



## 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](#) 

2011年 2月  
碩士學位論文

# 미생물을 이용한 흙의 고결화 특성

朝鮮大學校 大學院

土木工學科

金 浩 哲

# 미생물을 이용한 흙의 고결화 특성

Cementation characteristic of soil using Bacteria

2011年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

土木工學科

金 浩 哲

# 미생물을 이용한 흙의 고결화 특성

指導教授 金 大 賢

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함.

2010年 10月 日

朝鮮大學校 大學院

土木工學科

金 浩 哲

金浩哲 碩士學位 論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授 박길현 (印)

委員 朝鮮大學校 教授 김성홍 (印)

委員 朝鮮大學校 教授 김대현 (印)

2010年 11月 日

朝鮮大學校 大學院

# 목 차

제 1 장 서론.....	1
1.1 연구배경 및 목적.....	1
1.2 선행 연구.....	3
1.3 연구목적 및 방법.....	8
제 2 장 흙의 고결화 특성.....	9
2.1 흙의 고결화 개념.....	9
2.2 흙 속에서의 미생물.....	11
2.3 미생물을 이용한 흙의 고결화 특성.....	14
2.4 미생물을 이용한 흙의 고결화 시 고려해야 할 요인들.....	15
2.4.1 미생물 용액의 pH.....	15
2.4.2 흙 입자의 크기.....	15
2.4.3 흙의 종류.....	16
2.4.4 수분함량 및 온도.....	16
2.4.5 공극비.....	17
2.5 미생물과 요소의 반응.....	18
2.6 미생물을 이용한 탄산칼슘 생성.....	20
제 3 장 미생물 고결화 특성 규명을 위한 실내시험.....	22
3.1 개요.....	22
3.2 연구에 사용된 흙.....	24
3.3 염화칼슘.....	28
3.4 미생물 배양방법.....	30
3.4.1 일반농도 처리.....	30
3.4.2 고농도 처리.....	34
3.5 시험용기 및 시험시료 배합비.....	36
3.5.1 시험용기.....	36
3.5.2 모래의 상대밀도와 점토의 상대 다짐도.....	38
3.5.3 시험 시료 배합비.....	41

3.5.3.1 모래 시험 시료 배합비.....	41
3.5.3.2 실트 시험 시료 배합비.....	46
3.6 미생물 용액, 염화칼슘 첨가에 따른 반응 실험.....	50
3.6.1 미생물 용액, 염화칼슘 첨가에 따른 반응 실험.....	50
3.6.2 미생물 용액, 염화칼슘 용액을 흙에 섞는 방법.....	50
3.7 메커니즘 분석 방법 및 장비.....	53
3.7.1 전자 현미경의 원리 및 특징.....	53
3.7.1.1 전자 현미경의 원리.....	53
3.7.1.2 전자 현미경의 특징.....	53
3.7.2 X-회절 분석 시험.....	55
3.7.2.1 X-선의 발생 및 성질.....	55
3.7.2.2 X-선 회절 실험의 특징.....	55
 제 4 장 실험 결과 및 고찰.....	 57
4.1 미생물 반응을 통한 함수비의 차이.....	57
4.2 고결화 강도 측정 결과.....	59
4.2.1 미생물 용액, 염화칼슘 용액 반응 실험.....	59
4.2.2 미생물 반응을 통한 흙의 변화.....	60
4.2.3 포켓관입시험기 시험 결과.....	62
4.3 전자현미경 분석 결과.....	63
4.3.1 전자현미경 분석 결과.....	63
4.3.2 EDX 분석 결과.....	71
4.3.3 Mapping 분석 결과.....	78
4.4 X-회절 분석 결과.....	80
4.4.1 미생물 용액, 염화칼슘 용액 반응에 따른 X-회절 분석 결과.....	80
4.4.2 미생물 용액, 염화칼슘 용액을 흙에 각각 따로 섞었을 경우의 X-회절 결과.....	81
4.4.3 미생물 용액, 염화칼슘 용액을 미리 혼합한 후 흙에 섞었을 경우의 X-회절 분석 결과.....	88
 제 5 장 결론 .....	 91

# 그 림 목 차

그림 1.1 무처리 된 모래시료 및 일반농도로 처리된 모래시료의 반응 실험 비교..	5
그림 2.1 흙 입자간의 고결작용을 통한 흙 입자간의 공극 변화.....	10
그림 2.2 흙의 공극 통과를 위한 미생물 크기와 미생물의 통과 능력.....	11
그림 2.3 미생물과 탄산칼슘 반응을 통한 입자 크기 변화.....	13
그림 2.4 수분함량, 온도, 호흡속도와와의 관계.....	16
그림 2.5 요소 및 영양배지.....	19
그림 2.6 흙 입자와 탄산칼슘의 반응.....	21
그림 3.1 미생물 고결화 가능성을 위한 시험과정.....	23
그림 3.2 모래 시료의 입도분포곡선.....	26
그림 3.3 실트 시료의 입도분포곡선.....	26
그림 3.4 모래 시료의 다짐곡선.....	27
그림 3.5 실트 시료의 다짐곡선.....	27
그림 3.6 영화칼슘.....	29
그림 3.7 미생물 배양배지 만드는 방법.....	32
그림 3.8 계대배양방법.....	33
그림 3.9 원심분리기를 이용한 실험방법.....	35
그림 3.10 시험용기 입체모형도.....	37
그림 3.11 시험용기.....	37
그림 3.12 모래 시료 $r_{d(\min)}$ 산정 방법.....	42
그림 3.13 일반농도 처리 및 고농도 처리에 따른 실트, 모래 반응 실험.....	51
그림 4.1 미생물 용액과 영화칼슘 용액의 반응 실험.....	59
그림 4.2 미생물 반응 실험(무처리 7일)을 통한 흙의 변화.....	60
그림 4.3 미생물 반응 실험(고농축 7일)을 통한 흙의 변화.....	61
그림 4.4 포켓관입시험기.....	62
그림 4.5 모래 무처리 7일에 대한 전자현미경 분석.....	65
그림 4.6 모래 일반농도 처리 7일에 대한 전자현미경 분석.....	65
그림 4.7 모래 일반농도 처리 14일에 대한 전자현미경 분석.....	66
그림 4.8 모래 일반농도 처리 28일에 대한 전자현미경 분석.....	66
그림 4.9 모래 고농도 처리 7일에 대한 전자현미경 분석.....	67

그림 4.10 모래 고농도 처리 14일에 대한 전자현미경 분석.....	67
그림 4.11 실트 무처리 7일에 대한 전자현미경 분석.....	68
그림 4.12 실트 일반농도 처리 7일에 대한 전자현미경 분석.....	68
그림 4.13 실트 일반농도 처리 14일에 대한 전자현미경 분석.....	69
그림 4.14 실트 일반농도 처리 28일에 대한 전자현미경 분석.....	69
그림 4.15 실트 고농도 처리 7일에 대한 전자현미경 분석.....	70
그림 4.16 실트 고농도 처리 14일에 대한 전자현미경 분석.....	70
그림 4.17 모래 무처리 7일 반응에 따른 EDX 실험 결과표.....	72
그림 4.18 모래 일반농도 처리 7일 반응에 따른 EDX 실험 결과표.....	73
그림 4.19 모래 고농도 처리 7일 반응에 따른 EDX 실험 결과표.....	74
그림 4.20 실트 무처리 7일 반응에 따른 EDX 실험 결과표.....	75
그림 4.21 실트 일반농도 처리 7일 반응에 따른 EDX 실험 결과표.....	76
그림 4.22 실트 고농도 처리 7일 반응에 따른 EDX 실험 결과표.....	77
그림 4.23 모래 무처리 7일 반응에 따른 광물 함유량(Mapping).....	78
그림 4.24 모래 일반농도 처리 7일 반응에 따른 광물 함유량(Mapping).....	78
그림 4.25 모래 고농도 처리 7일 반응에 따른 광물 함유량(Mapping).....	79
그림 4.26 미생물 용액, 염화칼슘 용액 반응에 따른 X-회절 분석.....	80
그림 4.27 모래 무처리 7일에 따른 X-회절 분석.....	82
그림 4.28 모래 일반농도 처리 7일에 따른 X-회절 분석.....	83
그림 4.29 모래 고농도 처리 7일에 따른 X-회절 분석.....	84
그림 4.30 실트 무처리 7일에 따른 X-회절 분석.....	85
그림 4.31 실트 일반농도 처리 7일에 따른 X-회절 분석.....	86
그림 4.32 실트 고농도 처리 7일에 따른 X-회절 분석.....	87
그림 4.33 모래 고농도 처리 7일에 따른 X-회절 분석 - 한번에 섞은 경우.....	89
그림 4.34 실트 고농도 처리 7일에 따른 X-회절 분석 - 한번에 섞은 경우.....	90

## 표 목 차

표 1.1 Dejong 등의 방법과 오종신 방법과의 비교.....	7
표 2.1 요소의 기본정보.....	19
표 3.1 모래 시료의 물리적 특성.....	25
표 3.2 실트 시료의 물리적 특성.....	25
표 3.3 N값과 모래의 상대밀도.....	38
표 3.4 점토에 대한 연약지반 판정.....	39
표 3.5 모래 시험 시료 배합비.....	46
표 3.6 실트 시험 시료 배합비.....	49
표 4.1 모래의 함수비 변화 정도.....	57
표 4.2 실트의 함수비 변화 정도.....	58
표 4.3 모래 무처리 7일 반응에 따른 EDX 광물 함유량.....	72
표 4.4 모래 일반농도 처리 7일 반응에 따른 EDX 광물 함유량.....	73
표 4.5 모래 고농도 처리 7일 반응에 따른 EDX 광물 함유량.....	74
표 4.6 실트 무처리 7일 반응에 따른 EDX 광물 함유량.....	75
표 4.7 실트 일반농도 처리 7일 반응에 따른 EDX 광물 함유량.....	76
표 4.8 실트 고농도 처리 7일 반응에 따른 EDX 광물 함유량.....	77
표 4.9 모래 무처리 7일에 따른 X-회절 분석의 반응 생성물 리스트.....	82
표 4.10 모래 일반농도 처리 7일에 따른 X-회절 분석의 반응 생성물 리스트.....	83
표 4.11 모래 고농도 처리 7일에 따른 X-회절 분석의 반응 생성물 리스트.....	84
표 4.12 실트 무처리 7일에 따른 X-회절 분석의 반응 생성물 리스트.....	85
표 4.13 실트 일반농도 처리 7일에 따른 X-회절 분석의 반응 생성물 리스트.....	86
표 4.14 실트 고농도 처리 7일에 따른 X-회절 분석의 반응 생성물 리스트.....	87
표 4.15 모래 고농도 처리 7일에 따른 X-선 회절 분석의 반응 생성물 리스트 - 한번에 섞은 경우.....	89
표 4.16 실트 고농도 처리 7일에 따른 X-선 회절 분석의 반응 생성물 리스트 - 한번에 섞은 경우.....	90

## ABSTRACT

### Cementation Characteristics of Soil using Bacteria

Kim, Ho Chul

Advisor : Prof. Kim, Daehyeon

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

Recently there has been an increase in the field of construction that utilizes coastal dredging reclamation and soft ground as a basic ground for reducing the cost and effective use of territory. The method of construction has been suggested that considers the environmentally-friendly element in and outside of country unlike existing method that has placed emphasis on improvements of ground. The purpose of this study is to study the mechanism of microbial cementation of soil induced by bacteria by adding the microbial and non-microbial to the clay and sand.

Scanning Electron Microscope(SEM), EDX and X-ray diffraction(XRD) analyses were performed on the soft silt and loose sand specimens. Compared with the untreated specimen, a clearer cementation between particles was observed in the high bacteria concentration treated specimen. Based on the scanning electron microscope(SEM) EDX analyses, more calcium carbonate was observed in the specimen treated with high bacteria concentration than other specimens. On the basis of the preliminary results, it appears that microbial cementation can occur in the soft soil. Further study on the cementation of soils using bacteria is necessary to validate this result.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경 및 목적

최근 원자재 값 상승과 건설 재료의 부족으로 인해 국내·외 건설업체는 많은 어려움을 겪고 있으며, 새로운 대체재를 개발하기 위한 연구가 곳곳에서 활발하게 진행 중이다. 과거에는 연약지반의 현장조건 등을 고려하여 연약지반의 원지반 토사 자체를 치환하는 치환공법, 연직배수체인 샌드 드레인 및 페이퍼 드레인을 사용하여 압밀을 유발하는 압밀배수공법, 동적하중을 이용하여 연약지반을 개량하는 다짐공법, 시멘트나 약액 등 화학약품을 이용하여 지반을 고결화시키는 주입공법과 혼합공법 등을 주로 사용하였다. 이러한 공법들 중 대부분은 지반의 강도 증진에만 중점을 두었으며, 환경문제 발생에 대한 구체적인 해결방안을 제시하지 못하고 있는 실정이다. 예를 들어 시멘트를 이용한 지반 고결화 공법이나, 약액주입공법에 의한 지반개량에 있어서 각 지반의 여건에 따라 약액을 선정하여 시공하게 될 때 지하수의 오염과 환경에 미치는 영향을 고려하는 측면은 미미하고, 공사가 끝난 후에 사후 관리도 적절하게 이뤄지지 못하고 있는 실정이다.

과거에는 국내·외적으로 국토개발에 있어서 건설 공사 시 환경적인 측면을 고려하지 않고 연약지반 개량공법을 실시함으로써 공기의 단축이나 지반의 지지력 향상에 긍정적인 결과를 낼 수 있었지만, 이러한 공법을 오랜 기간 동안 실시해 온 결과로, 환경적 측면에 있어서 수질오염 등의 부정적인 결과를 낳게 될 것으로 예상되고 있다. 이와 더불어 최근 산업이 발달하고, 국민생활의 질이 향상됨에 따라 국민들의 의식도 환경문제에 대해 관심을 가지게 되는 방향으로 점차 변화되어 가고 있으며, 이러한 사회적 분위기를 반영하여 환경문제를 극복하기 위한 다양한 연구와 시도가 끊임없이 진행되고 있다. 연약지반 개량공법과 관련하여 지반공학 분야에서도 새로운 공법 개발에 많은 관심과 투자가 이루어지고 있으며, 이에 따라 연약지반 개량공법에 있어서 환

경적인 측면을 고려한 개량공법이 더욱더 절실히 요구되고 있다.

또한 국내에서는 공사비 절감과 국토의 효율적인 이용을 위해 연약지반 및 해안 준설 매립 지반을 기초지반으로 활용하여 시공하는 공사현장이 증가하고 있는 추세인데, 이러한 연약지반 및 준설 매립 지반은 초기 지지력이 낮고, 함수비가 높아 기초 지반으로 사용하는데 많은 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 시공 전 지반의 표층을 처리하는 공법으로 Mat공법, Drain공법 등 많은 대책공법들이 개발되어 현장에 적용되고 있으나, 앞서 말했던 것과 같이 단순히 지반을 개량하는 데에만 중점을 두고 있어서 후에 발생하는 환경문제를 개선함에 있어서 많은 한계가 있다.

미생물을 이용한 연구는 미국을 중심으로 Dejong(2006) 등 몇몇 연구자들로부터 진행되었으며, Ottawa 50-70 모래에 미생물을 첨가하여 시간에 따른 강도를 확인하였고, 이러한 실험을 통해 지반의 액상화 저감을 위한 연구를 시도하였다. 또한 국내에서는 오(2008)가 화강 풍화토에 미생물, 침강제(염화칼슘, 질산칼슘), 혼화제(소석회)를 첨가하여 강도에 따른 고결정도를 확인하였으나, 미생물 고결화 반응에 대한 메커니즘에 대한 규명을 명확하게 하지 못하였다.

본 연구에서는 미생물을 연약 지반에 적용하여 미생물 성장을 통해 탄산칼슘( $CaCO_3$ )을 생성시켜 흙 입자와 흙 입자 간의 공극을 채워줌으로써 지반의 고결화(Cementation) 가능성을 살펴보았다. 이러한 미생물 반응의 결과를 이용하여 연약지반 개량공법이 환경적인 측면에서도 긍정적인 효과를 나타낼 수 있도록 하는데 기여하고자 한다.

## 1.2 선행연구

미생물을 이용한 흙의 고결화(Cementation)에 관한 연구는 지반공학분야를 포함하여 국내·외에 있어서 아직 초기단계에 머무르고 있다. 일반적으로 흙의 고결화(Cementation) 방법은 주로 지반공학분야에서 시멘트나 석회를 사용하여 지반을 개량하는데 이용되어져 왔으며, 지반의 일부 또는 전체를 약액을 사용하여 개량하는 방법이 대부분이었다. 그러나 최근 미국을 중심으로 Dejong(2006) 등, 몇몇 연구자들의 의해 미생물을 일부 흙에 사용하여 고결화 정도를 확인하기 위해 여러 가지 실험을 실시하였으나, 반복적인 실험을 진행함에 있어 적용상의 번거로움이 가장 큰 문제로 나타났다. 미생물을 이용한 고결화(Cementation) 원리는 흙입자와 흙입자 간의 탄산칼슘( $CaCO_3$ )을 생성시켜 이를 침전시키는 반응과 밀접한 관련이 있다. 이러한 미생물 반응에 따른 기존 연구는 다음과 같다.

우선 토목공학 분야의 선행연구를 보면, 박테리아를 이용하여 흙의 공극을 막는 것은 박테리아를 침전시켜 방해석을 생성하므로 투수성을 줄이기 위해 사용되어진 방법이다(U.S Patent No. 5,143,155). 또한 미생물은 콘크리트 구조물의 균열을 보강하기 위해서 미생물을 사용하여 연구하였다(Ramakrishnan(1998), Ramachandran(2001)).

Ramakrishnan(1998)등은 시멘트 표준비에 사용된 혼합방법과 박테리아(*Bacillus pasteurii*) 성장제의 현탁액을 모래에 결합하여 모르타르 기둥을 만들었다. 인공적인 균열은 대체적인 재료(예를 들면, 모래, 석회가루, 실리카 흙)들과 박테리아 혼합재료로 28일 동안 보강되어졌는데 실리카 흙으로 처리된 균열보다 박테리아 혼합재료로 처리된 균열이 36%나 강도가 증가되었고, 균열부분의 SEM 조사로 방해석 결정체의 존재를 확인하였다.

미생물학 분야의 선행연구를 보면, Nelson 과 Launt(1991)은 주로 침투성이 있는 중막에 투수성을 줄이는 것에 초점을 맞추어 연구를 진행했다. 미생물과 세균으로부터 나온 생산물은 저장오일과 시추구멍에 공급의 회복을 돕기 위해서 50년 넘게 사용되어져 왔으며, 박테리아를 침투가 가능한 침전물에 사용하여 기름의 회복율을 높였다.

Stock-Fischer(1999) 등은 미생물학적으로 유발된 탄산칼슘 결정 침전은 pH 8.3에서 시작된다고 밝혔으며, 탄산칼슘 결정 침전이 증가하는 비율은 pH 9이상에서 발생된다고 보고 하였다. 탄산칼슘의 형성은 박테리아 대사활성 결과로써 발생하며, 인접 환경의 pH를 상승시키기도 한다. 이러한 pH 상승은 Urea의 효소가수분해에 의해 생산되는 암모니아에 의해서 발생되어짐을 밝혀냈다.

지반공학분야에서 미생물을 이용한 고결화 연구를 보면 Dejong(2006) 등은 Ottawa 50-70 모래를 이용하여 무처리 된 모래시료, 석고로 처리된 모래시료, 박테리아로 처리된 모래시료에 대해 각각 입자간의 고결화 정도를 확인하였다.

시험에 사용된 Ottawa 50-70 모래는 천연 상태의 모래를 사용하였으며, 온도 180°C에서 24시간 멸균되어 졌다. 각각의 모래 시료는 상대밀도 40%로 맞추어 실험을 실시하였다. 시험에서 석고로 처리된 모래시료는 탄산칼슘 고결 작용과 가장 비슷하게 반응되어 진다. 이러한 석고로 처리된 모래 시료 및 미생물로 처리된 모래 시료는 시료의 구성 성분을 평가하기 위해서 삼축압축시험을 실시하였다.

미생물로 처리된 모래 시료의 삼축 실험 방법은 다음과 같이 실시되었다.

- ① *Bacillus pasteurii*는 고체 영양배지(한천)에서 배양되어 졌으며, 배양의 순도를 확보하기 위해 새로운 성장물에 두 번 옮겨졌으며, 하나의 균체는 액체 배양 성장물에 옮겨졌고, 온도 37°C에서 19시간 동안 휘저어졌다.
- ② 액체 배양 성장물은 10분동안 1000g, 그리고 4°C에서 원심분리기에서 회전을 받는다.
- ③ 원심분리가 끝난 후 표면에 뜨는 액체는 제거되고 갓 나온 세포들은 다시 액체 성장 매개물에서 다시 부유하게 되고 초세포 제거를 위해 다시 원심작용을 받게 된다.
- ④ 이렇게 나온 요소 성장 매개물은 20ml에서 다시 재부유하게 된다.
- ⑤ 미생물 주입액과 미리 식혀진 요소 성장 매개물이 동시에 준비되어지며, 400ml의 요소 성장 매개물이 미생물 주입액에 혼합되어 공기를 빼고 휘저어진 결과 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 그리고 용액은 모든 세포들의 부유를 위해서 부드럽게 휘저어졌다. 미생물 처리 용액은 연동펌프를 사용하여 삼축시험 시편에 주입되어 졌으며, 요소, 염화칼슘 용액 그리고 바실러스 균으로 이루어져 있는 400ml 용액은 여과된 공기에 노출이 된다.
- ⑧ 그리고 그 용액은 20분동안 분당 20ml의 속도로 시편의 바닥으로 뽑아 올려진다.
- ⑨ 이러한 실험은 반복적으로 시멘트 결합의 일정한 수준이 달성 될 때까지 시편을 통해 흘러보내졌으며, 시편 내 충분한 알칼리 조건이 존재하는지 보장하기 위해 유출 pH는 정기적으로 모니터 되었다.

시험결과 미생물로 처리된 모래 시료에서 몇일 사이에 감지할 만한 수준의 고결화가 발생하였으며, 그림 1.1은 무처리 된 모래 시료(왼쪽)과 미생물로 처리된 모래 시료(오른쪽)를 나타내고 있으며, 미생물의 생장으로 인해 흙 입자와 흙 입자 사이에 고결화가 발생되었음을 나타내고 있다. 그러나 시료와 미생물 용액의 배합비가 명확하게 제시되지 않았으며, 실험과정이 복잡하여 적용상에 많은 어려움이 있을 것으로 판단된다.

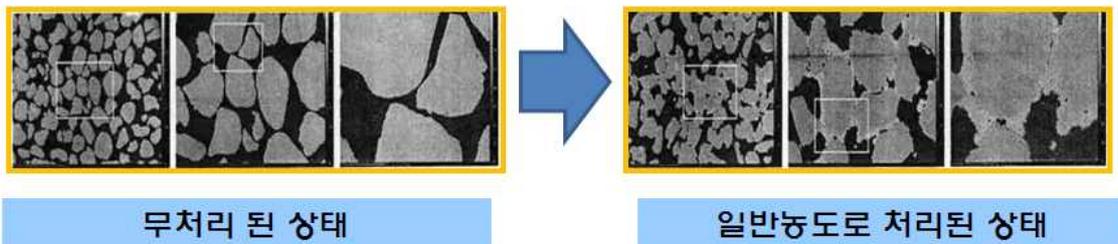


그림 1.1 무처리 된 모래시료 및 일반농도로 처리된 모래시료의 반응 실험 비교 (Dejong et al. 2006)

오(2008)는 미생물을 화강 풍화토에 적용하여 실험을 실시하였으며, 고결화 정도를 확인하였다. 실험에 사용한 시료는 국내에 분포하고 있는 화강 풍화토 계열로써 광주 진월지구 택지 조성공사 현장에서 채취하였으며, No.10체를 통과한 시료를 사용하였다. 미생물은 *Sporosarcina Pasteurii*로써 한국생명공학연구원 생물자원센터에서 균배양체로 균주를 분양 받아서 사용했다. 침강제는 염화칼슘 0.75M(Mol)과 질산칼슘 0.75M이 사용되었으며, 혼화제로 소석회가 3%로 첨가되었다.

시험방법은 시료+물 혼합토, 시료+미생물용액 혼합토, 시료+미생물용액+침강제 혼합토, 시료+미생물용액+혼화제 혼합토, 시료+미생물용액+침강제+혼화제 혼합토에 대한 조건에 대해서 실험을 실시하였다. 시험에 사용된 공시체 높이는 10.5cm, 지름 5.2cm (체적  $212.37\text{Cm}^3$ )의 PVC 몰드를 제작하였고 몰드에 일정한 압력을 가하기 위해 Pressure-Jack를 사용하였다. 시험의 진행은 함수비 15%, 20%, 25%를 구분하여 3일, 7일, 14일, 28일을 양생기간으로 하여 각 3개씩 180개의 공시체를 제작하였다.

강도 특성 및 내구성 파악을 위해서 일축압축시험기를 사용하였으며, 하중재하속도 5mm/min을 유지하는 변형제어방식으로 수행하였다. 그 밖에도 시료 입자간의 고결화 정도의 파악을 위해서 전자현미경(SEM) 분석을 통해서 입자와 입자상태간의 고결 정도를 확인하였으며, XRD 시험을 통해서 광물의 함유 정도를 파악하였다.

시험 결과 미생물 용액과 침강제의 반응으로 인해 침전물이 생성되었으며, 규화물과 탄산칼슘( $\text{CaCO}_3$ )의 일종인 바테라이트(Vaterite)라는 생성물이 추가적으로 생성되었다. 전자현미경 분석(SEM) 결과 미생물과 침강제가 토립자 사이에 반응을 일으켜 표면에 흡착성 물질이 형성되어 공극에 채워져 단단한 입자로 결합되었고, 실험을 통해 시료+미생물용액+혼화제 혼합토와 시료+미생물용액+혼화제+침강제 혼합토의 강도는 양생기간이 길어짐에 따라 강도가 증가함을 할 수 있었다. 또한 시료+미생물 용액+혼화제+침강제 혼합토는 시료+미생물 용액 보다 115% 강도가 더 증가되었다고 보고하였다.

그러나 미생물 용액에 대한 미생물 배양방법이 명확히 명시되지 않았으며, 미생물 함유량 실험에 있어서 시료+소석회 혼합토 및 시료+소석회+미생물 용액 혼합토의 두

실험조건 비교가 나타나지 않았다. 특히 소식회의 경우 점토와 혼합되었을 경우, 지반의 물을 흡수하고 포졸란 반응을 통하여 지반 자체를 보강하는 기능이 있어서, 본 실험에서는 순수한 미생물의 작용이라고 보기가 어렵다고 판단된다. 이에 추가적인 실험으로 소식회+미생물 용액과 소식회 + 물조건의 실험이 필요하다. 또한 결정적인 오류로써, 미생물 고결화 반응을 통한 메커니즘 규명이 명확하게 나타나지 않다는 점이다. 표 1.1은 Dejong(2006) 등의 방법과 오(2008) 방법을 표로 비교하여 나타내었다.

표 1.1 Dejong(2006) 등의 방법과 오(2008) 방법과의 비교

	Dejong(2006) 등의 방법	오(2008) 방법
사용시료	Ottawa 50-70 모래	화강 풍화토
강도측정법	삼축압축시험기에 배양된 미생물용액과 염화칼슘 용액을 반복적으로 주입하여 강도 변화를 확인함	일축압축강도시험, 전자현미경(SEM) 분석, XRD 시험
시험비교방법	무처리된 모래, 석고로 처리된 모래, 미생물로 처리된 모래에 대해서 각각의 강도 및 고결화 정도 비교	SW, SB, SBF, SBC, SBCF에 각각 함유량 15%, 20%, 25%와 3일, 7일, 14일, 28일에 따라 각각 시료 3개를 사용하였으며, 총 180개의 공시체를 제작함.
첨가된 약품	염화칼슘 25.2mM	침강제 : 염화칼슘, 질신칼슘 각각 0.75M 혼화제: 소식회 3%
배양액 사용	원심분리기를 통한 고농축 미생물용액 사용	일반농도의 미생물 용액 사용
사용한 미생물	<i>Bacillus Pasteurii</i>	<i>Bacillus Pasteurii</i>

### 1.3 연구목적 및 방법

본 연구에서는 미생물을 연약지반에 적용하여 미생물 성장을 통해 탄산칼슘( $CaCO_3$ )을 생성시켜 토립자와 토립자 간의 공극을 채워줌으로써 생성된 토립자의 지반 고결화 가능성을 살펴보았다. 미생물 무처리, 일반농도 처리, 고농도 처리(일반농도 처리의 40 배)의 미생물 용액을 느슨한 모래, 실트에 각각 적용하여 재령일(7일, 14일, 28일)에 따른 고결화 정도를 확인하였으며, 고결 정도 파악을 위해 포켓관입시험기를 이용하여 지반의 강도를 측정하였으며, 전자현미경(SEM) 분석 및 XRD 실험을 실시하여 흙 입자간의 생성된 탄산칼슘( $CaCO_3$ ) 정도를 확인하고자 하였다.

## 제 2 장 흙의 고결화 특성

### 2.1 흙의 고결화(Cementation) 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 묶어주어 흙 입자들을 단단하게 형성하도록 한다. 자연적인 환경에서의 시멘트는 퇴적물의 화학적 과정 및 풍화작용을 거쳐 만들어진다. 이렇게 자연적으로 고결화 된 모래는 지구 지각에 다양한 장소에 존재한다. 그 중에서 사암의 형태는 탄산칼슘 침전과 밀접한 관련이 있다(Saxena and Lastrico 1978). 자연적인 고결작용 형성은 소규모 뿐만 아니라 일반적인 규모, 또는 대규모의 지층상 간격에서 각기 다르게 나타난다. 침전물 내부의 고결작용 정도는 환경적인 조건 특성에 따라 조절이 가능하며 많은 차이가 발생하기도 한다. 이러한 고결화 정도는 날씨의 상태에 따라 점차적으로 시멘트 형성을 촉진시키거나 또는 더디게 하기도 한다(Dejong et al. 2006).

인공적인 고결작용의 처리 방식은 보통 그라우팅 방법을 생각할 수 있다. 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  $10^{-1} \sim 10^{-4} \text{cm/sec}$  범위의 침투성을 가진 토양을 처리하는데 사용된다(Karol 2003; Leonard 와 Moller 1963).

화학적 그라우팅은 일단 한번 주입되면 침전물 입자의 축진에 의해서 퇴적물에 굳어 응고되거나 긴 결정체로 채워져 얽히게 된다. 침전물이 응고되고 굳어지는 시간은 활성제, 흡입제, 축매제의 밀도에 따라 다르며, 범위는 1~300min 까지 할 수 있다(Karol 2003). 빈 공간을 중합된 겔로 채움으로써 전단강도가 증가 되었으며, 이러한 전단강도 증가는 흙의 안정성을 증가시킴과 동시에 침하로 인한 붕괴 가능성을 줄이

고, 흙 입자를 고정시키는 결과를 가져온다. 그림 2.1은 흙 입자간의 고결작용을 통한 흙 입자간의 공극변화를 나타내고 있으며, 탄산칼슘의 작용으로 입자와 입자간의 고결화가 일어나게 된다.

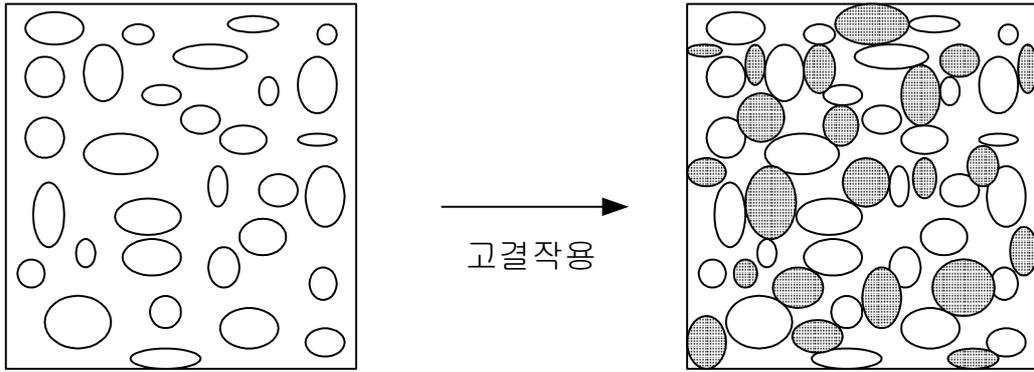


그림 2.1 흙 입자간의 고결작용을 통한 흙 입자간의 공극 변화

## 2.2 흙 속에서의 미생물

박테리아는 흙을 변화시키는데 많은 영향을 미치는 미생물이다. 흙에는 많고 다양한 미생물이 살고 있으며, 표면 흙은 1g당  $10^8 \sim 10^9$ 의 박테리아 Cell을 가지고 있다. 박테리아의 모양은 다양하고 형태는 둥근모양이거나, 막대모양, 나선형에 가깝다. Cell 지름은 보통  $0.5\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$  범위이다(Madigan 과 Martinko 2003). 미생물들은 굵은 흙 입자의 공극 안에서 자력으로 움직이거나 수동적으로 자유롭게 움직일 수 있다. 그러나 미세한 흙 입자의 작은 공극은 미생물 반응 침전으로 인한 미생물의 자유로운 이동을 방해한다. 그러므로 박테리아는 대략  $0.4\mu\text{m}$ 보다 작은 공극 구멍을 통과되기가 힘들 것으로 판단된다. 반면에 균과 원생동물이 흙에 들어가기 위해서는  $0.6\mu\text{m}$  보다 큰 공극이 필요하다(Mitchell 과 Santamarina 2005). 그림 2.2는 흙의 공극을 통과하기 위한 미생물 크기와 미생물의 통과 능력을 나타내고 있다.

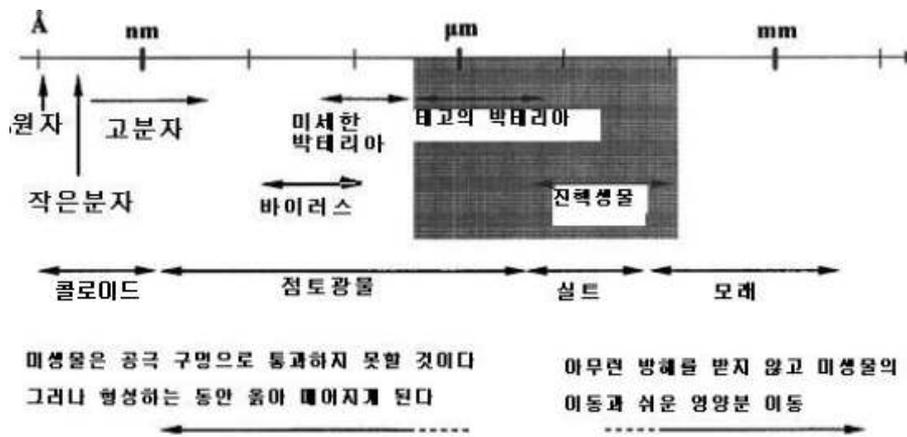


그림 2.2 흙의 공극 통과를 위한 미생물 크기와 미생물의 통과능력(Dejong et al. 2006)

각 흙의 직경을 살펴보면 모래는 0.075mm이상, 4.75mm미만의 입자들을 나타내고 있으며, 실트는 0.002mm이상, 0.075mm미만의 입자들을, 점토의 경우 0.002mm미만의 입자들을 나타낸다. 따라서 미생물을 이용하여 흙에 적용 시 미생물의 크기와 비교해 볼 때 모래와 실트가 적합한 흙임을 알 수 있다.

이러한 미생물은 현재 다양한 분야에서 사용되고 있다. 우선 환경 분야에서는 환경 개선을 위해 미생물의 이용으로 미생물 보호막을 생성시켜 금속으로부터 흙의 안정성을 얻을 수 있음을 제시하였고.(khachatoorian et al. 2003) 그 이외에 콘크리트 구조물에 미생물을 사용하여 균열을 회복하는데도 이용되어져 왔다. (Ramakrishnan et al. 1998; Ramachandran et al. 2001)

또한, 실험에 사용된 미생물은 탄산칼슘과 흡착하여 흙 입자에 붙어 입자크기를 상승시키며, 결과적으로 0.06mm ~ 0.1mm의 크기가 된다. 이는 입자 크기가 0.075mm이상인 모래 입자가 미생물 반응 실험에 적합한 시료임을 알 수 있다((Dejong et al. 2006). 그림 2.3은 미생물과 탄산칼슘의 반응을 통해 발생하는 흙 입자의 변화를 나타내는 그림으로, 탄산칼슘과 결합 시 흙 입자 크기가 상승됨을 보여주고 있다.

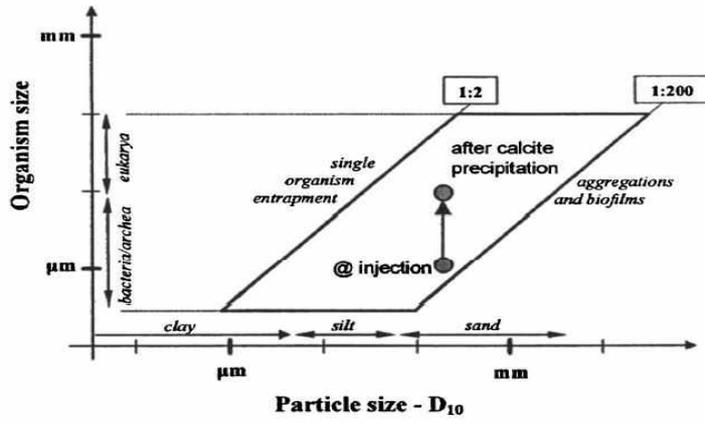


그림 2.3 미생물과 탄산칼슘 반응을 통한 입자 크기 변화((Dejong et al. 2006)

## 2.3 미생물을 이용한 흙의 고결화(Cementation) 특성

미생물을 이용한 흙의 고결화는 토립자와 토립자 사이에 탄산칼슘( $CaCO_3$ )을 생성하여 지반을 개량하고자 하는 방법으로써, 기존의 다른 지반개량공법과의 차별성을 갖는다. 기존 공법들 대부분은 지반강도 증진 및 향상에 중점을 두어 공법 적용 후 사후 관리에 있어서의 취약함이 드러났으며, 이로 인한 환경 문제의 심각성은 날로 커져갔다. 이에 미생물을 이용한 고결화 방법이 제안되었다. 이러한 흙의 고결화는 실험조건에 따라서 강도가 증가되거나 감소되기 때문에 최적의 조건을 찾는 것이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다.

미생물 생장에 있어서 무엇보다 중요한 것은 미생물이 오랫동안 흙속에서 성장할 수 있게 해주는 요소 및 영양배지이며, 탄산칼슘( $CaCO_3$ ) 생성을 위해 필요한 염화칼슘( $CaCl_2$ )의 양이다. 아직 미생물 배양을 통한 고결화의 연구가 국내·외적으로 보면 초기단계에 머무르고 있어, 최적의 성장조건에서 최대강도 발현 조건을 찾는 것이 지금 가장 우선 시 되어야 한다고 할 수 있다. 또한 실험에 사용된 미생물은 살아있는 생물로써 생장에 필요한 다양한 조건을 맞춰주어야 한다. 이러한 미생물 생장에 영향을 주는 조건으로 온도, 미생물 용액의 pH, 산소의 공급량 등 여러 가지 조건들이 있으며, 이러한 조건을 통해서 미생물이 우레아제 반응으로 탄산이온( $CO_3^{2-}$ ) 생성량을 증가되며, 실질적으로 염화칼슘( $CaCl_2$ )과 반응하는 양을 증가되어 최종적으로 흙 입자 간에 존재하는 탄산칼슘( $CaCO_3$ )의 생성량을 증가시켜, 지반을 보다 더 안전하게 고결화(Cementation) 시킬 수 있다.

## 2.4 미생물을 이용한 흙의 고결화 시 고려해야 할 요인들

### 2.4.1 미생물 용액의 pH

미생물 반응으로 생성되는 탄산칼슘결정 침전은 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, 미생물 용액과 염화칼슘의 반응 pH는 무처리 된 시료의 경우 6.5, 일반농도 처리된 경우는 7.0으로 각각 나타났다. 이는 미생물, 염화칼슘 용액을 흙에 적용 시 pH는 낮아짐을 확인하였다.

### 2.4.2 흙 입자의 크기

흙 입자의 크기는 미생물 반응 실험이 실질적으로 이루어지는 곳이므로 중요하다고 할 수 있다. 통일분류법을 참고하여 흙을 분류 할 때 자갈의 경우 4.75mm 이상의 입자들을 말하며, 모래의 경우 0.075mm 이상 4.75mm미만의 입자들을 말하며, 실트의 경우 0.002mm 이상 0.075mm 미만의 입자이며, 점토의 경우 0.002mm 미만의 입자들을 나타낸다. 실험에 사용된 미생물의 지름 길이는 보통 0.3 $\mu$ m ~ 0.5 $\mu$ m이며, 탄산칼슘과 흡착할 경우 크기는 20배가 증가하게 된다(Mitchell 과 Santamarina 2005). 이에 미생물이 흙 입자와 입자 사이에서 성장하기 위해서 0.06mm ~ 0.1mm의 흙 입자의 크기가 필요하다.

### 2.4.3 흙의 종류

미생물의 생장에 있어서 반응이 이루어지는 흙의 선정도 다른 요인과 마찬가지로 중요한 요인으로 작용한다. 2.4.2절에서 언급한 바와 같이 흙의 종류는 크게 자갈, 모래, 실트, 점토로 구분되어지며, 미생물 생장에 있어서 탄산칼슘과 흡착 되었을 때 크기와 비교해 볼 때 가장 적합한 흙이 모래와 실트임을 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 모래와 실트에 미생물 용액을 첨가하여 반응을 살펴보았다.

### 2.4.4 수분함량 및 온도

본 연구에 사용된 수분함량은 그림 2.4와 같이 최적의 온도에서 가장 활발한 호흡속도를 나타내고 있으며, 이러한 호흡속도는 실질적으로 생성되는 탄산칼슘의 양을 증가시켜주는 역할을 한다. 그림 2.4에서 볼 수 있듯이 미생물 생장의 최적 온도는 30°C이며, 이에 본 연구에서는 온도 조건을 30°C로 하여 미생물을 인큐베이터에서 배양하였다.

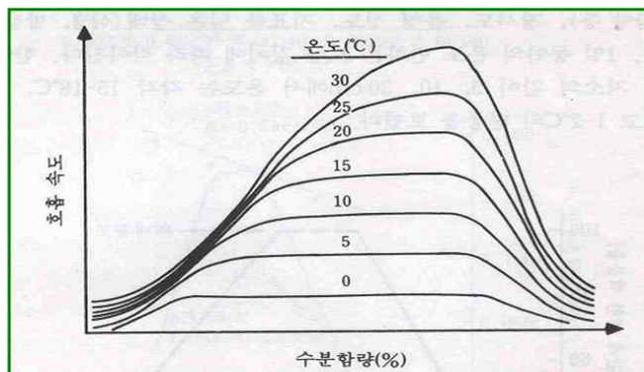


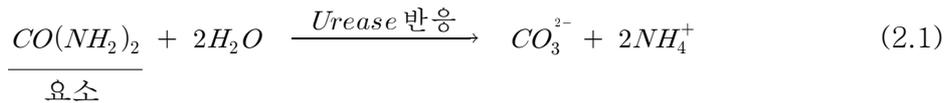
그림 2.4 수분함량, 온도, 호흡속도와의 관계

#### 2.4.5 공극비

미생물 고결화의 영향을 주는 것은 미생물이 공극 공간을 자유롭게 움직일 수 있는지에 대한단위체적당 충분한 입자 간의 접촉에 달려있다. 또한 미생물 고결화는 미생물의 크기와 공극 구조간의 균형 있는 관계를 필요로 한다(Mitchell 과 Santamarina 2005). 실험에 사용된 미생물은 투입당시에는 약 1~3 $\mu\text{m}$  정도로 자유로운 통과가 이루어지나 세포 밖에서 방해석 침전이 일어날 경우 미생물의 크기는 원래의 크기보다 약 20배 정도 커지게 된다. 이에 미생물 반응을 통해 미생물 성장 시 미생물이 충분히 움직일 수 있는 공극이 확보 되어야 한다.

## 2.5 미생물과 요소(Urea)의 반응

미생물을 이용한 흙의 고결화(Cementation) 가능성은 미생물의 성장 반응을 통한 결과라고 할 수 있다. 본 연구에서는 미생물을 배양하기 위해서 배양배지를 만들어 사용하였으며, 영양배지(Nutrient Broth)와 요소 혼합액을 사용하였다. 미생물 성장 요소 중 하나인 영양배지는 식물의 성장에 필요한 물질을 용해시킨 수용액이다. 또한 요소(두산동아백과사전 참고하면)는 Urea라고도 하며, 화학식( $CO(NH_2)_2$ )로 나타내며, 무색의 결정성 물질로 물과 반응성이 좋아 물에 잘 녹는다. 이러한 요소는 모든 포유동물과 일부 어류의 단백질 대사 최종 분해 산물로 이용되고 있으며, 단백질이 분해되고 나면 암모니아가 생성된다. 요소분해효소는 Urease라고도 하며, 요소를 가수분해하여 암모니아와 이산화탄소를 생성시키는 반응에 관여한다. 이러한 요소분해효소는 미생물 및 고등식물, 하등식물, 고등동물의 위정액과 적혈구에 널리 분포하며 식물에도 존재하기도 한다. 미생물과 요소의 반응식은 식 2.1과 같으며, 미생물 성장을 통해 요소와 반응하며 아래와 같이 탄산이온( $CO_3^{2-}$ )과 두 개의 암모늄이온( $NH_4^+$ )으로 가수분해 된다.



아래 그림 2.5는 시험에 사용된 요소(왼쪽)와 영양배지(오른쪽)를 나타내고 있으며, 표 2.1은 요소(Urea)의 기본정보를 나타내고 있다.



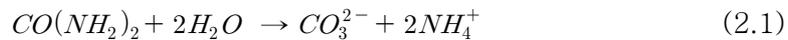
그림 2.5 요소(Urea) 및 영양배지(Nutrient Broth)

표 2.1 요소(urea)의 기본정보

화학식	$CO(NH_2)_2$
분자량	60.047
녹는점	132.7°C
비 중	1.335

## 2.6 미생물을 이용한 탄산칼슘 생성

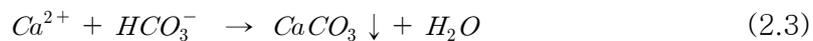
*Bacillus* 균은 pH 9에서 최적의 생장을 하는 미생물이다. 이러한 *Bacillus*는 요소를 먹잇감으로 삼아 요소분해효소를 통해 영양분을 섭취하고 탄산이온( $CO_3^{2-}$ )과 2개의 암모늄이온( $NH_4^+$ )을 생성한다. 아래 2.1 식은 미생물과 요소의 반응을 나타내는 식으로 요소가 분해됨에 따라 탄산이온과 암모늄이온이 생성되어졌다.

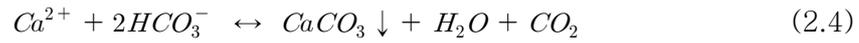


요소를 먹잇감으로 삼아 성장된 미생물을 통해 생성된 탄산이온( $CO_3^{2-}$ )과 염화칼슘( $CaCl_2$ )을 수용액화 하여 생성된 칼슘이온( $Ca^{2+}$ )의 반응을 통해 탄산칼슘( $CaCO_3$ ) 침전이 식 2.2와 같이 발생한다.



탄산이온( $CO_3^{2-}$ )은 물과 반응 시 세 가지 상태로 존재할 수 있다. 즉, 탄산이온( $CO_3^{2-}$ ), 탄산수소이온( $HCO_3^-$ ), 탄산( $H_2CO_3$ )로 각각 존재 할 수 있으며, 미생물로 인해 발생하는 탄산칼슘 침전은 탄산염 반응에 따라 다르게 발생한다(Ramakrishnan et al. 2001) 식 2.3은 탄산수소이온( $HCO_3^-$ )과 칼슘이온( $Ca^{2+}$ )의 반응으로 탄산칼슘( $CaCO_3$ )과 물( $H_2O$ )을 생성시키는 식이며, 식 2.4는 2개의 탄산수소이온( $H_2CO_3$ )과 칼슘이온( $Ca^{2+}$ )의 반응으로 탄산칼슘( $CaCO_3$ )과 이산화탄소( $CO_2$ ), 그리고 물( $H_2O$ )을 생성시키는 식이다.





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 형성되게 한다. 그림 2.6은 탄산칼슘( $CaCO_3$ ) 침전으로 흙 입자와 흙 입자 사이의 공극을 채워 고결화(Cementation) 되는 정도를 나타내는 그림이며, 고결화로 인해 지반의 안정성은 더욱 높아질 것으로 기대된다.

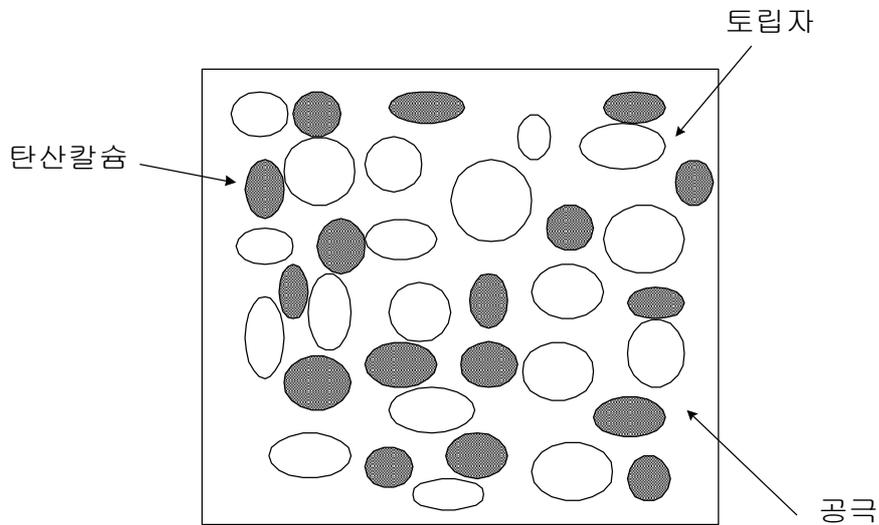


그림 2.6 흙 입자와 탄산칼슘의 반응

## 제 3 장 미생물 고결화 특성 규명을 위한 실내시험

### 3.1 개요

미생물을 이용한 흙의 고결화(Cementation)는 아직 전 세계적으로 초기 단계에 머무르고 있으며, 지반공학분야 이외에도 다양한 분야에 폭 넓게 활용되고 있다. 미생물을 이용한 고결화(Cementation)는 입자와 입자사이에 비어있는 공간에 미생물이 직접 침투하여 지반과 지반사이의 공극을 보다 더 조밀하게 채워주는 역할을 하여 강도를 증진하는 역할을 한다. 또한 기존의 전통적인 그라우팅 방법에 비해 순차적인 방법은 최종강도의 조절이 보다 더 수월하다. 특히 좁은 반경이 아닌 넓은 반경의 지반에 이용 시 미생물 번식을 통한 고결화(Cementation) 효과가 더 클 것으로 예상된다. 미생물이 적용될 지반은 연약지반으로써 초기 함수비가 높고 하중에 대한 지지력이 낮아서 지반공학적으로 많은 문제를 안고 있다. 이러한 연약지반을 개량하는 개량공법의 종류는 원지반 토사 자체를 치환하거나 양질의 토사로 바꾸는 치환공법, 지반 자체에 배수재를 사용하여 압밀을 촉진 시키는 압밀공법, 다짐 해머를 이용하여 지반을 다져 고결시키는 다짐공법 등으로 나누어지고 있으며, 기존의 시공 후 발생하는 환경문제가 있어, 공법이 아닌 친환경적인 공법 적용의 연구가 보다 활발하게 진행되어지고 있는 중에 있다.

본 연구에서는 미생물을 이용하여 흙의 성질을 개선하고 강도 증가 정도를 실험을 통해 알아보았다. 강도측정을 위한 시험으로 포켓관입시험기를 통해 일축압축강도를 실시하였으며, 탄산칼슘 생성을 확인하기 위하여 전자현미경(SEM) 분석 및 XRD 시험을 실시하였다. 시험에 필요한 시료 제작을 위해 실내시험을 실시하였으며, 다짐시험을 통하여 최대건조단위중량( $r_{d(max)}$ ) 및 최적함수비(OMC)를 결정하였고, 탄산칼슘( $CaCO_3$ ) 생성을 위해서 0.75M의 염화칼슘( $CaCl_2$ ) 용액을 첨가하여, 재령일(3일, 7일,

14일, 28일)에 따른 고결화 정도를 확인하였다. 그림 3.1은 미생물 고결화 (Cementation) 가능성을 위한 시험과정을 나타낸 그림으로써, 시험과정에 대해서 개략적으로 다음과 같이 나타내었다.

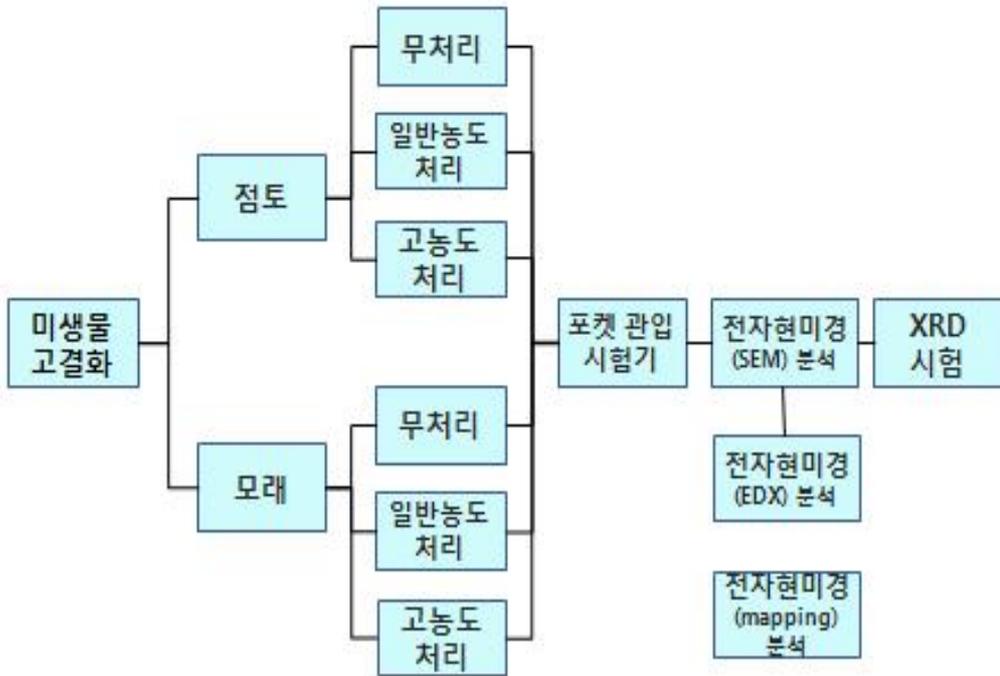


그림 3.1 미생물 고결화 가능성을 위한 시험과정

## 3.2 연구에 사용된 흙

미생물 고결화(Cementation)의 구성 요소는 흙, 미생물, 염화칼슘( $CaCl_2$ )이 있다. 그 중에서 흙의 선정은 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에 사용한 시료는 느슨한 모래와 실트를 사용하였다.

본 연구에 사용된 모래는 주문진 표준사를 사용 하였으며, 이러한 모래는 지반공학적으로 포화되어 있을 때 액상화 현상을 발생시켜, 연약한 지반에 지진하중 및 동하중 등을 받도록 하여 갑작스럽게 지반의 강도를 저하시키며, 구조물의 불안정성을 초래한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 느슨한 모래지반의 경우 동다짐 공법 등의 적용으로 구조물을 시공 전에 충분히 개량해서 사용하는 방법이 주로 이용된다.

실트 및 점토는 국내 연약지반상에 대표적인 흙으로 대체적으로 함수비가 높으며, 공학적으로 불안정한 흙이다. 본 연구에 사용된 실트 시료는 국내에 널리 분포하고 있는 화강 풍화토계열의 시료로써, 광주 효천 2지구 LH 보금자리 주택공사 현장에서 채취한 시료를 사용하였다. 시험 시료는 No.10체를 통과한 시료를 사용하였으며, 이를 사용하여 흙의 물리적, 역학적 특성을 파악하였다. 시료의 물리적 성질을 파악하기 위해 한국 공업규격에 준하여 비중(KS F 2308), 체가름(KS F 2309), 입도(KS F 2302), 다짐시험(KS F 2312)를 실시하였다. 이에 본 연구에서는 주문진 표준사와 화강 풍화토 계열 시료에 각각 미생물을 첨가하여 고결화(Cementation) 가능성을 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 3.2 실트 시료의 물리적 특성

시료	비중( $G_s$ )	# 200(%)	$r_{(d_{max})}$ ( $g/cm^3$ )	OMC(%)	액성한계 (LL) (%)	소성한계 (PL) (%)
실트(ML)	2.67	64.3	1.328	11.6	23.3	N,P

*Bacillus*의 크기는 0.3 $\mu$ m ~ 0.5 $\mu$ m의 지름을 가지고 있으며, 지반에 적용 시 활발히 움직일 수 있게 하기 위해서는 흙 입자 크기가 중요하다. 본 연구에 사용된 모래는 입장의 크기가 0.75mm ~ 4.75mm, 실트의 크기는 0.002mm ~ 0.75mm로 미생물이 탄산칼슘과 흡착할 경우 미생물의 크기는 약 20배가 증가되므로, 미생물이 흙속에서 활발히 움직이면서 가장 최적의 성장할 수 있는 흙으로 느슨한 모래와 실트를 선정하였다.

표 3.1은 모래 시료의 물리적 특성을 나타낸 것으로 비중, # 200체 통과률, 최대건조단위중량( $r_{(d_{max})}$ ), 최적함수비(OMC)를 나타내었다. 표 3.2은 실트 시료의 물리적 특성을 나타낸 표로써, 비중 및 200체 통과률, 최대건조단위중량( $r_{(d_{max})}$ ), 최적함수비(OMC), 액성한계를 나타내었다. 소성한계의 경우 N.P(비소성)로 나와 흙 분류 시 ML로 분류 되었다.

그림 3.2와 그림 3.3은 모래와 실트 시료의 입도분포곡선을 나타낸 것으로 아래와 같다.

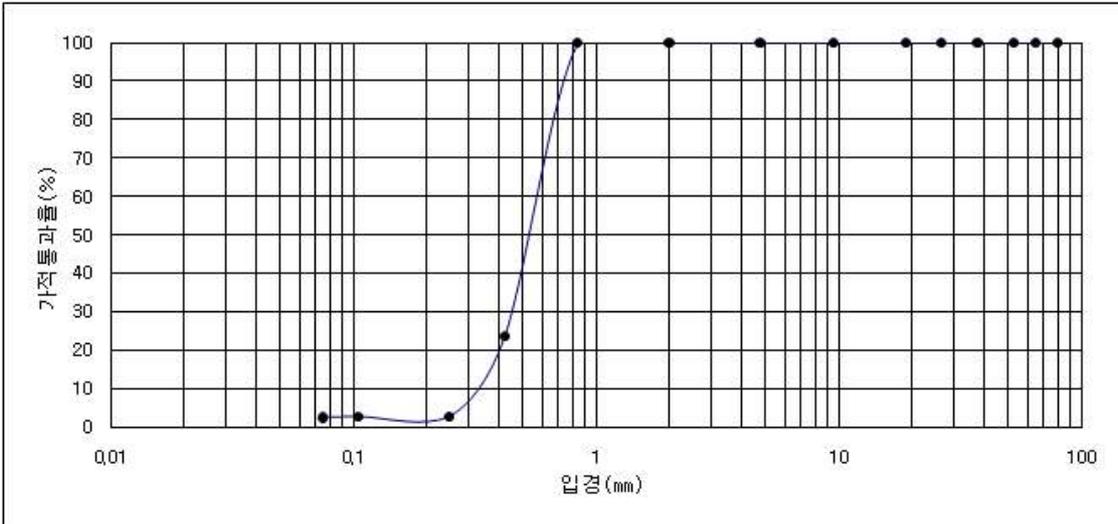


그림 3.2 모래 시료의 입도분포곡선

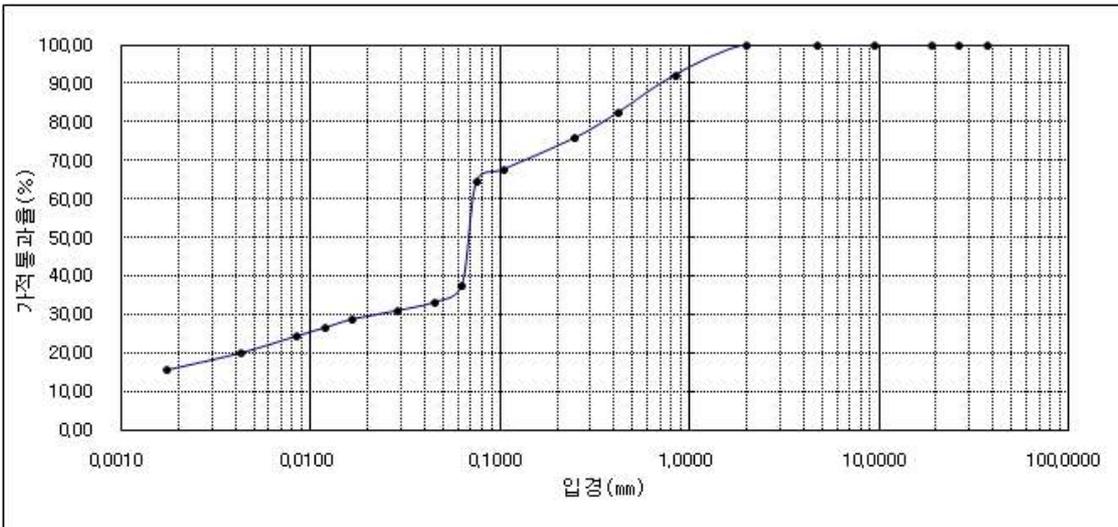


그림 3.3 실트 시료의 입도분포곡선

그림 3.4와 그림 3.5는 모래 및 실트 시료의 다짐곡선을 나타낸 것으로 모래의 경우 최대건조단위중량( $r_{d\max}$ )이  $1.608\text{g/cm}^3$  및 최적 함수비(OMC)는 14.92%로 산정되었다. 실트의 경우 최대건조단위중량( $r_{d\max}$ )이  $1.328\text{g/cm}^3$  및 최적 함수비(OMC)는 11.6%로 산정되었다.

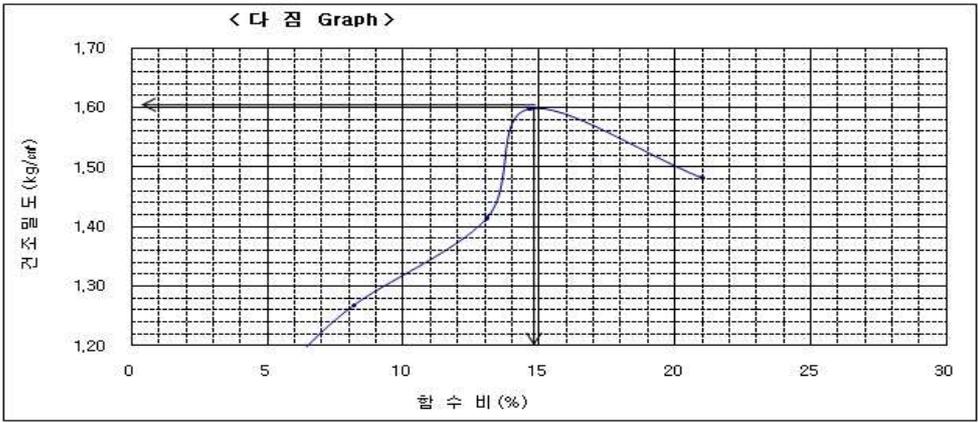


그림 3.4 모래 시료의 다짐곡선

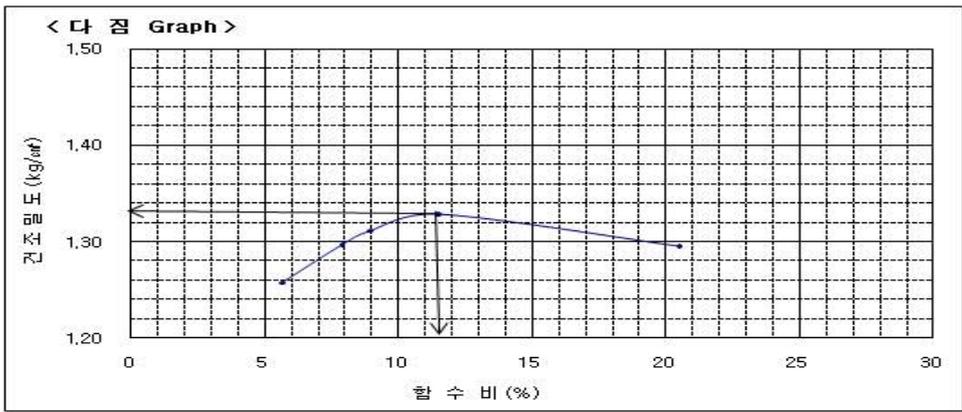


그림 3.5 실트 시료의 다짐곡선

### 3.3 염화칼슘

염화칼슘( $CaCl_2$ )(두산동아 백과사전 참고)은 염소(Cl)와 칼슘(Ca)이 반응하여 만들어진 이온성 화합물이다. 무수물은 조해성이 있는 사방계의 백색결정으로 약간 비틀어진 루틸구조를 하고 있으며, 화학식량은 111.0, 녹는점  $772^{\circ}C$ , 끓는점은  $1935^{\circ}C$ , 비중은 2.15 이다. 물에 대한 용해도, 즉 물 100g에 최대 녹는 염화칼슘의 g수는 74.5g으로 상당히 높은편이며, 알콜올, 아세톤에도 잘 녹는다. 또한 수분을 잘 흡수하므로 장마철 건조제로 많이 이용되고 있으며, 자신의 무게의 무려 14배 이상의 물을 흡수할 수 있다. 육수화물( $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ )을 얼음과 1.44대 1의 비율로 섞어서 만든 냉각제(한제)는  $-54.9^{\circ}C$ 까지 온도를 낮출 수 있다. 겨울철에 눈 위에 염화칼슘( $CaCl_2$ )을 뿌리면 그 주변의 습기를 흡수하여 녹게 되는데 녹으면서 내놓는 열이 주변의 눈을 다시 녹인다. 염화칼슘으로 녹은 물은  $-54.9^{\circ}C$ 가 되어야 얼 수 있기 때문에 눈으로 빙판이 된 길을 녹이고 다시 얼어붙지 않게 만드는 제설제로 아주 유용하다. 또한 의약품으로서도 링거액 등으로 알려진 바와 같이, 칼슘제 중에서 가장 흡수가 빠르고, 직접 복용하면 위를 해치므로 주로 주사제로 사용된다. 그 밖에도 염화칼슘( $CaCl_2$ )은 강력한 흡습력으로 노면상에 적당한 습기를 유지하여 먼지 발생을 방지하므로, 경기장 및 테니스장, 비포장도로의 방진에 뛰어난 효과를 발휘하며, 동결방지 효과는 경기장 및 테니스장 등에서 서리 방지용으로서 효과가 크다.

본 연구에서 사용된 염화칼슘( $CaCl_2$ )은 물에 녹여 수용액 상태를 만들어 흡속에 넣었으며, 미생물 생장으로 생성된 탄산이온( $CO_3^{2-}$ )과 염화칼슘( $CaCl_2$ )을 수용액화하여 만들어진 칼슘이온( $Ca^{2+}$ )과 반응하여 다음과 같이 침강하게 된다.



그림 3.6 시험에 사용된 염화칼슘으로써, 본 시험에서는 물에 녹여 수용액으로 사용하였다.

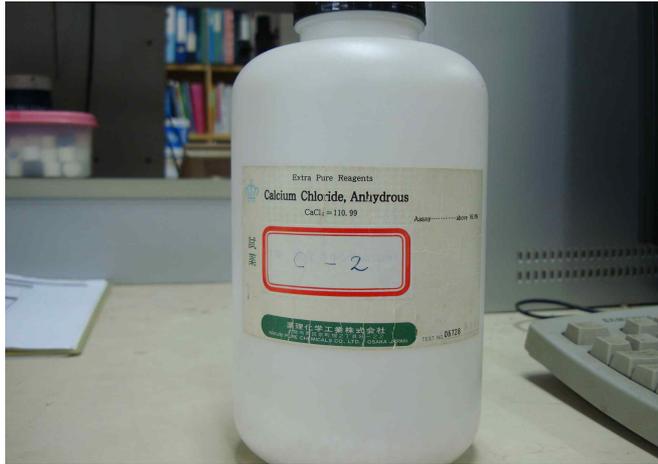


그림 3.6 염화칼슘( $CaCl_2$ )

### 3.4 미생물 배양방법

본 연구에 사용된 미생물은 *Sporosarcina Pasteurii*는 대전 미생물 배양센터에서 균 배양체로 균주를 분양받아 조선대학교 환경공학과 미생물 실험실에서 배양하였다. 미생물 배양방법에는 고체 배양법과 액체 배양법이 있으며, 고체 배양방법은 한천(우뭇가사리를 끓인 후 식혀 만든 끈끈한 물질)을 이용하여 고체 공간에 미생물을 배양하는 방법으로 주로 미생물이 다른 세균과의 함유 여부를 파악할 때 많이 사용되며, 미생물이 시간에 따라 생존하는 활성도 측정에 사용되지만, 다루기가 까다롭고 배양기간이 오래 걸리는 단점이 있다. 이에 비해 액체 배양방법은 배양 시간이 짧고 배양방법이 간편하여 최근에 많이 사용되는 방법이다. 미생물 배양방법은 오(2008)에서는 일반 농도의 미생물 용액을 가지고 실험을 실시하였으나, 탄산칼슘 생성이 되지 않았으며, Dejong(2006) 등의 경우 고농축 농도의 미생물을 가지고 실험을 실시하였으나, 반복적인 미생물 주입 작업과 이를 정기적으로 모니터링하여 고결화 정도를 확인하는 번거로움이 발생되었다. 이에 본 연구에서는 일반농도와 고농도 미생물 용액을 실트 및 모래에 한 번 주입하여 고결화 가능성을 확인하였다.

#### 3.4.1 일반농도 처리

일반농도 처리에 사용되는 미생물 배양방법은 계대배양(기존의 미생물 용액에서 1%를 새로운 배양배지에 옮기는 작업)을 통한 방법을 사용하였으며, 배양방법의 순서로 배양배지는 영양배지 0.8%와 요소 2%를 첨가하여 배양배지를 만들고 멸균기를 이용하여 미생물 전체를 멸균 시키고, 그 후 기존의 인큐베이터에서 배양 중인 미생물 용액을 클린벤츠에서 가져와 미생물 용액의 1%를 스포이드를 이용하여 계대배양을 집중시키는 방법으로 일반적인 미생물의 농도를 만들었다.

본 연구에서는 액체 배양방법을 사용하였으며, 미생물 배양방법은 크게 두 가지로

나누어지며, 배양배지를 만드는 방법과 계대배양방법으로 나누어진다. 우선은 배양배지를 만드는 방법(미생물 배양배지 500ml 기준)부터 정리해보면 그림 3.7과 같으며 세부적인 실험방법은 아래와 같다.

(1) 증류수를 500ml를 메스실린더에 담아서 비커에 넣고 시료 교반기 위에 놓고 속도를 조절한다.

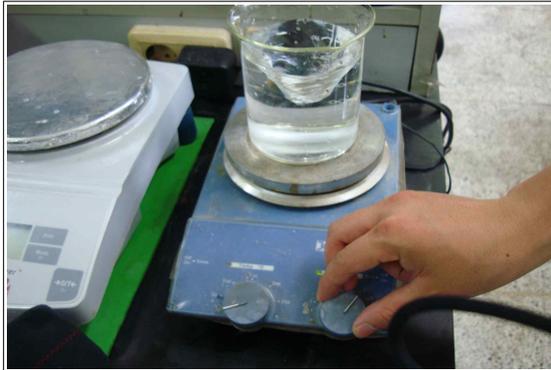
(2) 영양배지 0.8%(500ml 기준으로 4g을 넣음)를 비커에 넣고 섞는다.

(3) 요소(Urea) 2%(500ml 기준으로 10g을 넣음)를 비커에 넣고 섞는다.

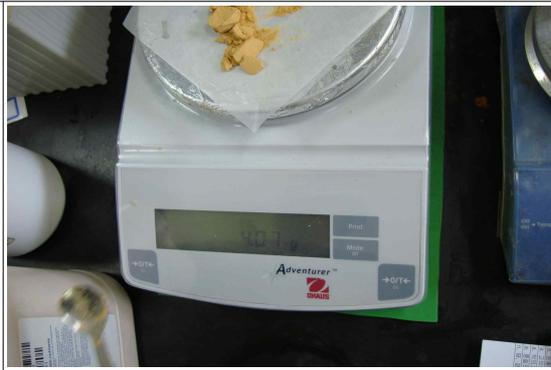
(4) 섞어진 미생물 배지용액을 100ml 삼각플라스크에 각각 담는다.

(5) 삼각플라스크에 담아진 100ml 배지용액을 각각 두껍을 막고 호일을 이용하여 막는다.(멸균과정에서 습기가 위로 올라와서 폭발하게 되는 것을 방지하기 위해서 호일로 감싼다.)

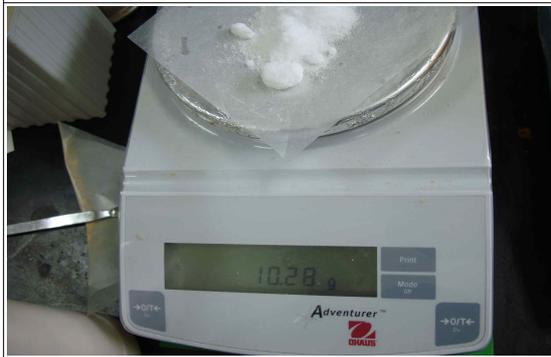
(6) 멸균기를 이용하여 15분간 멸균을 실시한다.



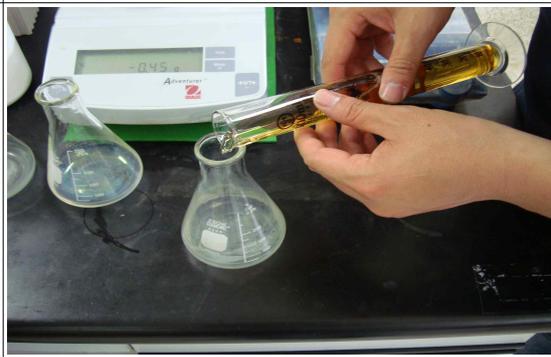
1. 증류수 500ml를 비커넣음



2. 영양배지 0.8%를 넣고 비커에 섞음



3. 우레아제 2%를 넣고 비커에 섞음



4. 삼각플라스크에 각각 나누어서 담음



5. 삼각플라스 두경을 막고 호일로 감음



6. 멸균기를 이용하여 멸균함

그림 3.7 미생물 배양배지 만드는 방법

다음은 미생물 배양에 실질적으로 사용되는 계대배양방법(100ml 기준)으로 그림 3.8과 같으며, 세부적인 실험방법은 아래와 같다.

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



1. 인큐베이터에서 미생물 용액을 가져옴

2. 1ml를 스포이드로 맞춤

3. 1ml를 계대배양 시킴

4. 인큐베이터에 넣음

그림 3.8 계대배양방법

### 3.4.2 고농도 처리

고농도 처리에 사용하는 미생물 배양방법은 기존의 일반농도 처리에 사용되는 미생물 용액과 동일한 방법으로 제작되나, 실험에 사용되는 미생물 양에서 차이가 있다. 고농도 처리에 사용되는 미생물은 일반농도 처리에 사용되는 미생물의 약 40배 정도이며, 실험에 추가적으로 원심분리기가 사용된다. 고농도 처리에 사용되는 미생물 배양방법은 크게 세 가지로 나누어지며, 배양배지를 만드는 방법과 계대배양방법, 그리고 원심분리기를 통한 고농축 미생물 추출 방법으로 나누어진다. 배양배지와 계대배양방법은 앞서 언급한 일반농도 처리방법과 실험방법은 동일하나, 시험에 사용할 배양배지는 1L의 미생물 용액이 들어있는 플라스크가 이용된다는 점이다. 시험에 사용할 원심분리기는 일정 속도의 rpm을 주는 시험 기계로써, 미생물과 요소를 분리하여 고농도의 미생물 용액을 얻을 수 있게 한다. 원심분리기를 이용한 실험방법을 정리해보면은 그림 3.9과 같으며, 세부적인 실험방법은 아래와 같다.

- (1) 2L의 미생물 용액을 실험에 사용할 원심분리기 통에 각각 1L씩 각각 나누어 담는다.
- (2) 1L씩 나누어진 원심분리기 통을 저울을 달아 동일한 무게로 맞춘다.(원심분리기 시험기 이용 시 무게가 맞지 않을 경우 기계 고정의 원인을 가지고 올 수 있으므로 반드시 동일한 무게로 맞추어서 실험을 실시해야 한다.)
- (3) 원심분리기에 필요한 장비를 기계에 맞게 설치한다.
- (4) 6000 rpm으로 10분간 설정하여 원심분리를 실시한다. (rpm 속도의 기준이 정해진 것은 없으나, 대개 6000 rpm 이상으로 사용할 경우 고농도의 미생물을 얻을 수 있다.)
- (5) 원심분리기를 통해서 분리된 배양배지 용액은 다른 비커에 담고 뭉쳐진 고농축 미생물에 25ml의 배양 배지액을 뿌려서 뭉쳐진 미생물이 용액에 골고루 섞이게 한다.
- (6) 고농도 미생물과 섞여진 용액은 다른 플라스크에 스포이드를 이용하여 25ml를 담는다.



1. 2L의 미생물을 1L씩 원심분리기 통에 넣음.



2. 저울을 이용하여 수평을 맞춤.



3. 원심분리기에 필요한 장비를 설치함.



4. 6000 rpm으로 10분간 설정하여 원심분리를 실시함.



5. 뭉쳐진 미생물에 25ml의 배양 배지액을 뿌려 섞음.



6. 고농도 미생물과 섞여진 용액을 25ml를 담음.

그림 3.9 원심분리기를 이용한 실험방법

## 3.5 시험용기 및 시험시료 배합비

### 3.5.1 시험용기

미생물을 이용한 흙의 고결화(Cementation)의 중요한 변수는 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.

이에 본 연구에서는 1:2의 비율에 맞추어 용기를 제작하여 사용하였으며, 실험을 통해 고결화 정도를 확인하고자 하였다. 실험된 사용된 용기는 직경 5.5cm, 높이 12cm의 원형 용기로써 직경 대 높이의 비율이 1:2 이상이다. 시험용기는 투명 아크릴로 제작되었으며, 실질적으로 이루어지는 미생물 반응을 유관상으로 확인하고자 하였다. 또한 수분 증발을 막기 위해 용기에 시료를 넣고 뚜껑을 막았으며, 미생물 호흡을 위해 용기 상단에 5mm의 공기구멍을 만들었다. 시험에 사용할 용기의 그림은 그림 3.10과 그림 3.11과 같다.

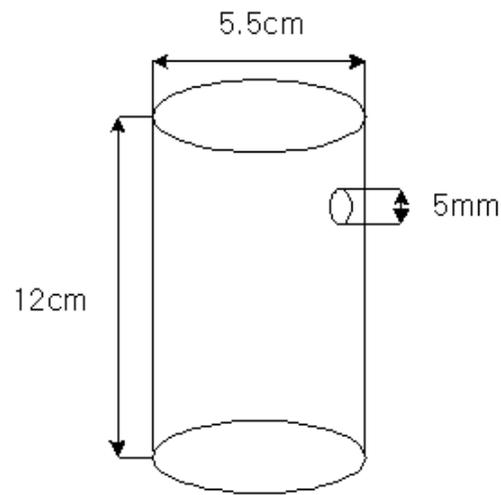


그림 3.10 시험용기 입체모형도



그림 3.11 시험용기

### 3.5.2 모래의 상대밀도와 점토의 상대 다짐도

모래 지반의 연약정도는 상대밀도( $D_r$ )로 표시되며, 일반적으로 상대밀도가 40%이하 일 경우 연약지반으로 간주한다. 이러한 모래 지반은 (한국지반공학회 시리즈 “연약지반”을 보면) 실제 현장에서 표준관입시험을 통하여 그 지반의 연약 정도 및 여러 가지 정수들을 추정하는데 N 값이 4이하이면 대단히 느슨한 모래 지반으로 나타내며, 10이하이면 느슨한 모래지반이라고 말한다. Terzaghi와 Peck은 모래 지반의 경우, 표준 관입시험에 의한 N 값과 상대밀도의 관계를 표 3.3과 같이 제안하였으며, 다음과 같이 나타내었다.

표 3.3 N값과 모래의 상대밀도

N값	지반의 상태	상대밀도(%)
0 ~ 4	대단히 느슨한 상태	0 ~ 20
4 ~ 10	느슨한 상태	20 ~ 40
10 ~ 30	보통	40 ~ 60
30 ~ 50	조밀한 상태	60 ~ 80
50이상	대단히 조밀한 상태	80 ~ 100

점토 지반은 (지반공학시리즈 “연약 지반”에 의하면) 일축압축강도, 콘 관입시험, 베인시험 및 표준관입시험 등의 결과로부터 연약정도는 일축압축강도( $q_u$ )가  $0.5\text{kgf/cm}^2$  이하인 점토는 연약점토로, 일축압축강도가  $0.25\text{kgf/cm}^2$  이하이면 대단히 연약한 점토라고 말한다. 표준관입시험을 수행하였다면 N값이 4이하 일 때 연약한 점토, N값이 2 이하 일 때 대단히 연약한 점토가 된다. 그러나 점토지반에서 측정된 N 값은 전단강도 및 연약한 점토를 판단하는데 개략적인 추정치만을 제공하므로 실제 설계 적용시에는 신중하게 검토하여야 한다. 표 3.4는 점토에 대한 연약지반 판정을 나타내었으며, 다음과 같다.

표 3.4 점토에 대한 연약지반 판정

굳기	N 값	일축압축강도, $q_u$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )
대단히 연약	< 2	< 0.25
연약	2~4	0.25~0.5
중간	4~8	0.5~1.0
견고	8~15	1.0~2.0
대단히 견고	15~30	2.0~4.0
고결	> 30	> 4.0

또한 다짐도는 실내다짐시험에서 얻은 최대건조단위중량( $r_{d(\max)}$ )에 대한 현장 건조단위중량( $r_d$ )의 비를 백분율로 나타낸 것으로 아래 3.1 식과 같은 식으로 나타낸다.

$$\text{다짐도}(R_c) = \frac{\text{현장에서 시공으로 얻은 건조단위중량}(r_d)}{\text{실험실에서 얻은 최대건조단위중량}(r_{d\max})} \times 100 \quad (3.1)$$

대부분의 현장 다짐 시방서에서는 다짐도 90~95% 이상으로 요구하여 시공을 한다. 중요한 공사 혹은 대규모 공사의 경우에는 시험 다짐 구간을 설정하여 다짐방법을 결정하며, 다짐을 받는 동안 흙의 건조단위중량은 롤러의 통과횟수에 영향을 받는다.

본 연구에 사용된 시료는 느슨한 모래와 실트이며, 무처리, 일반농도 처리, 고농도 처리로 각각 구분하여 실험을 실시하였으며, 모래의 경우 연약지반과 동일한 상태를 재현하기 위해서 상대밀도( $D_r$ ) 40%를 맞추어 실험을 실시하였으며, 실트의 경우 일반 공사현장과 비교해 볼 때 연약한 상태의 재현을 위해서 상대 다짐도( $R_c$ )를 70%로 맞추어서 실험을 실시하였다.

### 3.5.3 시험 시료 배합비

#### 3.5.3.1 모래 시험 시료 배합비

본 연구에 사용된 모래시험시료의 배합비는 다짐시험을 통해 얻어진 최적 함수비 14.92% 기준으로 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액을 첨가하였고, 상대밀도 40%를 맞추어 시험을 실시하였다.

시험에 사용된 상대밀도 산정식은 다음과 같다.

① 상대밀도( $D_r$ )의 산정

$$D_r = \frac{e - e_{\min}}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100$$

$e_{\max}$ 는  $\gamma_{d(\min)}$ 을 이용하여 구할 수 있으며,  $\gamma_{d(\min)}$ 을 산정하기 위해서 습윤모래를 10cm 높이에서 자유 낙하시켜 시험용기를 가득 채운 후 무게( $W$ )를 측정 하였으며, 무게( $w$ )를 용기의 체적( $V$ )로 나눈 값으로 다음과 같이  $\gamma_{t(\min)}$ 을 산정하였다.

실험방법은 KS F 2345을 참조하여 실시하였으며 시험방법은 다음과 같으며, 세부적인 실험방법은 다음과 같다.

- ① 건조된 시료를 입자 크기별로 분리기 일어나지 않도록 잘 섞는다.
- ② 튜브의 크기는 몰드의 크기 선택에 따라 좌우된다. 튜브의 부피는 몰드 부피의 1.25~1.30배이어야 하고 내부 지름은 몰드 내부 지름의 0.7배 정도이어야 한다.
- ③ 몰드 내에 튜브를 위치시키고 채움 장치, 스퀴프 또는 스푼으로 튜브 안에 시료를 넣고 채운다. 채우는 동안 시료의 분리가 최소화되도록 주의한다. 몰드 윗면으로 넘쳐 흐르는 높이가 3mm ~ 6mm 사이가 되도록 채운다.
- ④ 시료가 몰드를 넘쳐 흐르도록 튜브를 들어 올린 후, 여분의 시료를 몰드의 윗면과 수평을 이루도록 조심스럽게 제거한다.
- ⑤ 몰드와 흙의 질량을 측정하고 기록한 후, 빈 몰드의 질량을 고려하여 시료의

질량을 계산하고 기록한다.

- ⑥ 횡수별 최소 밀도 및 단위 질량값이 1% 이내가 될 때까지 위와 같은 단계를 반복한다.

그림 3.12은 모래 시료의 최소건조 단위중량을 구하는 방법을 사진으로 나타내고 있다.



그림 3.12 모래 시료  $r_{d(\min)}$  산정 방법

- ②  $\gamma_{t(\min)}$ 의 산정

$$\gamma_{t(\min)} = \frac{W}{V} = \frac{511.11}{285.12} = 1.79 \text{ g/cm}^3$$

$\gamma_{t(\min)}$ 을 산정 한 후 OMC를 이용하여  $\gamma_{d(\min)}$ 을 산정하였다.

- ③  $\gamma_{d(\min)}$ 의 산정

$$\gamma_{d(\min)} = \frac{\gamma_{t(\min)}}{1+w} = \frac{1.79}{1+0.1492} = 1.56 \text{ g/cm}^3$$

$\gamma_{d(\min)}$ 을 산정 한 후 이미 알고 있는  $G_s$ 를 통해서  $e_{\max}$ 를 구할 수 있으며,  $e_{\max}$ 를 구하는 식은 아래와 같다.

④  $e_{\max}$ 의 산정

$$e_{\max} = \frac{G_s}{\gamma_{d(\min)}} - 1$$

$e_{\max}$ 를 구하기 위해서  $G_s$  2.67 과  $\gamma_{d(\min)}$  1.56을 대입해서 풀면 다음과 같이  $e_{\max}$  0.71을 구할수 있다.

$$e_{\max} = \frac{2.67}{1.56} - 1 = 0.71$$

다음으로  $e_{\min}$ 의 산정을 보면  $\gamma_{d(\max)}$ 를 통해서 구할 수 있다.

이미 다짐시험을 통해서 얻어진  $\gamma_{d(\max)}$  1.608 g/cm<sup>3</sup> 와  $G_s$  2.67를 이용하여 대입해 풀면은 다음과 같이  $e_{\min}$  0.66을 구할 수 있다.

⑤  $e_{\min}$ 의 산정

$$e_{\min} = \frac{G_s}{\gamma_{d(\max)}} - 1 = \frac{2.67}{1.608} - 1 = 0.66$$

이제 상대밀도 산정식을 이용하여  $e$ 를 구하면 다음과 같이  $e = 0.68$ 를 얻을 수 있다.

⑥  $e$ 의 산정

$$D_r = \frac{e - e_{\min}}{e_{\max} - e_{\min}} = \frac{e - 0.66}{0.71 - 0.66}$$

$$e - 0.66 = 0.02 \quad \therefore e = 0.68$$

여기서 시험에 사용 할 시료의 양을 산정하기 위해서  $\gamma_d$ 를 구하면 다음과 같다.

⑦  $\gamma_d$ 의 산정

$$\gamma_d = \frac{G_s}{e} = \frac{2.67}{1.68} = 1.59 \text{ g/cm}^3$$

여기서  $\gamma_t$ 를 구하면 다음과 같다.

⑧  $\gamma_t$ 의 산정

$$\gamma_t = 1.59 \times (1 + 0.1492) = 1.83 \text{ g/cm}^3$$

$\gamma_t$ 까지 구한 후 시험용기에 사용 할 모래의 양을 산정한다.

본 시험에서는 용기의 70%를 채워서 실험을 실시하였으며. 특별히 시험용기의 70%를 사용하는 이유는 미생물이 호흡할 수 있는 공간을 확보하여 30%의 여유 공간으로 산소가 존재할 수 있게 하기 위해서이며, 용기 상단의 산소이동을 위해서 5mm의 구멍을 뚫어두었다.

시료의 70%에 해당되는 체적은 아래와 같이 산정된다.

⑨ 시료 70%에 해당되는 체적

$$V = \frac{\pi \times 5.5^2}{4} \times 8.4 = 199.57 \text{ cm}^3$$

그 후 70% 해당하는  $\gamma_d$ 를 이용하여  $w_d$ 를 산정하면 다음과 같다.

⑩ 시료 70%에 해당되는  $w_d$ 의 산정

$$\gamma_d = \frac{W_d}{V} \Rightarrow 1.59 = \frac{W_d}{199.57} \quad \therefore W_d = 317.32 \text{ g}$$

따라서, 시험에 사용 할 건조된 흙 시료의 양은 317.32g을 구할 수 있다.

미생물 반응실험에 필요한 물의 양 산정을 위해선  $\gamma_t$ 를 알아야 하므로  $\gamma_t$ 를 이용하여  $W$ 를 다음과 같이 구한다.

⑪ 시료 70%에 해당되는  $W$ 의 산정

$$\gamma_t = \frac{W}{V} \Rightarrow 1.83 = \frac{W}{199.57}$$

$$\therefore W = 365.21 \text{ g}$$

⑫ 필요한 물의 양 산정

따라서, 필요한 물의 양  $47.89g$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W - W_d = 365.21g - 317.32g = 47.89g$$

⑬ 미생물 사용량 산정 및 염화칼슘량 산정

이에 미생물 사용량을 50%을 산정해 보면 다음과 같다.

$$47.89 \times 0.5 = 23.945g$$

계산결과  $23.945g$ 이 나왔으나 이를 반올림하여  $24g$ 을 사용하였으며,

염화칼슘( $CaCl_2$ )의 양도 동일한 양인  $24g$ 을 사용하여 1:1 비율을 사용하였다.

이러한 배합비는 오(2008)방법에서 사용되었던 배합비와 비교 해보면

미생물용액+ 침강제 실험에서 사용된 배합비와 동일한 비율인 1:1을 방법을

사용하였으나, Mixing 시 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 한꺼번에 섞었는지 따로 섞었는지에 구체적인 언급이 되지 않아, 실험방법에 다소 차이가 있다.

본 연구에서는 미생물 용액과 염화칼슘을 따로따로 흡에 섞어 적용하는 방법을

사용하였다. 또한 Dejong(2006)에서 삼축시료 준비를 통한 배합비에 대해서

구체적으로 언급되지는 않았으나, 미생물과 염화칼슘이 1:1의 비율로 반응한다고 가정

했을 때 탄산칼슘이 생성될 수 있는 최대 양을 1:1의 비율로 가정하고 실험에서는

미생물용액과 염화칼슘 용액의 비율을 1:1로 설정하여 사용하였다. 이에 본

연구에서는 탄산칼슘 양을 최대로 얻기 위해서 1:1의 비율로 시험을 실시하였으며,

실험에 사용된 모래 시험 시료 배합비는 표 3.5과 같으며 시료에 염화칼슘 용액과

미생물 용액을 각각  $24g$ 씩 첨가하였다.

표 3.5 모래 시험 시료 배합비

(단위: g)

시료	재령일	Soil	염화칼슘 용액	미생물 용액	물
모래	무처리 7일	317.32	-	-	48
	일반농도 처리 3일	317.32	24	24	-
	일반농도 처리 7일	317.32	24	24	-
	일반농도 처리 14일	317.32	24	24	-
	일반농도 처리 28일	317.32	24	24	-
	고농도 처리 7일	317.32	24	24	-
	고농도 처리 14일	317.32	24	24	-

### 3.5.3.2 실트 시험 시료 배합비

본 실험에 사용 된 실트 시험 시료 배합비는 상대다짐도( $R_c$ ) 70%를 기준으로 사용 되었으며, 상대 다짐도를 산정하는 식은 다음과 같다.

① 상대 다짐도 산정식

$$\text{상대다짐도}(R_c) = \frac{\text{현장시공으로 얻은 건조단위중량}(\gamma_d)}{\text{실험실에서 얻은 최대 건조단위중량}(\gamma_{d(\max)})} \times 100$$

앞서 다짐시험을 통해서 다짐곡선으로부터  $\gamma_{d(\max)}$  1.328 g/cm<sup>3</sup>와 OMC 11.6%를 얻었다. 이에  $\gamma_d$ 를 산정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

②  $\gamma_d$ 의 산정

$$0.70 = \frac{\gamma_d}{1.328}$$

$$\therefore \gamma_d = 0.93 \text{g/cm}^3$$

$\gamma_d$ 를 통해서  $\gamma_t$ 를 산정하면 다음과 같다.

③  $\gamma_t$ 의 산정

$$\gamma_t = 0.93 \times (1 + 0.116) = 1.049 \text{ g/cm}^3$$

$\gamma_t$ 를 구한 후 시험 용기에 사용할 실트의 양을 산정한다.

본 시험에서는 용기에 시료 70%를 채워서 실험을 실시하였으며, 특별히 시험용기의 70%를 사용하는 이유는 미생물이 호흡할 수 있는 공간을 확보하여 30%의 여유 공간으로 산소가 존재할 수 있게 하여 미생물이 생존할 수 있게 하기 위해서이며, 용기 상단이 산소이동을 위해서 5mm의 구멍을 뚫어 두었다.

시료의 70%에 해당되는 체적은 아래와 같이 산정한다.

④ 시료 70%에 해당되는 체적의 산정

$$V = \frac{\pi \times 5.5^2}{4} \times 8.4 = 199.57 \text{ cm}^3$$

그 후 70%에 해당하는  $\gamma_d$ 를 이용하여  $W_d$ 를 산정하면 다음과 같다.

⑤ 시료 70%에 해당되는  $W_d$ 의 산정

$$\gamma_d = \frac{W_d}{V} = \frac{W_d}{199.57} = 0.93$$

$$\therefore W_d = 185.6 \text{ g}$$

따라서, 시험에 사용할 흙 시료의 양은 185.6g을 사용하였다

미생물 반응 실험에 필요한 물의 양 산정을 위해선  $\gamma_t$ 를 알아야 하므로  $\gamma_t$ 를 이용하여  $W$ 를 다음과 같이 구한다.

⑥ 시료 70%에 해당되는  $W$ 의 산정

$$\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{W}{199.57} = 1.04$$

$$\therefore W = 207.55 \text{ g}$$

따라서 필요한 물의 양  $21.95g$ 을 구할 수 있다.

⑦ 필요한 물의 양

$$W - W_d = 207.55 - 185.6 = 21.95g$$

이에 미생물 사용량을 50%을 산정 해 보면 다음과 같다.

⑧ 필요한 미생물량 및 염화칼슘양 산정

$$21.95 \times 0.5 = 10.975g$$

계산 결과  $10.975g$ 이 나왔으나, 이를 반올림하여  $11g$ 을 사용하였으며, 염화칼슘 ( $CaCl_2$ )의 양도 동일한 양인  $11g$ 을 사용하여 1:1을 사용하였다. 이러한 배합비는 오종신(2008)방법에서 사용되었던 배합비와 비교 해보면 미생물용액+ 침강제 실험에서 사용된 배합비와 동일한 비율인 1:1을 방법을 사용하였으나, Mixing 시 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 한꺼번에 섞었는지 따로 섞었는지에 구체적인 언급이 되지 않아 실험방법에 다소 차이가 있다.

본 연구에서는 미생물 용액과 염화칼슘을 따로따로 섞어 흡에 적용하는 방법을 사용하였다. 또한 Dejong(2006)에서 삼축시료 준비를 통한 배합비에 대해서 구체적으로 언급되지는 않았으나, 미생물과 염화칼슘이 1:1의 비율로 반응한다고 가정했을 때 탄산칼슘이 생성될 수 있는 최대 양을 1:1의 비율로 가정하고 실험에서는 미생물용액과 염화칼슘 용액의 비율을 1:1로 설정하여 사용하였다. 이에 본 연구에서는 탄산칼슘 양을 최대로 얻기 위해서 1:1의 비율로 시험을 실시하였으며, 실험에 사용된 실트 시험 시료 배합비는 표 3.6과 같으며, 시료에 염화칼슘 용액과 미생물 용액을 각각  $11g$ 씩 첨가하였다.

표 3.6 실트 시험 시료 배합비

(단위: g)

시료	재령일	Soil	염화칼슘 용액	미생물 용액	물
실트	무처리 7일	185.6	-	-	22
	일반농도 처리 3일	185.6	11	11	-
	일반농도 처리 7일	185.6	11	11	-
	일반농도 처리 14일	185.6	11	11	-
	일반농도 처리 28일	185.6	11	11	-
	고농도 처리 7일	185.6	11	11	-
	고농도 처리 14일	185.6	11	11	-

## 3.6 미생물 용액, 염화칼슘 첨가에 따른 반응 실험

### 3.6.1 미생물 용액, 염화칼슘 첨가에 따른 반응 실험

미생물로 처리된 용액을 느슨한 모래, 실트에 적용하여 고결화 가능성을 살펴 보았으며, 재령일(7일, 14일, 28일)에 따른 강도를 포켓관입시험기를 이용하여 측정하였고, 전자현미경(SEM) 분석 및 XRD 시험을 실시하여 입자와 입자간의 미생물 작용으로 탄산칼슘 고결화 가능성을 확인하였다. 시험에 사용된 모래 및 실트는 110°C에서 24시간 멸균되어졌다. 또한 실험에 사용된 염화칼슘( $CaCl_2$ ) 용액의 농도는 0.75M(Mol)을 사용했으며, 이는 선행연구를 통해 밝혀진 Dejong(2006) 등이 사용했던 25.2mM의 염화칼슘( $CaCl_2$ ) 용액보다 더 많은 양이 사용되었으며, 이는 탄산이온과 반응하는 염화칼슘 양을 늘리기 위해서 이와 같이 사용하였다. 미생물 반응을 통해서 생성된 탄산칼슘( $CaCO_3$ ) 생성량은 미생물 성장을 통해서 생성된 탄산이온( $CO_3^{2-}$ )과 염화칼슘( $CaCl_2$ )에 녹아있는 칼슘이온( $Ca^{2+}$ ) 반응의 양이라고 할 수 있다. 즉, 적은 양의 염화칼슘( $CaCl_2$ )의 양이 아닌 많은 양의 염화칼슘( $CaCl_2$ )이 물에 녹아 있을 때 칼슘이온( $Ca^{2+}$ )이 많이 발생되어 탄산이온( $CO_3^{2-}$ )과 반응하여 최대의 반응을 보일 수 있는 것이다. 이에 본 실험에서는 탄산이온( $CO_3^{2-}$ )과 반응할 수 있는 염화칼슘( $CaCl_2$ ) 적정량을 0.75M로 만들어 실험에 사용하였다. 또한 시험에 사용된 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액은 최적함수비를 기준으로 하여 사용하였고, 시험 배합비는 표 3.5 및 표 3.6과 같이 사용하였으며, 미생물 용액과 염화칼슘 용액의 양은 각각 50%씩 사용하였다. 시료 제조방법은 두 가지 방법을 사용하였으며, 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 각각 따로 흙에 섞는 방법 및 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 섞은 후 한꺼번에 흙에 섞는 방법을 사용하였다. 또한 재령일(7일, 14일, 28일)에 따른 강도 증가 정도를 파악하기 위해 포켓관입시험기를 이용하여 지반의 강도를 측정하였고, 탄산칼슘 생성 정도 확인을 위해 전자현미경(SEM) 분석 및 X-회절 분석 시험을 실시하였다. 또한 시료의 함

수량 차이 정도를 파악하기 위해서 각각의 재령일(7일, 14일, 28일)에 따른 함수비 변화를 측정하였다. 아래 그림 3.13은 모래, 실트 반응 실험 사진을 나타낸 것으로 다음과 같다.



그림 3.13 일반농도 처리 및 고농도 처리에 따른 실트, 모래 반응 실험

### 3.6.2 미생물 용액 및 염화칼슘 용액을 흡에 섞는 방법

미생물 용액, 염화칼슘 용액을 흡에 섞는 방법은 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 우선, 첫 번째로 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 따로 흡에 각각 섞는 방법과 두 번째로 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 섞은 후 한꺼번에 흡에 섞는 방법이다. 그러나 첫 번째 방법의 경우에는 흡에 미생물 용액을 섞고 다시 염화칼슘 용액과 섞어지게 되

므로 실질적으로 두 번째 방법보다 탄산칼슘의 생성량이 적게 발생되므로, 실험 시에는 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 한꺼번에 섞는 방법을 추천한다. 본 연구에서는 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 따로 섞는 방법과 한꺼번에 섞는 방법을 각각 실시하였으며, 두 실험방법에 대한 결과에 대해서 각각 비교하였다.

## 3.7 메커니즘 분석 방법 및 장비

### 3.7.1 전자현미경(Scanning Electron Microscope)의 원리 및 특징

#### 3.7.1.1 전자현미경의 원리

전자현미경(Electron Microscope)(백태선, 주사전자현미경(SEM) 2003)은 광학현미경(Light Microscope)에서 사용하는 가시광선(Visible Rays) 대신 전자선(Electron Beam)을, 또한 유리렌즈(Glass Lens) 대신에 전자렌즈(Electron Lens)를 사용하여 물체의 확대 상을 만드는 장치를 말한다. 전자현미경은 광선 대신에 전자 빔을 사용하기 때문에 현미경의 내부는 진공상태여야 하다. 전자는 공기와 충돌하여 에너지가 소실되거나 굴절되는 등 원하는 대로 제어하기 어렵기 때문이다. 전자현미경은 표본과 대물렌즈와 렌즈 사이의 거리는 일정하지만 중간렌즈와 투영렌즈의 코일에 통하는 전류의 세기에 의해 배율이 결정되며, 상의 초점은 대물렌즈의 코일에 흐르는 전류에 의해 조절된다. 광학 현미경은 실제의 상을 볼 수 있지만 전자현미경은 형광관이나 사진관을 통해 상을 볼 수 있다. 광학현미경은 표본의 빛을 흡수/반사함으로써 상이 형성되는 반면, 전자현미경에서는 전자선이 시료의 표면에 충돌하면서 발생하는 이차 전자, 산란전자, 투과전자, X-Ray 등을 측정하여 표면의 형태를 영상으로 나타낸다.

#### 3.7.1.2 전자현미경의 특징

최근 정보기기들의 극소화 추세뿐만 아니라 첨단 소재 분야에서도 극 미세 기술의 산업화로 인해 미세구조물 또는 재료의 표면형상에 대한 정보를 절실히 요구되고 있다. 특히, 1990년대 후반부터 전 세계적으로 나노연구가 활발해지면서 나노물질의 구조와 특성을 규명하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있으며, 전자현미경은 그 중의

한 축을 담당하고 있다. 전자현미경은 높은 에너지의 전자빔을 이용하여 전자가 시편과 충돌할 때 발생하는 이차전자, 반산전자, X-선 등을 검출하여 확대상을 촬영하는 장치이다. 전자현미경의 특징을 살펴보면 첫째, 분해능이 높기 때문에 고배율로 물체를 관찰할 수 있다. 열방사형 SEM은 10만배 이상(분해능: 3~5nm), 전계방사형 SEM(FE-SEM)은 최대 100만배(분해능: 1~2nm)까지 확대상을 얻을 수 있다. 둘째, SEM은 고배율 뿐 아니라 10~100배의 저배율 관찰에도 사용할 수 있다. SEM은 렌즈를 교환하지 않고 단지 코일에 흐르는 전류를 변화시켜 배율을 조절할 수 있기 때문이다. 일반적으로 저배율에서 넓은 면적을 관찰한 후 관심 있는 미세영역을 고배율로 관찰한다. 셋째, 전자현미경은 광학현미경과 달리 피사계 심도가 대단히 깊다. 피사계 심도란 관찰 대상물의 확대영상에서 초점이 맞는 깊이 범위를 말한다. SEM 영상은 이차원 데이터임에도 불구하고 마치 3차원 이미지와 유사하여 물체를 훨씬 정확하게 관찰할 수 있다. 따라서 SEM은 요철이 심한 파단면의 관찰이나 표면조도가 큰 시료를 관찰하는데 유리하다. 넷째, 최근 SEM은 디지털 영상을 제공하기 때문에 영상의 저장은 물론 영상에 대한 다양한 분석이 가능하다. 다섯째, 다양한 검출기 및 주변기기를 정착하여 응용분야를 확장할 수 있다. 특히 X선 분광분석기(EDS)는 짧은 시간에 미세 영역의 성분을 분석할 수 있기 때문에 이차전자 검출기와 함께 필수적 검출기법이 되고 있는 추세이다.

## 3.7.2 X-회절분석(XRD) 시험

### 3.7.2.1 X-선의 발생 및 성질

X-선(“주사 전자현미경 분석과 X선 미세분석” 윤준도, 청문각, 2005)은 고속의 전자가 무거운 원소의 원자에 충돌할 때 발생한다. 가열된 음극 Filament로부터 나온 열전자는 양극표적을 향해서 가속된다. 이때 전자의 중속도는 전자가 얻은 운동에너지가 전기장에 의해서 전자에 한일과 같다고 놓음으로써 계산할 수 있다. 이 전자의 운동에너지는 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, W 등이 사용된다. 표적에 도달한 고속의 전자는 원자핵의 Coulomb장형으로 방사하는데 이것이 X-선이다. 이 X-선은 보통 연속적인 파장을 가지고 있기 때문에 연속 X-선 혹은 제동 X-선이라 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 에너지차에 의해 주어지는 특정한 파장을 가진다. 그러므로, 이 X-ray를 특성 X-선이라 부른다.

### 3.7.2.2 X-선 회절실험의 특징

- ① 시료에 대한 제한이 적고, 시료를 파괴함이 없이 측정가능하고, 측정시간은 수십 분정도이다. 시료는 금속, 합금, 무기화합물, 암석광물, 유기화합물, 폴리머, 생체재료 등 무엇이든 가능하고, 결정질 및 비결정질재료 모두 측정가능하고, 분말시료든지 판상, 액체, 리본, Thin Film 시편에 대해서도 측정 가능하다.
- ② 물질의 정성분석 가능성이 가능하다. 물질의 결정구조와 화합형태가 다르면 회절패턴에 형태가 변화된다. 따라서, 표준물질의 데이터 파일과 대조해서(JCPDS

Card이용) 물질을 구별할 수 있다.

- ③ 격자상수를 정밀하게 구한다. 결정의 면 간격을 정확히 측정하는 일이 가능하고 구조를 미리 알고 있으면 격자상수를 정밀하게 구할 수 있다.
- ④ 미소결정의 크기를 구할 수 있다. 회절선의 폭을 측정해서 평균 입자크기가 50~200 Å인 미소 결정의 크기를 구할 수 있다.
- ⑤ 결정성의 좋고 나쁨을 조사할 수 있다. 비결정성 재료는 무정형의 회절패턴을 나타낸다.
- ⑥ 결정의 배향성을 조사할 수 있다.
- ⑦ 결정내부의 변형을 측정할 수 있다.
- ⑧ 혼합물과 화합물을 쉽게 구별할 수 있다. 혼합물의 회절패턴은 시료를 구성하고 있는 각 화합물의 회절패턴을 중첩시킨 것으로 나타난다.
- ⑨ 고용에 의한 격자의 팽창 및 수축정도를 알아낼 수 있다. 격자상수를 정밀하게 측정함으로써 알아낼 수 있으며, 고온에서 측정하면 열팽창 값을 구할 수 있다.
- ⑩ 회절선의 강도를 측정해서 각 성분의 정량분석을 할 수 있다. 미량으로 들어 있는 물질의 검출은 곤란하며, 비정질의 경우는 더욱 어렵다. 또 시료가 배향되어 있는 경우에는 오차가 크다.
- ⑪ 결정구조 해석이 용이하다. 개략적인 구조를 알고 있는 경우는 이 회절 패턴을 정밀하게 측정해서 결정구조를 해석하는 일이 가능하다.
- ⑫ 실험조작이 용이하다. 실험조작이 용이해서 초보라도 간단하게 회절패턴을 얻을 수 있다.

## 제 4 장 실험결과 및 고찰

### 4.1 미생물 반응을 통한 함수비의 차이

미생물을 이용한 반응실험은 최적함수비(OMC)를 기준으로 시료에 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 첨가하여 시료를 만들었다. 아래 표 4.1, 4.2는 모래 및 점토의 함수비 변화를 나타낸 것이다.

표 4.1 모래의 함수비 변화 정도

종류	시험 전 (g)	시험 후 (g)	용기무게 (g)	함수비(%)
무처리	-	-	-	14.92
무처리 7일	84.0	78.6	28.3	10.74
일반농도 처리 7일	102.8	94.5	26.2	12.15
일반농도 처리 14일	117.7	108.5	24.5	10.95
일반농도 처리 28일	135.2	125.6	28.5	9.89
고농도 처리 7일	66.5	62.1	25.7	12.09
고농도 처리 14일	73.4	69.1	26.3	10.05

표 4.2 실트의 함수비 변화 정도

종류	시험 전 (g)	시험 후 (g)	용기무게 (g)	함수비(%)
무처리	-	-	-	11.6
무처리 7일	62.8	59.5	24.5	9.5
일반농도 처리 7일	70.1	66.3	28.4	10.03
일반농도 처리 14일	74.2	70.1	26.1	9.31
일반농도 처리 28일	68.9	65.3	26.4	8.61
고농도 처리 7일	43.2	41.5	24.2	9.83
고농도 처리 14일	54.2	51.8	25.1	8.99

표 4.1에서 알 수 있듯이 모래의 경우 무처리 7일의 함수비는 10.74%, 일반농도 처리 7일의 경우 12.15%, 고농도 처리의 경우 12.09%로 각각의 함수비 변화에 있어서 차이는 미미한 것으로 나타났다. 실트의 경우도 표 4.2에서 알 수 있듯이 무처리 7일의 경우 함수비는 9.5%, 일반농도 처리의 경우 함수비는 10.03%, 고농도 처리의 경우 함수비는 9.83%로 각각 나타났으며, 시험 결과 재령일에 따른 함수비의 감소로 인한 흡의 강도의 증가에는 영향이 적은 것으로 판단된다.

## 4.2 고결화 강도 측정 결과

### 4.2.1 미생물 용액, 염화칼슘 용액 반응 실험

미생물 용액과 염화칼슘 용액의 반응 결과는 그림 4.1과 같이 반응되어 하얀색 침전물이 생기며, 미생물 용액에서 생성된 탄산이온과 염화칼슘 용액에서 생성된 칼슘이온이 각각 결합하여 탄산칼슘이 생성되었다.



그림 4.1 미생물 용액과 염화칼슘 용액의 반응 실험

#### 4.2.2 미생물 반응을 통한 흙의 변화

미생물 반응 실험 결과를 통해 뚜렷한 흙의 고결화는 찾아볼 수는 없었으나, 미생물로 처리된 시료(고농도 처리 7일)를 110°C로 24시간 건조시킨 후 살펴본 결과 흙에 미세하게나마 응집효과가 나타났음을 확인할 수 있었다. 이러한 흙의 응집 효과는 가벼운 충격에 허물어지지 않는았으나, 포켓관입시험기를 이용해 강도 측정을 하기에는 그만큼의 지지력이 존재하지 않았으며, 실험결과 흙 자체가 느슨함을 확인할 수 있었다. 그림 4.2는 무처리 7일 모래 시료를 110°C로 24시간 건조시킨 후 살펴본 결과를 나타낸 것으로 응집효과가 전혀 나타나지 않았음을 알 수 있으며, 그림 4.3는 고농도 7일 시료를 상온에서 110°C로 24시간 건조시킨 후 살펴본 결과를 나타낸 그림으로 미세하게 응집효과가 나타났음을 확인할 수 있다.



그림 4.2 미생물 반응 실험(무처리 7일)을 통한 흙의 변화



그림 4.3 미생물 반응 실험(고농축 7일)을 통한 흙의 변화

### 4.2.3 포켓관입시험기 시험 결과

본 연구에서는 미생물 반응 실험을 통해서 미생물 용액, 염화칼슘 용액을 시료에 각각 첨가하여 고결화(Cementation) 가능성을 알아보기 위해서 시험을 실시하였다. 시료에 첨가된 함수량은 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 1:1로 섞어 최적 함수비(OMC)를 상태로 시료에 첨가하였으며, 각 양생일이 경과된 시료의 함수량을 측정하였다.

시험결과 포켓 관입 시험기를 이용하여 지반의 강도를 측정하였으나, 포켓관입시험기로 측정할 수 있는 최소 측정강도가  $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 실질적으로 지반을 측정할 때 지반을 지지할 정도의 강도가 나오지 않았다. 이것으로 실트의 경우 대단히 연약 지반이라고 할 수 있으며, 모래의 경우에도 대단히 느슨한 상태라고 할 수 있다. 강도 증진을 위해서는 차후 표준량의 미생물이 아닌 고농도 이상의 미생물을 사용하거나 다른 지반 강도 측정 장치를 이용할 시 지반의 강도를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 그림 4.4는 실험에 사용된 포켓관입시험기 그림이다.



그림 4.4 포켓관입시험기

## 4.3 전자현미경(SEM, EDX, Mapping) 분석 결과

### 4.3.1 전자현미경(SEM) 분석 결과

미생물을 이용한 고결화(Cementation) 특성 시험은 흙 입자와 흙 입자사이의 고결정화 가능성을 파악하기 위한 실험으로써, 무처리 7일 시료와 일반농도 처리 7일, 14일, 28일 시료에 대해 전자현미경(SEM) 분석을 수행하였고, 시험결과를 아래의 그림을 통해 나타내었다.

모래 무처리 7일 시료의 경우 그림 4.5의 50배 사진을 보면 입자 주위에 어떠한 침전물도 생기지 않았음을 알 수 있다. 그러나 일반농도 처리 7일 시료의 경우 그림 4.6의 50배 사진을 보면 입자 주위에 미세한 조각들이 존재하고 있음을 알 수 있으며, 이는 무처리 7일 시료 사진에서 발견되지 않는 조각들이다. 고농축 처리 7일 시료의 경우 그림 4.9의 5000배의 경우 무처리 및 일반농도 처리에 비해 미세한 알갱이가 입자 주위에 많이 붙어 있음을 확인 할 수 있으며, 이는 EDX 및 Mapping에서 나타난 칼슘 계열의 광물로 추정할 수 있으며, EDX 및 Mapping 실험결과 무처리 된 시료보다 고농도 처리 시료에서의 칼슘 함유량이 무처리보다 10% 더 증가했으며, 이는 칼슘 함유량의 증가로 인해 고농도 처리에서 생성된 미세한 알갱이는 탄산칼슘으로 추정할 수 있을 것이다.

또한 일반농도 처리의 경우 재령일 14일, 28일이 경과함에 따라 생성되는 알갱이는 일반농도 처리 7일 시료의 반응과 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 미생물 반응이 7일 이후에는 효과가 없는 것을 암시하며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

실트의 경우 무처리 7일 시료와 일반농도 처리 7일 시료 및 고농도 처리 7일 시료의 결과를 보면 입자 주위에 특별히 생성된 알갱이가 존재 하지 않음을 확인할 수 있으며, 재령일(14일, 28일)이 경과함에도 뚜렷한 반응이 없음을 추가적으로 확인 할 수 있다. 이는 선행연구를 통해서 살펴본 바와 같이 Dejong 및 Mitchell의 의해 제시한

미생물 이동을 보면, 미생물이 실질적인 이동을 위해서는  $0.06\mu\text{m}\sim 0.1\mu\text{m}$ 의 흡 입자의 크기가 필요함을 알 수 있다. 이는 모래 입자의 크기가  $0.75\text{mm}\sim 4.75\text{mm}$ 의 범위에 있으므로 미생물 적용에 가장 알맞은 흡은 모래임을 알 수 있으며, 실트의 경우 흡 입자와 입자사이에 특별한 변화가 발견되지 않아 추가적으로 실트에서의 고결화 가능성을 확인하기 위한 연구가 필요할 것으로 생각된다. Dejong(2006) 등의 시험방법에서 사용된 2차원 Mapping방법으로는 단순히 칼슘 함유량만을 나타내었으며, 직접적으로 탄산칼슘이 생성되었음을 보여주지는 못했다. 따라서 본 연구에서는 미생물 반응을 통해 생성된 침전물이 탄산칼슘으로 밝혀내고, SEM 및 EDX, Mapping을 통해서 탄산칼슘으로 확인될 수 있는 칼슘 함유량의 생성량이 증가되었음을 보여주고 있어, 고농도 처리를 이용할 경우 생성되는 탄산칼슘의 양은 많아질 것으로 기대된다.

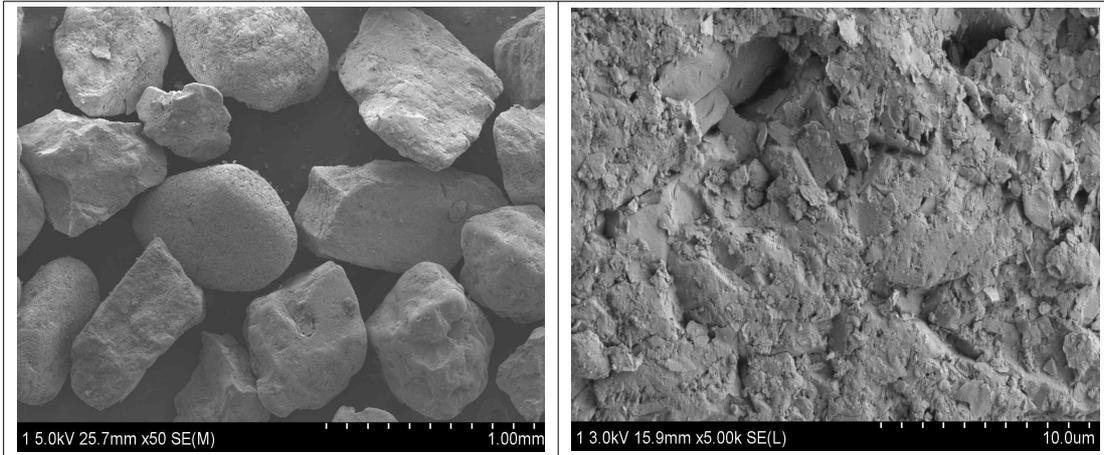


그림 4.5 모래 무처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

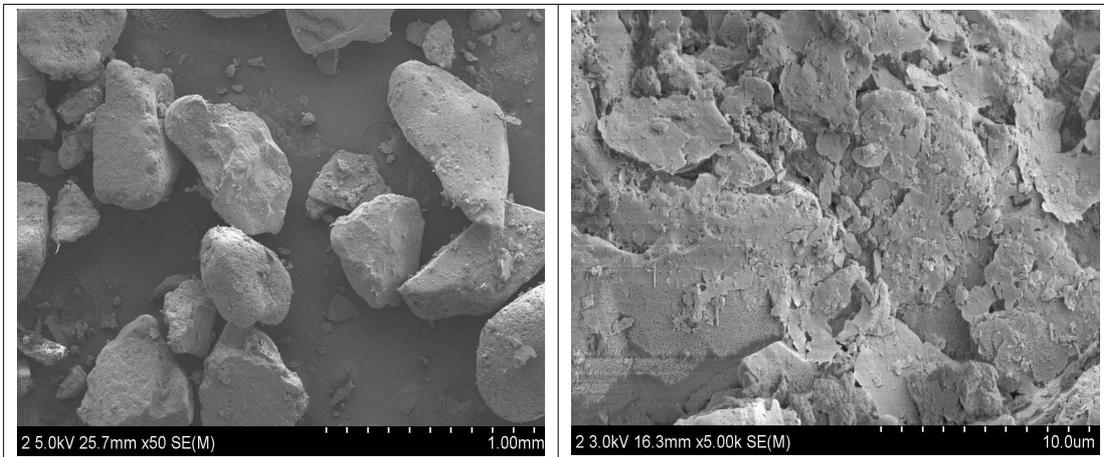


그림 4.6 모래 일반농도 처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

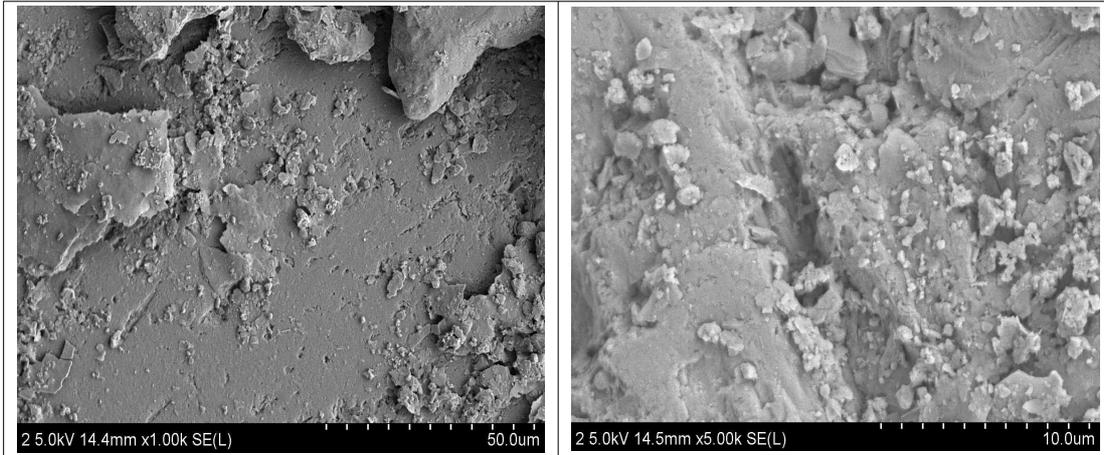


그림 4.7 모래 일반농도 처리 14일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

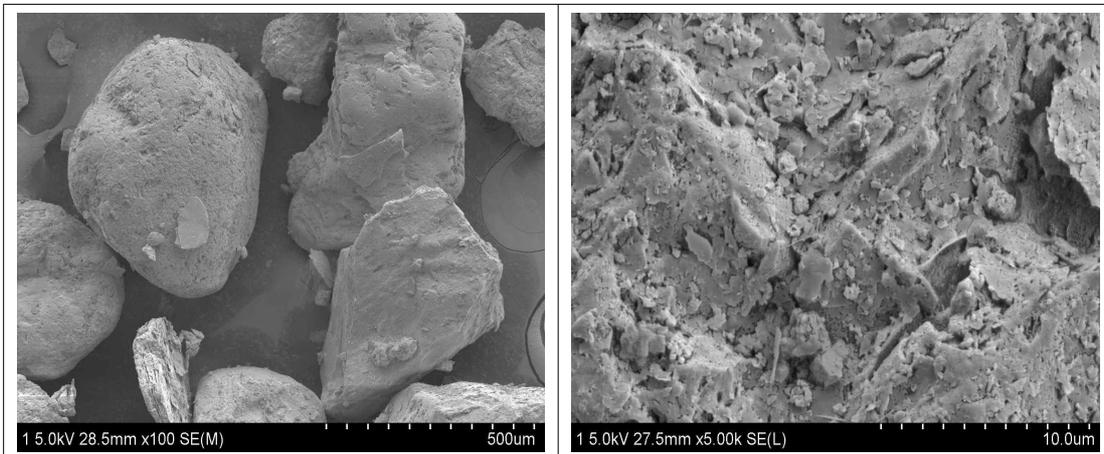


그림 4.8 모래 일반농도 처리 28일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

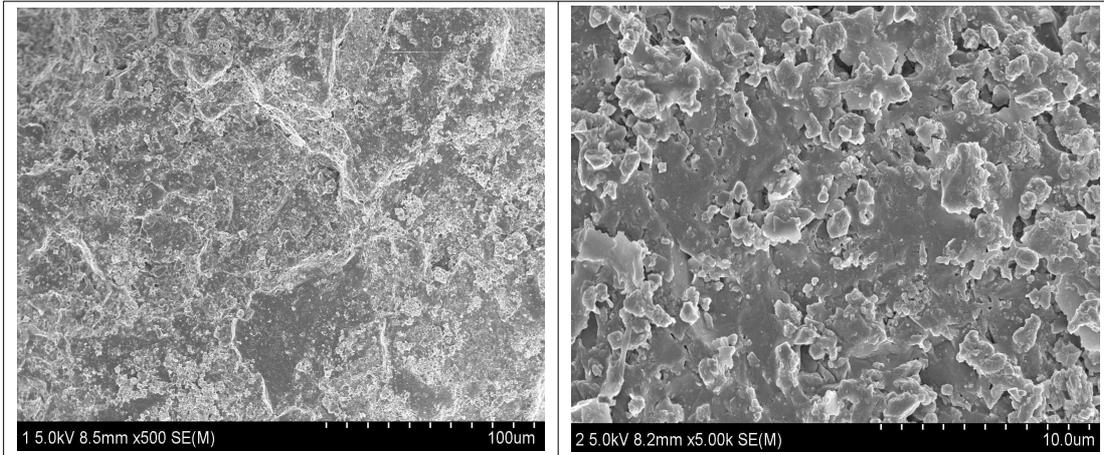


그림 4.9 모래 고농도 처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

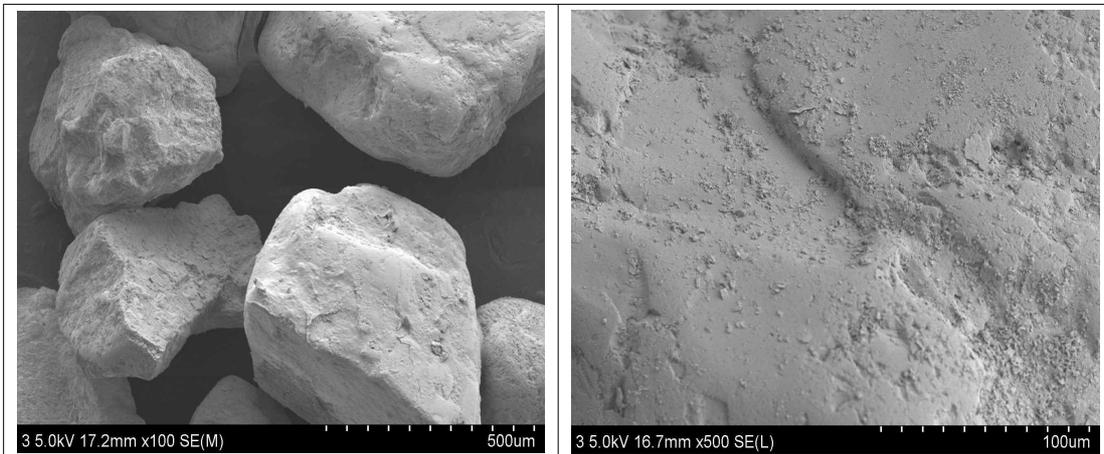


그림 4.10 모래 고농도 처리 14일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

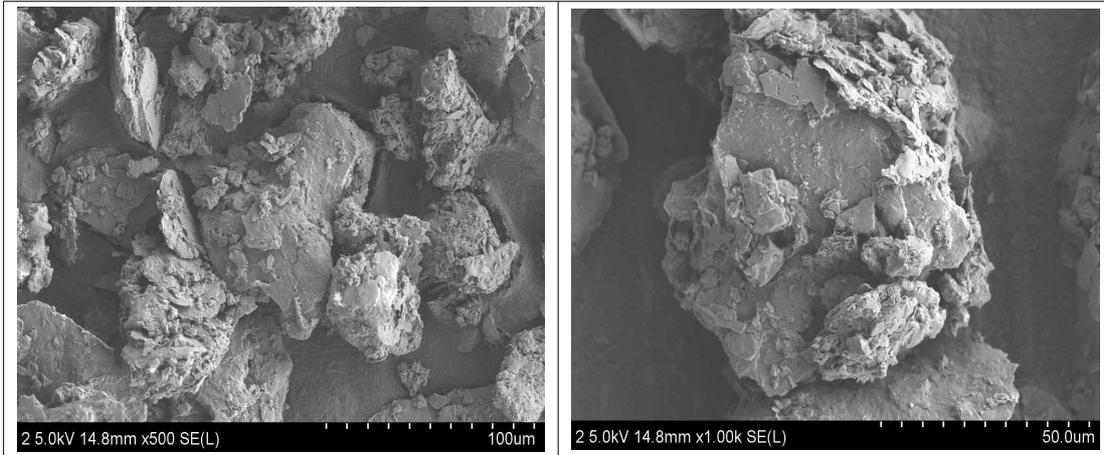


그림 4.11 실트 무처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

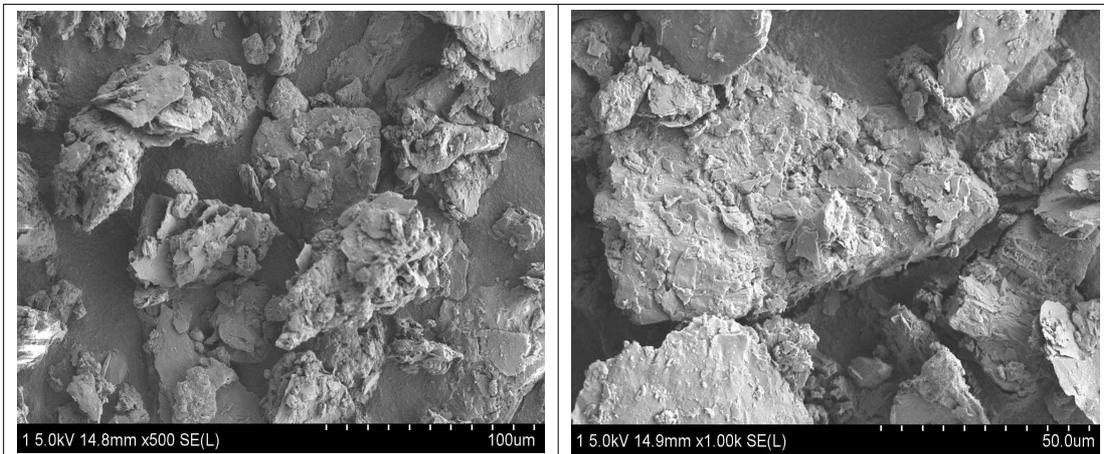


그림 4.12 실트 일반농도 처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

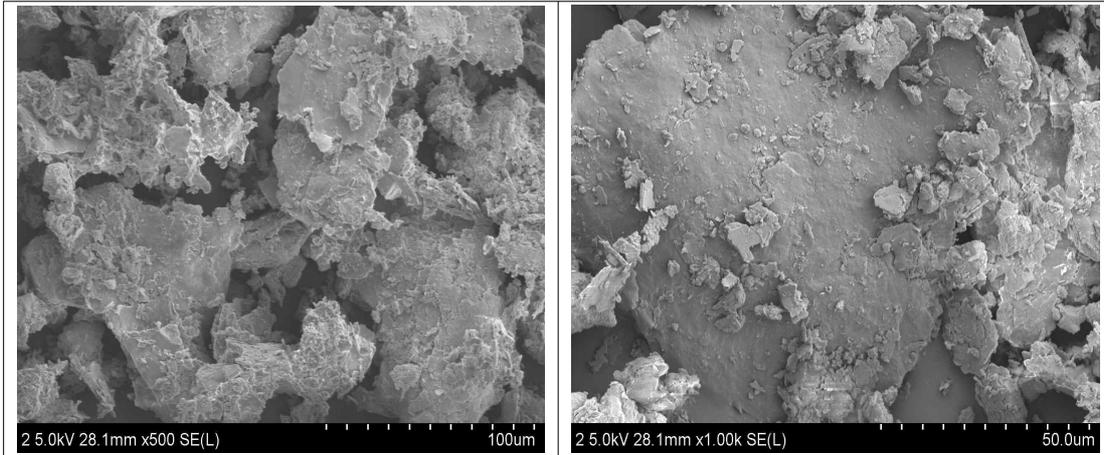


그림 4.13 실트 일반농도 처리 14일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

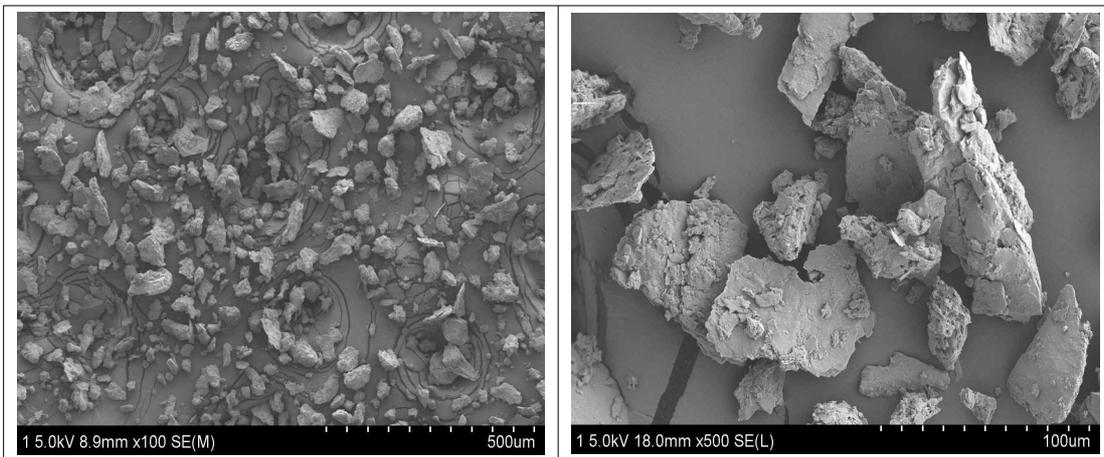


그림 4.14 실트 일반농도 처리 28일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

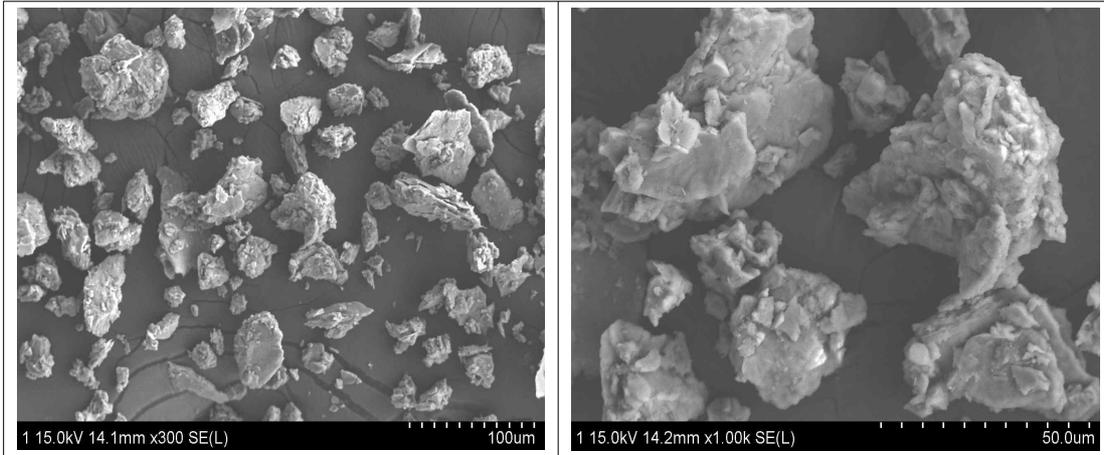


그림 4.15 실트 고농도 처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

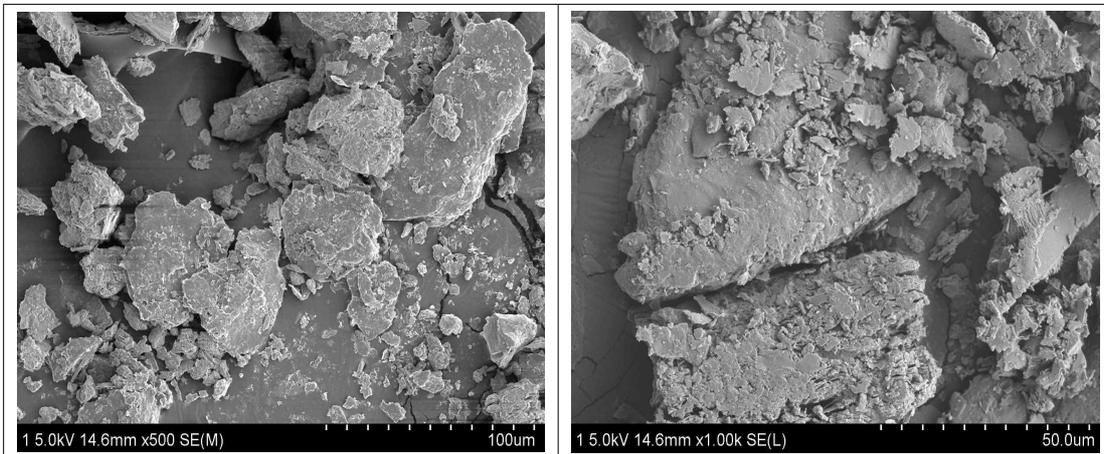


그림 4.16 실트 고농도 처리 14일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

#### 4.3.2 EDX 분석 결과(7일차 실험결과)

EDX(Energe Dispersive X-ray Spectroscopy)는 원소분석기라고도 하며, EDS, EDAX 등으로 불리고 있다. 일반적으로 EDX는 전자를 만들어 낼 수 있는 장비에 장착하여 검출기의 형태로 사용된다. EDX는 X축을 X-ray 에너지 gd로, Y축을 Count로 그래프가 그려지며, 각 Peak는 면적을 계산하여 검출된 원소들 간의 상대적인 정량법의 비교가 가능하며, 면적에 대한 상대 값만을 나타낸다. 본 연구에서는 모래 및 실트의 무처리, 일반농도 처리, 고농도 처리 7일에 대해서 EDX 분석 결과를 각각 비교하였다.

실험결과 모래의 경우 그림 4.17의 무처리 7일의 경우 칼슘(Ca) 함유량은 0.72%, 일반농도 처리 7일은 6.84%, 고농도 처리 7일은 11.82%로 나타났다. 미생물 용액과 연화칼슘 용액의 작용으로 생성된 칼슘 함유량은 탄산칼슘의 함유량으로 추정할 수 있으며, 모래의 경우 무처리에 비해 고농축을 사용할 경우 전체적으로 10%이상의 칼슘 함유량이 더 생성시킬 수 있음을 실험을 통해서 알 수 있다.

실트의 경우 무처리 7일의 칼슘(Ca)함유량은 1.14%, 일반농도 처리 7일은 2.08%, 고농도 처리 7일은 1.96%로 각각 나타났다. 이러한 칼슘 함유량 결과는 미생물 작용이 실트에서 이루어지지 않았다고 볼 수 있으며, 선행연구에서 논의한 바와 같이 미생물 사용에 적합한 흙이 모래임을 확인할 수 있다.

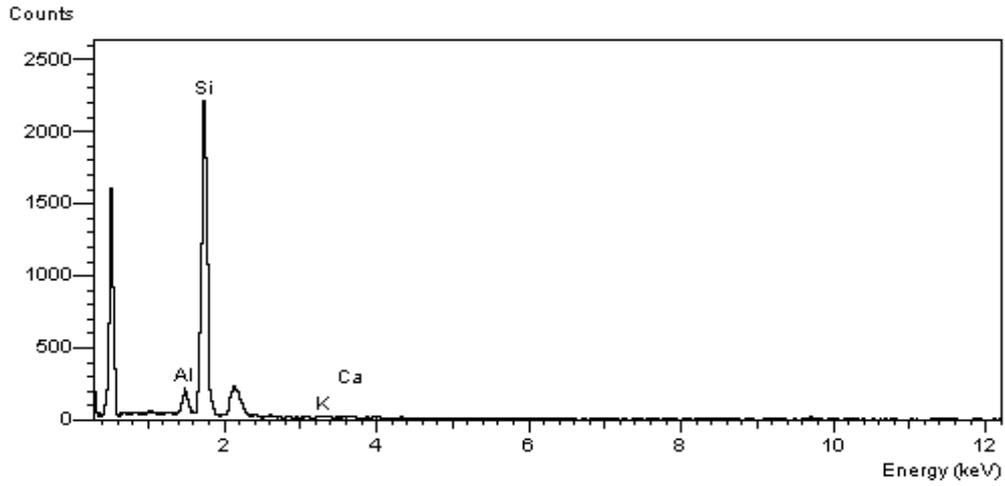


그림 4.17 모래 무처리 7일 시료의 EDX 실험 결과

표 4.3 모래 무처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량

광물	함유량(%)
Al	6.02
Si	92.06
K	1.20
Ca	0.72

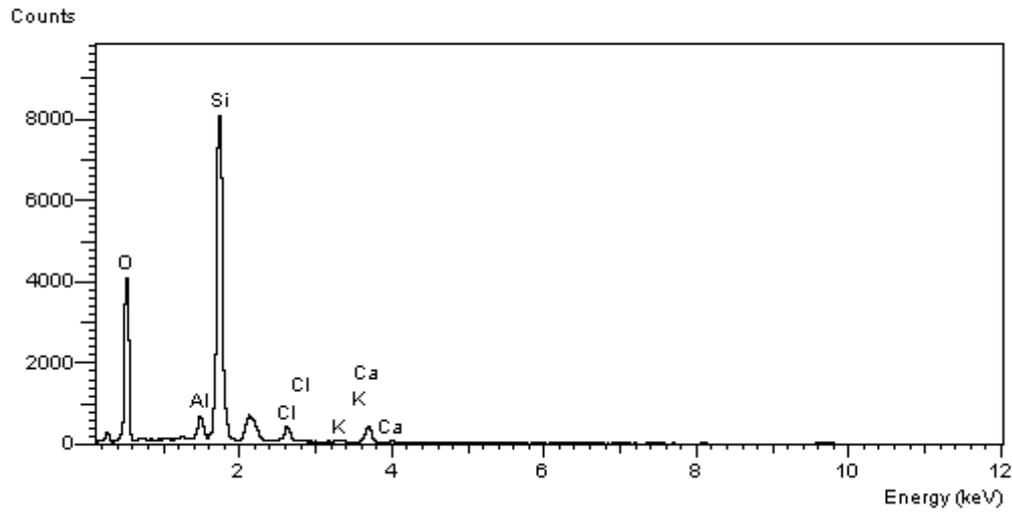


그림 4.18 모래 일반농도 처리 7일 시료의 EDX 실험 결과

표 4.4 모래 일반농도 처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량

광물	함유량(%)
Al	4.81
Si	81.79
Cl	5.73
K	0.83
Ca	6.84

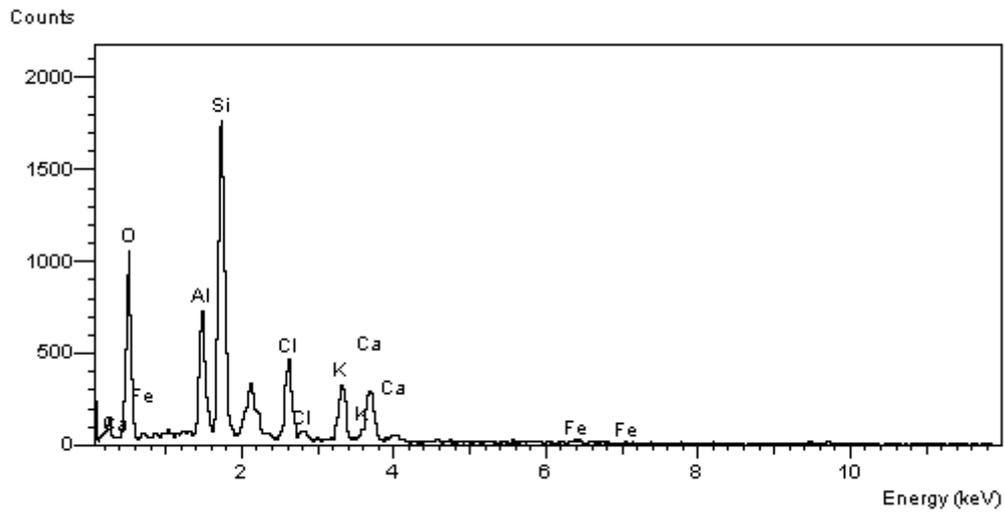


그림 4.19 모래 고농도 처리 7일 시료의 EDX 실험 결과

표 4.5 모래 고농도 처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량

광물	함유량(%)
Al	14.95
Si	45.74
Cl	14.42
K	11.82
Ca	11.82
Fe	1.25

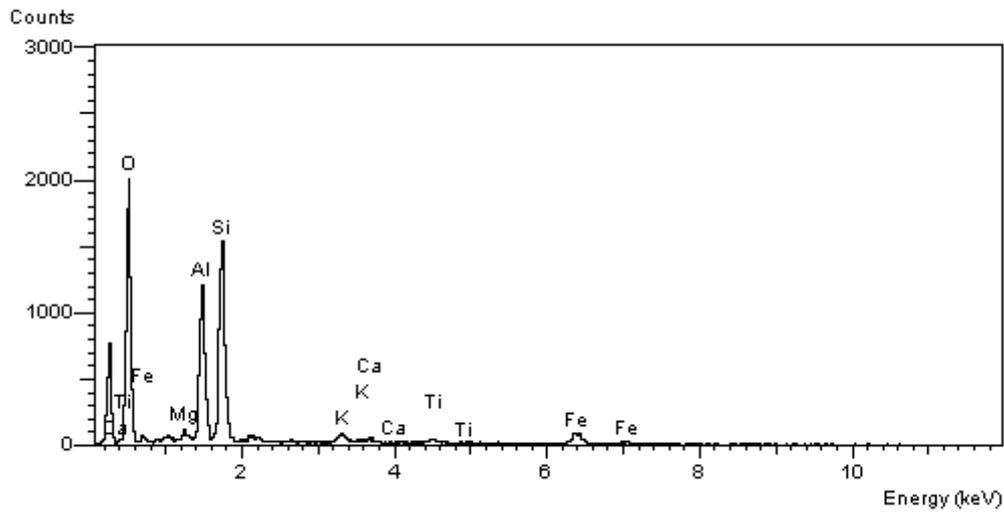


그림 4.20 실트 무처리 7일 시료의 EDX 실험 결과

표 4.6 실트 무처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량

광물	함유량(%)
Mg	2.10
Al	31.56
Si	52.57
K	2.90
Ca	1.14
Ti	1.22
Fe	8.51

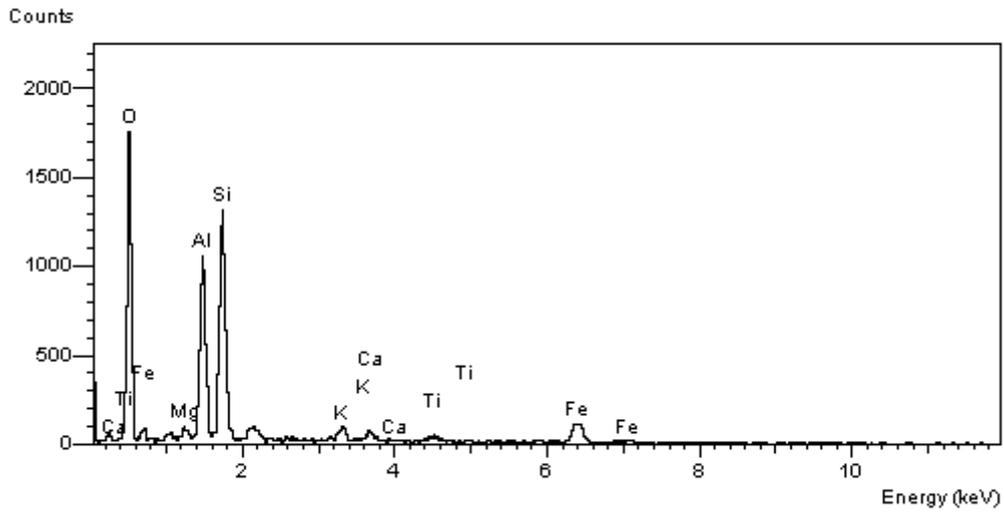


그림 4.21 실트 일반농도 처리 7일 시료의 EDX 실험 결과

표 4.7 실트 일반농도 처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량

광물	함유량(%)
Mg	1.73
Al	30.83
Si	47.64
K	3.24
Ca	2.08
Ti	1.48
Fe	13.00

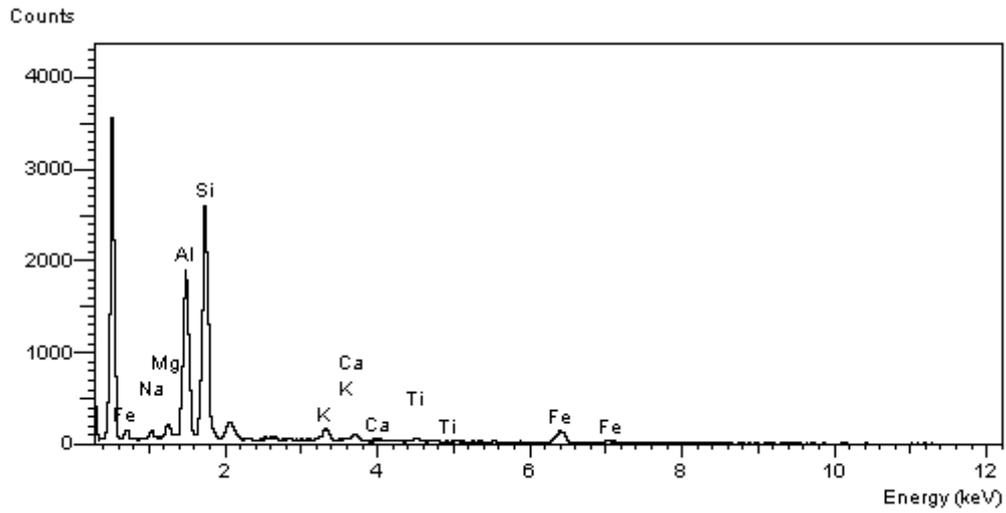


그림 4.22 실트 고농도 처리 7일 시료의 EDX 실험 결과

표 4.8 실트 고농도 처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량

광물	함유량(%)
Na	2.43
Mg	2.24
Al	29.92
Si	50.91
K	2.98
Ca	1.96
Ti	0.82
Fe	8.74

### 4.3.3 Mapping 분석 결과(모래 7일차 실험결과)

Mapping 분석 방법은 전자현미경과 동일한 분석방법으로 사용되어지며, 광물의 함유량 정도를 3차원 입자상으로 나타내는 것으로 본 연구에서는 모래 시료에 대해서 무처리, 일반농도 처리, 고농도 처리 7일에 대해서 각각 Mapping을 실시하였다. 무보강의 경우 탄산칼슘 계열 원소인 칼슘(Ca) 성분이 거의 나타나지 않았으나, 일반농도 처리 및 고농도 처리에서는 칼슘 성분의 입자상이 고농도로 갈수록 칼슘 생성량이 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 실험 결과는 EDX 분석결과에서 나타난 칼슘 함유량과 일치하며, 연구에서 확인된 칼슘 성분의 검출은 탄산칼슘으로 추정할 수 있으며, 칼슘의 함유량이 높을수록 생성되는 탄산칼슘의 양은 많아 질 것으로 판단된다.

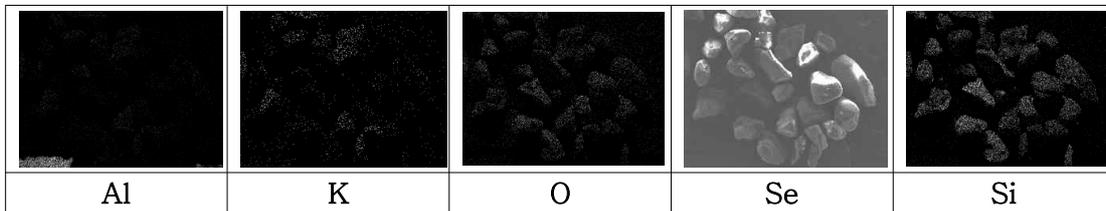


그림 4.23 모래 무처리 7일 시료에 대한 광물 함유량(Mapping)

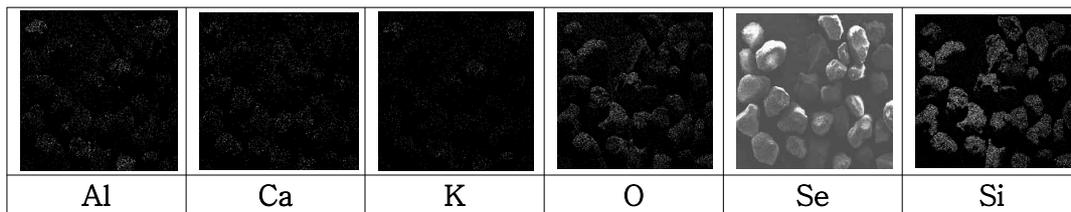


그림 4.24 모래 일반농도 처리 7일 시료에 대한 광물 함유량(Mapping)

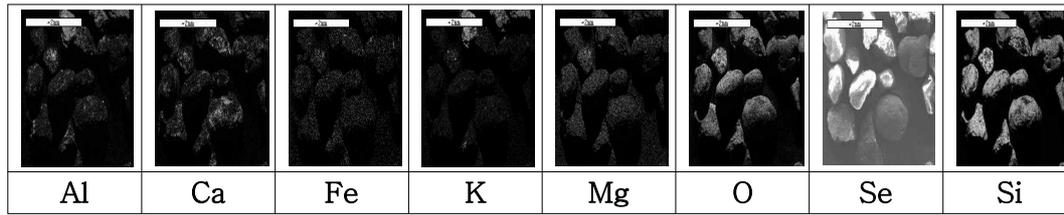


그림 4.25 모래 고농도 처리 7일 시료에 대한 광물 함유량(Mapping)

## 4.4 X-회절 분석(XRD) 결과(7일차 실험결과)

### 4.4.1 미생물 용액, 염화칼슘 용액 반응에 따른 X-회절 분석 결과

미생물 용액과 염화칼슘 용액의 반응에 따른 XRD 분석 결과 흰색 침전물이 생성되었으며, 이는 백색의 가루로써 탄산칼슘으로 추정할 수 있다. 또한 그림 4.26은 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응에 따른 XRD 분석결과를 Peak로 나타내었으며, 실험결과를 통해서 Peak와 탄산칼슘 Peak가 일치함을 알 수 있었고, 이는 미생물 용액과 염화칼슘 용액의 반응으로 탄산칼슘이 생성되었음을 확인할 수 있었다.

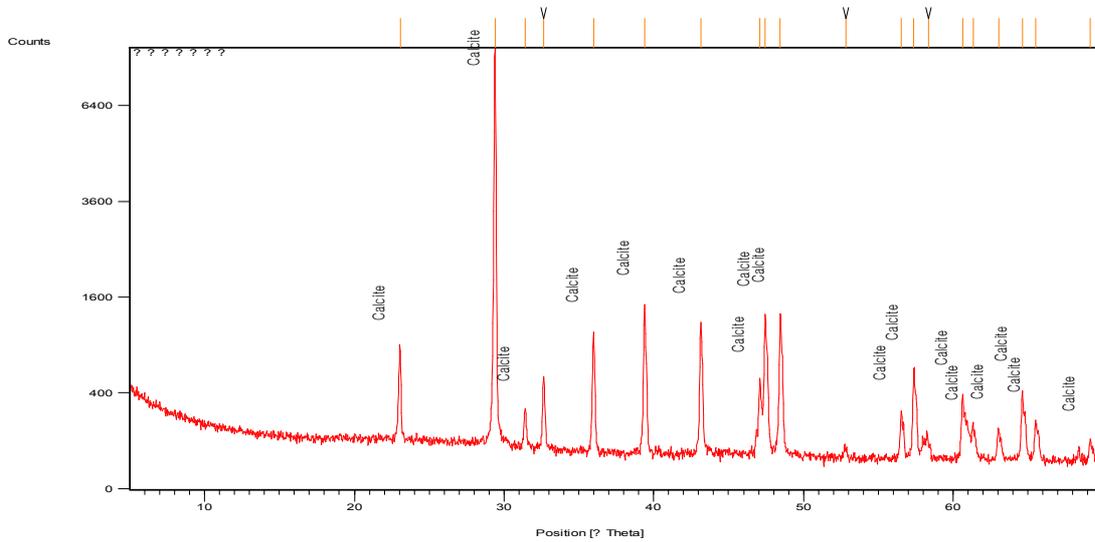


그림 4.26 미생물 용액, 염화칼슘 용액 반응에 따른 X-회절 분석(XRD Peak 조사 그래프)

#### 4.4.2 미생물 용액, 염화칼슘 용액을 흙에 각각 따로 섞었을 경우의 X-회절 분석 결과

본 실험에서는 미생물 용액, 염화칼슘 용액을 흙에 각각 따로 섞어 나타나는 반응 생성물을 조사하기 위해 X-회절 분석을 수행하였다. 실험은 무처리 시료와 미생물 용액, 염화칼슘 용액을 시료에 섞어 각각의 반응을 X-회절 분석을 이용하여 실시하였으며, 시료는 교란되지 않는 시료를 사용하였으며, 또한 시료를 #200번체 이하로 분쇄하였고 건조기를 통해 시료를 건조 상태로 만들었다. 일반적으로 X-선은 결정에 부딪히면 그 일부가 회절을 일으키고 그 회절방향과 회절 강도는 물질의 결정구조에 따라 달라진다. 이러한 현상을 이용하여 물질이 어떠한 결정구조를 갖는가를 분석할 수 있고 구조적 특성을 또한 확인할 수 있다. 실험결과, 모래의 경우 공통적으로 이산화규소( $SiO_2$ )와 공통적으로  $KAlSi_3O_8$ ,  $NaAlSi_3O_8$ 의 원소가 발견되었고. 실트의 경우에도 공통적으로 이산화규소( $SiO_2$ )가 발견되었다. 이러한 실험결과는 오(2008) 방법의 실험에서 밝혀진 X-회절 분석 시 이산화규소가 생성되지 않았다고 하였으나, 본 실험을 통한 결과 무처리 된 시료(모래, 실트)에서 각각 이산화규소가 생성되었음을 확인할 수 있었으며, 이는 오(2008) 방법의 실험을 통한 결과 분석상의 오류라고 할 수 있다. 또한 Dejong(2006) 등의 방법에서는 X-회절 분석에 대한 내용 자체가 제시되지 않았다. 실험결과 미생물 용액과 염화칼슘 용액의 반응을 통한 흙에서는 X-회절 분석 결과 Peak를 살펴 본 결과 탄산칼슘의 Peak가 나타나지 않았음을 알 수 있다. 이는 통상적으로 결정구조가 5% 미만이거나, 결정성이 좋지 않을 경우 회절 분석 상에 나타나지 않은 경우이며, 또한 실험에 사용된 배합비 상에 사용된 미생물 용액과 염화칼슘 용액이 시료와의 상대적인 양이 부족하여 생성되는 탄산칼슘 양이 적게 나타난 것으로 예상되며, 추가적인 연구를 통해 미세하게 생성된 탄산칼슘 생성물을 확인할 수 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

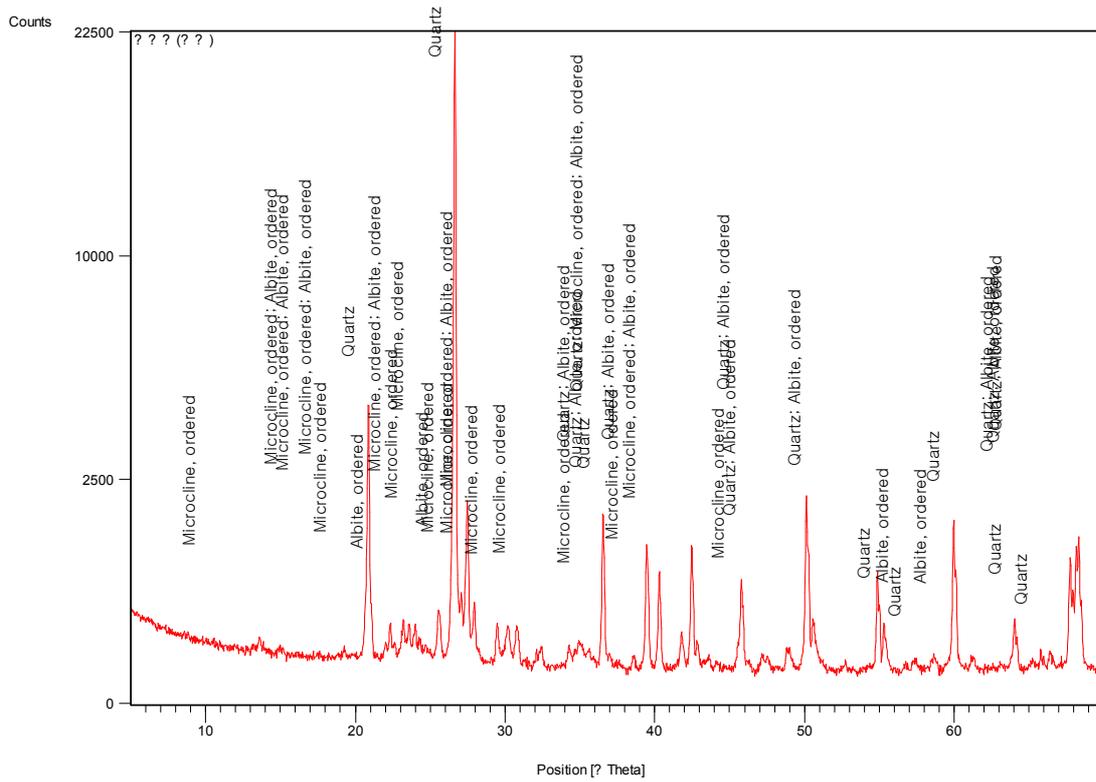


그림 4.27 모래 무처리 7일 시료의 X-회절 분석(XRD Peak 조사 그래프)

표 4.9 모래 무처리 7일 시료의 X-회절 분석(XRD)의 반응 생성물 리스트

Ref. code	광물명칭(mineral name)	화학식
01-086-1560	Quartz	$SiO_2$
00-022-0687	Microcline, ordered	$KAlSi_3O_8$
00-020-0554	Albite, ordered	$NaAlSi_3O_8$

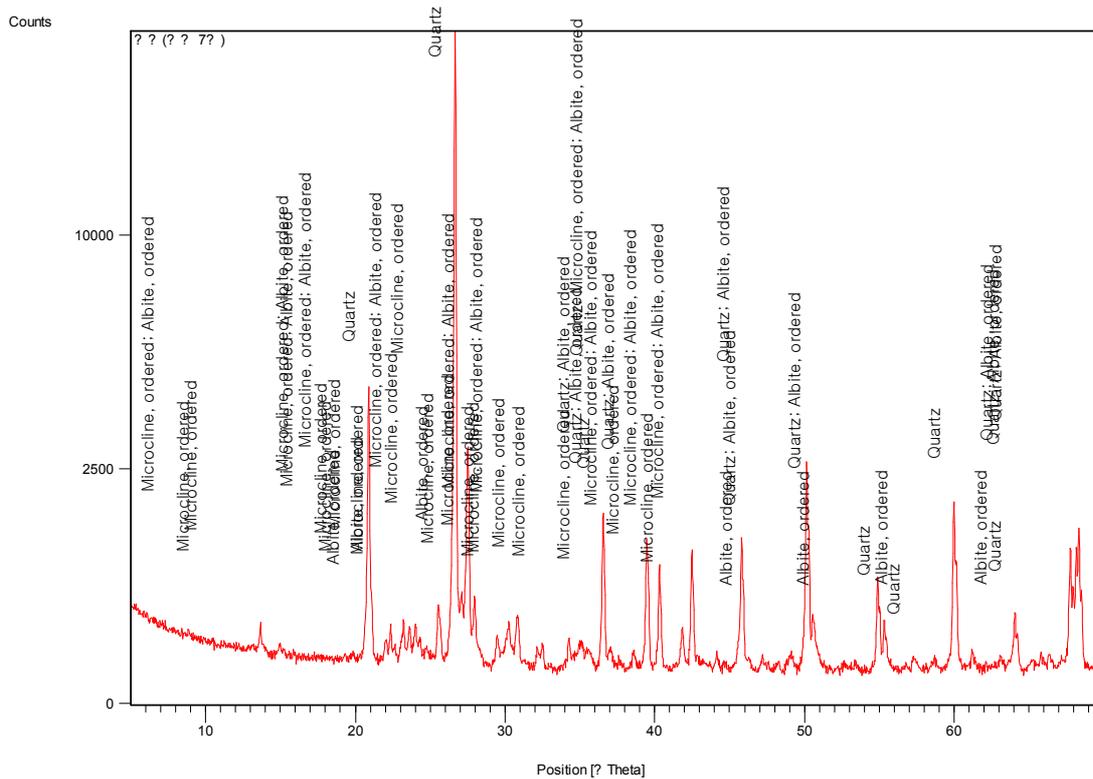


그림 4.28 모래 일반농도 처리 7일 시료의 X-회절 분석(XRD Peak 조사 그래프)

표 4.10 모래 일반농도 처리 7일 시료의 X-회절 분석(XRD)의 반응 생성물 리스트

Ref. code	광물명칭(mineral name)	화학식
01-078-2315	Quartz	$SiO_2$
00-022-0687	Microcline, ordered	$KAlSi_3O_8$
00-020-0554	Albite, ordered	$NaAlSi_3O_8$

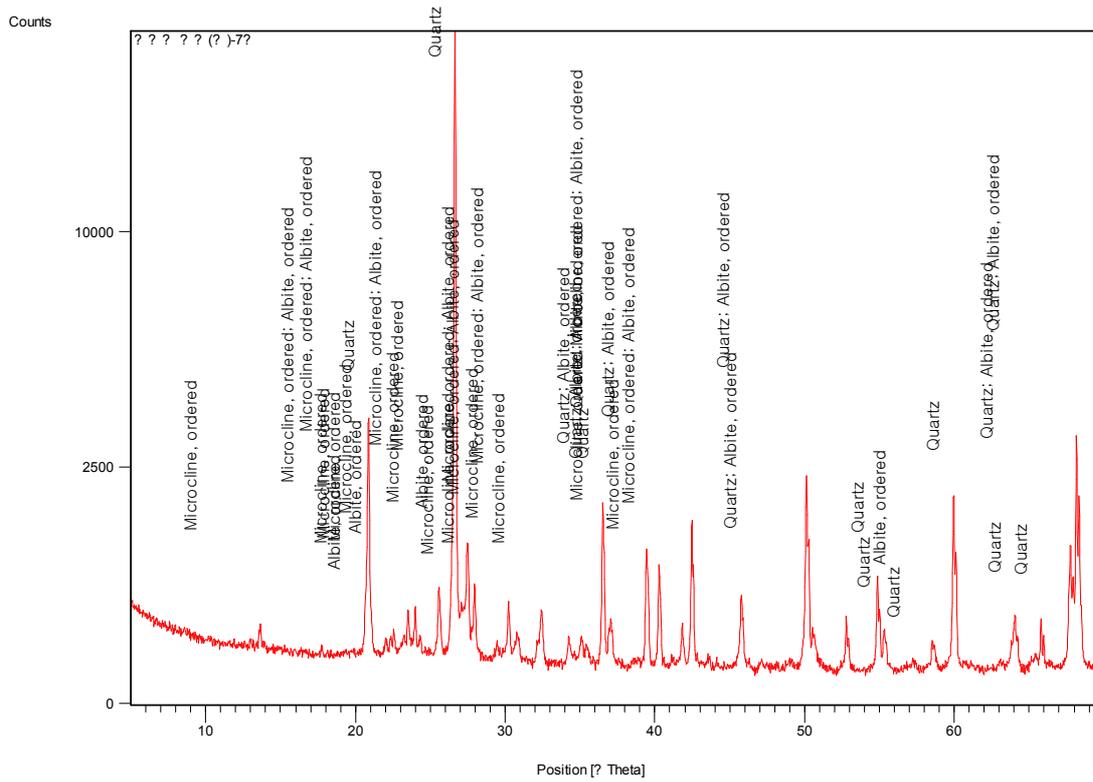


그림 4.29 모래 고농도 처리 7일 시료의 X-회절 분석(XRD Peak 조사 그래프)

표 4.11 모래 고농도 처리 7일 시료의 X-회절 분석(XRD)의 반응 생성물 리스트

Ref. code	광물명칭(mineral name)	화학식
01-070-3755	Quartz	$SiO_2$
00-022-0687	Microcline, ordered	$KAlSi_3O_8$
00-020-0554	Albite, ordered	$NaAlSi_3O_8$

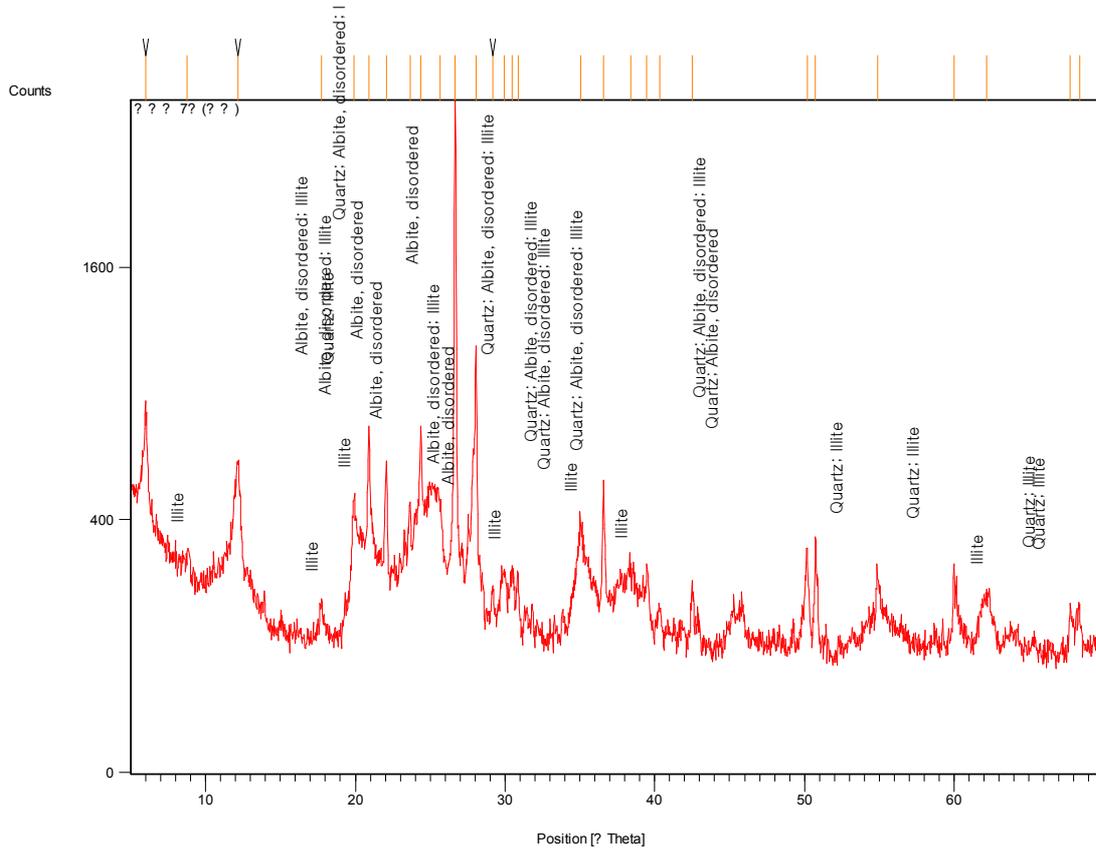


그림 4.30 실트 무처리 7일 시료의 X-회절 분석(XRD Peak 조사 그래프)

표 4.12 실트 무처리 7일 시료의 X-회절 분석(XRD)의 반응 생성물 리스트

Ref. code	광물명칭(mineral name)	화학식
01-085-0796	Quartz	$Si O_2$
00-010-0393	Albite, disordered	$Na (Si_3 Al) O_8$
01-070-3754	Illite	$K (Al_4 Si_2 O_9 (OH)_3$

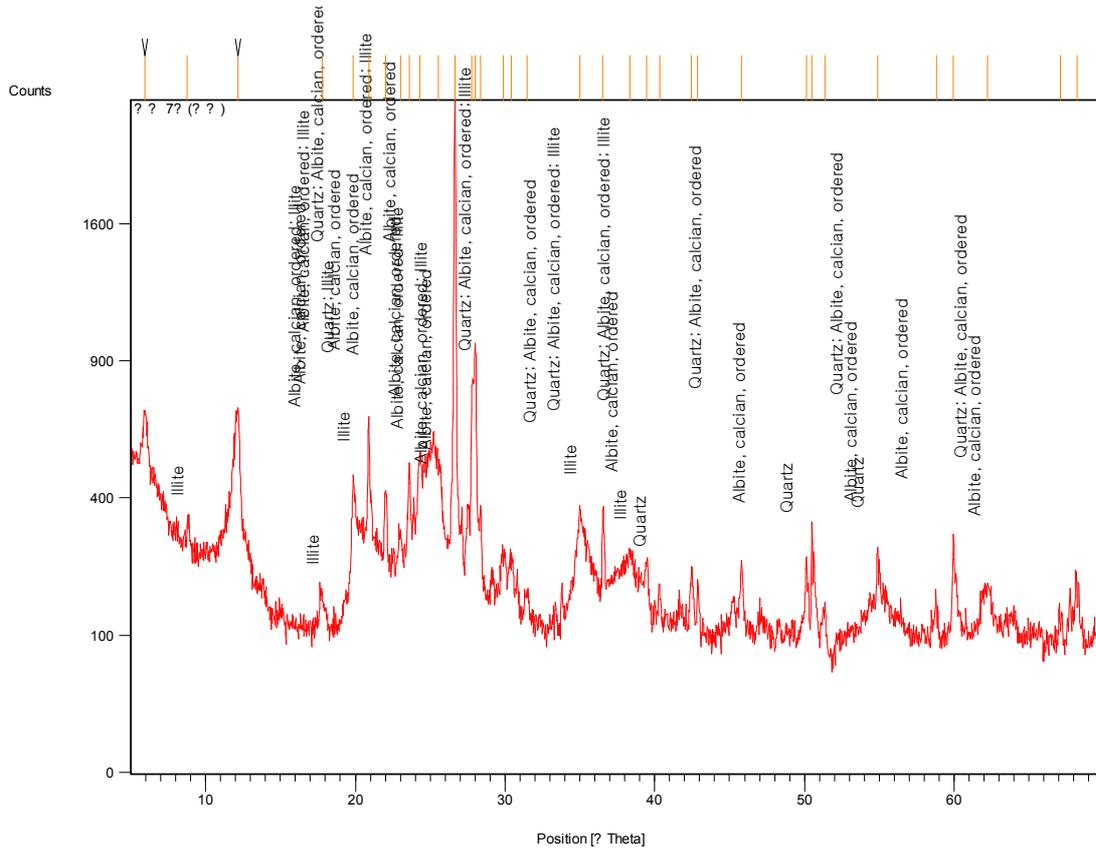


그림 4.31 실트 일반농도 처리 7일 시료의 X-회절 분석(XRD Peak 조사 그래프)

표 4.13 실트 일반농도 처리 7일 시료의 X-회절 분석(XRD)의 반응 생성물 리스트

Ref. code	광물명칭(mineral name)	화학식
01-086-1560	Quartz	$SiO_2$
00-020-0548	Albite, ordered	$Na(Si_3Al)O_8$
00-002-0056	Illite	$K(Al_4Si_2O_9(OH)_3)$

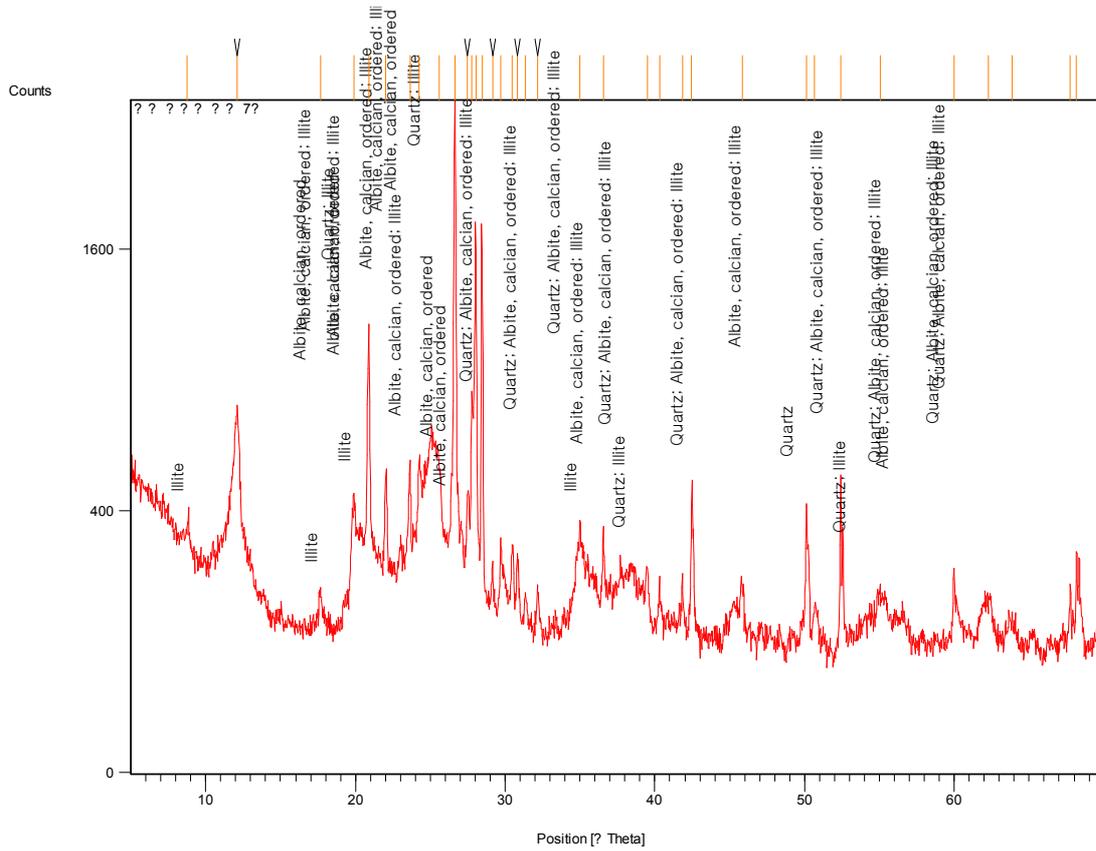


그림 4.32 실트 고농도 처리 7일 시료의 X-회절 분석(XRD Peak 조사 그래프)

표 4.14 실트 고농도 처리 7일 시료의 X-회절 분석(XRD)의 반응 생성물 리스트

Ref. code	광물명칭(mineral name)	화학식
01-070-3755	Quartz	$SiO_2$
00-020-0548	Albite, ordered	$Na(Si_3Al)O_8$
01-070-3754	Illite	$K(Al_4Si_2O_9(OH)_3)$

#### 4.4.3 미생물 용액, 염화칼슘 용액을 미리 혼합한 후 흙에 섞었을 경우의 X-회절 분석 결과

본 실험에서는 미생물 용액, 염화칼슘 용액을 미리 혼합한 후 흙에 섞어 나타나는 반응 생성물을 조사하기 위해서 X-회절 분석을 수행하였다. 실험결과 생성된 광물은 그림 4.33의 경우는 그림 4.27의 경우와 거의 일치하며, 그림 4.29에서와 같이 공통적으로  $SiO_2$ 가 발견되었으며, 그 밖에  $KAlSi_3O_8$  및  $NaAlSi_3O_8$ 이 공통적으로 발견되었다. 이러한 실험결과는 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 미리 혼합한 후 흙에 같이 섞었을 경우와 흙에 각각 따로 섞었을 경우에서의 X-회절 분석 결과 Peak점에서 탄산칼슘 Peak를 확인할 수 없었으며, 실트의 경우에서도 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 혼합한 후 흙에 섞었을 경우와 흙에 각각 따로 섞었을 경우에서도 공통적으로  $SiO_2$ ,  $Na(Si_3Al)O_8$ ,  $K(Al_4Si_2O_9(OH)_3)$  등이 발견되었으며, 모래의 경우와 마찬가지로 X-회절 분석 결과 Peak점에서 탄산칼슘 Peak를 확인할 수 없었다. 이러한 내용은 4.4.2절에서 언급한바와 같이 X-회절 분석 결과 통상적으로 결정구조가 5% 미만이거나, 결정성이 좋지 않을 경우 회절 분석 상에 나타나지 않는 경우이므로 탄산칼슘 생성물을 확인할 수 있는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

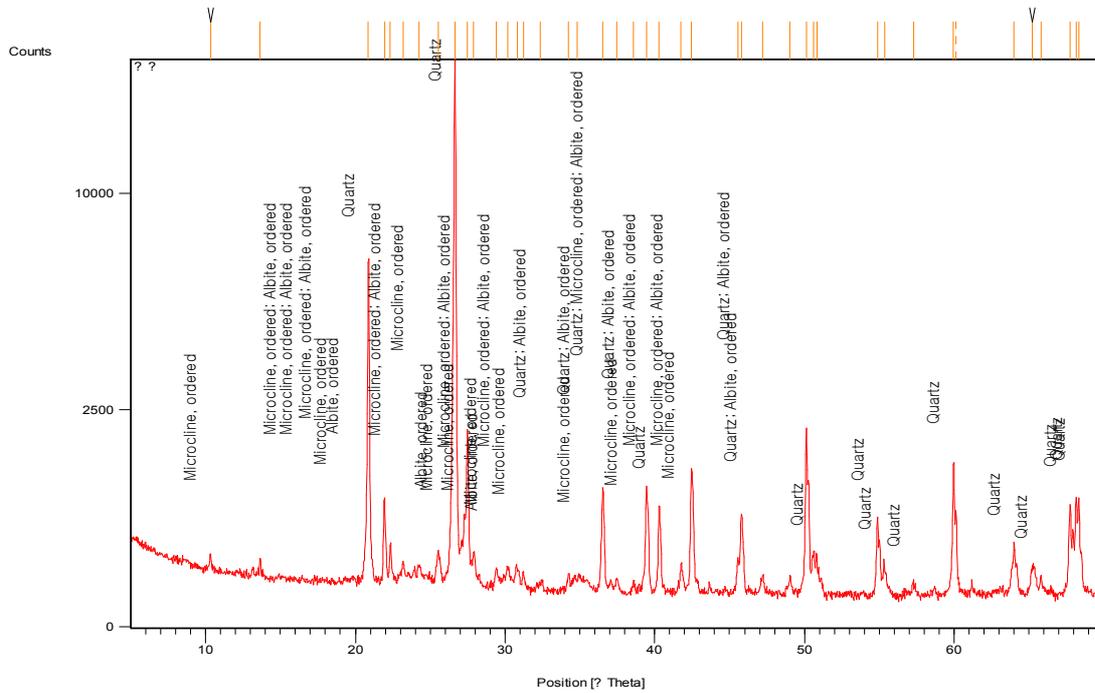


그림 4.33 모래 고농도 처리 7일 시료의 X-회절분석(XRD Peak 조사 그래프) - 한번에 섞은 경우

표 4.15 모래 고농도 처리 7일 시료의 X-선 회절분석(XRD)의 반응 생성물 리스트 - 한번에 섞은 경우

Ref. code	광물명칭(mineral name)	화학식
01-086-1560	Quartz	$SiO_2$
00-022-0687	Microcline, ordered	$KAlSi_3O_8$
00-009-0466	Albite, ordered	$NaAlSi_3O_8$

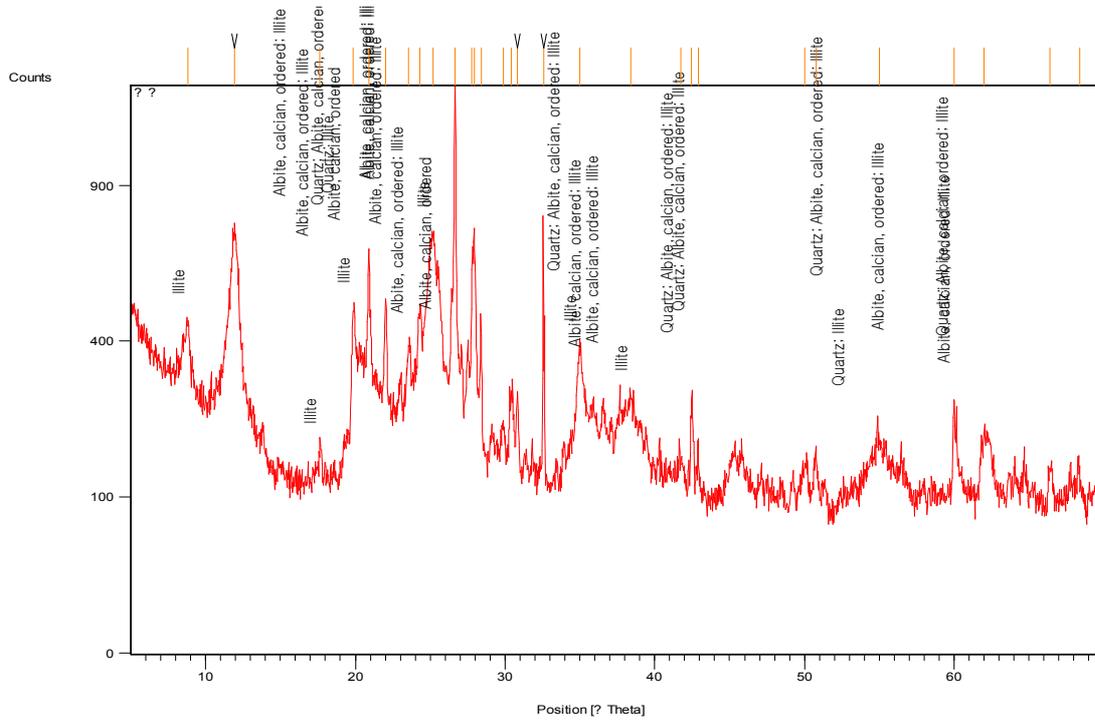


그림 4.34 실트 고농도 처리 7일 시료의 X-회절분석(XRD Peak 조사 그래프) - 한번에 섞은 경우

표 4.16 실트 고농도 처리 7일 시료의 X-선 회절분석(XRD)의 반응 생성물 리스트 - 한번에 섞은 경우

Ref. code	광물명칭(mineral name)	화학식
01-085-0930	Quartz	$SiO_2$
00-020-0548	Albite, ordered	$Na(Si_3Al)O_8$
01-070-3754	Illite	$K(Al_4Si_2O_9(OH)_3)$

## 제 5 장 결 론

본 연구는 실트와 느슨한 모래에 미생물을 이용하여 고결화 가능성을 살펴보고자 하였다. 무처리 시료 및 일반농도 처리 시료, 고농도 처리 시료에 대해 물성 및 역학적 특성을 파악하였고, 전자현미경(SEM) 분석 및 X-회절 분석(XRD) 시험을 통해 탄산칼슘 생성을 분석 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 미생물 용액과 염화칼슘( $CaCl_2$ ) 용액의 반응으로 탄산칼슘( $CaCO_3$ )이 미세하게 생성되었으며, 침전물은 백색의 결정이며, X-회절 분석 결과 Peak점은 탄산칼슘 Peak와 일치한다.

2. 미생물 고결화 정도 확인을 위해 전자현미경(SEM) 분석을 실시한 결과 미생물로 처리된 모래시료에서는 미생물 용액과 염화칼슘( $CaCl_2$ ) 용액의 반응으로 입자와 입자간에 탄산칼슘으로 추정되는 미세한 입자가 생성되었음을 확인하였으며, EDX와 Mapping에서 발견된 칼슘광물이 미생물 반응을 통한 탄산칼슘이 생성되었음을 암시한다. 또한 일반농도 처리 시료의 경우 재령일(14일, 28일)이 경과함에 따라 생성되는 입자의 양과 비교해보면, 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 미생물이 흙 속에서 7일 이상의 생존이 불가능하다는 것을 알 수 있으며, 미생물이 흙 속에서 보다 더 오랜 기간 생존할 수 있도록 하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3. 오(2008) 방법에서 제시된 무처리 된 시료에서는 이산화규소( $SiO_2$ )가 발견되지 않았으나, 본 연구에서 사용된 무처리 된 시료에서는 이산화규소가 발견되었다. 또한 Dejong(2008) 방법에서는 X-회절분석을 통한 실험 분석 자체가 제시되지 않았으나, 본 연구에서는 X-회절 분석을 통해서 미생물 용액과 염화칼슘 용액의 반응을 통해서 생성되는 탄산칼슘을 Peak점을 찾아서 확인하고자 실험을 실시하였다. X-회절분석 시

험결과 미생물 용액, 염화칼슘 용액을 미리 혼합한 후 흙에 섞었을 경우와 흙에 각각 따로 섞었을 경우의 Peak 확인 결과 모래, 실트에서 탄산칼슘의 Peak가 발견되지 않았으며, 이는 통상적으로 결정구조가 5% 미만이거나, 결정성이 좋지 않을 경우 회절 분석 상에 나타나지 않은 경우이므로 탄산칼슘의 생성물을 확인할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

4. 무처리 시료와 일반농도 시료, 고농도 시료의 경우 재령일에 따른 반응을 포켓관입 시험기를 통해 강도를 측정하였다. 연구에 사용된 포켓관입시험기로 측정할 수 있는 최소 일축압축강도는  $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 이며, 무처리 시료의 일축압축강도는  $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$  보다 적어서 측정을 할 수 없었고, 일반농도 처리 시료 및 고농도 처리 시료 7일 경우에도 포켓관입시험기로 측정한 결과 일축압축강도가  $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$  보다 적었다. 실험결과, 육안 상으로는 미생물반응을 통해 약간의 강도 증가가 감지되었으나, 포켓관입시험기로는 강도 측정이 불가능하여 이를 확인 할 수가 없었다. 또한, 실험 전에 예상했던 흙의 강도증가가 발생하지 않는 이유는 탄산칼슘( $\text{CaCO}_3$ )을 생성하기 위한 미생물의 양이 부족하기 때문으로 판단된다. 이에 미생물 양을 보다 늘려 반응을 통해서 생성되는 탄산칼슘의 양을 증진 시킬 수 있는 연구가 추가적으로 필요하다.

5. 추가적인 연구를 통하여 흙의 특성에 따른 최적의 배합조건을 제시할 수 있다면, 미생물 반응을 통한 흙의 고결화(Cementation) 원리는 연약지반의 강도 증진 이외에 준설매립 지반을 물론 미생물 적용을 통해 다양한 지반의 강도증진 및 내구성 또한 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. 두산백과사전 Encyber & Encyer.com, 엄화칼슘
2. 백태선, “주사전자현미경(SEM)”, 2003. 9
3. 사단법인 한국지반공학회 (2005), “지반공학시리즈 6, 연약지반”, Chapter 1, pp. 2-3
4. 사단법인 한국지반공학회 (2005), “지반공학시리즈 6, 연약지반”, Chapter 5, pp. 192-201
5. 오종신(2008), “미생물 고결토의 공학적 특성 연구”, 전남대학교대학원 석사논문
6. 윤준도, “주사전자현미경 분석과 X선 미세분석”, 청문각, 2005
7. 일반미생물학 7판, 라이프사이언스
8. Bachmeier, K. L., Williams, A. E., Warmington, J. R., and Bang, S. S. (2002). "Urease Activity in Microbiologically-Induced Calcite Precipitation." *Journal of Biotechnology*, 93, 171-181
9. Dejong(2006), "Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 132(11), 1381-1392
10. Ferris, F. G., Stehmeier, L. G., Kantzas, A., and Mourits, F. M. (1996). "Bacteriogenic Mineral Plugging." *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 35(8), 56-61.
11. GENE CLONING & DNA ANALYSIS, Blackwell, T. A Brown
12. Janssen, P. H. (2006). "Identifying the Dominant Soil Bacterial taxa in libraries of 16S rRNA genes." *Applied Environmental Microbiology*, 72(3), 1719-1728

13. Karol, R. H. (2003). Chemical Grouting and soil Stabilization, Marcel Dekker, Inc., New York
14. Khachatoorian, R., Petrisor, I. B., Kwan, C.-C., and Yen, T. F. (2003). "Biopolymer plugging effect: Laboratory-Pressurized Pumping Flow Studies." Journal of Petroleum Science Engineering., 38(1-2), 13-21
15. 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, 156-163
16. Mueller, R. F. (1996). "Bacterial Transport and Colonization in low Nutrient Environments." Journal of Water Resources., 30(11), 2681-2690
17. Michell, J. K., and Santamarina, J. C. (2005). "Biological Considerations in Geotechnical Engineering." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering., 131(10), 1222-1233
18. Nelson, S. J., and Launt, P. D. (1991). "Stripper Well Production Increased with MEOR treatment." Oil Gas Journal., 89, 114-118
19. Ramakrishnan, V., Bang, S. S., and Deo, K. S. (1998). "A Novel Technique for Repairing Cracks in High Performance Concrete Using Bacteria." Proc. of the Int. Conf. on HPHSC, Perth, Australia, 597-618
20. Ramakrishnam, V. Ramesh, K. P. and Bang, S. S. (2001), "Bacterial Concrete." Proc. of SPIE-Int. Society of Optical Engineering, 4234, 168-176
21. Stocks-Fisher, S. Galinat, J. K and Bang S. S. (1999). "Microbiological Precipitation of  $CaCO_3$ " Soil Biology and Biochemistry., 31(11), 1563-1571.

## 감사의 글

논문을 완성하면서 “감사의 글”을 쓰려고 하니 대학원 생활의 여러 가지 일들이 머릿속을 스쳐간다. 나 자신을 위해서 유익한 시간이었고, 대학원 과정을 통해 한층 더 발전하고 긍정적인 나로 바뀔 수 있는 계기가 되었으며, 그 결과가 드디어 결실을 맺으려고 하고 있다.

먼저 석사 생활 동안 부족한 제자에게 관심과 배려를 보여주신 지도교수님이신 김대현교수님께 머리 숙여 감사드립니다. 교수님의 지도가 없었으면 석사 학위논문이 완성되지 못했을 것입니다. 또한 부정적인 마인드가 강한 저에게 긍정적인 마인드로 바뀔 수 있게 도와주시고 늘 모든 일에 계획을 세우고 실행할 수 있는 포인트를 볼 수 있도록 지도해주신 교수님께 다시 한 번 감사드립니다.

대학원 생활을 하면서 많은 가르침을 주신 교수님들께도 감사의 말씀을 드립니다. 항상 저에게 격려의 말들과 친절하게 대해주셨던 박길현교수님, 모르는 것에 대해서 물었을 때 친절하게 알려주셨던 김운중교수님, 항상 저를 믿어주시고 여러 가지 관점에서 생각할 수 있게 해주신 김성홍교수님, 지금은 미국에 계시지만은 항상 저에게 친절하게 대해주셨던 박정용교수님께 다시 한 번 감사의 말씀을 드립니다.

또 대학원 생활 동안 도움을 주신 겸임교수님들께도 감사의 말씀을 드립니다. 1년 반 동안 토질실험실에서 많은 격려와 도움을 주신 김선학교수님, 보다 넓은 시각을 볼 수 있게 도와주신 양승현교수님, 대학원 생활 중 초심을 잃지 않게 항상 도움 주신 김영균교수님, 그리고 좋은 이야기를 많이 해주신 황선하교수님께도 감사의 말씀을 전하고 싶습니다.

대학원 생활 동안 동고동락했던 선·후배님들께도 감사의 말씀을 전합니다. 토질 실험실에서 함께 지냈던 경호, 광기에게 참 많이 미안했고 고맙다는 말을 전합니다. 그리고 이번에 새로 들어온 길룡이형도 열심히 해서 좋은 결과를 얻기를 바랄뿐입니다. 지금은 졸업했지만 대학원 생활 내내 많은 조언을 아끼지 않았던 강균형, 석인형, 항상 일 처리가 서툰 저에게 많은 지원을 해주셨던 미소남 정원형, 후배의 입장에서 먼저

생각해주고 많은 이야기를 들어주었던 준현이형, 저를 많이 웃게 해준 승엽형, 그리고 대학원 생활 동안 힘들 때 술 한 잔 같이 기울여 준 대영이, 무슨 부탁을 해도 잘 들어 준 맹선이, 그리고 항상 웃음을 많이 준 찬진, 신규, 광민, 인석, 상주, 문수, 창호, 동근이외에 정말 모든 분들께 감사의 말을 전합니다.

초·중·고 동안 동고동락을 함께 했던 지영이, 지금은 직장으로 인해 잘 보지는 못하더라도 항상 친구를 생각해주는 병연이, 나에게 자신감을 잃지 않게 해준 신덕이, 친구가 다양하게 생각할 수 있게 해주고 긍정의 힘을 잃지 않게 해준 대성이, 이들이 있어서 지금의 결실이 더욱 더 값진 것 같습니다.

마지막으로 한결같은 마음으로 막내아들이 학문에 전념할 수 있게 지원해주시고 믿어 주신 부모님, 그리고 동생을 끝까지 믿어주고 격려해주신 호인형, 큰형수, 항상 건강이 중요하다고 잘 챙기라고 이야기하셨던 매형, 누나, 동생의 어려움을 가장 잘 알아주셨던 호일형, 많은 격려를 해주셨던 호봉형, 막내형수, 그리고 ‘삼촌, 삼촌’하면서 많은 웃음을 주었던 조카들과도 이 기쁨을 함께 나누고 싶습니다.

이 논문이 나오기까지 도움 주신 모든 분들께 다시 한 번 머리 숙여 감사의 말씀을 드리며, 보다 더 열심히 노력하며, 최고보다는 최선을 다하여 열심히 살겠습니다.

2011년 2월  
김 호 철

