로 측정 되었다.

그림 4.39는 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘+시멘트 중량비에 따라 제작된 공시체를 일축압축시험을 통해 각각의 공시체에 따른 일축압축강도와 변형률을 응력-변형률 곡선으로 나타내었으며, 그림 4.40에서는 7일 양생한 탄산칼슘+시멘트 공시체 각각의 일축압축강도를 중량비에 따라 나타내었다.

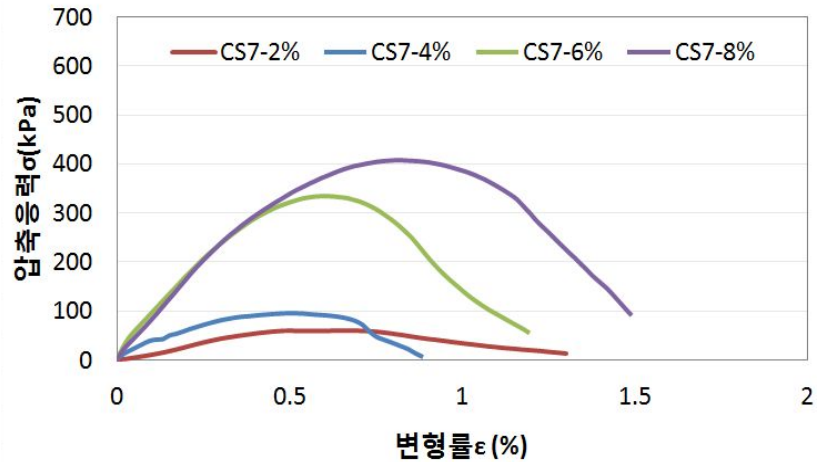


그림 4.39 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 비교

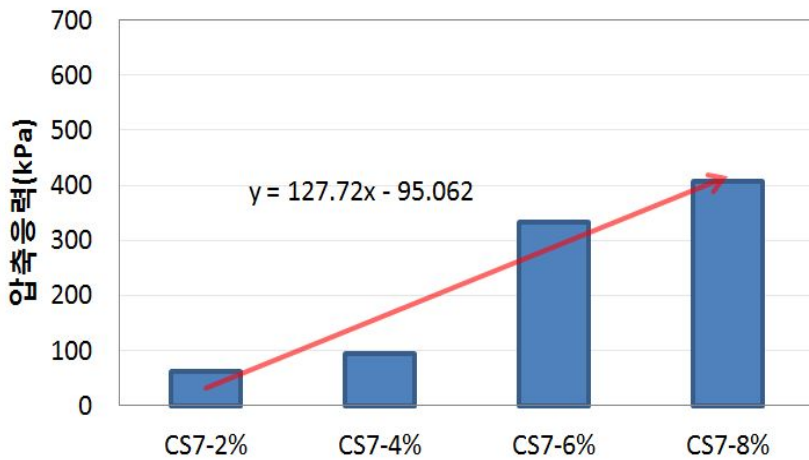


그림 4.40 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 증가

탄산칼슘+시멘트를 첨가하여 제작한 공시체를 건조기 40℃에서 7일 동안 양생 후 일축압축시험을 측정한 결과 중량비가 증가할수록 즉, 탄산칼슘+시멘트의 양이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였으며, 이는 3일 양생한 중량비 2% 탄산칼슘+시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 61.12kPa, 중량비 8% 탄산칼슘+시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 407.14kPa로 약 6.6배 증가함을 확인하였다.

그림 4.41은 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘+시멘트 공시체의 변형률을 나타내었다.

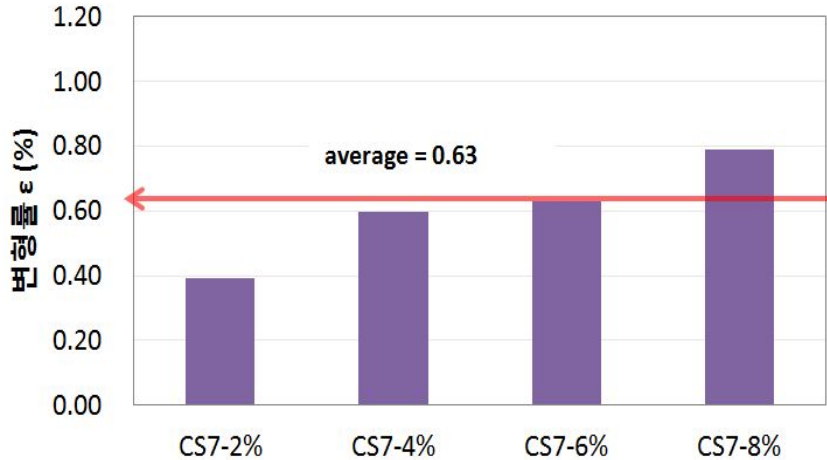


그림 4.41 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘+시멘트 변형률

양생기간 7일에 대한 탄산칼슘+시멘트 공시체의 변형률은 탄산칼슘+시멘트의 양이 증가 할수록 뚜렷한 변형률의 차이를 나타내었으며, CS7-2%와 CS7-8%의 변형률간의 차이를 나타내므로 탄산칼슘+시멘트의 양이 증가할수록 7일 양생한 탄산칼슘+시멘트의 공시체의 변형률이 증가한 것으로 판단된다.

4.2.3.3 탄산칼슘+시멘트 공시체 14일 강도 평가

탄산칼슘+시멘트를 중량비 2%, 4%, 6%, 8%의 비율로 공시체를 제작하였다. 앞서 탄산칼슘+시멘트 3일 강도평가를 통해 공시체의 신뢰도를 확인 하였으므로 탄산칼슘+시멘트 14일 공시체는 1개씩 제작하여 강도를 평가하였다. 양생기간 14일 후 일축압축 시험을 통해 다음과 같은 실험결과를 나타내었다.

표 4.16 탄산칼슘+시멘트 공시체의 14일 강도평가 결과

공시체	고결제	양생 기간 (일)	시료 무게 (g)	중량비 (%)	시멘트 (g)	탄산 칼슘 (g)	일축압축 강도 (kPa)	변형률 (%)
CS14-2%	탄산칼슘 +시멘트	14	275	2	2.75	2.75	62.79	0.40
CS14-4%	탄산칼슘 +시멘트	14	275	4	5.5	5.5	118.81	0.69
CS14-6%	탄산칼슘 +시멘트	14	275	6	8.25	8.25	335.70	0.59
CS14-8%	탄산칼슘 +시멘트	14	275	8	11	11	436.60	0.78

탄산칼슘+시멘트로 제작한 공시체를 14일간 40°C의 온도로 양생시켜 일축압축시험을 통해 측정 한 결과는 표 4.16과 같은 결과가 나왔으며, 실험결과 탄산칼슘+시멘트 2% 공시체의 일축압축강도는 62.79kPa, 4% 공시체에서는 118.81kPa, 6% 공시체에서는 335.70kPa, 8% 공시체에서는 436.60kPa로 측정 되었다.

그림 4.42는 양생기간 7일에 대한 탄산칼슘+시멘트 중량비에 따라 제작된 공시체를 일축압축시험을 통해 각각의 공시체에 따른 일축압축강도와 변형률을 응력-변형률 곡선으로 나타내었으며, 그림 4.43에서는 14일 양생한 탄산칼슘+시멘트 공시체 각각의 일축압축강도를 중량비에 따라 나타내었다.

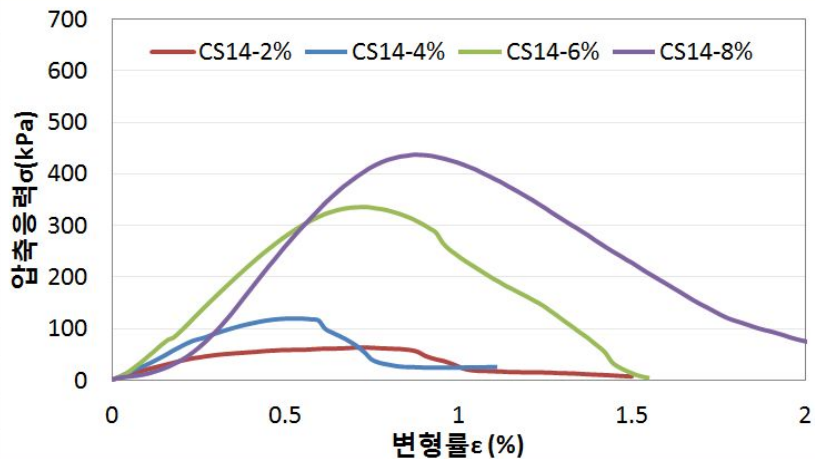


그림 4.42 양생기간 14일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 비교

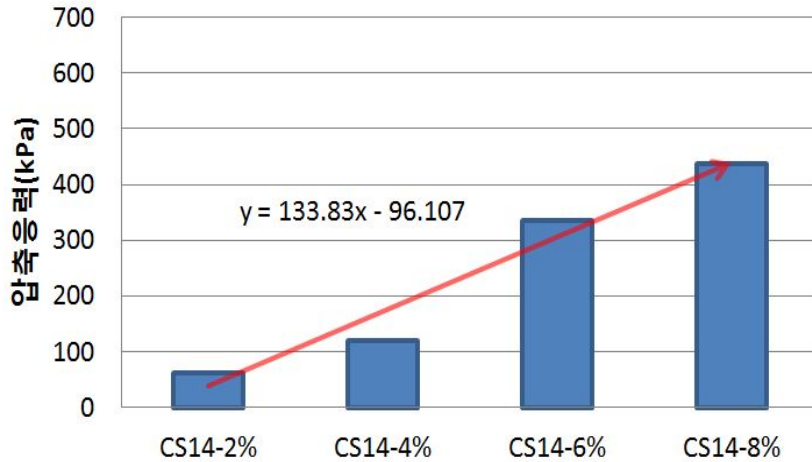


그림 4.43 양생기간 14일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 증가

탄산칼슘+시멘트를 첨가하여 제작한 공시체를 건조기 40℃에서 7일 동안 양생 후 일축압축시험을 측정한 결과 중량비가 증가할수록 즉, 탄산칼슘+시멘트의 양이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였으며, 이는 3일 양생한 중량비 2% 탄산칼슘+시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 62.79kPa, 중량비 8% 탄산칼슘+시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 436.60kPa로 약 7배 증가함을 확인하였다.

그림 4.44는 양생기간 14일에 대한 탄산칼슘+시멘트 공시체의 변형률을 나타내었다.

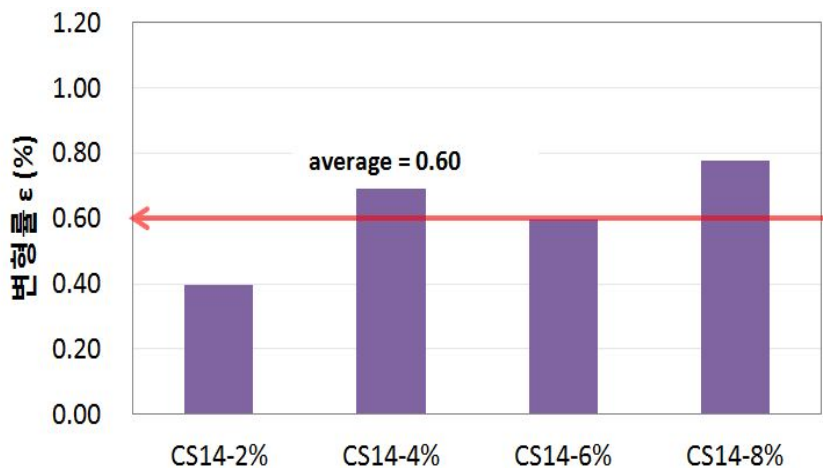


그림 4.44 양생기간 14일에 대한 탄산칼슘+시멘트 변형률

양생기간 14일에 대한 탄산칼슘+시멘트 공시체의 변형률은 탄산칼슘+시멘트의 양에 따라 변형률의 추세를 판단할 수 없었다. CS14-2%에서 CS14-6%까지 변형률은 비슷한 양상을 보였으나 CS14-8%에서는 다른 양생기간의 공시체와 달리 작은 변형률을 나타냈으며, 14일 양생한 공시체의 평균 변형률은 0.6으로 산정되었다.

4.2.3.4 탄산칼슘+시멘트 공시체 21일 강도 평가

탄산칼슘+시멘트를 중량비 2%, 4%, 6%, 8%의 비율로 공시체를 제작하였다. 앞서 탄산칼슘+시멘트 3일 강도평가를 통해 공시체의 신뢰도를 확인 하였으므로 탄산칼슘+시멘트 21일 공시체는 1개씩 제작하여 강도를 평가하였다. 양생기간 21일 후 일축압축 시험을 통해 다음과 같은 실험결과를 나타내었다.

표 4.17 탄산칼슘+시멘트 공시체의 21일 강도평가 결과

공시체	고결제	양생 기간 (일)	시료 무게 (g)	중량비 (%)	시멘트 (g)	탄산 칼슘 (g)	일축압축 강도 (kPa)	변형률 (%)
CS21-2%	탄산칼슘 +시멘트	21	275	2	2.75	2.75	67.83	0.44
CS21-4%	탄산칼슘 +시멘트	21	275	4	5.5	5.5	140.19	0.48
CS21-6%	탄산칼슘 +시멘트	21	275	6	8.25	8.25	338.75	0.84
CS21-8%	탄산칼슘 +시멘트	21	275	8	11	11	499.94	0.69

탄산칼슘+시멘트로 제작한 공시체를 21일간 40°C의 온도로 양생시켜 일축압축시험을 통해 측정 한 결과는 표 4.17과 같은 결과가 나왔으며, 실험결과 탄산칼슘+시멘트 2% 공시체의 일축압축강도는 67.83kPa, 4% 공시체에서는 140.19kPa, 6% 공시체에서는 338.75kPa, 8% 공시체에서는 499.94kPa로 측정 되었다.

그림 4.45는 양생기간 21일에 대한 탄산칼슘+시멘트 중량비에 따라 제작된 공시체를 일축압축시험을 통해 각각의 공시체에 따른 일축압축강도와 변형률을 응력-변형률 곡선으로 나타내었으며, 그림 4.46에서는 21일 양생한 탄산칼슘+시멘트 공시체 각각의 일축압축강도를 중량비에 따라 나타내었다.

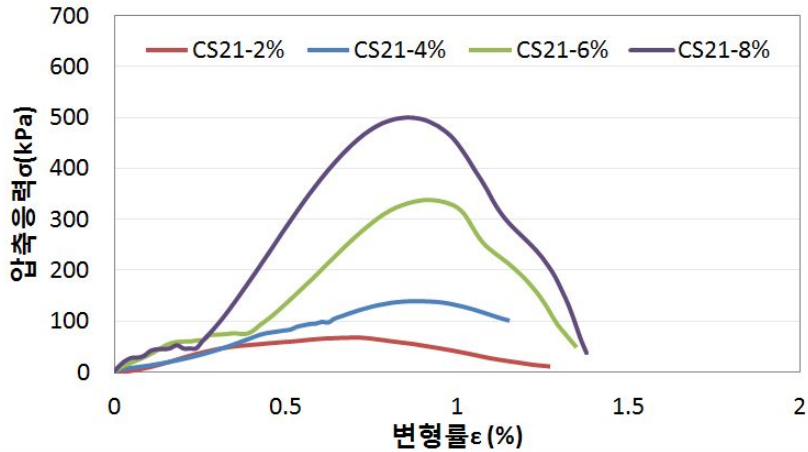


그림 4.45 양생기간 21일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 비교

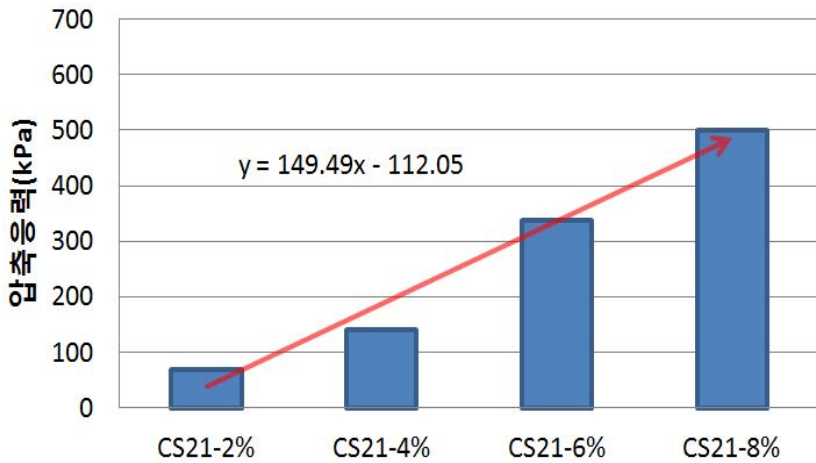


그림 4.46 양생기간 21일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 증가

탄산칼슘+시멘트를 첨가하여 제작한 공시체를 건조기 40℃에서 21일 동안 양생 후 일축압축시험을 측정한 결과 중량비가 증가할수록 즉, 탄산칼슘+시멘트의 양이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였으며, 이는 3일 양생한 중량비 2% 탄산칼슘+시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 67.83kPa, 중량비 8% 탄산칼슘+시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 499.94kPa로 약 7.4배 증가함을 확인하였다.

그림 4.47은 양생기간 21일에 대한 탄산칼슘+시멘트 공시체의 변형률을 나타내었다.

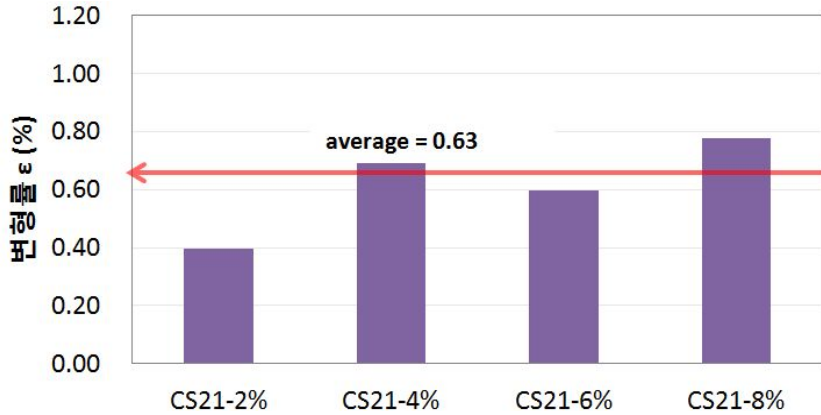


그림 4.47 양생기간 21일에 대한 탄산칼슘+시멘트 변형률

양생기간 21일에 대한 탄산칼슘+시멘트 공시체의 변형률은 탄산칼슘+시멘트의 양이 증가 할수록 뚜렷한 변형률의 차이를 나타내지는 않았으며, 21일 양생한 탄산칼슘+시멘트 공시체의 변형률 평균은 0.63으로 나타났다.

4.2.3.5 탄산칼슘+시멘트 공시체 28일 강도 평가

탄산칼슘+시멘트를 중량비 2%, 4%, 6%, 8%의 비율로 공시체를 제작하였다. 앞서 탄산칼슘+시멘트 3일 강도평가를 통해 공시체의 신뢰도를 확인 하였으므로 탄산칼슘+시멘트 28일 공시체는 1개씩 제작하여 강도를 평가하였다. 양생기간 28일 후 일축압축 시험을 통해 다음과 같은 실험결과를 나타내었다.

표 4.18 탄산칼슘+시멘트 공시체의 28일 강도평가 결과

공시체	고결제	양생 기간 (일)	시료 무게 (g)	중량비 (%)	시멘트 (g)	탄산 칼슘 (g)	일축압축 강도 (kPa)	변형률 (%)
CS28-2%	탄산칼슘 +시멘트	28	275	2	2.75	2.75	76.45	0.53
CS28-4%	탄산칼슘 +시멘트	28	275	4	5.5	5.5	169.56	0.69
CS28-6%	탄산칼슘 +시멘트	28	275	6	8.25	8.25	352.78	0.56
CS28-8%	탄산칼슘 +시멘트	28	275	8	11	11	654.27	0.92

탄산칼슘+시멘트로 제작한 공시체를 28일간 약 40°C의 온도로 양생시켜 일축압축시험을 통해 측정된 결과는 표 4.18과 같은 결과가 나왔으며, 실험결과 탄산칼슘+시멘트 2% 공시체의 일축압축강도는 76.45kPa, 4% 공시체에서는 169.56kPa, 6% 공시체에서는 352.78kPa, 8% 공시체에서는 654.27kPa로 측정 되었다.

그림 4.48은 양생기간 28일에 대한 탄산칼슘+시멘트 중량비에 따라 제작된 공시체를 일축압축시험을 통해 각각의 공시체에 따른 일축압축강도와 변형률을 응력-변형률 곡선으로 나타내었으며, 그림 4.49에서는 28일 양생한 탄산칼슘+시멘트 공시체 각각의 일축압축강도를 중량비에 따라 나타내었다.

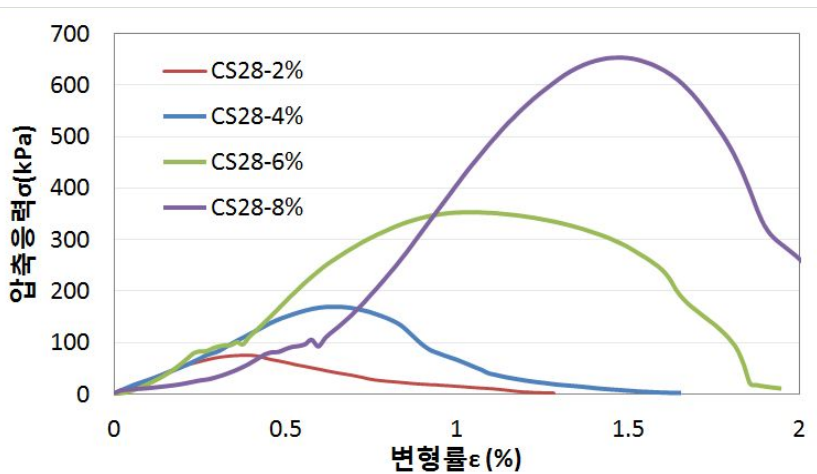


그림 4.48 양생기간 28일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 비교

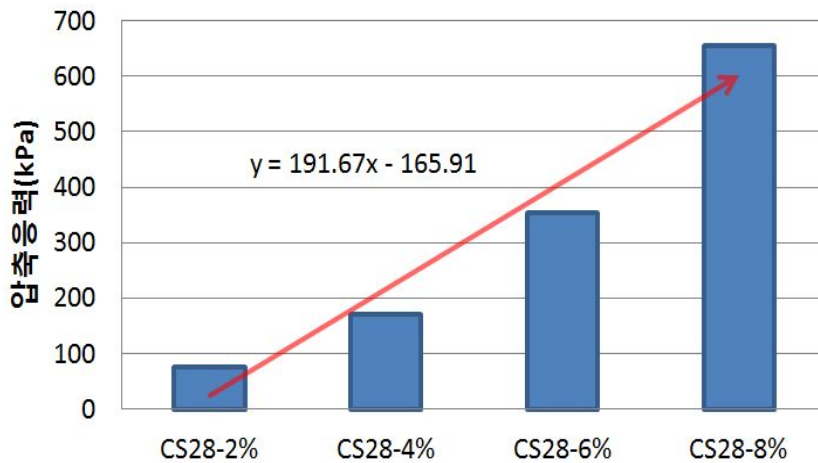


그림 4.49 양생기간 28일에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력 증가

탄산칼슘+시멘트를 첨가하여 제작한 공시체를 건조기 40℃에서 28일 동안 양생 후 일축압축시험을 측정한 결과 중량비가 증가할수록 즉, 탄산칼슘+시멘트의 양이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였으며, 이는 28일 양생한 중량비 2% 탄산칼슘+시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 76.45kPa, 중량비 8% 탄산칼슘+시멘트 공시체의 최대 일축압축강도는 654.27kPa로 약 8.5배 증가함을 확인하였다.

그림 4.50은 양생기간 28일에 대한 탄산칼슘+시멘트 공시체의 변형률을 나타내었다.

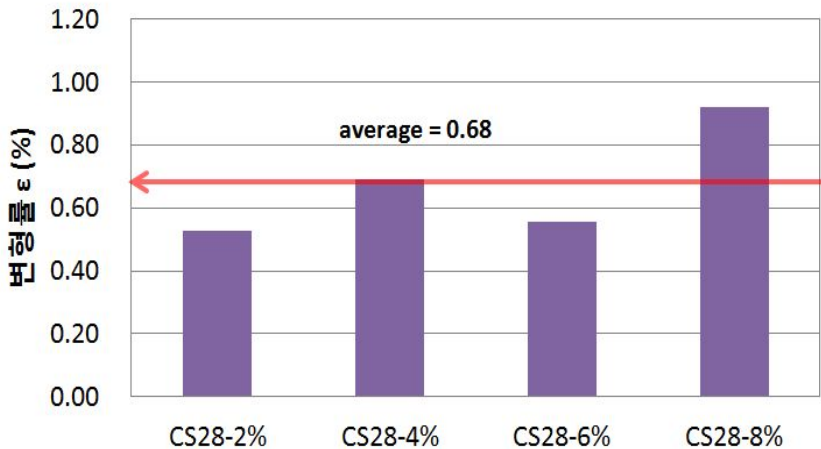


그림 4.50 양생기간 28일에 대한 탄산칼슘+시멘트 변형률

양생기간 28일에 대한 탄산칼슘+시멘트 공시체의 변형률은 탄산칼슘+시멘트의 양이 증가 할수록 뚜렷한 변형률의 차이를 나타내지는 않았으나 CS28-2%와 CS28-8%의 변형률간의 차이를 나타내므로 탄산칼슘+시멘트의 양이 증가할수록 28일 양생한 탄산칼슘+시멘트의 공시체의 변형률이 증가한 것으로 판단된다.

4.2.3.6 양생기간에 대한 탄산칼슘+시멘트 공시체 강도 평가

탄산칼슘+시멘트를 중량비(2%, 4%, 6%, 8%)에 따라 공시체를 제작하여 각각 3일, 7일, 14일, 21일, 28일간 양생하여 일축압축시험을 통해 측정한 일축압축강도는 다음과 같다.

표 4.19 양생기간에 대한 탄산칼슘+시멘트 강도 평가

(단위 : kPa)

공시체	양생기간에 따른 탄산칼슘+시멘트 공시체 비교					
	3일		7일	14일	21일	28일
	A	B				
CS-2%	36.80	43.50	61.12	62.79	67.83	76.45
CS-4%	56.93	62.79	94.78	118.81	140.19	169.56
CS-6%	275.26	296.35	333.96	335.70	338.75	352.78
CS-8%	367.78	372.01	407.14	436.60	499.94	654.27

표 4.19는 양생기간에 따른 탄산칼슘+시멘트 공시체 비교분석 결과이다. 중량비 2% 탄산칼슘+시멘트 공시체(CS-2%)의 압축강도는 36.80~76.45kPa, 중량비 4% 탄산칼슘+시멘트 공시체(CS-4%)에서는 56.93kPa~169.56kPa, 중량비 6% 탄산칼슘+시멘트 공시체(CS-6%)에서는 275.26kPa~352.78kPa, 중량비 8% 탄산칼슘+시멘트 공시체(CS-8)에서는 367.78~654.27kPa로 측정되었다.

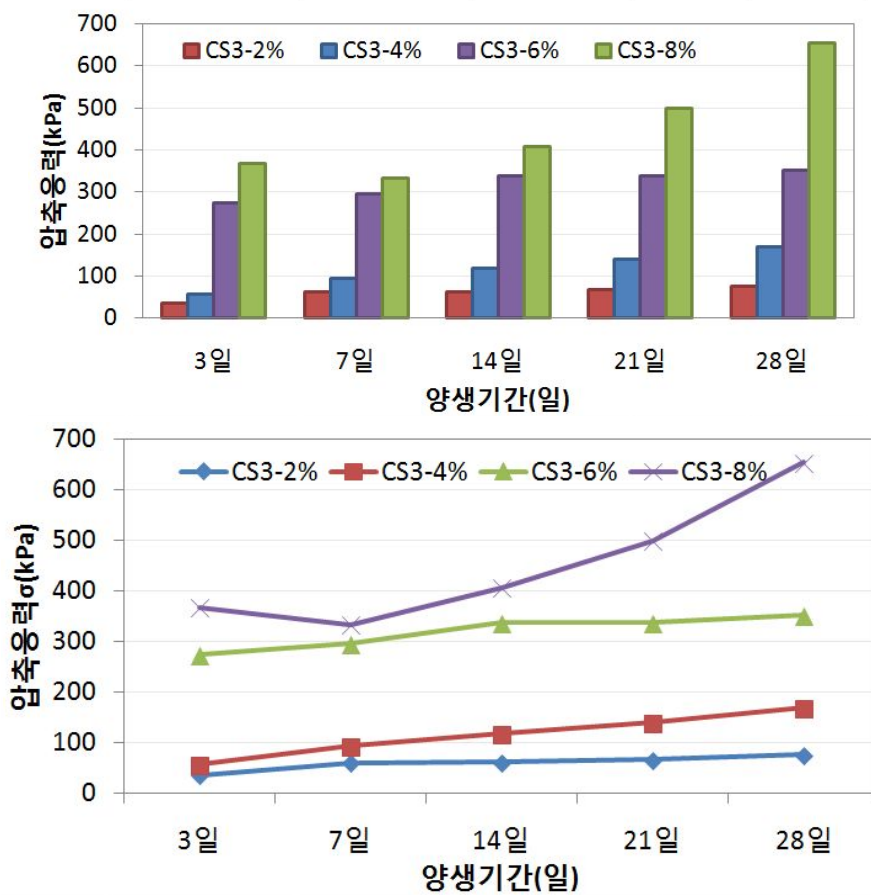


그림 4.51 양생기간에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력

그림 4.51은 양생기간에 대한 탄산칼슘+시멘트 압축응력을 비교 분석하였다. 분석 결과 탄산칼슘+시멘트 공시체의 강도는 중량비가 증가할수록 강도는 증가하였으나, 양생일이 증가할수록 강도변화는 미미하다. 탄산칼슘+시멘트 공시체는 앞서 시행한 탄산칼슘 및 시멘트 공시체와 중량비 및 양생일 증가에 따라 공시체의 강도는 상승하였으나, 중량비 8% 탄산칼슘+시멘트 공시체에서의 양생 3일에 공시체 강도는 탄산칼슘+시멘트의 중량비의 증가에 따라 공시체의 강도를 증진시키는 효과가 있으며, 양생일에 대한 영향은 미미하였지만, 중량비 8% 탄산칼슘+시멘트의 공시체는 양생일 3일에서 $367.78kPa$, 28일에서는 $654.27kPa$ 로 양생일이 증가함에 따라 약 2배의 강도증진을 확인하였다. 따라서 미생물에 의해 생성된 탄산칼슘은 첨가량과 양생일이 증가할수록 강도는 증가되는 것으로 판단된다.

탄산칼슘+시멘트 공시체의 강도는 탄산칼슘 및 시멘트의 공시체보다 양생일 초기강도는 낮게 측정되었으나, 미미하지만 점차적으로 강도가 증가하였다. 이는 시멘트가 양생일에 따라 강도가 증가하는 성질의 영향을 받은 것으로 판단된다.

탄산칼슘, 시멘트, 탄산칼슘+시멘트 공시체를 일축압축시험을 통해 측정한 일축압축강도를 비교 분석한 결과 고결제(탄산칼슘, 시멘트)의 사용이 적은 공시체의 경우에는 탄산칼슘 공시체와 시멘트 공시체의 강도차이가 작게 나타났으며, 고결제의 사용이 많은 공시체의 경우에는 차이가 크게 나타났다. 따라서 본 연구를 통해 탄산칼슘의 함유량이 많을수록 공시체의 강도가 증가하는 것을 입증하였으며, 미생물 반응으로 생성된 탄산칼슘은 흙의 강도개선 효과가 있다고 판단된다. 보다 심도 있는 연구를 통해 탄산칼슘의 적절한 중량비 산정 및 탄산칼슘과 시멘트의 배합비에 대한 연구가 요구된다.

4.2.4 일축압축시험 분석 결과

앞서 분석한 탄산칼슘, 시멘트, 탄산칼슘+시멘트 공시체의 일축압축 강도를 같은 중량비(2%, 4%, 6%, 8%)에 따라 비교분석 하였다. 이는 탄산칼슘, 시멘트, 그리고 탄산칼슘+시멘트의 일축압축강도의 변화를 동일한 중량비에 따라 비교 분석 함으로써 탄산칼슘, 시멘트 그리고 탄산칼슘+시멘트가 공시체에 강도개선 효과를 서로 비교 분석할 수 있었다.

다음 그림 4.52는 탄산칼슘, 시멘트, 탄산칼슘+시멘트 각각의 중량비 2%공시체의 일축압축강도를 양생일에 따라 도시하였다.

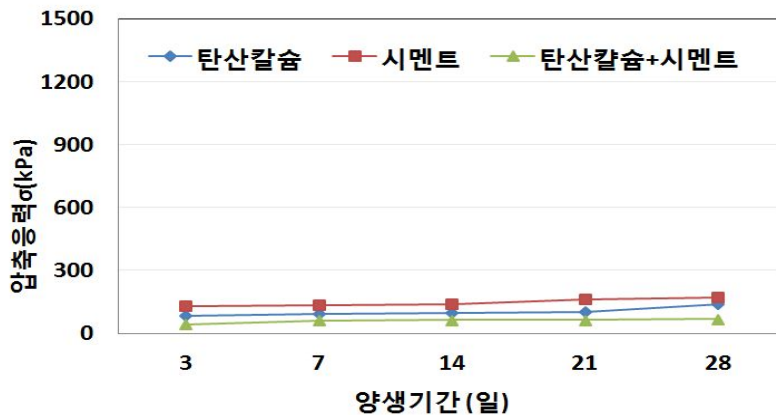


그림 4.52 중량비 2% 공시체의 일축압축 강도

탄산칼슘, 시멘트 그리고 탄산칼슘+시멘트 2% 중량비의 일축압축 강도를 양생기간에 따라 분석한 결과 2% 중량비에 해당하는 고결제의 양은 5.7g로 공시체의 강도 개선에 시멘트, 탄산칼슘, 탄산칼슘+시멘트 순으로 탄산칼슘이 탄산칼슘+시멘트보다 강도 개선에 보다 더 효과적인 것으로 분석되었다. 이는 탄산칼슘+시멘트는 탄산칼슘과 시멘트의 배합의 1:1인 것으로 감한하면 탄산칼슘과 시멘트의 양은 중량비 1%씩 첨가되어 탄산칼슘보다 작은 강도 개선 효과가 나타난 것으로 판단된다.

다음 그림 4.53은 탄산칼슘, 시멘트, 탄산칼슘+시멘트 각각의 중량비 4% 공시체의 일축압축강도를 양생일에 따라 도시하였다.

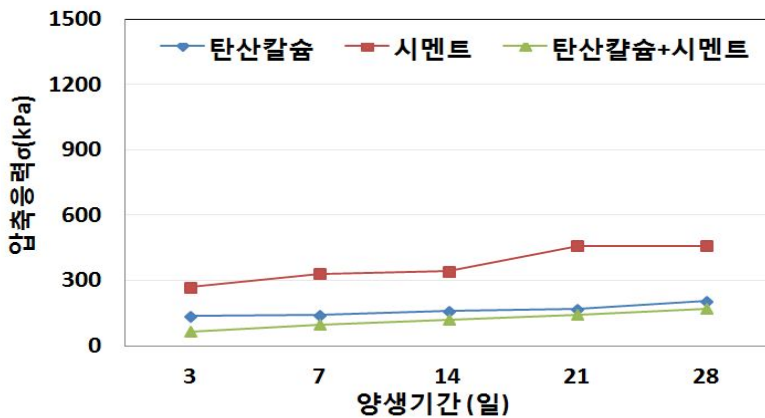


그림 4.53 중량비 4% 공시체의 일축압축 강도

탄산칼슘, 시멘트 그리고 탄산칼슘+시멘트 4% 중량비의 일축압축 강도를 양생기간에 따라 분석한 결과 4% 중량비에 해당하는 고결제의 양은 11.4g로 공시체의 강도 개선에 시멘트, 탄산칼슘, 탄산칼슘+시멘트 순으로 탄산칼슘이 탄산칼슘+시멘트보다 강도 개선에 보다 더 효과적인 것으로 분석되었으나, 양생기간 초기의 강도보다 점차적으로 양생기간이 증가할수록 탄산칼슘과 탄산칼슘+시멘트의 강도 개선 효과의 차이는 미미한 것으로 나타났다. 이는 탄산칼슘+시멘트는 탄산칼슘과 시멘트의 배합의 1:1인 것으로 감한하면 탄산칼슘과 시멘트의 양은 중량비 2%씩 첨가되어 양생기간 초기에는 탄산칼슘보다 작은 강도 개선 효과가 나타났으며, 양생기간이 증가할수록 시멘트의 수화작용에 의해 탄산칼슘+시멘트의 강도증진에 영향을 미친 것으로 판단된다.

다음 그림 4.54는 탄산칼슘, 시멘트, 탄산칼슘+시멘트 각각의 중량비 6% 공시체의 일축압축강도를 양생일에 따라 도시하였다.

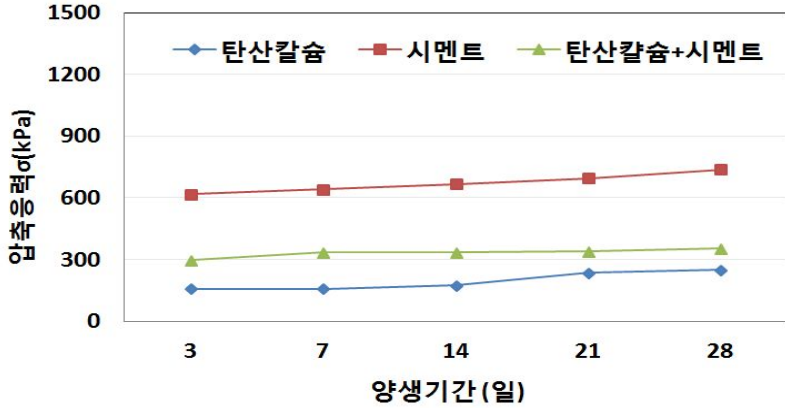


그림 4.54 중량비 6% 공시체의 일축압축 강도

탄산칼슘, 시멘트 그리고 탄산칼슘+시멘트 6% 중량비의 일축압축 강도를 양생기간에 따라 분석한 결과 6% 중량비에 해당하는 고결체의 양은 17.1g로 앞서 설명한 중량비 2%, 4%공시체의 강도 개선과 달리 시멘트, 탄산칼슘+시멘트 탄산칼슘 순으로 탄산칼슘+시멘트가 탄산칼슘보다 강도 개선에 보다 더 효과적인 것으로 분석되었다. 이는 탄산칼슘+시멘트 중량비 6%에서는 탄산칼슘 8.25g과 시멘트 8.25g으로 시멘트의 강도 개선효과가 중량비 4%에서 보다 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

다음 그림 4.55는 탄산칼슘, 시멘트, 탄산칼슘+시멘트 각각의 중량비 8% 공시체의 일축압축강도를 양생일에 따라 도시하였다.

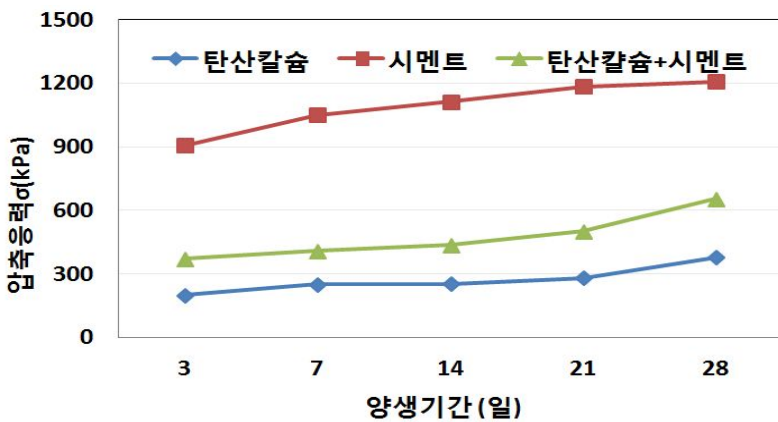


그림 4.55 중량비 8% 공시체의 일축압축 강도

탄산칼슘, 시멘트 그리고 탄산칼슘+시멘트 6% 중량비의 일축압축 강도를 양생기간에 따라 분석한 결과 6% 중량비에 해당하는 고결체의 양은 22.8g로 앞서 설명한 중량비 6%공시체의 강도 개선과 같이 시멘트, 탄산칼슘+시멘트 탄산칼슘 순으로 나타났다. 중량비 2~4%의 공시체에서는 탄산칼슘이 탄산칼슘+시멘트보다 더 큰 강도가 발현되었으나, 중량비 6~8%에서는 중량비 2~4%와 달리 탄산칼슘+시멘트가 탄산칼슘보다 더 큰 강도가 발현되었다. 작은 중량비에서는 작은 시멘트의 양으로 강도 효과에 큰 영향을 미치지 못한 결과로 판단되며, 차후에 탄산칼슘과 시멘트의

탄산칼슘+시멘트가 탄산칼슘보다 강도 개선에 보다 더 효과적인 것으로 분석되었다. 이는 탄산칼슘+시멘트 중량비 6%에서는 탄산칼슘 8.25g과 시멘트 8.25g으로 시멘트의 강도 개선효과가 중량비 4%에서 보다 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

4.3 전자현미경(SEM) 분석

4.3.1 전자현미경(SEM) 분석 결과

무처리 시료의 모래의 SEM 분석결과 모래 입자 표면에 어떠한 침전물도 생기지 않아 매우 매끄러운 모습을 확인하였으나, 표 4.20~4.25 분석결과 탄산칼슘 시료에서는 모래 입자 표면에 흰색의 탄산칼슘 입자가 분포하는 것을 확인 하였으며, 시멘트에서는 10,000배의 사진을 통해 시료입자 표면에 수화반응으로 생성된 침상의 에트링자이트가 잘 발달되어 있었으며, 양생일이 증가한 시료일수록 에트링자이트가 잘 발달되어 있는 것을 확인 할 수 있었다. 이로 인해 3일~28일 양생한 SEM분석 결과를 비교해본 결과 탄산칼슘 알갱이와 시멘트의 에트링자이트가 굵어짐으로써 점차적으로 강도가 상승하는 것으로 판단된다.

탄산칼슘+시멘트 시료에서는 시료 입자 표면에 탄산칼슘 입자와 에트링자이트가 뒤섞여서 발달 되었으나, 모든 양생일의 SEM 분석 결과 시멘트의 에트링자이트가 적게 발달 되어 탄산칼슘과 시멘트의 혼합사용 시에는 시멘트만을 사용하는 경우보다 수화작용이 보다 작게 나타나므로 차후 탄산칼슘과 시멘트의 배합에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

표 4.20 무처리 모래 전자현미경(SEM) 분석

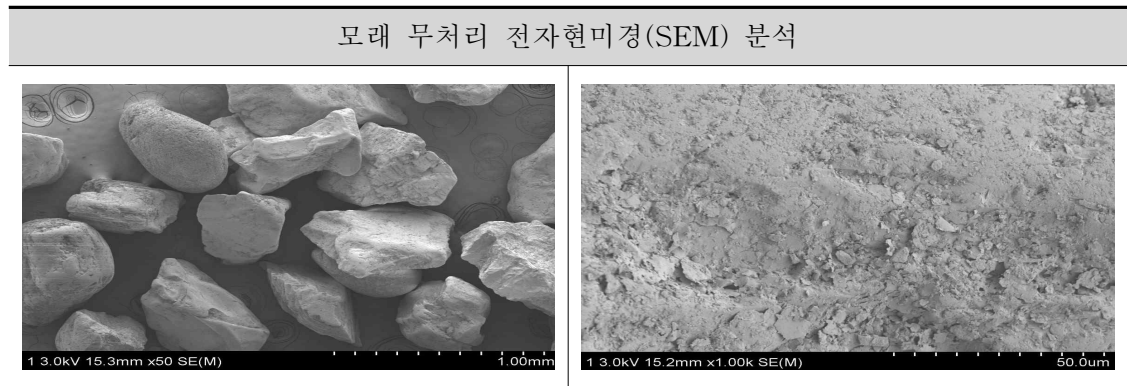


표 4.21 4% 공시체 3일 양생 후 SEM 분석 결과

비율	탄산칼슘	시멘트	탄산칼슘 +시멘트
× 2 0 0			
× 1 0 0 0			
× 1 0 0 0 0			

표 4.22 4% 공시체 7일 양생 후 SEM 분석 결과

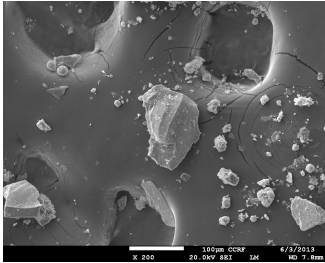
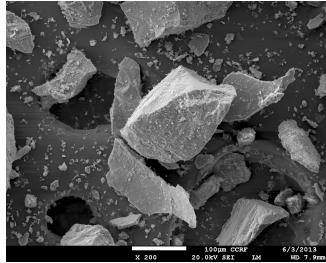
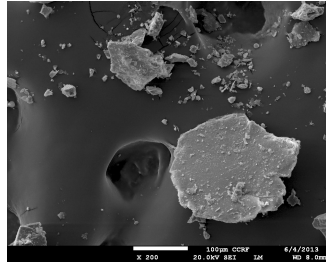
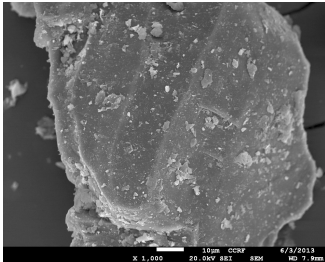
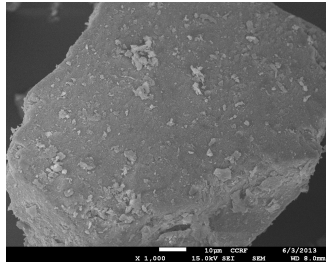
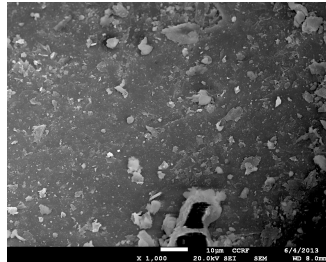
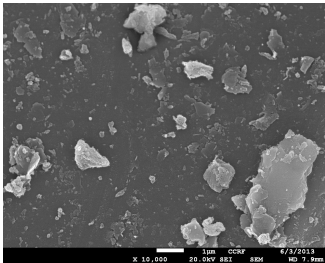
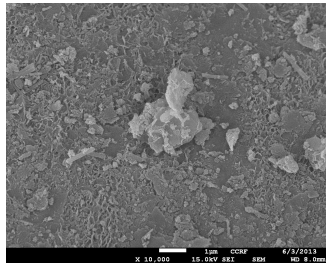
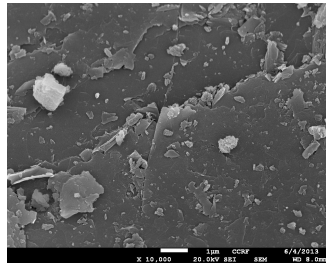
비율	탄산칼슘	시멘트	탄산칼슘 +시멘트
× 2 0 0			
× 1 0 0 0			
× 1 0 0 0 0			

표 4.23 4% 공시체 14일 양생 후 SEM 분석 결과

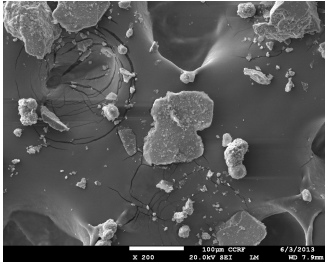
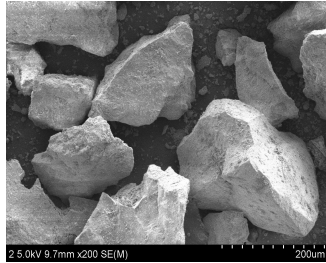
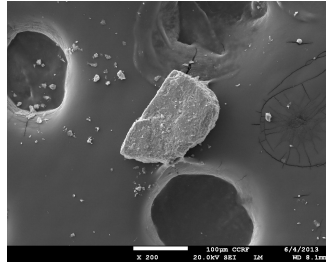
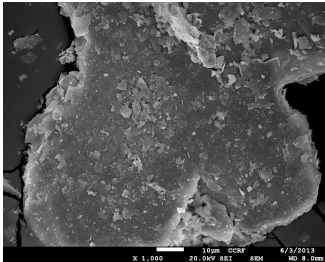
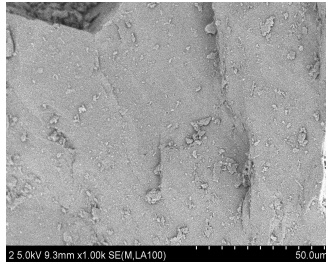
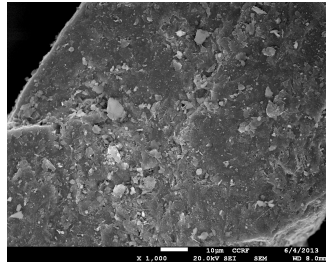
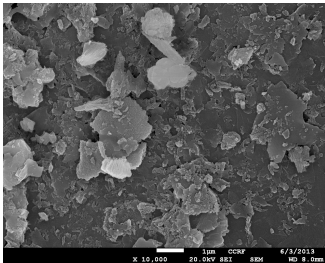
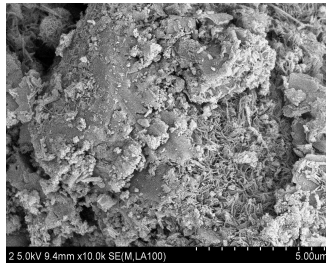
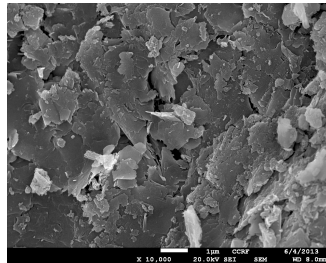
비율	탄산칼슘	시멘트	탄산칼슘 +시멘트
× 2 0 0	 <p>SEM image showing calcium carbonate particles at 200x magnification. The image displays irregular, angular particles of varying sizes. Technical data at the bottom: X 200, 100um CCRF, 20.0kV B13, 124, 4/3/2013, HD 8.12mm.</p>	 <p>SEM image showing cement particles at 200x magnification. The image shows large, angular, and somewhat porous particles. Technical data at the bottom: 2.5.0kV 9.7mm x200 SE(M), 200um.</p>	 <p>SEM image showing a mixture of calcium carbonate and cement at 200x magnification. The image shows a complex structure with large, irregular particles and some smaller, more rounded features. Technical data at the bottom: X 200, 100um CCRF, 20.0kV B13, 124, 4/4/2013, HD 8.12mm.</p>
× 1 0 0 0	 <p>SEM image showing calcium carbonate particles at 1,000x magnification. The image shows a dense, irregular surface with some smaller, rounded features. Technical data at the bottom: X 1,000, 10um CCRF, 20.0kV B13, 804, 4/3/2013, HD 8.12mm.</p>	 <p>SEM image showing cement particles at 1,000x magnification. The image shows a relatively smooth, flat surface with some small, scattered particles. Technical data at the bottom: 2.5.0kV 9.3mm x1.00k SE(M,LA100), 50.0um.</p>	 <p>SEM image showing a mixture of calcium carbonate and cement at 1,000x magnification. The image shows a complex, porous structure with many small, rounded features. Technical data at the bottom: X 1,000, 10um CCRF, 20.0kV B13, 804, 4/4/2013, HD 8.12mm.</p>
× 1 0 0 0 0	 <p>SEM image showing calcium carbonate particles at 10,000x magnification. The image shows a highly porous, irregular structure with many small, rounded features. Technical data at the bottom: X 10,000, 1um CCRF, 20.0kV B13, 804, 4/3/2013, HD 8.12mm.</p>	 <p>SEM image showing cement particles at 10,000x magnification. The image shows a highly porous, irregular structure with many small, rounded features. Technical data at the bottom: 2.5.0kV 9.4mm x10.0k SE(M,LA100), 5.00um.</p>	 <p>SEM image showing a mixture of calcium carbonate and cement at 10,000x magnification. The image shows a highly porous, irregular structure with many small, rounded features. Technical data at the bottom: X 10,000, 1um CCRF, 20.0kV B13, 804, 4/4/2013, HD 8.12mm.</p>

표 4.24 4% 공시체 21일 양생 후 SEM 분석 결과

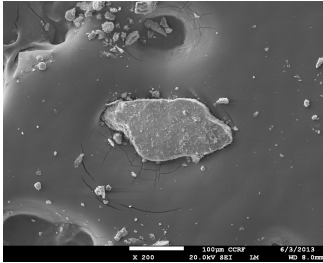
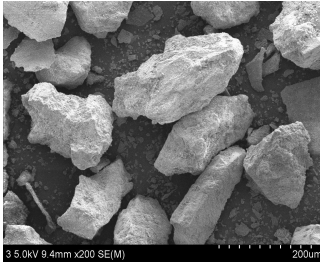
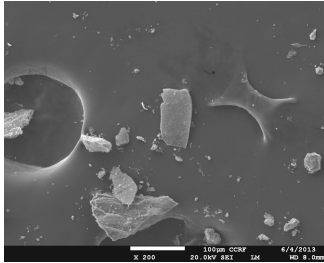
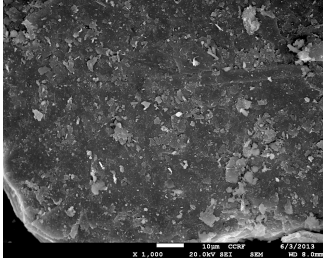
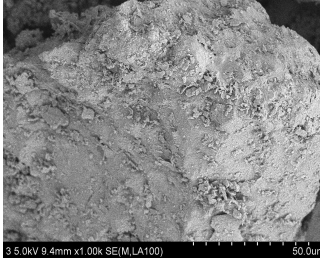

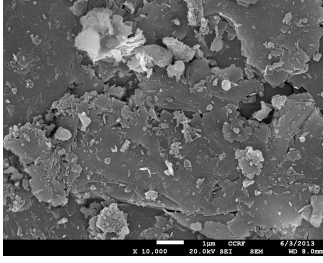
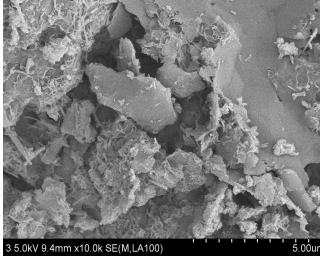
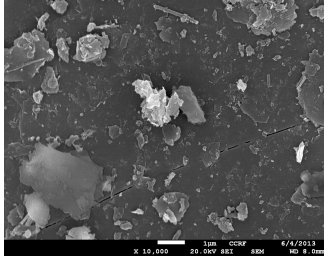
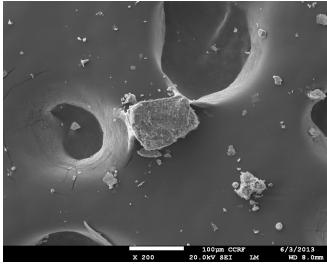
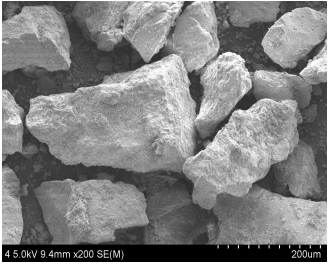
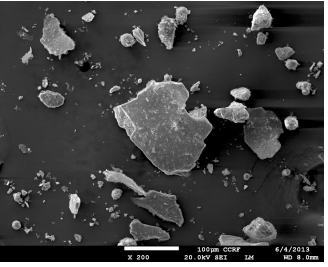
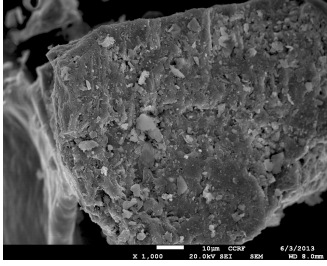
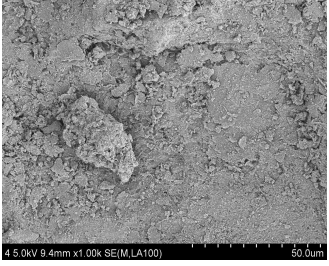
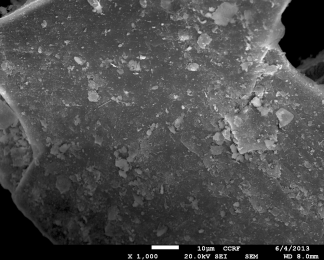
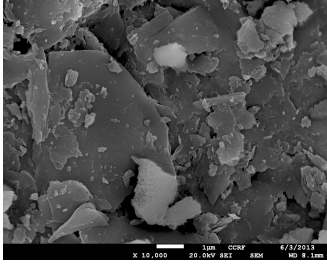
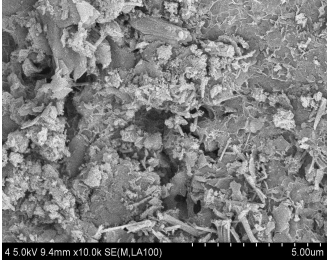
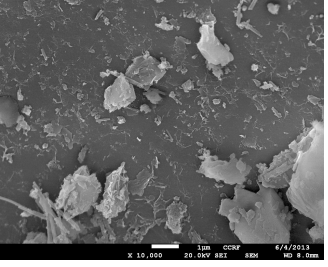
비율	탄산칼슘	시멘트	탄산칼슘 +시멘트
× 2 0 0			
× 1 0 0 0			
× 1 0 0 0 0			

표 4.25 4% 공시체 28일 양생 후 SEM 분석 결과

비율	탄산칼슘	시멘트	탄산칼슘 +시멘트
× 2 0 0			
× 1 0 0 0			
× 1 0 0 0 0			

4.3.2 EDX 분석 결과

실험결과 탄산칼슘의 경우 표 4.26과 같이 3일 강도의 경우 칼슘(Ca) 함유량은 탄산칼슘 시료에서는 최대 9.17%, 시멘트는 7.34%, 탄산칼슘+시멘트는 1.37%로 나타났다. 탄산칼슘, 시멘트, 탄산칼슘+시멘트의 공시체를 양생기간에 따라 광물의 함유량의 변화를 분석하고자 하였으나, EDX 분석결과에서는 각각의 공시체가 양생기간에 따라 광물의 함유량 변화가 어떠한 경향을 보이지 않아 확인할 수 없었다. 하지만 탄산칼슘, 시멘트, 탄산칼슘+시멘트의 공시체에 칼슘의 함유량과 강도 관계에서는 미미한 상관성을 갖고 있는 것으로 판단되며, 차후에 보다 정밀한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

표 4.26 4% 공시체 3일 양생 후 EDX 분석 결과

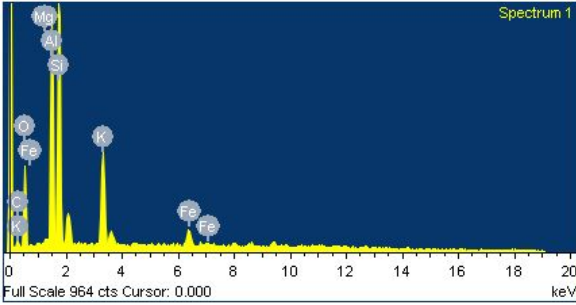
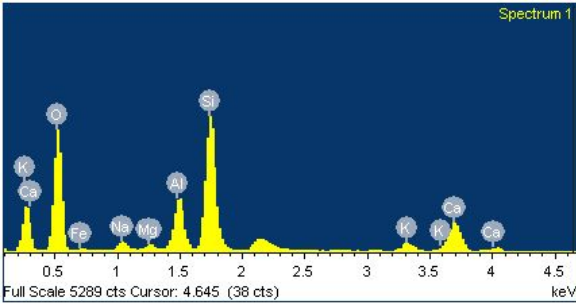
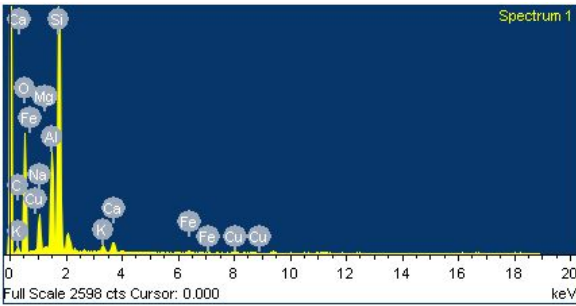
탄산칼슘		<table border="1"> <thead> <tr> <th>광물</th> <th>함유량(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>10.01</td></tr> <tr><td>O</td><td>37.50</td></tr> <tr><td>Mg</td><td>0.52</td></tr> <tr><td>Al</td><td>15.83</td></tr> <tr><td>Si</td><td>21.38</td></tr> <tr><td>K</td><td>10.23</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>4.52</td></tr> <tr><td>합</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	광물	함유량(%)	C	10.01	O	37.50	Mg	0.52	Al	15.83	Si	21.38	K	10.23	Fe	4.52	합	100.00						
광물	함유량(%)																									
C	10.01																									
O	37.50																									
Mg	0.52																									
Al	15.83																									
Si	21.38																									
K	10.23																									
Fe	4.52																									
합	100.00																									
시멘트		<table border="1"> <thead> <tr> <th>광물</th> <th>함유량(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>O</td><td>53.58</td></tr> <tr><td>Na</td><td>1.73</td></tr> <tr><td>Mg</td><td>0.77</td></tr> <tr><td>Al</td><td>7.31</td></tr> <tr><td>Si</td><td>21.49</td></tr> <tr><td>K</td><td>2.21</td></tr> <tr><td>Ca</td><td>9.17</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>3.73</td></tr> <tr><td>합</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	광물	함유량(%)	O	53.58	Na	1.73	Mg	0.77	Al	7.31	Si	21.49	K	2.21	Ca	9.17	Fe	3.73	합	100.00				
광물	함유량(%)																									
O	53.58																									
Na	1.73																									
Mg	0.77																									
Al	7.31																									
Si	21.49																									
K	2.21																									
Ca	9.17																									
Fe	3.73																									
합	100.00																									
탄산칼슘 +시멘트		<table border="1"> <thead> <tr> <th>광물</th> <th>함유량(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>12.30</td></tr> <tr><td>O</td><td>47.02</td></tr> <tr><td>Na</td><td>4.98</td></tr> <tr><td>Mg</td><td>0.35</td></tr> <tr><td>Al</td><td>8.65</td></tr> <tr><td>Si</td><td>23.06</td></tr> <tr><td>K</td><td>0.82</td></tr> <tr><td>Ca</td><td>1.37</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>0.57</td></tr> <tr><td>Cu</td><td>0.88</td></tr> <tr><td>합</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	광물	함유량(%)	C	12.30	O	47.02	Na	4.98	Mg	0.35	Al	8.65	Si	23.06	K	0.82	Ca	1.37	Fe	0.57	Cu	0.88	합	100.00
광물	함유량(%)																									
C	12.30																									
O	47.02																									
Na	4.98																									
Mg	0.35																									
Al	8.65																									
Si	23.06																									
K	0.82																									
Ca	1.37																									
Fe	0.57																									
Cu	0.88																									
합	100.00																									

표 4.27 4% 공시체 7일 양생 후 EDX 분석 결과

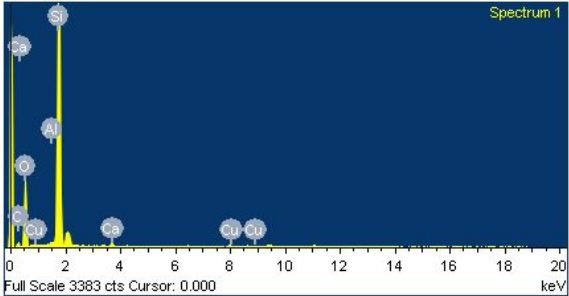
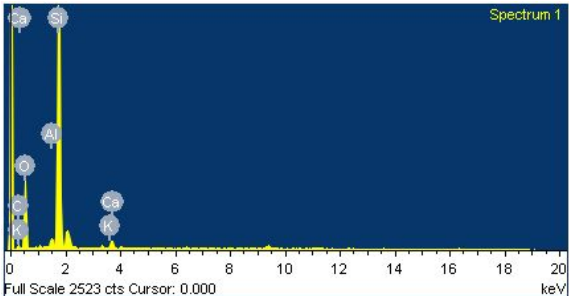
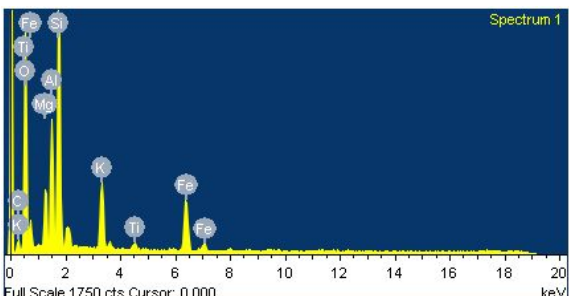
탄산칼슘	 <p>Spectrum 1 Full Scale 3383 cts Cursor: 0.000 keV</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>광물</th> <th>함유량(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td>10.19</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>49.08</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>0.52</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>38.64</td> </tr> <tr> <td>Ca</td> <td>0.70</td> </tr> <tr> <td>Cu</td> <td>0.87</td> </tr> <tr> <td>합</td> <td>100.00</td> </tr> </tbody> </table>	광물	함유량(%)	C	10.19	O	49.08	Al	0.52	Si	38.64	Ca	0.70	Cu	0.87	합	100.00				
광물	함유량(%)																					
C	10.19																					
O	49.08																					
Al	0.52																					
Si	38.64																					
Ca	0.70																					
Cu	0.87																					
합	100.00																					
시멘트	 <p>Spectrum 1 Full Scale 2523 cts Cursor: 0.000 keV</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>광물</th> <th>함유량(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td>12.69</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>48.70</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>1.22</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>35.15</td> </tr> <tr> <td>K</td> <td>0.54</td> </tr> <tr> <td>Ca</td> <td>1.69</td> </tr> <tr> <td>합</td> <td>100.00</td> </tr> </tbody> </table>	광물	함유량(%)	C	12.69	O	48.70	Al	1.22	Si	35.15	K	0.54	Ca	1.69	합	100.00				
광물	함유량(%)																					
C	12.69																					
O	48.70																					
Al	1.22																					
Si	35.15																					
K	0.54																					
Ca	1.69																					
합	100.00																					
탄산칼슘 + 시멘트	 <p>Spectrum 1 Full Scale 1750 cts Cursor: 0.000 keV</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>광물</th> <th>함유량(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td>5.26</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>51.09</td> </tr> <tr> <td>Mg</td> <td>4.58</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>8.09</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>14.96</td> </tr> <tr> <td>K</td> <td>5.12</td> </tr> <tr> <td>Ti</td> <td>0.71</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>10.20</td> </tr> <tr> <td>합</td> <td>100.00</td> </tr> </tbody> </table>	광물	함유량(%)	C	5.26	O	51.09	Mg	4.58	Al	8.09	Si	14.96	K	5.12	Ti	0.71	Fe	10.20	합	100.00
광물	함유량(%)																					
C	5.26																					
O	51.09																					
Mg	4.58																					
Al	8.09																					
Si	14.96																					
K	5.12																					
Ti	0.71																					
Fe	10.20																					
합	100.00																					

표 4.28 4% 공시체 14일 양생 후 EDX 분석 결과

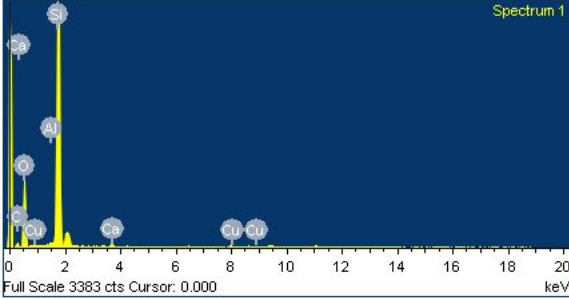
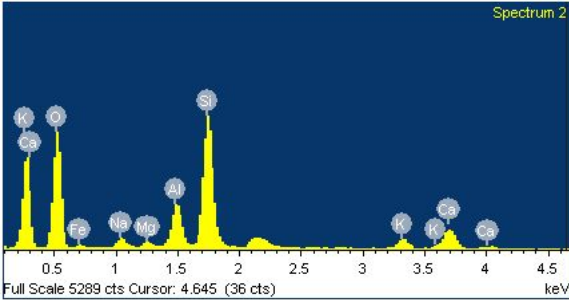
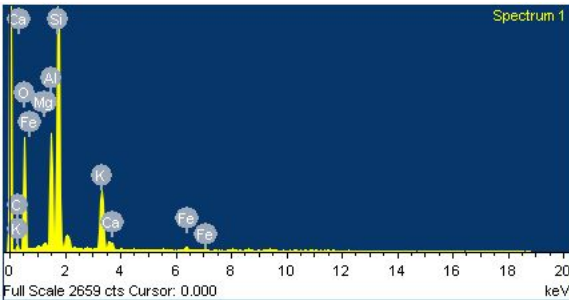
탄산칼슘	 <p>Full Scale 3383 cts Cursor: 0.000 keV</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>광물</th> <th>함유량(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>O</td><td>41.41</td></tr> <tr><td>Mg</td><td>4.69</td></tr> <tr><td>Al</td><td>9.06</td></tr> <tr><td>Si</td><td>18.84</td></tr> <tr><td>K</td><td>5.89</td></tr> <tr><td>Ca</td><td>1.27</td></tr> <tr><td>Ti</td><td>0.76</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>16.29</td></tr> <tr><td>Cu</td><td>1.80</td></tr> <tr><td>합</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	광물	함유량(%)	C	0.00	O	41.41	Mg	4.69	Al	9.06	Si	18.84	K	5.89	Ca	1.27	Ti	0.76	Fe	16.29	Cu	1.80	합	100.00
광물	함유량(%)																									
C	0.00																									
O	41.41																									
Mg	4.69																									
Al	9.06																									
Si	18.84																									
K	5.89																									
Ca	1.27																									
Ti	0.76																									
Fe	16.29																									
Cu	1.80																									
합	100.00																									
시멘트	 <p>Full Scale 5289 cts Cursor: 4.645 (36 cts) keV</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>광물</th> <th>함유량(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>O</td><td>54.28</td></tr> <tr><td>Na</td><td>2.01</td></tr> <tr><td>Mg</td><td>0.88</td></tr> <tr><td>Al</td><td>6.80</td></tr> <tr><td>Si</td><td>22.99</td></tr> <tr><td>K</td><td>2.88</td></tr> <tr><td>Ca</td><td>6.88</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>3.27</td></tr> <tr><td>합</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	광물	함유량(%)	O	54.28	Na	2.01	Mg	0.88	Al	6.80	Si	22.99	K	2.88	Ca	6.88	Fe	3.27	합	100.00				
광물	함유량(%)																									
O	54.28																									
Na	2.01																									
Mg	0.88																									
Al	6.80																									
Si	22.99																									
K	2.88																									
Ca	6.88																									
Fe	3.27																									
합	100.00																									
탄산칼슘 + 시멘트	 <p>Full Scale 2659 cts Cursor: 0.000 keV</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>광물</th> <th>함유량(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>10.65</td></tr> <tr><td>O</td><td>47.68</td></tr> <tr><td>Mg</td><td>0.43</td></tr> <tr><td>Al</td><td>9.59</td></tr> <tr><td>Si</td><td>22.31</td></tr> <tr><td>K</td><td>7.92</td></tr> <tr><td>Ca</td><td>0.73</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>0.70</td></tr> <tr><td>합</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	광물	함유량(%)	C	10.65	O	47.68	Mg	0.43	Al	9.59	Si	22.31	K	7.92	Ca	0.73	Fe	0.70	합	100.00				
광물	함유량(%)																									
C	10.65																									
O	47.68																									
Mg	0.43																									
Al	9.59																									
Si	22.31																									
K	7.92																									
Ca	0.73																									
Fe	0.70																									
합	100.00																									

표 4.29 4% 공시체 21일 양생 후 EDX 분석 결과

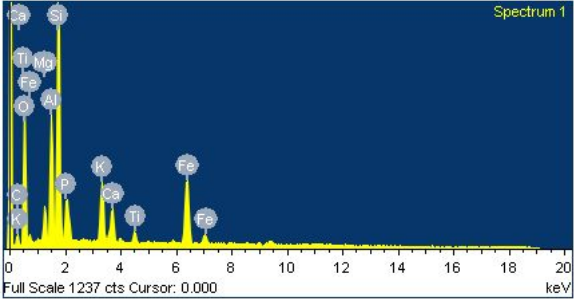
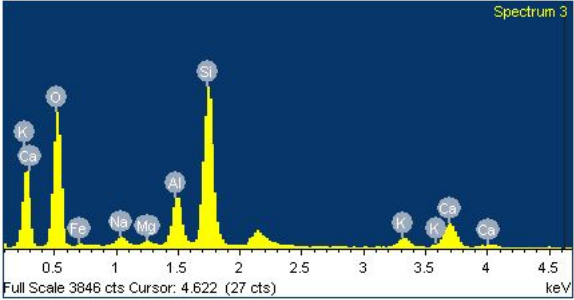
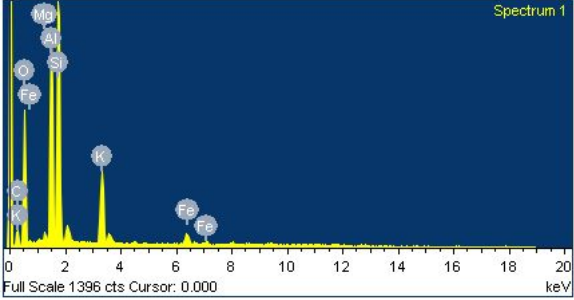
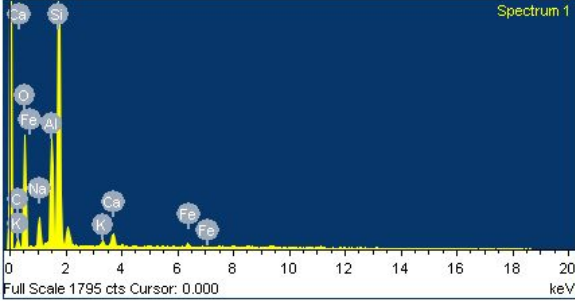
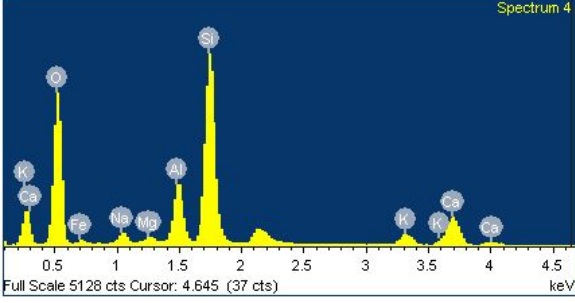
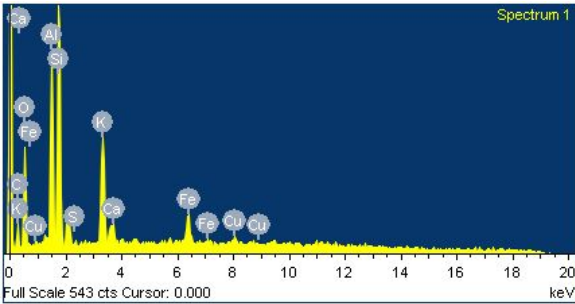
탄산칼슘		<table border="1"> <thead> <tr> <th>광물</th> <th>함유량(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>6.08</td></tr> <tr><td>O</td><td>42.79</td></tr> <tr><td>Mg</td><td>2.78</td></tr> <tr><td>Al</td><td>8.07</td></tr> <tr><td>Si</td><td>15.75</td></tr> <tr><td>P</td><td>2.23</td></tr> <tr><td>K</td><td>5.24</td></tr> <tr><td>Ca</td><td>2.71</td></tr> <tr><td>Ti</td><td>1.19</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>13.18</td></tr> <tr><td>합</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	광물	함유량(%)	C	6.08	O	42.79	Mg	2.78	Al	8.07	Si	15.75	P	2.23	K	5.24	Ca	2.71	Ti	1.19	Fe	13.18	합	100.00
광물	함유량(%)																									
C	6.08																									
O	42.79																									
Mg	2.78																									
Al	8.07																									
Si	15.75																									
P	2.23																									
K	5.24																									
Ca	2.71																									
Ti	1.19																									
Fe	13.18																									
합	100.00																									
시멘트		<table border="1"> <thead> <tr> <th>광물</th> <th>함유량(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>O</td><td>53.94</td></tr> <tr><td>Na</td><td>1.69</td></tr> <tr><td>Mg</td><td>0.76</td></tr> <tr><td>Al</td><td>6.53</td></tr> <tr><td>Si</td><td>23.87</td></tr> <tr><td>K</td><td>2.37</td></tr> <tr><td>Ca</td><td>7.40</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>3.44</td></tr> <tr><td>합</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	광물	함유량(%)	O	53.94	Na	1.69	Mg	0.76	Al	6.53	Si	23.87	K	2.37	Ca	7.40	Fe	3.44	합	100.00				
광물	함유량(%)																									
O	53.94																									
Na	1.69																									
Mg	0.76																									
Al	6.53																									
Si	23.87																									
K	2.37																									
Ca	7.40																									
Fe	3.44																									
합	100.00																									
탄산칼슘 +시멘트		<table border="1"> <thead> <tr> <th>광물</th> <th>함유량(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>15.02</td></tr> <tr><td>O</td><td>45.02</td></tr> <tr><td>Mg</td><td>0.49</td></tr> <tr><td>Al</td><td>12.84</td></tr> <tr><td>Si</td><td>17.43</td></tr> <tr><td>K</td><td>6.69</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>2.51</td></tr> <tr><td>합</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	광물	함유량(%)	C	15.02	O	45.02	Mg	0.49	Al	12.84	Si	17.43	K	6.69	Fe	2.51	합	100.00						
광물	함유량(%)																									
C	15.02																									
O	45.02																									
Mg	0.49																									
Al	12.84																									
Si	17.43																									
K	6.69																									
Fe	2.51																									
합	100.00																									

표 4.30 4% 공시체 28일 양생 후 EDX 분석 결과

탄산칼슘		<table border="1"> <thead> <tr> <th>광물</th> <th>함유량(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>12.99</td></tr> <tr><td>O</td><td>46.16</td></tr> <tr><td>Na</td><td>4.25</td></tr> <tr><td>Al</td><td>9.62</td></tr> <tr><td>Si</td><td>23.56</td></tr> <tr><td>K</td><td>0.68</td></tr> <tr><td>Ca</td><td>1.84</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>0.89</td></tr> <tr><td>합</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	광물	함유량(%)	C	12.99	O	46.16	Na	4.25	Al	9.62	Si	23.56	K	0.68	Ca	1.84	Fe	0.89	합	100.00		
광물	함유량(%)																							
C	12.99																							
O	46.16																							
Na	4.25																							
Al	9.62																							
Si	23.56																							
K	0.68																							
Ca	1.84																							
Fe	0.89																							
합	100.00																							
시멘트		<table border="1"> <thead> <tr> <th>광물</th> <th>함유량(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>O</td><td>53.52</td></tr> <tr><td>Na</td><td>1.87</td></tr> <tr><td>Mg</td><td>0.62</td></tr> <tr><td>Al</td><td>6.86</td></tr> <tr><td>Si</td><td>24.39</td></tr> <tr><td>K</td><td>2.52</td></tr> <tr><td>Ca</td><td>7.34</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>2.89</td></tr> <tr><td>합</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	광물	함유량(%)	O	53.52	Na	1.87	Mg	0.62	Al	6.86	Si	24.39	K	2.52	Ca	7.34	Fe	2.89	합	100.00		
광물	함유량(%)																							
O	53.52																							
Na	1.87																							
Mg	0.62																							
Al	6.86																							
Si	24.39																							
K	2.52																							
Ca	7.34																							
Fe	2.89																							
합	100.00																							
탄산칼슘 +시멘트		<table border="1"> <thead> <tr> <th>광물</th> <th>함유량(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>19.72</td></tr> <tr><td>O</td><td>34.96</td></tr> <tr><td>Al</td><td>10.49</td></tr> <tr><td>Si</td><td>15.12</td></tr> <tr><td>S</td><td>0.51</td></tr> <tr><td>K</td><td>9.24</td></tr> <tr><td>Ca</td><td>1.31</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>6.01</td></tr> <tr><td>Cu</td><td>2.62</td></tr> <tr><td>합</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	광물	함유량(%)	C	19.72	O	34.96	Al	10.49	Si	15.12	S	0.51	K	9.24	Ca	1.31	Fe	6.01	Cu	2.62	합	100.00
광물	함유량(%)																							
C	19.72																							
O	34.96																							
Al	10.49																							
Si	15.12																							
S	0.51																							
K	9.24																							
Ca	1.31																							
Fe	6.01																							
Cu	2.62																							
합	100.00																							

4.4 X-회절 분석(XRD)

본 실험에서는 탄산칼슘, 시멘트, 탄산칼슘+시멘트 시료가 양생일에 따른 성분을 조사 및 분석하기 위하여 X-회절 분석을 수행하였다. 시험 방법은 중량비 4%의 탄산칼슘, 시멘트, 탄산칼슘+시멘트 공시체를 3일, 7일, 14일, 21일, 28일 양생시킨 시료에 대해 XRD 분석을 실시하였다.

그림 4.56은 탄산칼슘 4%공시체 중에서 대표적으로 14일 양생 후 시료를 XRD 분석한 그래프이다. 탄산칼슘 4% 공시체에서 여러 가지 광물이 발견 되었다. 모래에 가장 많은 구성 성분인 SiO_2 (이산화규소)와 $CaCO_3$ (탄산칼슘)이 증점적으로 확인되었으며 이는 Score를 통해 확인 할 수 있었다.

XRD 분석결과, SiO_2 (이산화규소)와 $CaCO_3$ (탄산칼슘)의 광물의 형성을 X선 분석을 통해 알 수 있었으며, 시간에 따른 강도의 증가가 탄산칼슘 양생을 통한 강도 증가 효과임을 알 수 있었다.

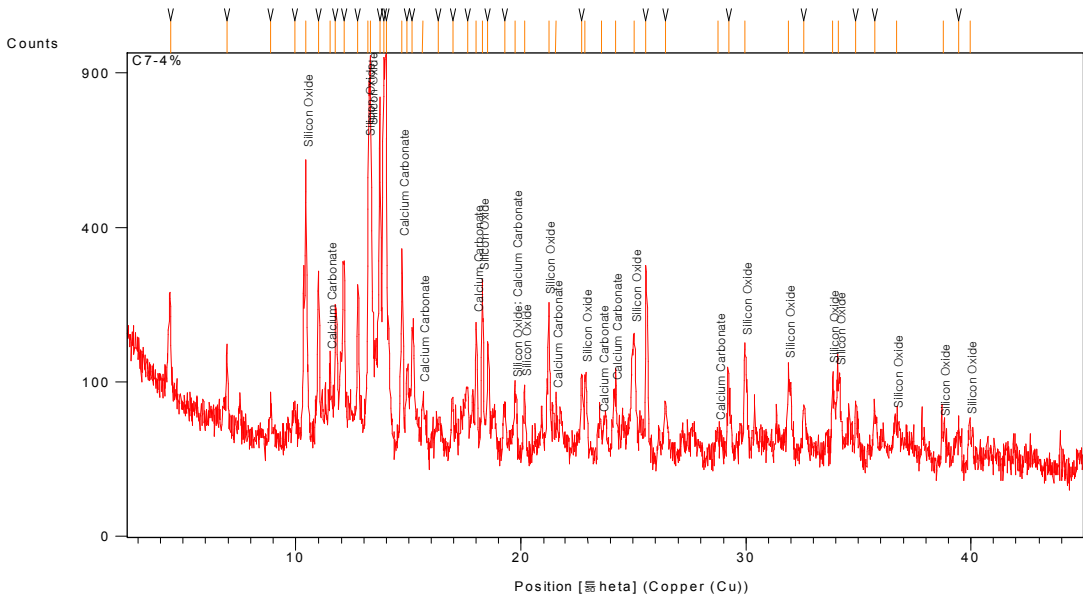


그림 4.56 탄산칼슘 4% 공시체 14일 양생 후 시료 XRD 분석

표 4.31 탄산칼슘 공시체 XRD 분석 결과

공시체	화학식	Scale Factor	Score
C3-4%	SiO_2	0.308	54
	$CaCO_3$	0.124	12
C7-4%	SiO_2	0.326	63
	$CaCO_3$	0.286	34
C14-4%	SiO_2	0.352	70
	$CaCO_3$	0.354	12
C21-4%	SiO_2	0.404	80
	$CaCO_3$	0.450	10
C28-4%	SiO_2	0.411	78
	$CaCO_3$	0.556	12

그림 4.57은 시멘트 4%공시체 중에서 대표적으로 14일 양생 후 시료를 XRD 분석한 그래프이다. 먼저 SiO_2 (이산화규소)는 흙 속에 존재하는 물질과 Al_2O_3 (산화알루미늄)은 시멘트에서 가장 많이 들어있는 광물임을 확인 할 수 있었다. 시간에 따른 강도의 증가가 시멘트의 양생을 통한 강도 증가임을 확일 할 수 있었다.

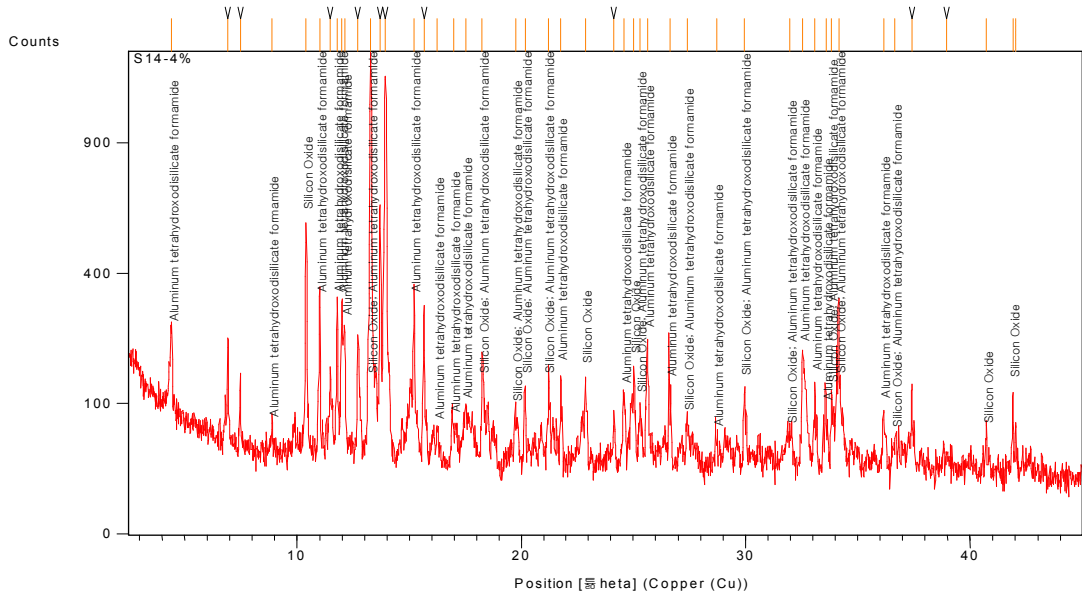


그림 4.57 시멘트 4% 공시체 14일 양생 후 시료 XRD 분석

표 4.32 시멘트 공시체 XRD 분석 결과

공시체	화학식	Scale Factor	Score
S3-4%	SiO_2	0.773	72
	Al_2O_3	0.097	22
S7-4%	SiO_2	1.024	65
	Al_2O_3	0.271	21
S14-4%	SiO_2	1.530	61
	Al_2O_3	0.278	11
S21-4%	SiO_2	2.635	72
	Al_2O_3	0.301	17
S28-4%	SiO_2	2.523	61
	Al_2O_3	0.329	7

표 4.33 탄산칼슘 + 시멘트 공시체 XRD 분석 결과

공시체	화학식	Scale Factor	Score
CS3-4%	SiO_2	0.962	73
	Al_2O_3	0.052	26
	$CaCO_3$	0.152	11
CS7-4%	SiO_2	0.995	79
	Al_2O_3	0.062	10
	$CaCO_3$	0.152	16
CS14-4%	SiO_2	0.999	67
	Al_2O_3	0.077	12
	$CaCO_3$	0.162	10
CS21-4%	SiO_2	1.010	50
	Al_2O_3	0.084	19
	$CaCO_3$	0.172	8
CS28-4%	SiO_2	1.100	72
	Al_2O_3	0.089	21
	$CaCO_3$	0.175	11

4.5 열중량분석(TGA) 분석 결과

열중량 분석법을 이용하여 미생물 반응으로 생성된 탄산칼슘의 양을 정량적으로 평가하였다. 열중량 측정온도 구간은 20~1,000℃의 범위로 설정하였으며, 온도를 10℃/min의 속도로 올리면서 열중량이 감소하는 것을 측정하였다. 탄산칼슘은 650~700℃의 온도에서 탈탄(decarburization)이 발생하여 열분해가 일어나게 된다. 탄산칼슘 4%의 공시체 열중량 분석결과 탄산칼슘 상대중량은 양생일이 증가함에 따라 탄산칼슘 상대중량이 미미하게 증가하였다. 시멘트 공시체의 탄산칼슘 상대중량은 양생일이 증

가함에 따라 탄산칼슘 공시체보다 더 미미하게 증가하였으며, 탄산칼슘+시멘트의 공시체에서는 양생일이 증가함에 따라 탄산칼슘의 상대중량 경향을 판단할 수가 없었다.

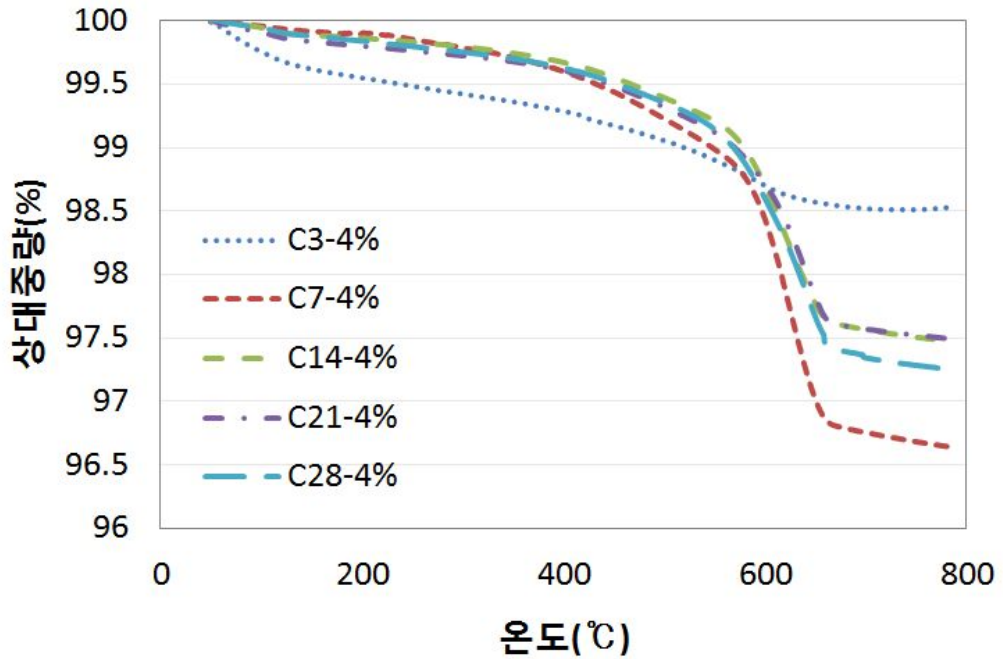


그림 4.59 탄산칼슘 4% 공시체 TGA 분석 결과

표 4.34 탄산칼슘 4% 공시체 TGA 분석 결과

공시체	C3-4%	C7-4%	C14-4%	C21-4%	C28-4%
상대중량 (%)	0.06	0.33	0.27	0.29	0.38

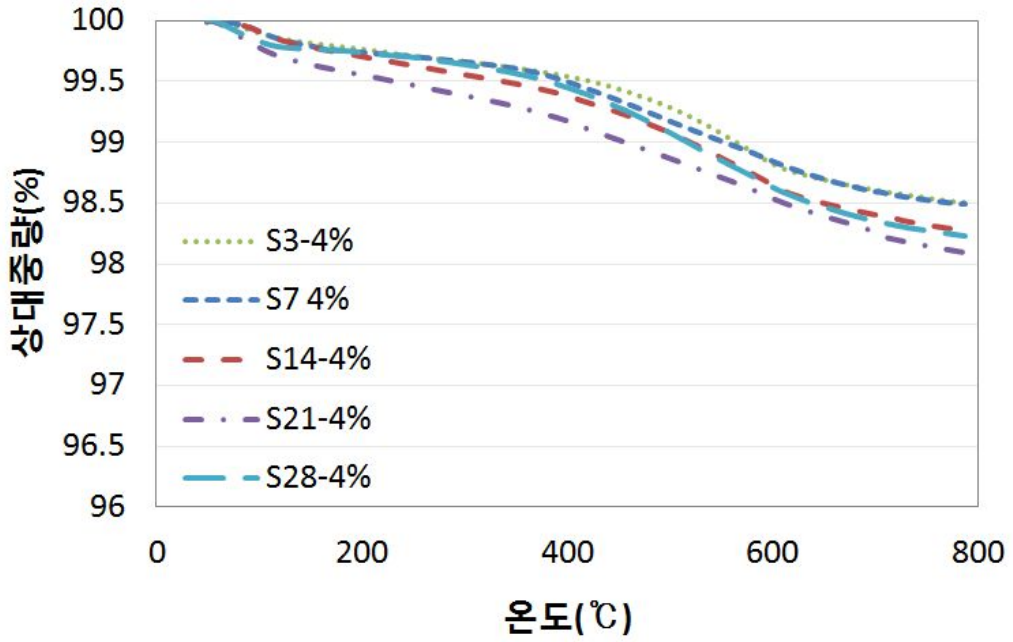


그림 4.60 공시체에 시멘트 4% 배합실험 TGA 분석 결과

표 4.35 시멘트 4% 공시체 TGA 분석 결과

공시체	S3-4%	S7-4%	S14-4%	S21-4%	S28-4%
상대중량 (%)	0.15	0.17	0.18	0.25	0.19

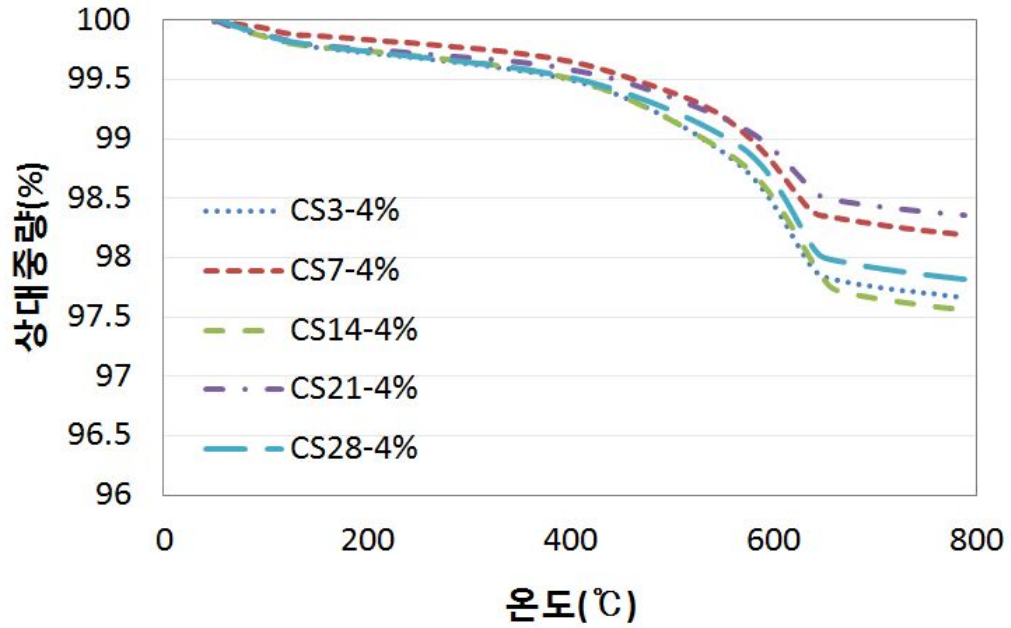


그림 4.61 탄산칼슘+시멘트 4% 공시체 TGA 분석 결과

표 4.36 탄산칼슘+시멘트 4% 공시체 TGA 분석 결과

공시체	CS3-4%	CS7-4%	CS14-4%	CS21-4%	CS28-4%
상대중량 (%)	0.14	0.12	0.22	0.12	0.14

제 5 장 결론

본 연구는 모래시료에 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 첨가하여 생성된 탄산칼슘의 강도 개선효과를 살피고자 하였다. 고결제(탄산칼슘, 시멘트)의 중량비 2%, 4%, 6%, 8%로 공시체를 제작하여 양생일 3일, 7일, 14일, 21일, 28일에 따른 강도를 일축압축시험으로 측정하였으며, 전자현미경(SEM), EDX분석 및 X-회절(XRD)분석과 열중량(TGA)분석을 통해 탄산칼슘 및 탄산칼슘+시멘트의 중량비 4%에 따른 성분 변화를 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 중량비에 따라 탄산칼슘 공시체를 3일, 7일, 14일, 21일, 28일 양생 후 강도를 측정한 결과 84.57~378.86kPa의 일축압축강도를 측정하였다. 미생물 반응으로 생성된 탄산칼슘은 양생일의 증가 할수록 초기양생 대비 약 1.5배의 강도가 증진하였으며, 공시체 내 탄산칼슘의 양이 증가할수록 강도가 증가한 것으로 나타났다. 미생물에 의해 생성된 탄산칼슘을 느슨한 사질토 지반에 적용 시 연약지반 개량효과가 있음을 확인하였다.
2. 중량비에 따라 시멘트 공시체를 3일, 7일, 14일, 21일, 28일 양생 후 강도를 측정한 결과 128.45~1,206.69kPa로 나타났으며, 분석결과 시멘트의 양과 양생일이 증가할수록 수화작용에 의해 사질토 지반의 강도가 증가하는 것을 확인하였다.
3. 중량비에 따라 탄산칼슘+시멘트 공시체를 3일, 7일, 21일, 28일 양생 후 강도를 측정한 결과 128.45~654.27kPa의 일축압축강도를 측정하였다. 미생물 반응으로 생성된 탄산칼슘과 시멘트의 1:1 배합을 통해 비록 중량비 2~4%의 공시체 에서는 탄산칼슘의 공시체보다 낮은 강도가 나타났으나, 중량비 6~8% 적용시에는 탄산칼슘 공시체의 강도보다 높음을 확인하였다. 추후 미생물에 의해 생성된 탄산칼슘과 시멘트의 배합에 대한 연구를 통한 탄산칼슘+시멘트는 연약지반 강도 증진에 효과가 있을 것으로 판단된다.

탄산칼슘, 시멘트, 탄산칼슘+시멘트 공시체 모두 중량비가 증가할수록, 양생일이 증가할수록 공시체의 사질토 지반의 강도증진에 효과가 있는 것으로 판단되며, 중량비 2%에서는 탄산칼슘+시멘트보다 탄산칼슘이 강도 발현효과가 높았으나, 중량비 4~6%에서는 탄산칼슘+시멘트가 탄산칼슘보다 사질토 지반의 강도 발현효과가 보다 높은 것

으로 나타났다. 이는 중량비가 증가할수록 공시체 내의 시멘트의 첨가량이 증가로 조 기강도 및 수화작용에 의한 강도 증진이 높은 시멘트의 영향인 것으로 판단된다. 또한 추가적인 연구를 통해 미생물에 의해 생성된 탄산칼슘과 시멘트를 적절히 배합한다면 탄산칼슘+시멘트가 보다 높은 강도 발현 효과가 있을 것으로 기대되며, 이로 인해 이산화탄소 배출량 및 석회채취의 절감 등 환경비용의 절감을 할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김대현, 김호철, 박경호(2010), “Bacteria를 이용한 연약한 흙의 고결화 가능성”, 2010 한국지반공학회 가을 학술발표회 발표논문, pp. 379~391.
2. 김대현, 김호철, 박경호(2011), “미생물을 이용한 연약지반 고결화 방법”, *CERTIFICATE OF PATENT*, 10-1030761, pp. 1~47.
3. 김대현, 박경호(2011), “미생물을 이용한 탄산칼슘 생성과 흙의 고결화”, 2011 한국지반공학회 봄 학술발표회 발표논문, pp. 661~671.
4. 김대현, 박경호, 김호철, 이용희(2012), “미생물 처리 방법이 바이오그라우트에 미치는 영향”, 한국지반환경공학회논문집, 제13권, 5호, pp. 51~57.
5. 김대현, 이강일, 박경호, 전상주(2013), “바이오그라우팅을 이용한 연약지반 강도 평가”, 지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp. 371~376.
6. 김호철(2011), 미생물을 이용한 흙의 고결화 특성, 석사학위논문, 조선대학교
7. 박경호(2011), 미생물 반응에 의한 연약지반의 강도 개선, 석사학위논문, 조선대학교
8. 박경호, 김대현(2012), “Bacteria를 이용한 실트와 모래의 고결화에 따른 탄산칼슘 확인”, 한국지반공학회논문집, 제28권, 6호, pp. 53~61.
9. 박경호, 김대현(2013), “Bacteria에 의해 생성된 탄산칼슘의 연약지반 강도 및 주입 평가”, 한국지반공학회, 제29권, 2호, pp. 65~73
10. 박성식, 최선규, 남인현(2012), “식물추출액을 이용한 지반 고결제 개발”, 한국지반공학회논문집, 제28권, 3호, pp. 67~75.
11. 박성식, 김화중, 이준철(2011), “미생물에 의해 생성된 광물질이 고결모래의 강도에 미치는 영향”, 한국지반공학회, 제27권, 5호, pp 75~84
12. 백태선, “주사전자현미경(SEM)”, 2003. 9
13. 사단법인 한국지반공학회 (2005), “지반공학시리즈 6, 연약지반”, Chapter 1, pp. 2~3.
14. 사단법인 한국지반공학회 (2005), “지반공학시리즈 6, 연약지반”, Chapter 5, pp. 192~201.
15. 오종신(2008), 미생물 고결토의 공학적 특성 연구, 석사학위논문, 전남대학교
16. 윤준도, 주사전자현미경 분석과 X선 미세분석, 청문각, 2005
17. 일반미생물학 7판, 라이프사이언스
18. 장일한(2013), “베타글루칸 계열 바이오폴리머를 이용한 흙의 강도 증진”, 한국지반

- 공학회 가을학술발표회 논문집, pp. 379~391.
19. 조민재(2012), 환원슬래그 혼합점토의 일축압축강도 특성, 석사학위논문, 인하대학교
 20. Bachmeier, K. L., Williams, A. E., Warmington, J. R., and bang, S. S. (2002). "Urease Activity in Microbiologically Induced Calcite Precipitation" *Journal of Biotechnology*, Vol. 93, pp. 171~181.
 21. Daehyeon Kim, Kyungho Park(2012), "Applicability of Microbial Cementation in the Soil, JS-Seoul 2012, November 2-3, pp.45~48
 22. Daehyeon Kim, Kyungho Park(2013), "Injection Effect of Bio-Grout for Soft Ground", American Scientific Publishers, Vol. 19, pp. 468~472
 23. Dejong, J. T., Fritzges, M. B., and Nüsslein, K. (2006). "Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 1381~1392.
 24. Dejong. J. T., Brina M. Mortensen., Brian C. Martinez., and Douglas C. nelson. (2010). "Bio-mediated Soil Improvement", *Ecological Engineering*, Vol. 36, pp. 197~210.
 25. Ferris, F. G., Stehmeier, L. G., Kantzas, A., and Mourits, F. M. (1996). "Bacteriogenic Mineral Plugging" *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 35, pp. 56~61.
 26. Janssen, P. H. (2006). "Identifying the Dominant Soil Bacterial Taxa in Libraries of 16S rRNA Genes" *American Society for Microbiology*, Vol. 72, pp. 1719~1728.
 27. Karol, R. H. (2003). *Chemical Grouting and Soil Stabilization*, Marcel Dekker, Inc., New York
 28. Khachatoorian, R., Petrisor, I. B., Kwan, C.C., and Yen, T. F. (2003). "Biopolymer Plugging Effect" *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 38, pp. 13~21.
 29. L.A. van Paassen., M.P. Harkes., G.A van Zwieten., W.H. van der Zon., W.R.L. van der Star., and M.C.M. van Loosdrecht., (2009). "Scale Up of Biogrout", *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 2328~2333.
 30. L.A. van Paassen., M.C.M. van Loosdrecht., M. Pieron, A. Mulder., D.J.M. Ngan-Tillard.,

- and T.J.M. van der Linden., (2010). "Strength and Deformation of Biologically Cemented Sandstone", *Rock Engineering in Difficult Ground Conditions*, pp. 405~410.
31. 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.
 32. Mueller, R. F. (1996). "Bacterial Transport and Colonization in Low Nutrient Environments", *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 30), pp. 2681~2690.
 33. Michell, J. K., and santamarina, J. C. (2005). "Biological Considerations in Geotechnical Engineering" *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, pp. 1222~1233.
 24. Nelson, S. J., and Launt, P. D. (1991). "Stripper Well Production Increased with MEOR Treatment" *Oil & Gas Journal*, Vol. 89, pp. 114~118.
 25. Ramakrishnan, V., Bang, S. S., and Deo, K. S. (1998). "A Novel Technique for Repairing Cracks in High Performance Concrete using Bacteria", *Proc. International Conference on High Performance High Strength Concrete*, Perth, Australia, pp. 597~618.
 36. Ramakrishnam, V. Ramesh, K. P. and Bang, S. S. (2001), "Bacterial Concrete" *Proc. of SPIE-Int. Society of Optical Engineering*, pp. 168~176.
 37. 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.
 38. V. Achal, A., Mukherjee, P.C., Basu, M. and Sudhakara Reddy, (2009). "Strain Improvement of *Sporosarcina Pasteurii* for Enhanced Urease and Calcite Production", *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, pp. 981~988.
 39. Victoria S. Whiffin., Leon A. van Paassen., and Marien P. Harkes., (2007). "Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique", *Geomicrobiology Journal*, pp. 1~7.

감사의 글

논문을 마무리하면서 이제 이렇게 “감사의 글”을 적으려 하니 맨 처음 대학원에 입학했던 순간들부터 지금 논문을 마무리하는 지금까지의 모든 일들이 머릿속을 스쳐 지나가며, 많은 생각을 하게 되고 많은걸 느끼게 됩니다. 제가 대학원에 진학하지 않았더라면 미처 몰랐던 수많은 전공지식을 배우고, 이러한 지식들을 온전히 내 것으로 가져가게 됨은 물론 사람들이 얽혀 사는 사회, 실험실 식구들의 사랑과 관심 등 많은 것을 얻어가게 되는 것 같습니다. 제가 석사학위를 수여받으면서 지켜봐 주었던 모든 이들에게 감사의 마음을 작게나마 이렇게 적어보려 합니다.

먼저 석사 생활동안 뭐든지 부족하고, 미숙한 제자에게 항상 한결같은 관심과 사랑, 배려를 해주시는 지도교수님이신 김대현 교수님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 교수님의 애정 어린 지도가 없었더라면 저의 석사 학위논문은 결코 완성 되지 못했을 것입니다. 늘 불안한 미래를 걱정하는 저에게 여러 가지 새로운 방향을 제시해 주시며, 한층 깊은 생각을 할 수 있게 조언해주시고, 늘 모든 일에 계획을 세우고 실행할 수 있게 이끌어 주신 점 다시 한 번 감사드립니다. 제가 졸업을 하고 꿈을 이루어가며 힘이 드는 그 순간 순간마다 교수님이 저에게 일러주셨던 말씀들을 다시 곱씹어가며 꿈을 실현 시켜 나아가는 그런 사람이 되겠습니다.

그리고 대학원 생활을 하는데 있어서 많은 것을 아낌없이 조언해 주셨던 교수님들에게도 감사의 말씀을 전합니다. 찾아볼 때 마다 싫은 내색 없이 항상 웃음으로 저를 반겨주시고 편의를 봐주셨던 박길현 교수님, 전공지식에 관하여 모르는 게 있을 때 마다 찾아가서 물어볼 때 언제나 친절하게 알려주셨던 김운중 교수님, 항상 저를 믿어주시고 전공지식에 대하여 심화된 지식으로 한 단계 더 성장하게 해주신 김성홍 교수님, 어려운 수업을 항상 쉽게 열정적으로 이해하기 쉽게 강의해주신 박정웅 교수님, 언제나 저에게 멋진 미소로 따뜻한 인사말을 해주셨던 이원희 교수님, 저에게 늘 큰 꿈을 가지고 그 꿈을 이루라던 박상준 교수님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

또 대학원 생활 동안에 많은 도움을 주셨던 겸임 교수님들께도 감사의 말씀을 드립니다. 토질실험실에 계시면서 저의 많은 고민을 귀 기울여 들어주시고 제 입장에서 한번 더 생각해주시면서 따뜻하게 조언해주셨던 김선학 교수님, 보다 넓은 시각으로 세상을 바라보는 방법을 알려주신 양승현 교수님, 늘 저에게 따뜻한 조언을 해주신 박상범 교

수님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

대학원 생활동안 동고동락하면서 의지가 되었던 선, 후배님들에게도 감사의 말씀을 전합니다. 토질연구실 후배들을 위해 바쁜 시간에도 항상 물심양면으로 도와주시고, 항상 후배의 입장에서 생각해주시며 발전되는 후배가 되도록 주옥같은 말씀해주셨던 멋진 김현태 선배님, 다른 직업을 가지고 열심히 일하시지만 같은 연구실에서 언제나 따뜻하게 후배를 챙겨주시는 훈남 허홍균 선배님, 바쁜 업무속에서도 언제나 웃으시면서 후배의 부족함을 채워주시는 임재춘 선배님, 바쁘시지만 언제나 후배를 챙겨주시는 김문채 선배님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 실험실 내에서 같이 지내며 많은 도움을 주신 경호형에게도 이 자리를 빌려 정말 감사의 말을 전합니다. 그리고 저에게 있어 친 형처럼 따뜻한 마음을 주시고, 다독여 주는 호철이형, 멀리 있어 바쁘겠지만 늘 신경써주시는 광기형, 미국에서도 언제나 응원해주는 영원한 사수 성우형, 항상 토질실험실에서 같이 지내며 늘 함께 붙어있고, 기쁜일, 슬픈일, 희노애락을 함께 해주었던 친 형보다 더 형 같이 대해주었던 사랑하는 대학원 동기 신규형, 묵묵히 언제나 후배를 챙겨주는 일훈이형, 힘들어하는 저에게 술 한잔하자며, 바쁜 시간 쪼개 술 한잔 기울이며 함께 고민한 대훈이형, 그리고 부족한 선배 때문에 고생도 많이 했지만 가장 많이 챙겨준 좋아하는 태광이, 항상 묵묵히 자기 일을 하며 신경써주는 홍욱이, 이번에 실험실에 함께 들어와 부족한 형한테 많은걸 배우겠다던 민우, 성삼이, 민석이, 태훈이에게도 이 자리를 빌려 정말 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

대학원 생활동안 많은 도움을 준 나리누나, 정환이형, 성윤이형, 승민이형에게 감사의 말을 전하며, 고생한다며 힘내라고 어깨라도 주물러 주던 지승이, 대운이, 나처럼 곧 대학원 졸업하는 병철이, 경면이, 인호까지 모두 감사합니다.

마지막으로 큰아들이 학문에 전념할 수 있도록 전적으로 믿어주시고, 자신의 꿈이 아닌 아들의 꿈을 위해 오늘도 곳은일 마다하지 않으시고, 고생하시는 부모님. 말로 표현할 수 없을 정도의 감사함을 드리며, 이 기쁨을 함께 나누고 싶습니다.

또한, 이 논문이 나오기까지 도움 주신 모든 분들께 다시 한 번 머리 숙여 감사의 말씀을 드리며, 꿈을 바라보는 사람이 아닌 꿈을 위해 실천하는 사람이 될 수 있도록 노력하겠습니다.

2013년 8월
전 상 주