



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

2011年 8月  
석사학위논문

미생물 반응에 의한  
연약지반의 강도 개선

조선대학교대학원

토목공학과

박 경 호

미생물 반응에 의한  
연약지반의 강도 개선

**Strength Improvement of Soft Ground  
with Microbial Reaction**

2011년 8월 25일

조선대학교 대학원

토목공학과

박 경 호

미생물 반응에 의한  
연약지반의 강도 개선

지도교수 김 대 현

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2011년 4월

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

박 경 호

박경호의 석사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수     朴    吉    鉉    (인)

위    원 조선대학교 교수     金    聖    洪    (인)

위    원 조선대학교 교수     金    大    賢    (인)

2011년 5월

조 선 대 학 교 대 학 원

# 목 차

## ABSTRACT

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 제 1 장 서론 .....                    | 1  |
| 1.1 연구배경 및 목적 .....               | 1  |
| 1.2 국내·외 연구 동향 .....              | 3  |
| 1.2.1 국내 연구 동향 .....              | 4  |
| 1.2.2 국외 연구 동향 .....              | 7  |
| 1.3 연구방법 및 범위 .....               | 13 |
| <br>                              |    |
| 제 2 장 미생물 고결화 특성 .....            | 14 |
| 2.1 미생물 고결화 개념 .....              | 14 |
| 2.2 미생물 고결화 시 고려해야 할 요인 .....     | 16 |
| 2.2.1 미생물 용액의 pH .....            | 16 |
| 2.2.2 미생물의 크기 및 공극비의 관계 .....     | 16 |
| 2.2.3 흡 입자의 크기 .....              | 17 |
| 2.2.4 수분함량 및 온도 .....             | 18 |
| 2.2.5 Urea의 함량에 따른 미생물 성장곡선 ..... | 18 |
| 2.3 미생물에 의한 탄산칼슘 생성 이론 .....      | 20 |
| 2.3.1 미생물과 요소(Urease)의 반응 .....   | 20 |
| 2.3.2 탄산칼슘 생성 이론 .....            | 21 |
| 2.3.2.1 광합성에 의한 탄산칼슘 생성 .....     | 21 |
| 2.3.2.2 미생물에 의한 탄산칼슘 생성 .....     | 21 |

|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| 제 3 장 미생물 고결화 규명을 위한 실내시험 ..... | 24     |
| 3.1 개요 .....                    | 24     |
| 3.2 시험용기 및 시험시료 배합비 .....       | 26     |
| 3.2.1 시험용기 .....                | 26     |
| 3.2.2 연구에 사용된 시료 .....          | 28     |
| 3.2.2.1 모래 시험 시료 배합비 .....      | 28     |
| 3.2.2.2 실트 시험 시료 배합비 .....      | 30     |
| 3.3 미생물 배양 방법 .....             | 32     |
| 3.3.1 일반농도처리 .....              | 32     |
| 3.3.2 고농도처리 .....               | 35     |
| 3.3.3 상층액처리 .....               | 37     |
| 3.3.4 고농도처리 X2 .....            | 37     |
| 3.3.5 25%t시료 고농도처리 .....        | 38     |
| 3.4 메커니즘 분석 방법 및 장비 .....       | 39     |
| 3.4.1 전자현미경의 원리 및 특징 .....      | 39     |
| 3.4.1.1 전자현미경의 원리 .....         | 39     |
| 3.4.1.2 전자현미경의 특징 .....         | 39     |
| 3.4.2 X-회절분석(XRD) 시험 .....      | 41     |
| 3.4.2.1 X-선의 성질 .....           | 41     |
| 3.4.2.2 X-회절분석 시험의 특징 .....     | 41     |
| 3.4.3 포켓관입 시험 .....             | 42     |
| <br>제 4 장 실험 결과 및 고찰 .....      | <br>43 |
| 4.1 미생물 용액, 염화칼슘 용액 반응 실험 ..... | 43     |
| 4.2 미생물 반응을 통한 흙의 변화 .....      | 46     |
| 4.3 전자현미경(SEM) 분석 .....         | 48     |

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 4.3.1 전자현미경(SEM) 분석 결과 .....         | 48 |
| 4.3.1.1 전자현미경(SEM) 모래 7일 분석 결과 ..... | 48 |
| 4.3.1.2 전자현미경(SEM) 실트 7일 분석 결과 ..... | 52 |
| 4.3.2 EDX 분석 결과 .....                | 55 |
| 4.3.2.1 EDX 모래 7일 분석 결과 .....        | 55 |
| 4.3.2.2 EDX 실트 7일 분석 결과 .....        | 62 |
| 4.3.3 Mapping 분석 결과 .....            | 67 |
| 4.4 X-회절 분석(XRD) .....               | 68 |
| 4.4.1 X-회절 모래 분석(XRD) 결과 .....       | 68 |
| 4.4.2 X-회절 실트 분석(XRD) 결과 .....       | 74 |
| <br>                                 |    |
| 제 5 장 결론 .....                       | 80 |
| <br>                                 |    |
| 참고문헌 .....                           | 82 |



# 표 목 차

|  |    |
|--|----|
| 표 1.1 모르타르 공시체 배합비 .....                         | 6  |
| 표 3.1 모래 시험 시료 배합비 .....                         | 29 |
| 표 3.2 모래 시료의 물리적 특성 .....                        | 30 |
| 표 3.3 실트 시험 시료 배합비 .....                         | 31 |
| 표 3.4 실트 시료의 물리적 특성 .....                        | 31 |
| 표 4.1 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 XRD 분석 .....         | 44 |
| 표 4.2 모래 무처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량 .....          | 56 |
| 표 4.3 모래 일반농도처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량 .....       | 57 |
| 표 4.4 모래 고농도처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량 .....        | 58 |
| 표 4.5 모래 상층액처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량 .....        | 59 |
| 표 4.6 모래 고농도처리 X2 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량 .....     | 60 |
| 표 4.7 모래 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량 .....  | 61 |
| 표 4.8 실트 무처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량 .....          | 63 |
| 표 4.9 실트 일반농도처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량 .....       | 64 |
| 표 4.10 실트 고농도처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량 .....       | 65 |
| 표 4.11 실트 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량 ..... | 66 |
| 표 4.12 모래 7일 Mapping(Ca 함유량) 분석 .....            | 67 |
| 표 4.13 모래 무처리 7일 시료에 대한 XRD 광물 분석 .....          | 69 |
| 표 4.14 모래 일반농도처리 7일 시료에 대한 XRD 광물 분석 .....       | 70 |
| 표 4.15 모래 고농도처리 7일 시료에 대한 XRD 광물 분석 .....        | 71 |
| 표 4.16 모래 상층액처리 7일 시료에 대한 XRD 광물 분석 .....        | 72 |
| 표 4.17 모래 고농도처리 X2 7일 시료에 대한 XRD 광물 분석 .....     | 73 |
| 표 4.18 모래 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 XRD 광물 분석 .....  | 74 |
| 표 4.19 실트 무처리 7일 시료에 대한 XRD 광물 분석 .....          | 76 |
| 표 4.20 실트 일반농도처리 7일 시료에 대한 XRD 광물 분석 .....       | 77 |
| 표 4.21 실트 고농도처리 7일 시료에 대한 XRD 광물 분석 .....        | 78 |
| 표 4.22 실트 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 XRD 광물 분석 .....  | 79 |

# 그림 목 차

|   |    |
|---|----|
| 그림 1.1 PVC Mold 공시체 성형장비 .....                    | 5  |
| 그림 1.2 미생물 반응 실험을 통한 흙의 변화 .....                  | 6  |
| 그림 1.3 미생물을 이용한 콘크리트 균열 치료 .....                  | 7  |
| 그림 1.4 SEM 분석결과 .....                             | 8  |
| 그림 1.5 SEM 분석 및 압축강도 시험 결과 .....                  | 9  |
| 그림 1.6 무처리된 모래시료 및 일반농도로 처리된 모래시료의 반응 실험 비교 ..... | 10 |
| 그림 1.7 PVC 모형실험 장치 모식도 .....                      | 11 |
| 그림 2.1 흙 입자 공극 사이의 탄산칼슘 모식도 .....                 | 15 |
| 그림 2.2 초기 미생물 용액의 pH 값 .....                      | 16 |
| 그림 2.3 미생물 크기에 따른 박테리아 종류 .....                   | 17 |
| 그림 2.4 수분함량, 온도, 호흡속도와의 관계 .....                  | 18 |
| 그림 2.5 Urea의 양에 따른 미생물 성장곡선 .....                 | 19 |
| 그림 2.6 미생물 고결화 메커니즘 .....                         | 23 |
| 그림 3.1 미생물 고결화를 위한 시험과정 .....                     | 25 |
| 그림 3.2 시험용기 입체 모형도 .....                          | 27 |
| 그림 3.3 시험용기 .....                                 | 27 |
| 그림 3.4 모래 시료의 입도분포곡선 .....                        | 30 |
| 그림 3.5 미생물 배양배지 만드는 방법 .....                      | 33 |
| 그림 3.6 계대배양방법 .....                               | 34 |
| 그림 3.7 원심분리기를 이용한 고농도처리 .....                     | 36 |
| 그림 4.1 미생물 용액과 염화칼슘 용액 방응 실험 .....                | 43 |
| 그림 4.2 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 XRD 분석 .....         | 44 |
| 그림 4.3 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 SEM 분석 .....         | 45 |
| 그림 4.4 무처리, 고농도처리 7일 반응 모습 .....                  | 46 |
| 그림 4.5 25%시료 고농도처리 7일 반응 모습 .....                 | 47 |
| 그림 4.6 모래 무처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석 .....       | 49 |
| 그림 4.7 모래 일반농도처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석 .....    | 49 |

|  |    |
|--|----|
| 그림 4.8 모래 고농도처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석 .....        | 50 |
| 그림 4.9 모래 상층액처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석 .....        | 50 |
| 그림 4.10 모래 고농도처리 X2 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석 .....    | 51 |
| 그림 4.11 모래 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석 ..... | 51 |
| 그림 4.12 실트 무처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석 .....         | 53 |
| 그림 4.13 실트 일반농도처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석 .....      | 53 |
| 그림 4.14 실트 고농도처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석 .....       | 54 |
| 그림 4.15 실트 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석 ..... | 54 |
| 그림 4.16 모래 무처리 7일 시료에 대한 EDX 분석 .....                | 56 |
| 그림 4.17 모래 일반농도처리 7일 시료에 대한 EDX 분석 .....             | 57 |
| 그림 4.18 모래 고농도처리 7일 시료에 대한 EDX 분석 .....              | 58 |
| 그림 4.19 모래 상층액처리 7일 시료에 대한 EDX 분석 .....              | 59 |
| 그림 4.20 모래 고농도처리 X2 7일 시료에 대한 EDX 분석 .....           | 60 |
| 그림 4.21 모래 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 EDX 분석 .....        | 61 |
| 그림 4.22 실트 무처리 7일 시료에 대한 EDX 분석 .....                | 63 |
| 그림 4.23 실트 일반농도처리 7일 시료에 대한 EDX 분석 .....             | 64 |
| 그림 4.24 실트 고농도처리 7일 시료에 대한 EDX 분석 .....              | 65 |
| 그림 4.25 실트 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 EDX 분석 .....        | 66 |
| 그림 4.26 모래 무처리 7일 시료에 대한 XRD 분석 .....                | 69 |
| 그림 4.27 모래 일반농도처리 7일 시료에 대한 XRD 분석 .....             | 70 |
| 그림 4.28 모래 고농도처리 7일 시료에 대한 XRD 분석 .....              | 71 |
| 그림 4.29 모래 상층액처리 7일 시료에 대한 XRD 분석 .....              | 72 |
| 그림 4.30 모래 고농도처리 X2 7일 시료에 대한 XRD 분석 .....           | 73 |
| 그림 4.31 모래 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 XRD 분석 .....        | 74 |
| 그림 4.32 실트 무처리 7일 시료에 대한 XRD 분석 .....                | 76 |
| 그림 4.33 실트 일반농도처리 7일 시료에 대한 XRD 분석 .....             | 77 |
| 그림 4.34 실트 고농도처리 7일 시료에 대한 XRD 분석 .....              | 78 |
| 그림 4.35 실트 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 XRD 분석 .....        | 79 |

# ABSTRACT

## Strength Improvement of Soft Ground with Microbial Reaction

Park, Kyeong Ho

Advisor : Prof. Kim, Daehyeon

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

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 천연소재의 고갈로 인한 원자재 값 상승과 급속한 산업발전에 따라 국가 기간 산업의 양적, 질적 확대에 인하여 국내 부지의 확보가 용이하지 않은 실정이다. 이에 효율적으로 토지를 이용하고자 그동안 건설부지로 고려치 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 필요하다.

느슨한 사질토나 연약한 실트지반은 압축성이 크며, 지지력이 작고, 보일링 및 히빙 등이 발생되어 기초지반으로서 안정성 확보가 매우 어렵다. 기존의 연약지반 공법을 살펴보면 연약지반의 현장조건 등을 고려하여 연직배수체인 샌드 드레인 및 페이퍼 드레인을 사용한 압밀배수공법, 동적하중을 이용하여 연약지반을 개량하는 다짐공법, 연약지반의 원 지반 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 지반 공학적으로 문제가 되고 있는 연약한 점토지반, 느슨한 모래지반에 친환경 신소재인 미생물을 첨가하여 생·화학적 반응을 통해 흙의 고결화(Cementation) 특

성을 규명하고 새로운 신공법을 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 흙 입자와 미생물용액의 생·화학적 고결화 발생 메커니즘의 규명이 매우 중요하다 할 수 있다.

본 연구에서는 새로운 메커니즘인 미생물을 연약지반에 교반하여 생장을 통해 탄산칼슘( $CaCO_3$ )을 생성함으로 흙 입자와 흙 입자 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.

## 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 선행연구를 아래와 같이 간략히 요약해 보았다.

첫 번째로, 지반공학적인 분야로 국내에서는 김대현(2010) 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 x 1.1m x 1.0 m)을 통해 주입공법을 사용함으로써 느슨한 모래지반에 적용하여 강도를 나타내는 등 지반공학 분야의 공법을 적용한 다양한 연구가 진행되고 있다.

두 번째로, 건축공학적인 분야로 Ramakrishnan(2005) 등은 콘크리트의 강도 개선을 위해 미생물을 사용하였으며, 김화중(2010) 등은 모르타르의 균열에 자기치유 스마트 콘크리트 개발에 대한 기초연구를 하였고, Graef(2005) 등은 콘크리트 구조물 표면에 발생한 이끼 등에 의한 찌꺼기를 미생물의 사용으로 제거하는 방법 등 미생물의 적용성에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

세 번째로, 미생물학적인 분야로는 Aydilek(2008)이 흙 표면에 서식하면서 성장하는 미생물의 모습을 선처리를 통해 전자현미경(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.

지반공학 분야로는 첫 번째, 오종신(2008)이 미생물을 화강 풍화토에 적용하여 실험을 실시하였으나, 석회를 사용함으로써 순수한 미생물의 고결화 효과를 나타내지 못하였다. 실험에 사용한 시료는 국내에 분포하고 있는 화강 풍화토 계열로써 광주 진월 지구 택지 조성공사 현장에서 채취하였으며, 미생물은 *Sporosarcina Pasteurii*로써 한국생명공학연구원 생물자원센터에서 균 배양체로 균주를 분양 받아서 사용했다. 침강제는 염화칼슘 0.75M(Mol)과 질산칼슘 0.75M이 사용되었으며, 혼화제로 소석회가 3%로 첨가되었다.

시험 결과 미생물 용액과 침강제의 반응으로 인해 침전물이 생성되었으며, 규화물과 탄산칼슘( $CaCO_3$ )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, 시험을 통해 시료+미생물용액+혼화제 혼합토와 시료+미생물용액+혼화제+침강제 혼합토의 강도는 양생기간이 길어짐에 따라 강도가 증가함을 알 수 있었다. 이러한 결과로 시료+미생물용액+혼화제+침강제 혼합토는 시료+미생물 용액 보다 약115%의 강도가 더 증가됨을 확인 할 수 있었다.

그러나 미생물 용액에 대한 배양방법이 명확히 명시되지 않았으며, 시료와 미생물 및 반응액의 배합에 있어서 시료+소석회 혼합토 및 시료+소석회+미생물 용액 혼합토의 두 실험조건 비교가 나타나지 않아 미생물 자체의 효과를 확인 할 수 없었다. 특히, 소석회의 경우 점토에 사용하면 지반의 물을 흡수하여 연약지반 자체를 보강하는 기능이 있기 때문에 본 실험에서는 순수한 미생물의 작용이라고 보기가 어렵다. 또한 미생물 고결화 반응을 통한 메커니즘 규명이 명확하게 나타나 있지 않았다.



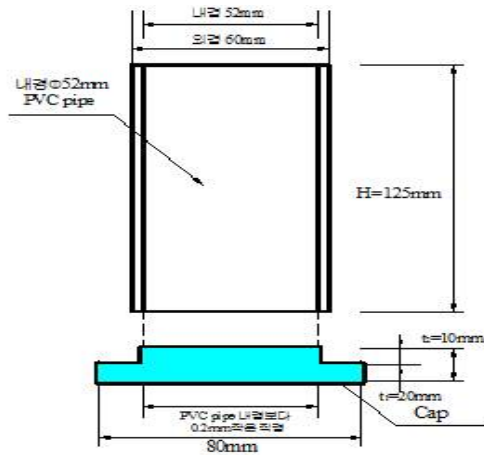


그림 1.1 PVC Mold 공시체 성형장비(오종신, 2008)

두 번째, 김호철(2010)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.

시험결과 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 Ca 계열의 함유가 높아짐에 따라 칼슘계열의 증가를 확인 할 수 있었고, 그림 1.2와 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 1.2 미생물 반응 실험을 통한 흙의 변화(김호철, 2010)

건축공학분야로는 김화중(2009) 등이 콘크리트 구조물의 장기 수명화를 목적으로 빈 잡한 검사나 보수작업을 필요로 하지 않고 콘크리트에 발생하는 미세한 균열에도 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/(256 cm<sup>3</sup> x 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+인산완충액을 시멘트에 60%로 pH의 변화를 위해 인산염 완충액(Phosphate buffer)사용하여 모르타르 공시체를 제작하였다. 3일간 수중양생을 실시, 절건 상태에서 균열을 만들어 균열부에 10ml주사기를 이용, 그

림 1.3과 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.

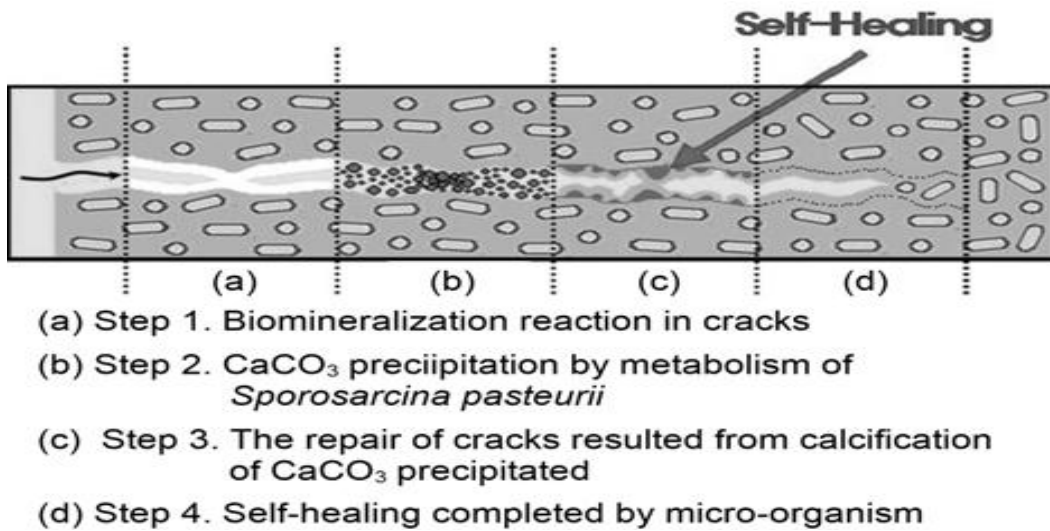


그림 1.3 미생물을 이용한 콘크리트 균열 치료(김화중 등, 2009)

## 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, 2009, 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 우레아의 분해를 통해 발생하다는 것을 입증하기 위해 미생물이 흙 입자에 실제로 존재 하는지를 알아보기 위해 실험을 실시하였다. 실험된 공시체에 선 처리(Mounting, Coating)를 통해 아래 그림 1.4에서 보이는 것과 같이 흙 속에 미생물의 존재 가능성을 입증하였다.

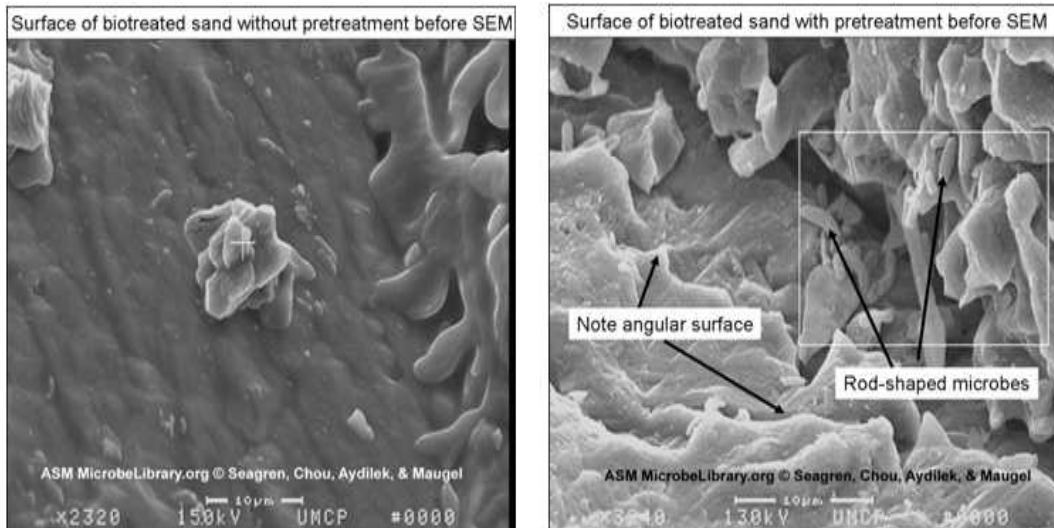


그림 1.4 SEM 분석결과(Aydilek 등, 2008)

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 1.5와 같이 균열부분의 SEM 조사로 방해석 결정체의 존재를 확인하였고, 살아있는 박테리아  $7.6 \times 10^2$ (cells/cm<sup>2</sup>) 일 때 압축강도가 높음을 확인 할 수 있었다.

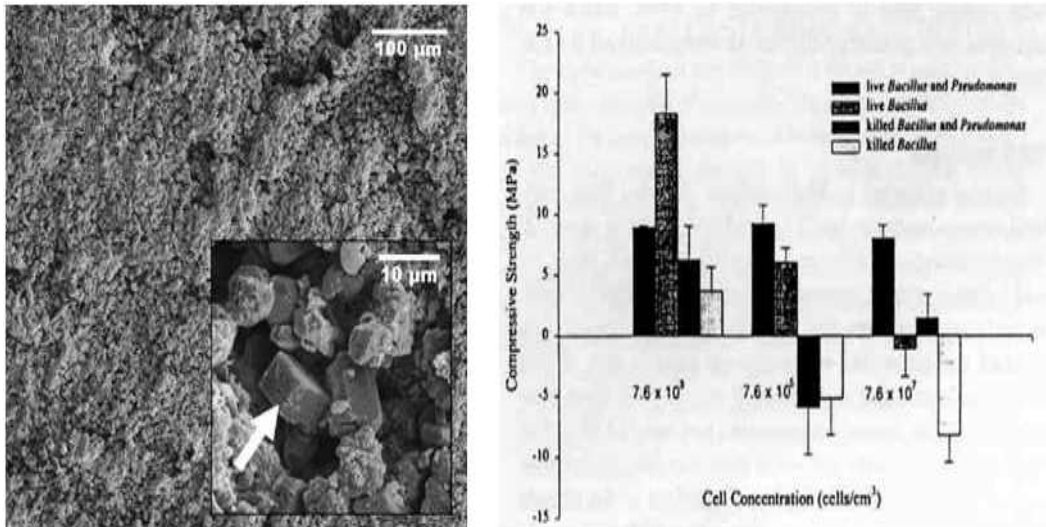


그림 1.5 SEM 분석 및 압축강도 시험 결과(Ramachandran 등, 2001)

지반공학 분야로 첫 번째, Dejong(2009) 등은 Ottawa 50-70 모래를 이용하여 무 처리된 모래시료, 석고 시멘트로 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 실험이 실시되었고, 시험에서 석고 시멘트로 처리된 모래시료는 탄산칼슘 고결 작용과 가장 비슷하게 반응되어 진다. 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 1.6은 무 처리 된 모래 시료(왼쪽)와 미생물로 처리된 모래 시료(오른쪽)를 나타내고 있으며, 미생물의 생장으로 인해 흠 입자와 흠 입자 사이에 고결화가 발생되었음을 나타내고 있다. 그러나 실험과정이 복잡하여 적용성에 있어서 어려움이 있었다.

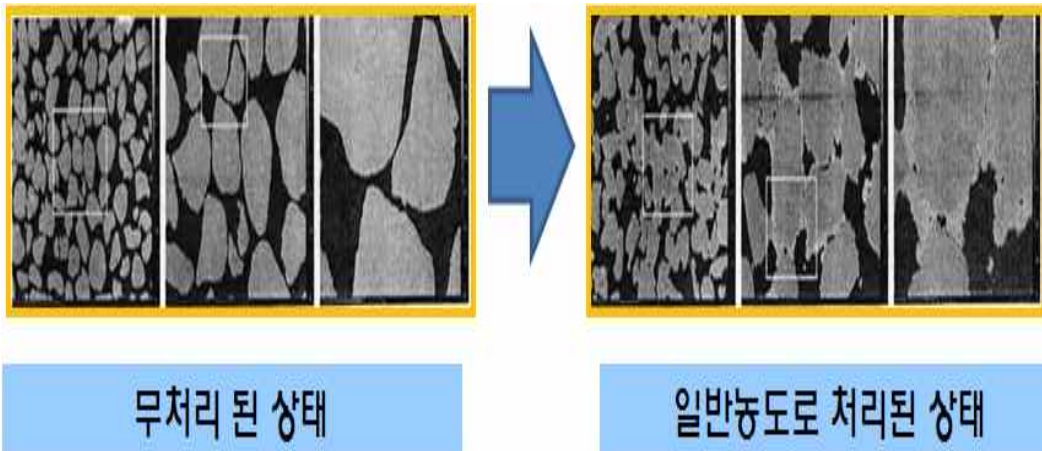


그림 1.6 무처리된 모래시료 및 일반농도로 처리된 모래시료의 반응 실험 비교(Dejong 등, 2006)

두 번째, 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 측정하였다. 박테리아 용액과 시약용액 둘 다 낮은 압력(약 7m/day)으로 기둥 길이 전체에 걸쳐 막힘없이 주입이 되어졌다.

시험의 결과로는 비과과 시험인 초음파 속도로 강도 변형 식을 사용하여  $100\text{kg/cm}^2$  정도의 큰 값을 얻었으나, 정량적인 분석이 아닌 추정치에 의한 값으로 일축압축강도의 값이 추정되어졌다.

그림 1.7은 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 길어질수록 탄산칼슘 침전의 양은 적어졌다. 이로서 미생물의 침전효과는 반응용액과 혼합된 직후 탄산칼슘의 침전이 일어남을 알 수 있었고, 탄산칼슘 침전의 양에 따라 강도의 효과가 높은 것으로 나타남을 알 수 있었다.

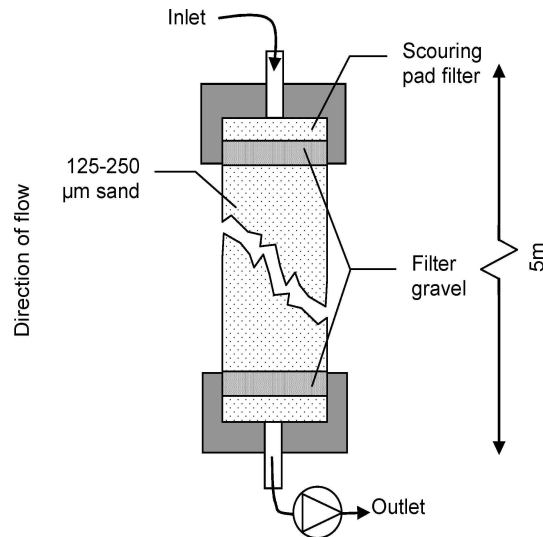


그림 1.7 PVC 모형실험 장치 모식도(Whiffin, 2004)



세 번째, Paassen(2009) 등은 현장 적용 성을 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/D10 = 1.6)와 Iltterbeck 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 side에서 일정한 수위로 박스 중앙에서 옆면을 따라 주입률(50L/hr)로 주입 되어졌다. 50일 동안에 3500L의 시약용액은 8번에 주입되어 약 12%의 효율로 200mol의 탄산칼슘(20kg/m<sup>3</sup>)은 침전되어졌다. 이 실험에서는 탄산칼슘은 코너와 바닥에서 옆면을 따라 존재함을 확인 할 수 있었다.

② Iltterbeck 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 4000L의 시약용액은 16번 주입되었다. 이것으로 50%의 효율로 1000mol의 탄산칼슘(100kg/m<sup>3</sup>)이 침전되어졌다.

시험결과로는 Manual cone penetration test를 통하여 표면에서 50kg/cm<sup>2</sup>보다 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 추세인데, 이러한 연약지반 및 준설 매립지반은 초기 지지력이 낮고, 함수비가 높아 기초지반으로 사용하는 데 많은 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 대책공법들이 개발되어 현장에 적용되고 있으나, 단순히 지반을 개량하는 데에만 중점을 두고 있어 발생하는 환경문제를 개선에 많은 한계가 있다.

본 연구에서는 미생물을 연약지반에 적용하여 미생물 성장을 통해 탄산칼슘( $CaCO_3$ )을 생성시켜 입자 간의 공극을 채워줌으로써 연약지반의 강도 개선을 하고자 한다. 미생물 처리는 무처리, 일반농도처리, 고농도처리, 상층액처리, 고농도처리 X2, 25%시료 고농도처리 등의 다양한 미생물 처리를 사용하여 느슨한 모래, 실트질 공시체의 재령 일 7일에 따른 고결화 정도를 확인하였으며, 고결화 정도를 파악하기 위해 포켓관입 시험기를 이용하여 연약지반의 강도 효과를 측정 하였다. 그리고 미생물 urease에 의한 탄산칼슘 침전의 고결화 메커니즘을 규명하기 위해 흙 입자의 표면을 100배 ~ 5000배 확대하여 표면의 결정을 확인하는 전자현미경(SEM) 분석, 흙 입자에 생성된 광물을 원소기호로 표시하여 백분율로 나타내는 EDX 분석, 흙 표면을 3D모습으로 표현하여 각각의 원소 별로 존재의 유무를 나타내는 Mapping 분석 및 X선을 이용한 파동성과 결정내 원자의 규칙적인 배열을 Scale Factor로 나타내어 정량적인 분석이 가능한 XRD 분석을 실시하여 흙 입자간의 생성된 탄산칼슘( $CaCO_3$ ) 정도를 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 흙 입자들을 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 흙 입자들을 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 높이려고 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 활성제, 흡입제, 촉매제의 밀도에 따라 다르며, 범위는 1 ~ 300min 까지 할 수 있다(Karol 2003).

아래 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.

### Distribution Alternatives

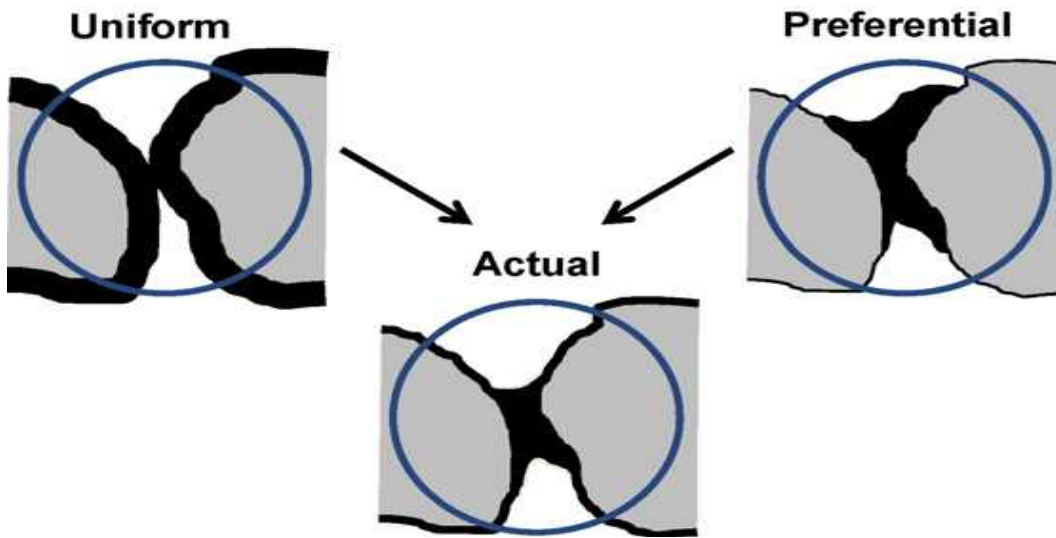


그림 2.1 흙 입자 공극 사이의 탄산칼슘 모식도(Dejong 등, 2010)

## 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 최대가 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 흙에 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.

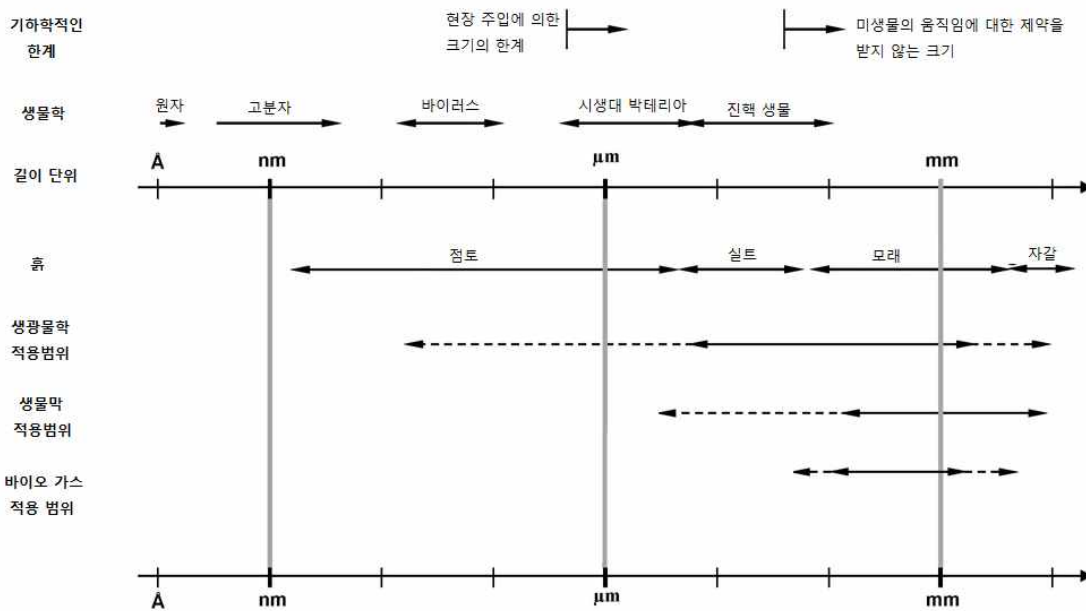


그림 2.3 미생물 크기에 따른 박테리아 종류(Mitchell 등, 2005)

### 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 이

상 ~ 4.75mm 미만의 입자들을 나태내고, 실트의 경우 0.002mm 이상 ~ 0.075mm 미만의 입자들이며, 점토의 경우 0.002mm 미만의 입자들을 나타낸다.

## 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.

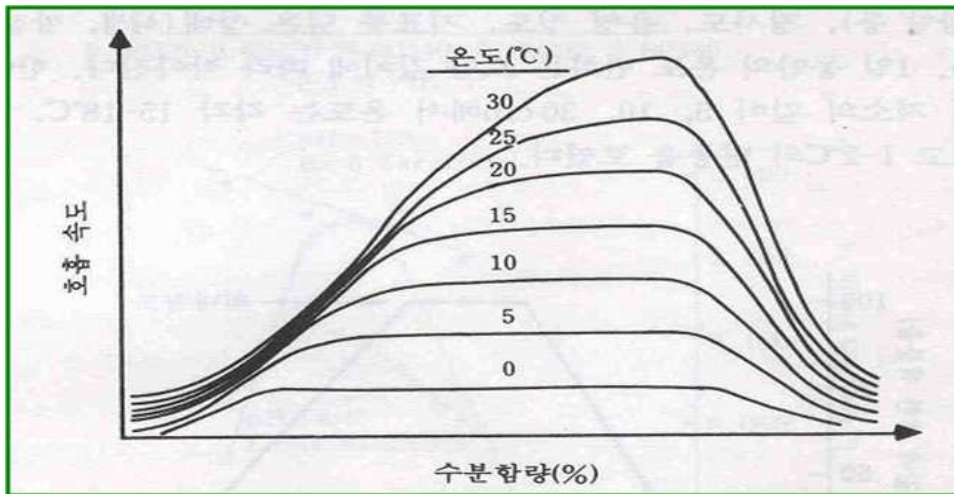


그림 2.4 수분함량, 온도, 호흡속도와의 관계(Prescott`s, 2008)

## 2.2.5 Urea의 함량에 따른 미생물 성장곡선

미생물 활성화를 알아보고자 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 오래 동안 성장이 가능함을 확인 할 수 있었다. 또

한 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 기간인 늦은 성장기 시간대로 볼 수 있다.

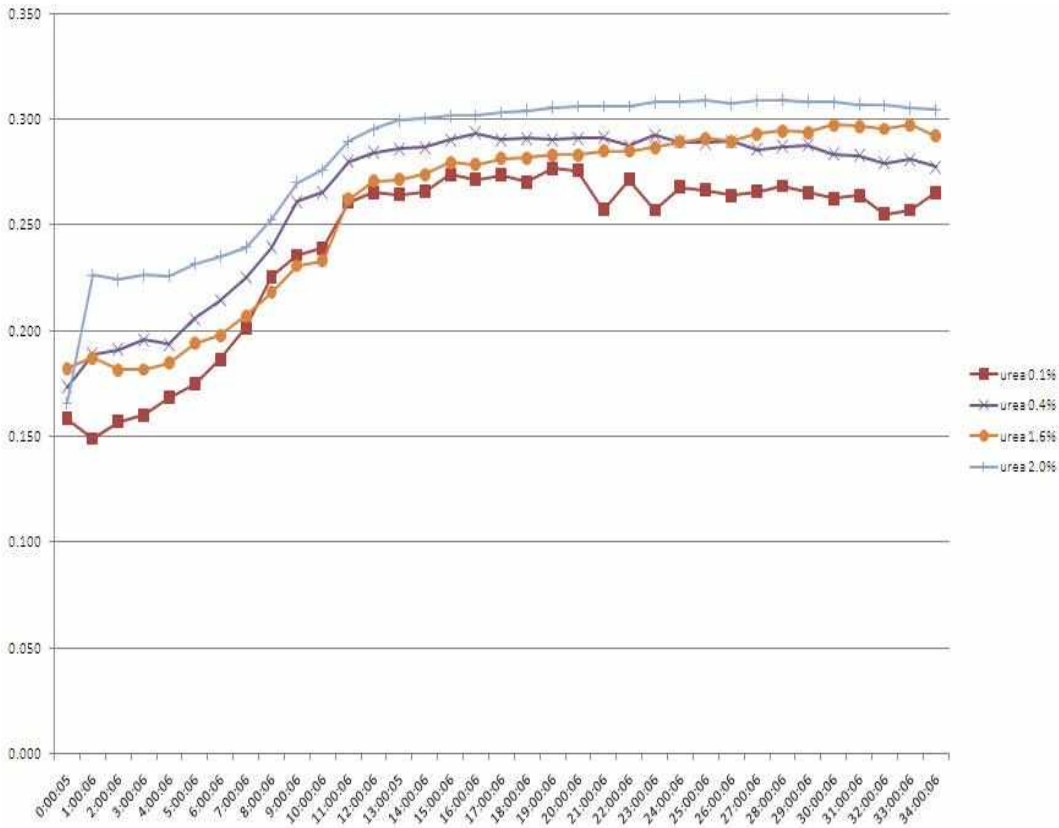
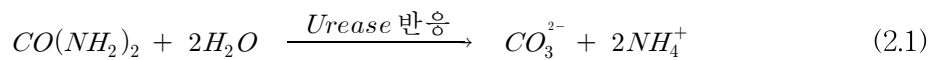


그림 2.5 Urea의 양에 따른 미생물 성장곡선

## 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 관여한다. 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)

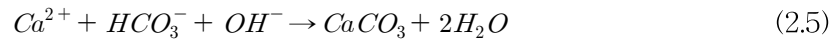
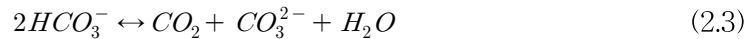
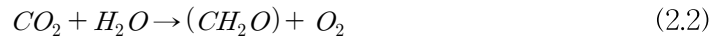




## 2.3.2 탄산칼슘 생성 이론

### 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 2.4 식과 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).

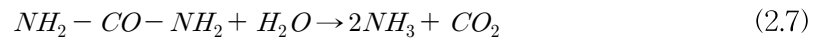


### 2.3.2.2 미생물에 의한 탄산칼슘 생성

미생물 요소를 먹잇감으로 삼아 생장을 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.



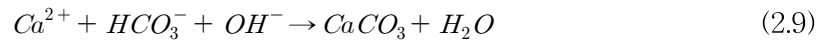
*Sporosaricina pasteurii* 미생물은 요소( $CO(NH_2)_2$ )와 물( $H_2O$ )과 반응하여 2개의 암모늄( $2NH_3$ )과 이산화탄소( $CO_2$ )로 분해되는 반응식은 아래 식 2.7과 같다.



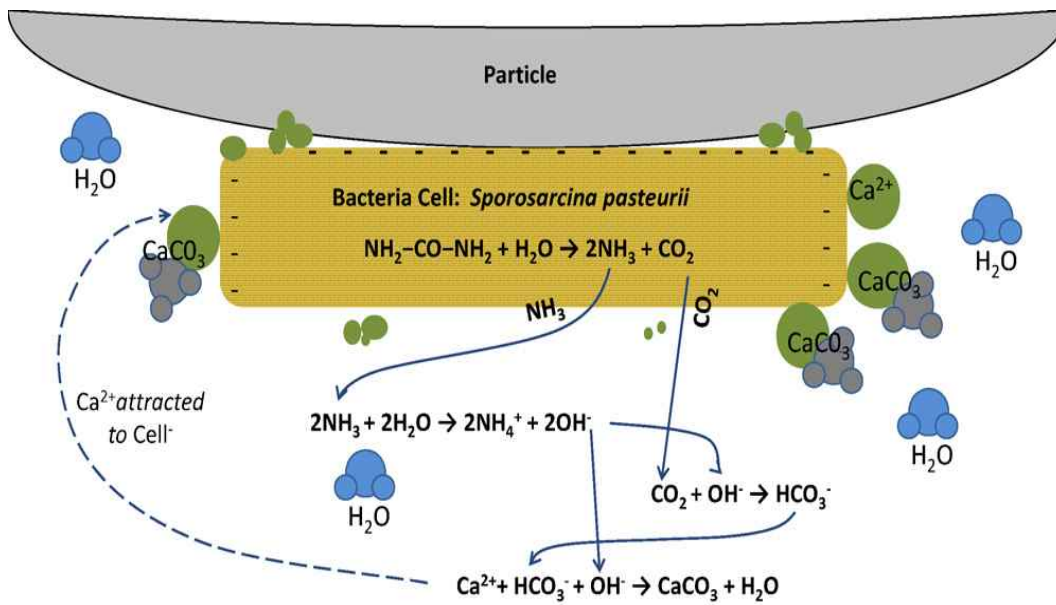
이때 발생하는 2개의 암모늄은 수용액 상태인 물과 다시 결합하여 2개의 수산화이온 ( $OH^-$ )가 발생한다. 이러한 수산화이온( $OH^-$ )은 이산화탄소( $CO_2$ )와 결합하여 본 연구의 핵심적인 요소 탄산염( $HCO_3^-$ )을 생성하게 된다. 탄산염의 생성 과정은 아래 식 2.8과 같다.



탄산염은 물과 반응 시 세 가지 상태로 존재 할 수 있다. 즉, 탄산이온( $CO_3^{2-}$ ), 탄산수소이온( $HCO_3^-$ ), 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( $Ca^{2+}$ )와 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  $\text{NH}_4^+$  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 미생물을 이용한 고결화(Cementation)는 입자와 입자 사이의 공간에 미생물이 직접 침투하여 공극의 사이를 보다 조밀하게 채워주어 강도를 증진하는 역할을 한다. 이러한 미생물이 적용될 지반은 연약지반으로써 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 고결 시키는 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 이용하여 탄산칼슘의 정도를 확인하고 이에 따른 강도 증가 정도를 실험을 통해 알아보았다. 강도측정을 위한 시험으로 포켓관입 시험기를 통해 일축압축강도를 실시하였으며, 탄산칼슘 메커니즘을 확인하기 위해 전자현미경(SEM, EDX, Mapping) 분석 및 XRD 분석을 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( $CaCl_2$ )을 첨가하여, 무처리, 일반농도처리, 고농도처리, 상층액처리, 고농도처리 X2, 25%시료 고농도처리 등의 7일 재령 일에 따른 고결정도를 확인하였다. 그림 3.1은 미생물 고결화(Cementation) 가능성을 위한 시험과정을 나타낸 그림으로 시험과정에 대해 개략적으로 다음과 같이 나타내었다.

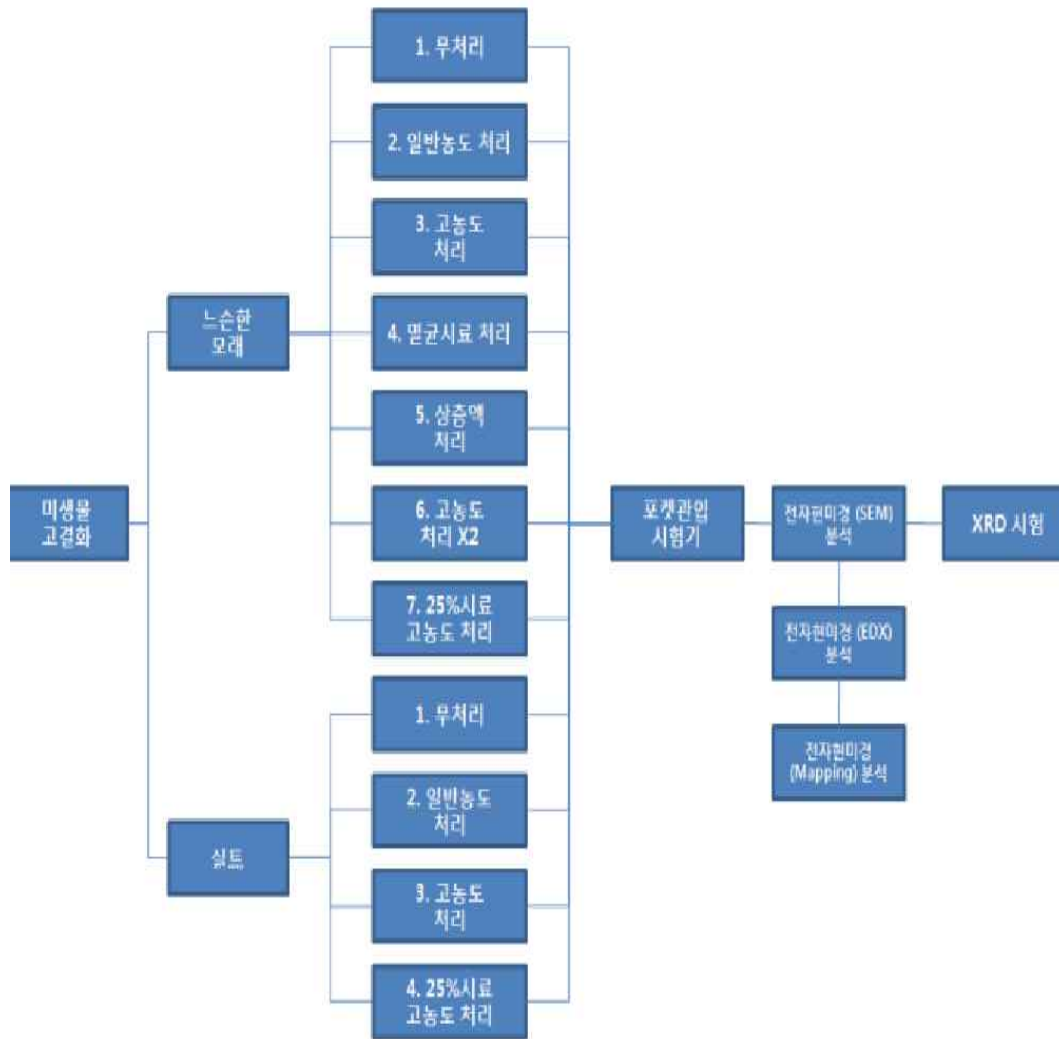


그림 3.1 미생물 고결화를 위한 시험과정

## 3.2 시험용기 및 시험시료 배합비

### 3.2.1 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, 실험된 사용된 용기는 직경 5.5cm, 높이 12cm의 원형 용기로써 직경 대 높이의 비율이 1: 2 이상으로 제작하였다. 시험용기는 투명 아크릴로 제작되었으며, 실질적으로 이루어지는 미생물 반응을 육안 상으로 확인하고자 하였다. 또한, 미생물 호흡을 위해 용기 상단에 5mm의 공기구멍을 만들었으며, 전체의 70%의 높이 표시를 하여 공기가 충분히 존재할 수 있는 공간을 남겨두었다. 시험에 사용할 용기의 그림은 그림 3.2와 그림 3.3과 같다.

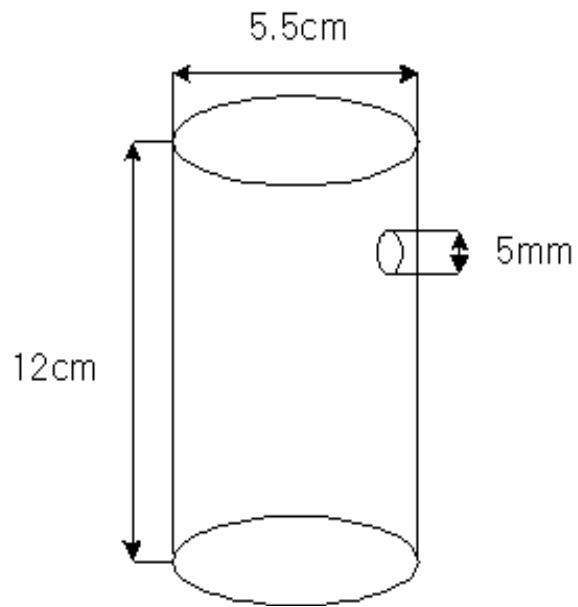


그림 3.2 시험용기 입체 모형도(김호철, 2010)



그림 3.3 시험용기

### 3.2.2 연구에 사용된 시료

미생물 고결화의 구성 요소로는 시료, 미생물, 염화칼슘이 있다. 본 연구에 사용된 모래는 주문진 표준사를 사용 하였으며, 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. 실트질 시료는 국내에 널리 분포하고 있는 화강 풍화토계열의 시료로써 광주 효천 2지구 LH 보금자리 주택공사 현장에서 채취한 시료를 사용하였다. 실트질의 경우는 불균등한 침하로 인해 지반에 부등침하가 일어나며 지하수의 상승이나 홍수 시 차수성이 낮아 침하가 매우 오랜 기간 동안 발생하여 문제를 일으킨다. 또한, 히빙 현상으로 굴착 면이 불룩하게 솟아오르는 등 다양한 문제점을 자기고 있어 lime을 주입하는 공법으로 지반의 강도를 보강하거나, 치환 등의 방법으로 연약지반의 강도를 보강하는 방법이 주로 이용된다. 실트질 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)을 실시하였다. 이에 본 연구에서는 주문진 표준사와 화강 풍화토 계열 시료에 무처리, 일반농도처리, 고농도처리, 상층액처리, 고농도처리 X2, 25%시료 고농도처리 등으로 미생물 용액을 첨가하여 미생물 고결화(Cementation)의 강도를 살펴보았다.

#### 3.2.2.1 모래 시험 시료 배합비

본 연구에 사용된 모래시험시료의 배합비는 표 3.1과 같이 다짐시험을 통해 얻어진 최적 함수비 14.92% 기준으로 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액을 1: 1 비율로 첨가했으며, 느슨한 모래의 상태를 재현하기 위하여 상대밀도 40%를 맞추어 시험을 실시하였다.



표 3.1 모래 시험 시료 배합비

(단위 : g)

| 시료 | 재령일(7일)        | Soil   | 염화칼슘<br>용액 | 미생물<br>용액 | 물  |
|----|----------------|--------|------------|-----------|----|
| 모래 | 무처리            | 317.32 | -          | -         | 48 |
|    | 일반농도처리         | 317.32 | 24         | 24        | -  |
|    | 고농도처리          | 317.32 | 24         | 24        | -  |
|    | 상층액처리          | 317.32 | 24         | 24        | -  |
|    | 고농도처리 X2       | 317.32 | 24         | 24        | -  |
|    | 25%시료<br>고농도처리 | 317.32 | 24         | 24        | -  |

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

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

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

균등계수( $C_u$ ) =  $0.58 / 0.33 = 1.76$ , 곡률계수( $C_c$ ) =  $0.45^2 / (0.33 * 0.58) = 1.06$  값을 얻을 수 있다. 그림 3.4에서 볼 수 있듯이 입경 가적 곡선이 매우 급경사이고, 균등계수가 6보다 작으므로 입도 분포가 나쁜 빈입도(poor grading)임을 알 수 있다.

표 3.2 모래 시료의 물리적 특성

| 시료     | 비중(Gs) | # 200(%) | $r_{(d_{max})}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | OMC(%) |
|--------|--------|----------|--------------------------------------|--------|
| 모래(SP) | 2.67   | 2.4      | 1.608                                | 14.92  |

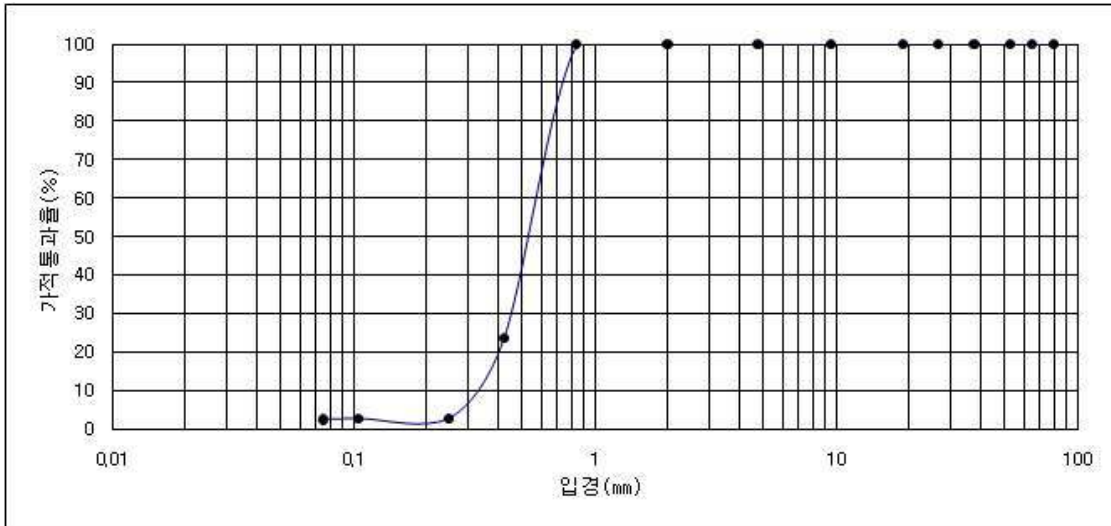


그림 3.4 모래 시료의 입도분포곡선(김호철, 2010)

### 3.2.2.2 실트 시험 시료 배합비

본 연구에 사용된 실트시험시료의 배합비는 표 3.3과 같이 다짐시험을 통해 얻어진 최적 함수비 11.6% 기준으로 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액을 1: 1 비율로 첨가했으며, 느슨한 실트의 상태를 재현하기 위하여 상대밀도 70%를 맞추어 시험을 실시하였다.

표 3.3 실트 시험 시료 배합비

(단위 : g)

| 시료 | 재령일(7일)        | Soil(g) | 염화칼슘<br>용액(ml) | 미생물<br>용액(ml) | 물(ml) |
|----|----------------|---------|----------------|---------------|-------|
| 실트 | 무처리            | 185.6   | -              | -             | 22    |
|    | 일반농도처리         | 185.6   | 11             | 11            | -     |
|    | 고농도처리          | 185.6   | 11             | 11            | -     |
|    | 상축액처리          | 185.6   | 11             | 11            | -     |
|    | 고농도처리 X2       | 185.6   | 11             | 11            | -     |
|    | 25%시료<br>고농도처리 | 185.6   | 11             | 11            | -     |

표 3.4는 실트 시료의 물리적 특성을 나타낸 표로써, 비중 및 200체 통과율, 최대건조단위중량( $r_{(d_{max})}$ ), 최적함수비(OMC), 액성한계(LL)를 나타내었다. 소성한계의 경우 N.P(비소성)로 나와 흙 분류 시 ML로 분류 되었다.

표 3.4 실트 시료의 물리적 특성

| 시료     | 비중(Gs) | # 200(%) | $r_{(d_{max})}$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | OMC(%) | 액성한계<br>(LL) (%) | 소성한계<br>(PL) (%) |
|--------|--------|----------|---|--------|------------------|------------------|
| 실트(ML) | 2.67   | 64.8     | 1.328                                   | 11.6   | 23.3             | N.P              |

### 3.3 미생물 배양 방법

#### 3.3.1 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 클린벤츠에서 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 1000ml 기준)부터 정리해보면 그림 3.5와 같다.

- ① 증류수를 900ml를 메스실린더에 담아서 비커에 넣고 시료 교반기 위에 놓고 속도를 조절한다.
- ② N/B(영양배지) 0.8%(1000ml 기준으로 8g를 넣음)을 비커에 넣고 섞는다.
- ③ 요소(Urea) 2%(1000ml 기준으로 20g를 넣음)를 비커에 넣고 섞는다.
- ④ 섞어진 미생물 배지용액을 1000ml 삼각플라스크에 담는다.
- ⑤ 삼각플라스크에 담아진 1000ml 배지용액을 뚜껑을 막고 호일을 통해서 막는다.
- ⑥ 멸균기를 이용하여 15분간 멸균을 실시한다.



1. 증류수 1000ml를 비커 넣음



2. NB 0.8%를 넣고 비커에 섞음



3. 우레아제 2%를 넣고 비커에 섞음



4. 삼각플라스크에 각각 나누어서 담음



5. 삼각플라스 뚜껑을 막고 호일로 감음

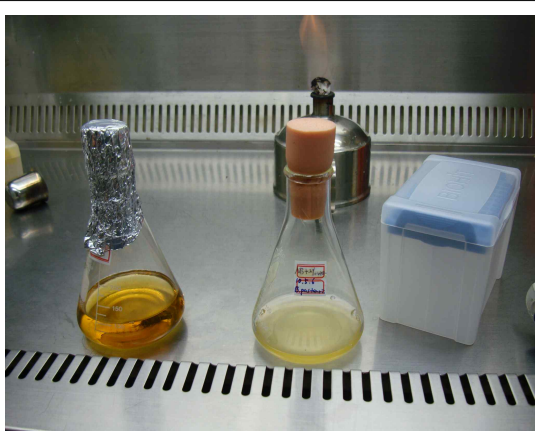


6. 멸균기를 이용하여 멸균함

그림 3.5 미생물 배양배지 만드는 방법

미생물 배양에 실질적으로 사용되는 계대배양방법(100ml 기준)은 그림 3.6과 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.



1. 인큐베이터에서 미생물 용액을 가져옴



2. 1ml를 스포이트로 맞춤



3. 1ml를 계대배양 시킴



4. 인큐베이터에 넣음

그림 3.6 계대배양방법

### 3.3.2 고농도처리

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 1000ml의 미생물 용액이 들어있는 플라스크가 이용된다. 원심분리기는 일정 속도의 rpm을 주는 시험 기계로써, 미생물과 요소를 분리하여 고농도의 미생물 용액을 얻을 수 있게 한다. 원심분리기를 이용한 실험방법을 정리해보면은 그림 3.7과 같다.

- ① 2L의 미생물 용액을 실험에 사용할 원심분리기 통에 각각 1000ml 씩 각각 나누어 담는다.
- ② 1000ml 씩 나누어진 원심분리기 통을 전자저울을 이용해 정확한 동일 무게로 맞춘 후 원심분리기를 사용하여야 원심분리기 축의 힘을 방지 할 수 있다.
- ③ 원심분리기에 필요한 장비를 기계에 잘 맞춰서 넣는다.
- ④ 6000rpm으로 8분간 4℃로 정하여 원심분리를 실시한다. 미생물의 종류에 따라서 rpm, 시간, 온도 등이 달라진다.
- ⑤ 원심분리기를 통해서 분리된 배양배지 용액은 다른 비커에 담고 뭉쳐진 고농축 미생물에 25ml의 배양 배지 액을 뿌려서 뭉쳐진 미생물이 용액에 다시 부양 할 수 있도록 골고루 섞이게 한다.
- ⑥ 고농도 미생물과 섞여진 용액은 다른 플라스크에 스포이트를 이용하여 25ml를 담는다.





1. 2L의 미생물을 1000ml 씩 원심분리기 통에 넣음.



2. 저울을 이용하여 수평을 맞춘.



3. 원심분리기에 필요한 장비를 설치함.



4. 6000rpm으로 10분간 설정하여 원심분리를 실시함.



5. 뭉쳐진 미생물에 25ml의 배양 배지 액을 뿌려 섞음.



6. 고농도 미생물과 섞여진 용액을 25ml를 담음.

그림 3.7 원심분리기를 이용한 고농도처리



### 3.3.3 상층액처리

일반농도처리 1000ml에서 고농축을 사용하고 남은 용액 약 900ml를 이용하여 보다 효과적으로 탄산칼슘의 반응을 일으키고 효율적인 자원 활용을 하고자 본 실험을 진행하였다. 상층액이라 함은 1000ml의 일반농도처리에서 원심분리기를 사용하여 일반적으로 6000rpm, 4℃에서 8분간 고농도처리를 하는데 100% 농축이 완료되는 것이 아니기 때문에 고농도처리 후 남은 용액 가운데에 미생물의 잔여량이 존재하고, 상층액 용액 자체에 탄산염이 존재하므로 상층액 + 염화칼슘을 섞으면 탄산칼슘이 생성됨을 눈으로 확인 할 수가 있다. 이는 기존에 물 + 염화칼슘으로 염화칼슘 수용액을 만드는 것보다 효과적인 탄산칼슘의 반응을 나타낼 수 있으므로 염화칼슘의 Mol수가 높아지면 반응하는 탄산칼슘의 양도 많아질 것이다. 앞으로 진행되는 고농축을 통한 실험을 할 경우 상층액은 매우 유용한 자원이 될 수 있다.

### 3.3.4 고농도처리 X2

일반적인 고농도처리 실험은 일반농도 1000ml에서 약 40배로 고농도처리 하는 방법을 사용하여 25ml 고농도처리 미생물 용액을 만들었다. 고농도처리 X2 실험은 위와 같이 고농도처리 된 용액에서 1%를 추출하여 새로운 1000ml 영양배지에 계대배양을 시키고 하루 동안 인큐베이터에 성장을 시킨 후 다시 고농도처리를 실행하여 이론상으로 약 1600배의 처리 용액을 만들어 내는 것이 목표였다. 그러나 실험을 진행하면서 일반농도처리 2000ml를 고농도처리 하여 약 80배, 일반농도처리 3000ml를 약 120배로 고농도처리 하는 것은 현실적으로 가능하나 1600배의 고농도처리는 불가능한 것으로 판단된다. 이번 실험을 통하여 미생물 성장 할 수 있는 양이 삼각플라스크에 한정되어 있고, 미생물이 이분법성장을 하는데 초기 성장하는 속도는 기존의 성장속도보다 매우 빠를 수 있으나, 하루정도의 시기가 지나가면 기존의 성장 곡선과 별 차이가 없음을 고결화 실험 후 SEM상의 칼슘 함유량으로 확인 할 수 있었다.

### 3.3.5 25%시료 고농도처리

기존의 실험 방법을 이용하여 보다 효과적으로 효율성을 높여서 실험을 진행하기 위해 다음과 같은 방법을 창안 하였다. 기존의 실험에서 증명 되었듯이 적용하는 시료의 양에 있어서 비교적으로 생성되는 탄산칼슘의 양이 적기 때문에 XRD상에서 탄산칼슘이 증명되지 않았고, SEM상에서도 마찬가지로 Ca의 양이 비교적 적게 나왔다.

본 실험에서는 기존의 고농도처리 미생물 용액(25ml)과 상층액을 사용한 염화칼슘 수용액(25ml)은 동일하게 사용하고 시료의 양을 75%를 줄여 25% 시료의 양을 가지고 실험에 사용하였다. 이 결과로서 모래시료의 경우 EDX상에서 Ca는 26.72%로 눈의 띄게 높아졌고 SEM상에서는 모래의 입자 표면에 탄산칼슘의 알갱이를 육안으로 확인할 수가 있었다. 또한 XRD상에서 전혀 찾을 수 없었던 탄산칼슘의 존재 또한 발견함으로써 이로써 기존의 방법에서 발견되지 않았던 탄산칼슘은 그 양이 적고 모래의 입자보다 결정질이 좋지 않기 때문에 나타나지 않았음을 증명해 주었다.

또한, 실트질의 경우 EDX상에서 Ca는 5.43%로 모래의 일반농도처리에서 나온 양과 비슷한 수준까지 나왔으며, 이는 실트질 상에서 선행연구와 같이 탄산칼슘의 생성이 어려우나 그 가능성을 충분히 볼 수 있는 결과를 가져왔다.

## 3.4 메커니즘 분석 방법 및 장비

### 3.4.1 전자현미경의 원리 및 특징

#### 3.4.1.1 전자현미경의 원리

전자현미경(Scanning Electron Microscope)(공업화학전망 2009)은 광학현미경(Light Microscope)에서 사용하는 가시광선(visible rays) 대신 전자선(electron beam)을, 유리 렌즈(glass lens) 대신에 전자렌즈(electron lens)를 사용하여 물체의 확대 상을 만드는 장치를 말한다.

전자현미경은 전자에 대한 렌즈작용을 코일에 흐르는 전류를 변환시킴으로써 magnetic field를 사용하여 전자의 이동 경로를 변하게 하여 마치 볼록렌즈가 빛을 집속하듯 전자를 모아주는 것과 유사하다. 광선 대신에 전자 빔을 사용하기 때문에 현미경의 내부는 진공상태여야 하는 이유는 전자가 공기와 충돌하면 에너지가 소실되거나 굴절되는 등 원하는 대로 제어하기 어렵기 때문이다. 또한 표본과 대물렌즈와 렌즈 사이의 거리는 일정하지만 중간렌즈와 투영렌즈의 코일에 통하는 전류의 세기에 의해 배율이 결정되며 상의 초점은 대물렌즈의 코일에 흐르는 전류에 의해 조절된다.

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

#### 3.4.1.2 전자현미경의 특징

전자현미경은 높은 에너지의 전자빔을 이용하여 전자가 시편과 충돌할 때 발생하는 이차전자, 반사전자, X-선 등을 검출하여 확대 상을 촬영하는 장치로 재료의 표면형상, 적층 결함, 계면 등을 직접 관찰함에 따라 이들이 재료의 여러 성질들에 미치는 영향을 정확히 규명할 수 있고, 재료의 성질에 미치는 영향을 규명하여 새로운 재료의

개발에 이용할 수 있다. 전자현미경의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- ① 분해능이 높기 때문에 고배율로 물체를 관찰할 수 있다. 열방사형 텅스텐 필라멘트 방식의 SEM은 10만 배 이상(분해능: 3 ~ 5 nm), 전계방사형 SEM(FE-SEM)은 최대 100만 배(분해능: 0.5 ~ 2 nm)까지 확대 상을 얻을 수 있다.
- ② 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.
- ③ 최근 SEM은 디지털 영상을 제공하기 때문에 영상의 저장은 물론 영상에 대한 다양한 분석이 가능하다. 과거에는 소형 CRT 모니터를 통해서 영상을 볼 수 있던 때와 차원이 다른 다양한 기능을 제공한다.
- ④ 다양한 검출기 및 주변기기를 장착하여 응용분야를 확장할 수 있다. 대표적인 검출기는 후방산란전자를 측정할 수 있는 BSE(back Scattered Electron) 검출기와 특성 X선을 검출할 수 있는 EDS(energy dispersive X-ray spectroscopy)와 WDS(wavelength dispersive X-ray spectroscopy) 검출기가 대표적이다. 특히, X선 분광분석법은 짧은 시간에 미세영역의 구성성분을 분석할 수 있기 때문에 이차전자 검출기와 함께 필수적 검출기법이 되고 있는 추세이다.
- ⑤ 고전압(0.5~30 kV)을 사용하여 가속전자를 발생시키므로 여러 가지 복잡한 장치가 요구되며, 전자빔을 이용하기 때문에 진공( $10^{-5}$  torr 이하)이 필수적이다. 이 두 가지 요소(고전압과 진공기술)로 인해 전자현미경은 크고 복잡하며 가격 또한 비싸다.
- ⑥ 최근에는 저 진공 SEM(가변 진공 SEM 또는 Environmental SEM이라고도 함), Cryo-SEM 및 Charge Reduction 기술 등이 개발되어 SEM의 활용분야가 확장되고 있는 추세이다.

## 3.4.2 X-회절분석(XRD) 시험

### 3.4.2.1 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 중속도는 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. 이 때 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 변한다면 그 X-선은 최대의 에너지를 가질 것이다. 보통 연속 X-선과 특성 X-선은 그림에서와 같이 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.

### 3.4.2.2 X-회절분석 시험의 특징

- ① 시료에 대한 제한이 적고, 시료를 파괴함이 없이 측정가능하고 측정시간은 수십 분정도이다.
- ② 물질의 정성분석 가능이 가능하다. 물질의 결정구조와 화합형태가 다르면 회절 패턴에 형태가 변화된다. 따라서 표준물질의 데이터 파일과 대조해서(JCPDS

card이용) 물질을 구별할 수 있다.

- ③ 미소결정의 크기를 구할 수 있다. 회절선의 폭을 측정해서 평균 입자크기가 50~200 Å인 미소 결정의 크기를 구할 수 있다.
- ④ 결정성의 좋고 나쁨을 조사할 수 있다. 비결정성 재료는 무정형의 회절패턴을 나타낸다.
- ⑤ 혼합물과 화합물을 쉽게 구별할 수 있다. 혼합물의 회절패턴은 시료를 구성하고 있는 각 화합물의 회절패턴을 중첩시킨 것으로 타난다.
- ⑥ 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.
- ⑦ 결정구조 해석이 용이하다. 개략적인 구조를 알고 있는 경우는 이 회절 패턴을 정밀하게 측정해서 결정구조를 해석하는 일이 가능하다.
- ⑧ 실험조작이 용이하다. 실험조작이 용이해서 초보라도 간단하게 회절패턴을 얻을 수 있다.

### 3.4.3 포켓관입 시험

본 연구에서는 미생물 반응 실험을 통해서 미생물 용액, 염화칼슘 용액을 시료에 각각 첨가하여 고결화(Cementation) 가능성을 알아보기 위해서 각각의 무처리, 일반농도 처리, 고농도처리, 멸균시료처리, 상층액처리, 고농도처리 X2, 25%시료 고농도처리 시험을 실시하였다. 시험결과 포켓 관입 시험기를 이용하여 지반의 강도를 측정하였으나, 25%시료 고농도처리 외에는 포켓관입 시험기로 측정할 수 있는 측정강도 값  $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 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 표준량의 미생물이 아닌 고농도 이상의 미생물을 사용하거나 다른 지반 강도 측정 장치를 이용할 시 지반의 강도를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 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 생성되었다. 이 용액을 건조기에 증발시켜 하얀 침전 가루를 전자현미경 SEM 분석 및 XRD 분석을 통하여 탄산칼슘( $CaCO_3$ )을 증명하였다. 그림 4.2 XRD 분석 결과를 Peak로 나타내었으며, 실험결과를 통해 Peak와 탄산칼슘 Peak가 일치함을 알 수 있어 탄산칼슘( $CaCO_3$ )의 생성을 확인 할 수 있었고, 그림 4.3 SEM 분석을 통해 그 백색의 가루모양인 정육각형 덩어리가 서로 엉겨 붙어서 생성됨을 육안으로 확인 할 수가 있었다.



그림 4.1 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험

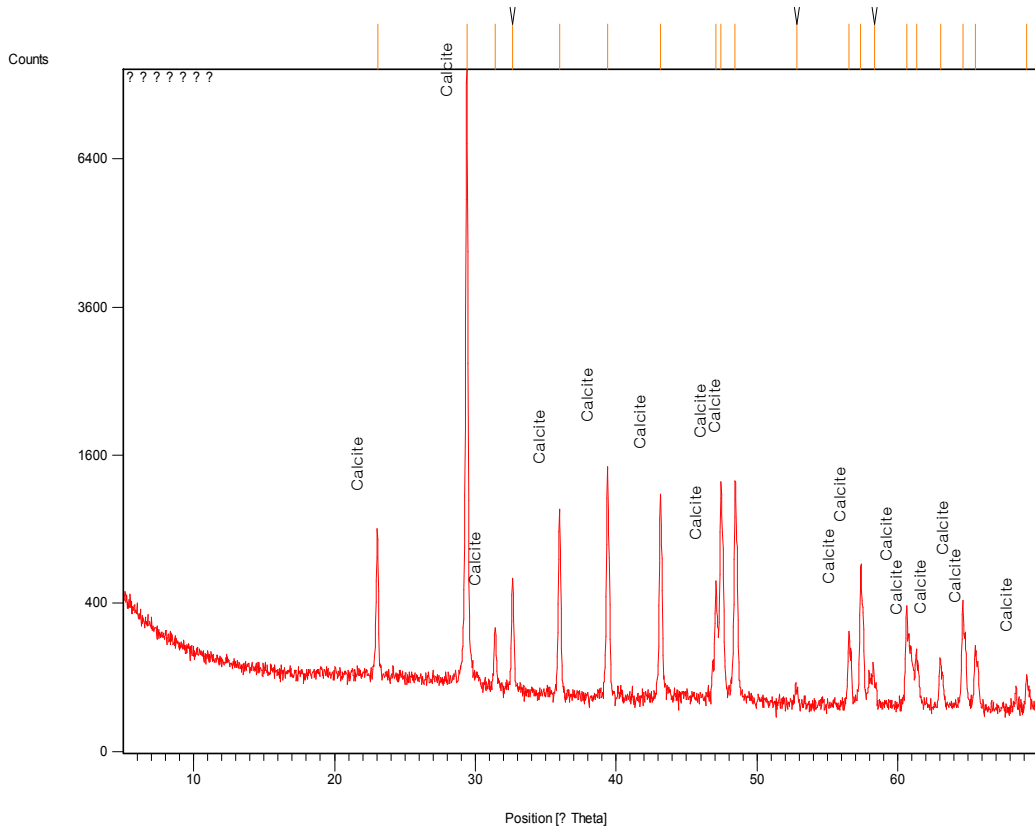


그림 4.2 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 XRD 분석

표4.1 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 XRD 분석

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



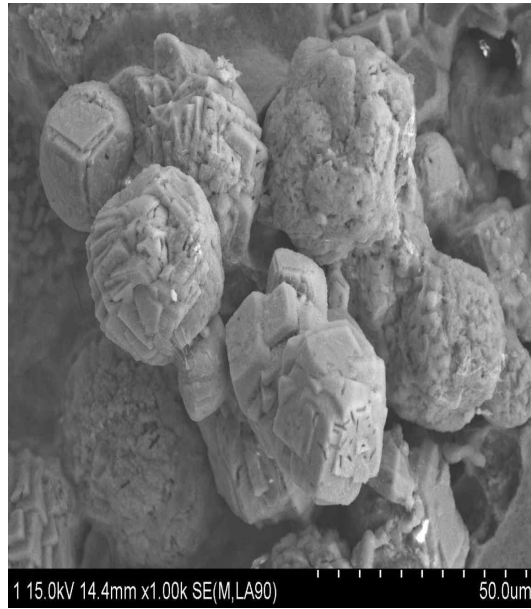
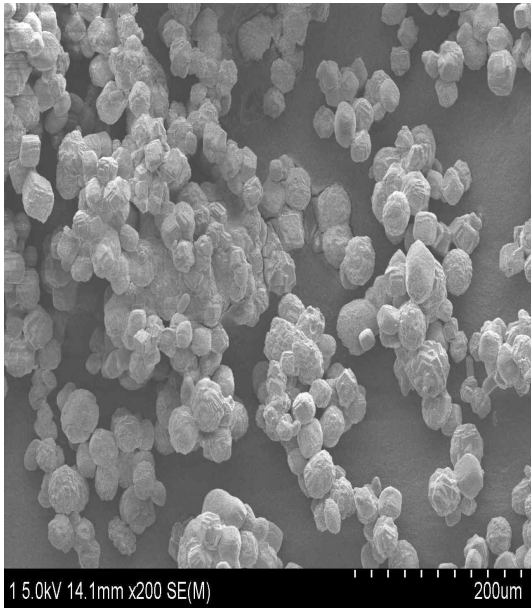


그림 4.3 미생물 용액과 염화칼슘 용액 반응 실험 SEM 분석

## 4.2 미생물 반응을 통한 흙의 변화

미생물 반응 실험 결과를 통해 고농도 처리 7일을 상온에서 110°C로 24시간 건조시킨 후 살펴본 결과, 흙의 미세하게나마 응집효과가 나타났음을 확인할 수 있었다. 또한 25%시료 고농도처리를 통해서 단단한 층이 생성됨을 확인할 수 있었다. 이러한 흙의 응집 효과는 가벼운 충격에는 허물어지지 않는다고, 포켓관입 시험기를 이용해 강도 측정을 할 수 있을 만큼의 지지력이 나타남을 보았다. 그림 4.4의 첫 번째 사진은 무처리 7일 모래 시료를 상온에서 110°C로 24시간 건조시킨 후 살펴본 결과를 나타낸 것으로 응집효과가 전혀 나타나지 않았음을 알 수 있으며, 두 번째 사진은 고농도 처리 7일을 상온에서 110°C로 24시간 건조시킨 후 살펴본 결과를 나타낸 그림으로 미세하게 응집효과가 나타났음을 확인할 수 있었다. 그림 4.5에서는 25%시료 고농도처리를 한 후 30°C 인큐베이터에 넣은 후 살펴본 결과, 시료 표면의 응집효과를 통해 단단한 층이 형성됨을 볼 수 있고, 포켓관입 시험기 최댓값 5kg/cm<sup>2</sup>에서도 파괴되지 않는 강도를 갖게 되었다. 이를 통해 순수하게 처리된 미생물 지반이 5kg/cm<sup>2</sup>보다 높은 강도를 나타냄을 확인할 수 있었다.



그림 4.4 무처리, 고농도처리 7일 반응 모습



그림 4.5 25%시료 고농도처리 7일 반응 모습

## 4.3 전자현미경(SEM) 분석

### 4.3.1 전자현미경(SEM) 분석 결과

미생물을 이용한 고결화(Cementation) 특성 시험은 흙 입자와 흙 입자 사이의 고결화 정도를 파악하기 위한 실험으로, 무처리 7일 시료와 일반농도처리 7일, 고농도처리 7일, 상층액처리 7일, 고농도처리 X2 7일, 25%시료 고농도처리 7일차 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석을 수행하였고, 아래의 그림을 통해 나타내었다.

#### 4.3.1.1 전자현미경(SEM) 모래 7일 분석 결과

모래 무처리 7일의 경우 그림 4.6의 5000배 사진을 보면 입자 표면에 어떠한 침전물도 생기지 않은 매우 매끄러운 모습을 알 수 있다. 그러나 그림 4.7의 일반농도 처리 7일의 경우 5000배 사진을 보면 입자 표면에 미세한 조각들이 존재함을 확인 할 수 있으며, 그림 4.8의 고농도처리 7일의 경우 5000배의 경우 무처리 및 일반농도처리에 비해 미세한 알갱이가 입자 표면에 많이 붙어 있음을 볼 수 있다. 그림 4.9와 4.10에서는 고농도처리 비슷한 정도의 알갱이가 입자 표면에 붙어 있음을 볼 수 있으며, 그림 4.11의 시료25% 고농도처리에서는 육안 상으로 확실하게 입자 표면에 알갱이가 생성됨으로서, 이는 무처리 7일 사진에서 발견할 수 없는 조각들이다. 이러한 알갱이는 미생물 반응으로 인해 생성된 탄산칼슘이라고 할 수 있다.

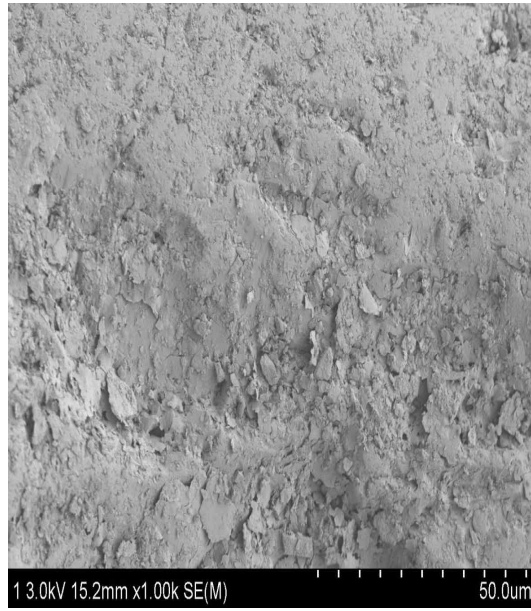
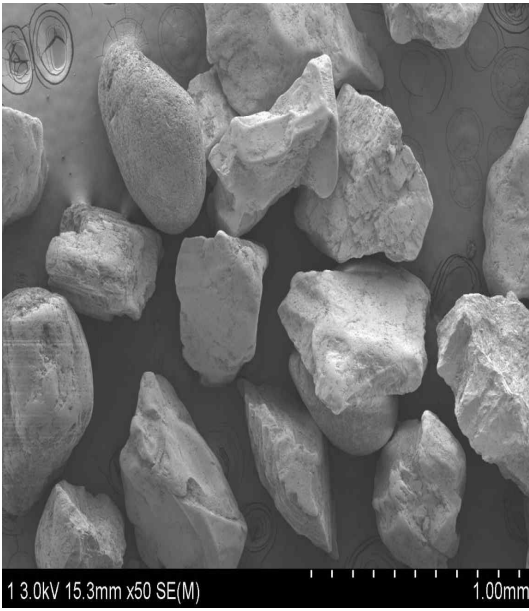


그림 4.6 모래 무처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

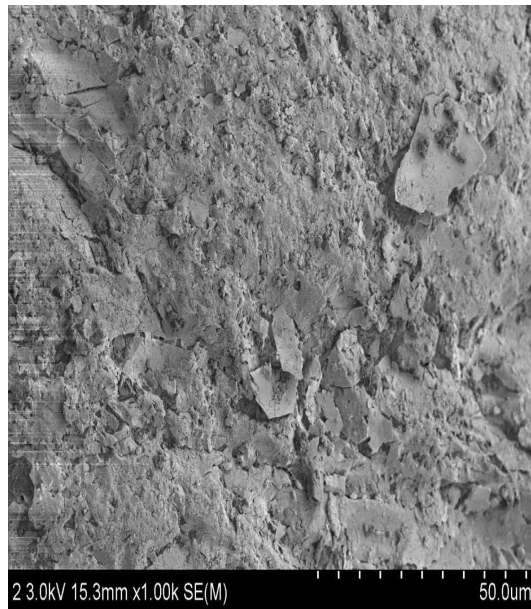


그림 4.7 모래 일반농도처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석



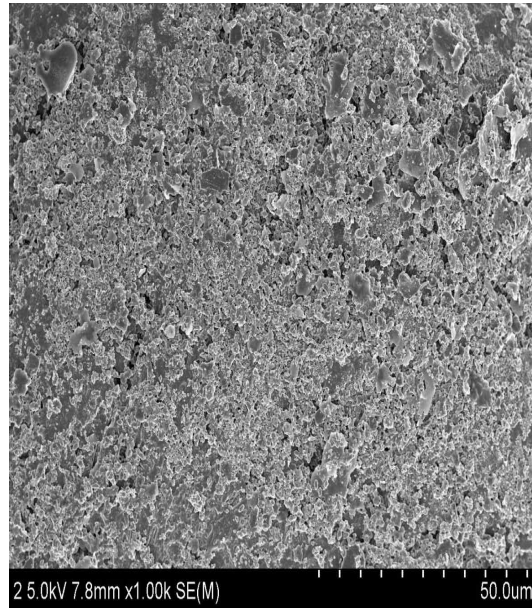
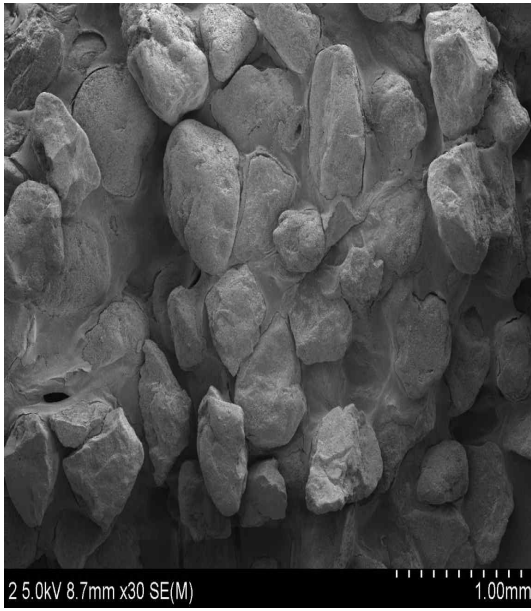


그림 4.8 모래 고농도처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

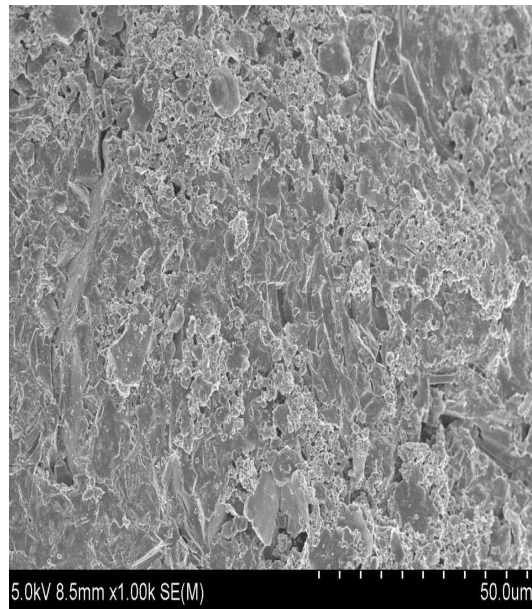
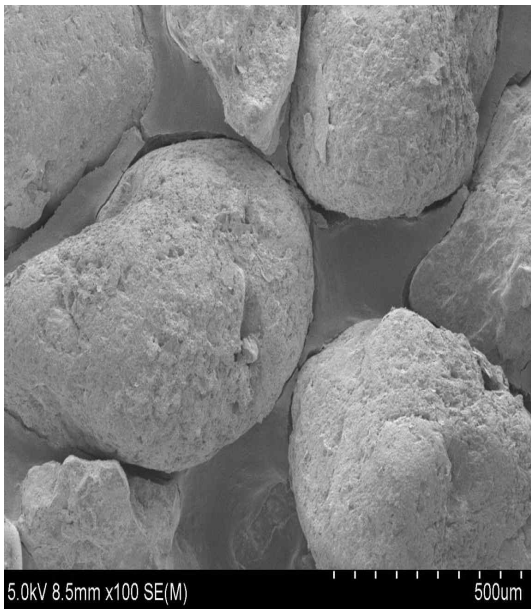


그림 4.9 모래 상층액처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

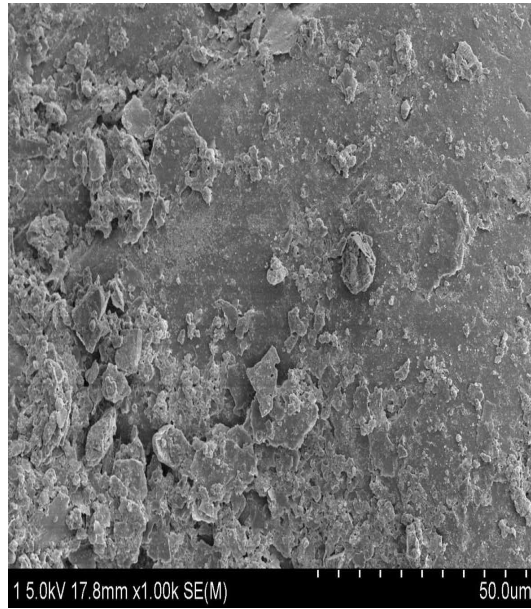
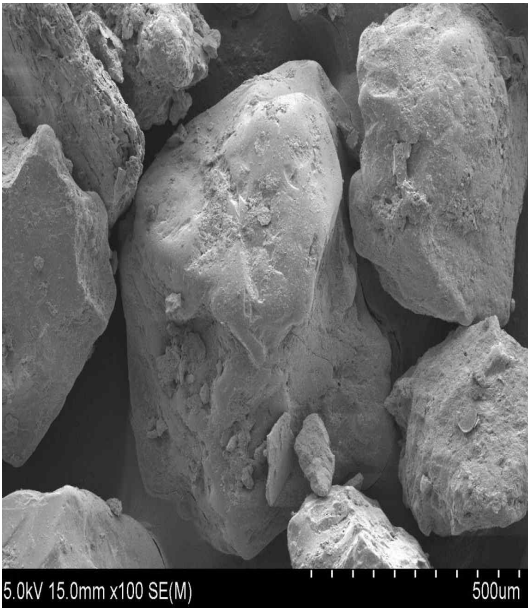


그림 4.10 모래 고농도처리 X2 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

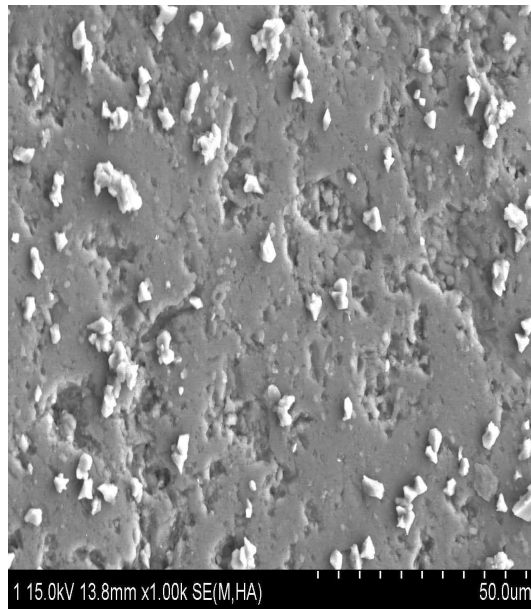
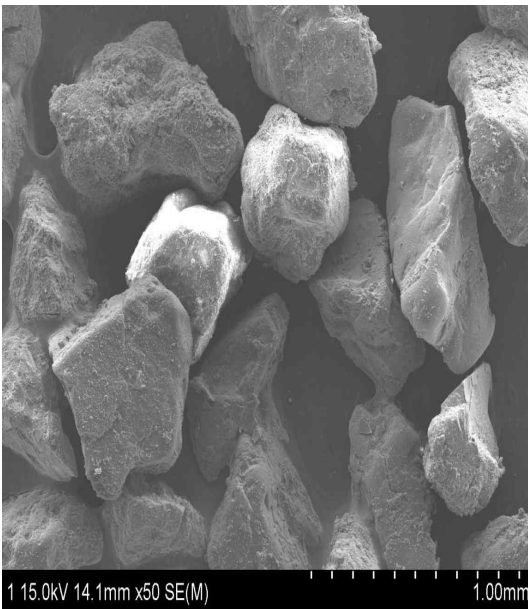


그림 4.11 모래 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

#### 4.3.1.2 전자현미경(SEM) 실트 7일 분석 결과

실트의 경우 무처리 7일, 일반농도처리 7일, 고농도처리 7일 및 25%시료 고농도처리 결과 입자 표면에 특별히 생성된 알갱이가 있는지 육안 상으로 구분하기가 매우 힘든 것을 알 수 있다. 이는 선행연구를 통해서 살펴본바 Dejong(2006) 등이 제시한 미생물이 자생적으로 이동을 하기 위한 공극의 크기에서 0.0006mm ~ 0.0001mm의 흠 입자의 크기가 필요함을 알 수 있듯이 모래 입자의 크기가 0.76mm ~ 4.76mm의 범위에 있으므로 미생물 적용에 가장 알맞은 흠은 모래임을 알 수 있으며, 실트의 경우 미생물의 생장이 어려워 탄산칼슘이 거의 생성되지 않음을 알 수 있다. 또한, 탄산칼슘의 크기가 흠 입자의 크기보다 매우 작은 알갱이이므로 전자현미경 상으로 입자가 균일하지 않은 실트에서는 육안 상으로 확인이 어려웠다. 그러나 시료25% 고농도처리에서 SEM의 육안으로 확인이 어렵던 연약지반의 고결화를 EDX의 Ca양과 XRD분석을 통하여 Ca광물의 계열을 확인함으로써 실트에서도 고결화 가능성을 볼 수 있었다.



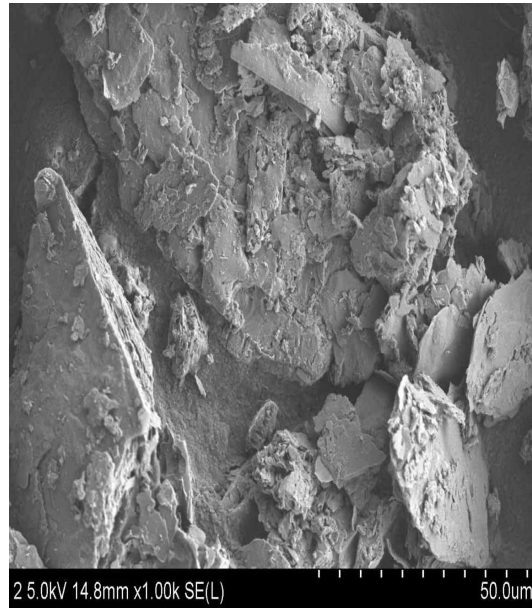
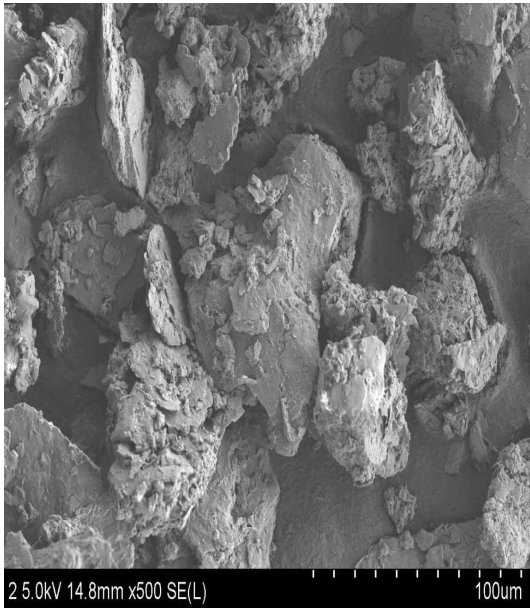


그림 4.12 실트 무처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

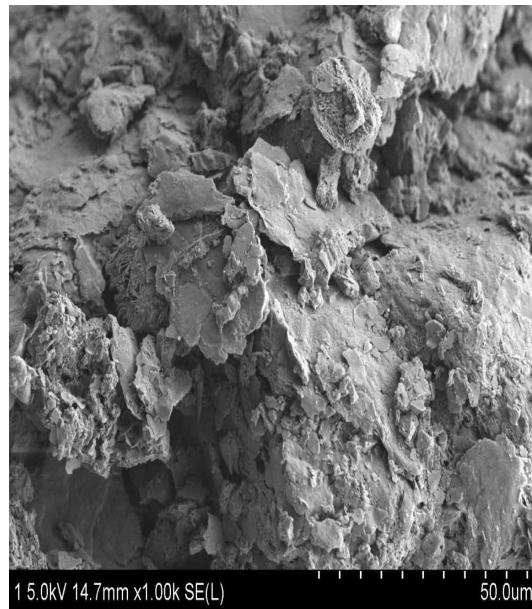
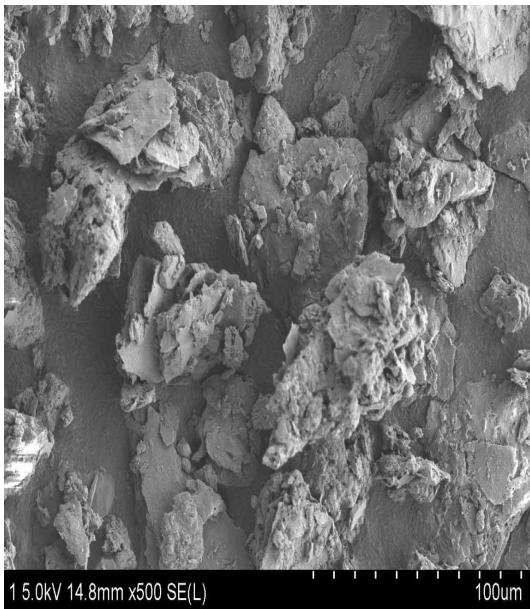


그림 4.13 실트 일반농도처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

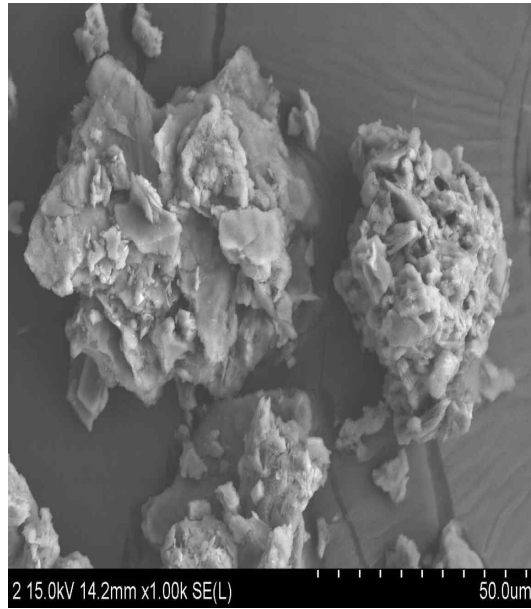
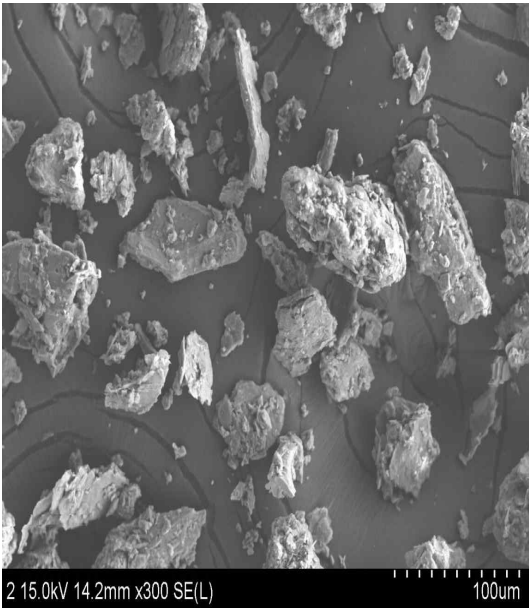


그림 4.14 실트 고농도처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

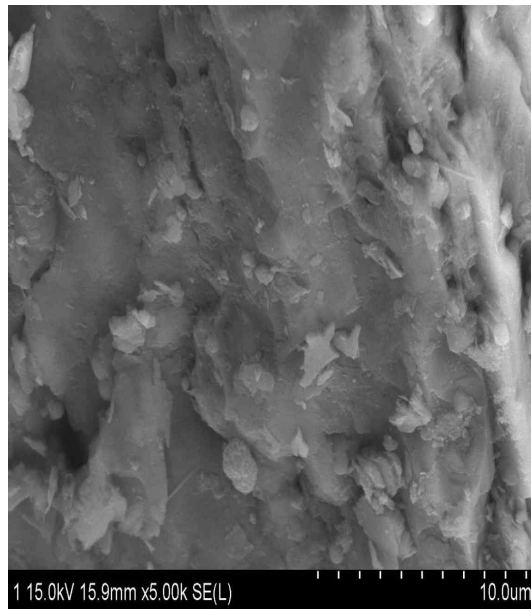
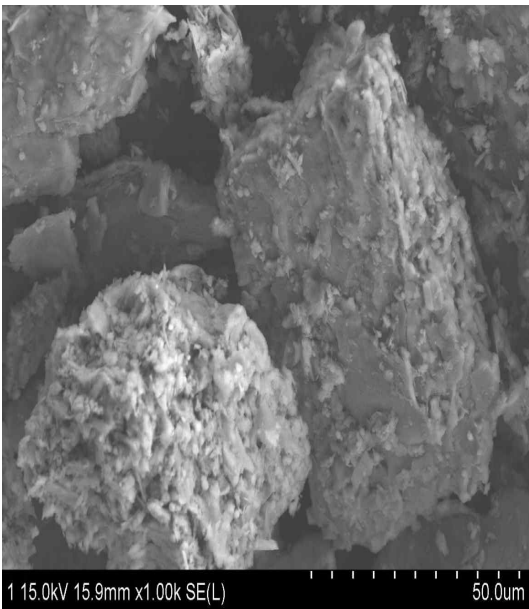


그림 4.15 실트 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 전자현미경(SEM) 분석

## 4.3.2 EDX 분석 결과

EDX(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)는 원소분석기라고도 하며, EDAX 등으로 불린다. 일반적으로 EDX는 전자를 만들어 낼 수 있는 장비에 장착하여 검출기의 형태로 사용되며 X축을 X-ray 에너지로, Y축은 Count로 그래프가 그려지며, 각 Peak는 면적을 계산하여 검출된 원소간의 상대적인 정량법의 비교가 가능하며, 면적에 대한 상대 값만을 가짐으로 오차의 범위는 존재한다. 본 연구에서는 무처리, 일반농도처리, 고농도처리, 상층액처리, 고농도처리 X2, 25%시료 고농도처리에 대해서 EDX 분석 결과를 각각 비교하였다.

### 4.3.2.1 EDX 모래 7일 분석 결과

실험결과 모래의 경우 표 4.2와 같이 무처리 7일의 경우 칼슘(Ca) 함유량은 1.02%, 일반농도처리 7일은 6.84%, 고농도처리 7일은 14.78%, 상층액처리 7일은 12.05 %, 고농도처리 X2 7일은 10.33%, 25%시료 고농도처리 7일은 26.72%에서 나타났다. 미생물 용액과 염화칼슘 용액의 작용으로 생성된 칼슘 함유량은 탄산칼슘으로 추정할 수 있으며, 무처리에 비해 고농도 처리를 사용할 경우 전체적으로 10%이상의 칼슘 함유량이 더 생성시킬 수 있음을 실험을 통해서 알 수 있고, 25%시료 고농도처리에서는 25%이상의 칼슘 함유량이 더 생성시킬 수 있음을 실험을 통해서 나타났다. 이러한 칼슘의 함유정도의 차이가 흙의 변화에서 보았듯이 강도의 크기를 결정하는 것과 비례하는 결과를 가져왔다.

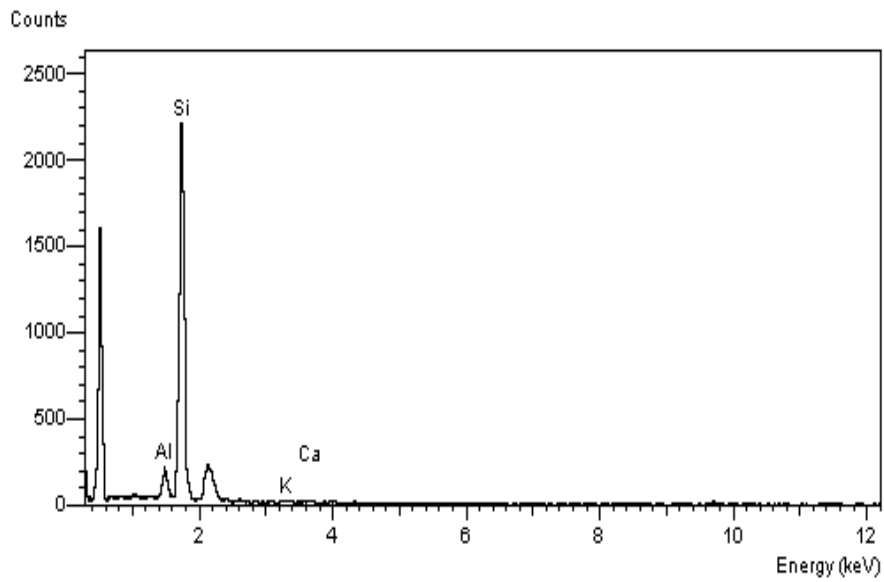


그림 4.16 모래 무처리 7일 시료에 대한 EDX 분석

표 4.2 모래 무처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량

| 광 물 | 함유량(%) |
|-----|--------|
| Si  | 91.56  |
| Al  | 5.76   |
| K   | 1.66   |
| Ca  | 1.02   |

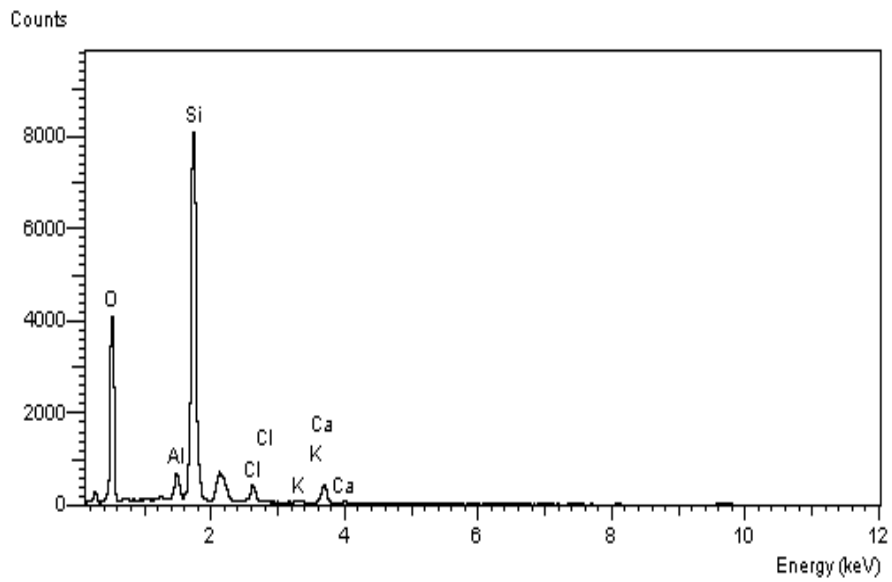


그림 4.17 모래 일반농도처리 7일 시료에 대한 EDX 분석

표 4.3 모래 일반농도처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량

| 광 물 | 함유량(%) |
|-----|--------|
| Si  | 81.79  |
| Cl  | 5.73   |
| Al  | 4.81   |
| Ca  | 6.84   |

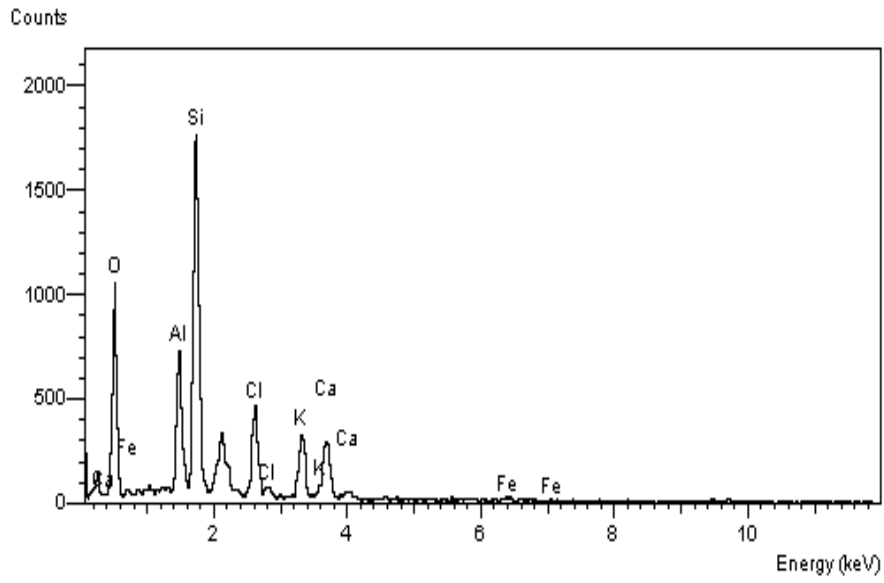


그림 4.18 모래 고농도처리 7일 시료에 대한 EDX 분석

표 4.4 모래 고농도처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량

| 광 물 | 함유량(%) |
|-----|--------|
| Si  | 40.09  |
| Al  | 12.59  |
| Cl  | 15.95  |
| Ca  | 14.78  |

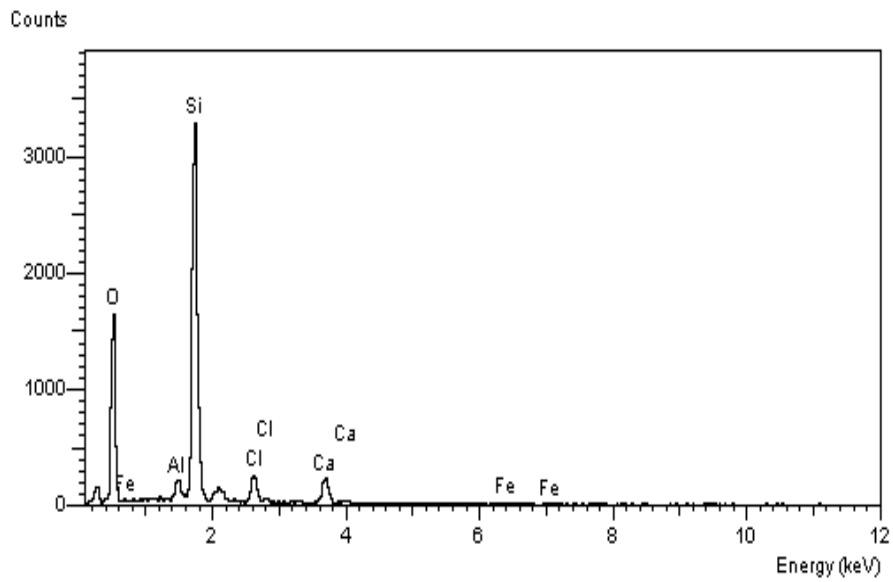


그림 4.19 모래 상층액처리 7일 시료에 대한 EDX 분석

표 4.5 모래 상층액처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량

| 광 물 | 함유량(%) |
|-----|--------|
| Si  | 67.07  |
| Cl  | 10.91  |
| Al  | 8.16   |
| Ca  | 12.05  |

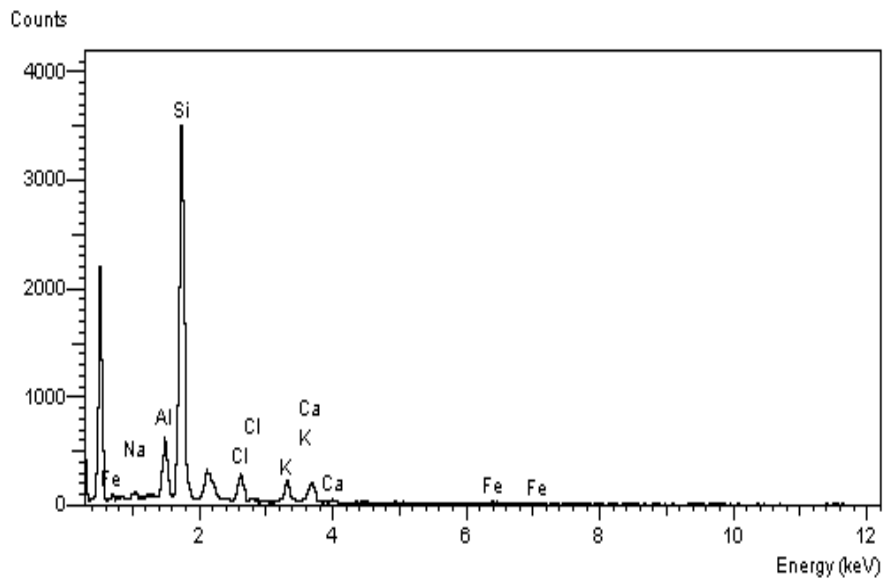


그림 4.20 모래 고농도처리 X2 7일 시료에 대한 EDX 분석

표 4.6 모래 고농도처리 X2 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량

| 광 물 | 함유량(%) |
|-----|--------|
| Si  | 63.22  |
| Cl  | 11.42  |
| Al  | 12.92  |
| Ca  | 10.33  |



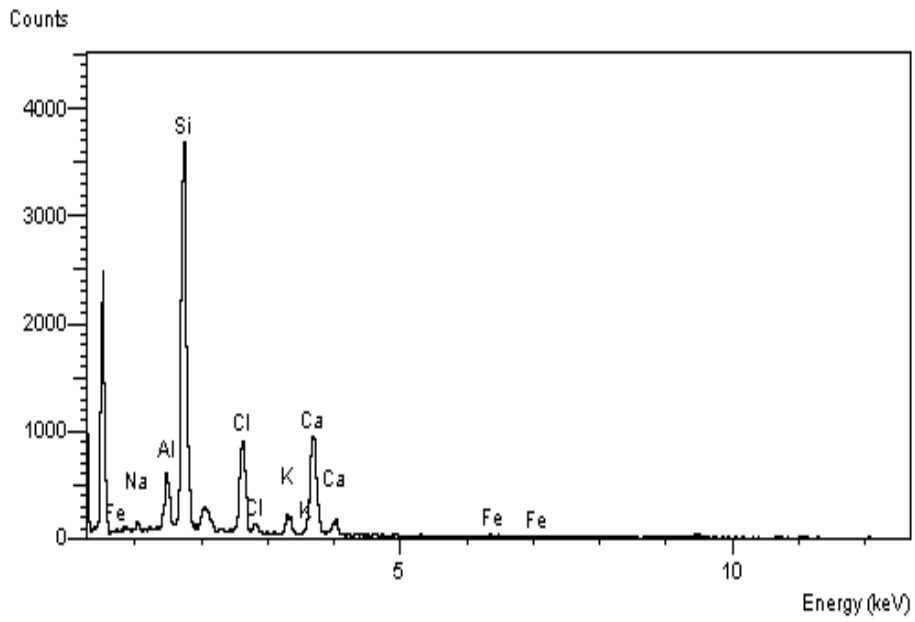


그림 4.21 모래 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 EDX 분석

표 4.7 모래 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량

| 광 물       | 함유량(%)       |
|-----------|--------------|
| Si        | 42.99        |
| Cl        | 18.14        |
| Al        | 5.21         |
| <b>Ca</b> | <b>26.72</b> |

#### 4.3.2.2 EDX 실트 7일 분석 결과

실트의 경우 표 4.8과 같이 무처리 7일의 경우 칼슘(Ca)의 함유량은 1.48%, 일반농도처리 7일은 2.58%, 고농도처리 7일은 3.24%, 25%시료 고농도처리는 5.43%를 나타내고 있다. 이러한 칼슘 함유량 결과는 미생물 작용이 거의 이루어지지 않았음을 알 수 있고, 앞서 설명한 미생물의 성장 조건 중 공극의 크기와 흙 입자의 크기가 상당한 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 또한, SEM의 분석에서 나타나듯이 탄산칼슘의 양이 적으므로 표면상에 탄산칼슘의 침전을 육안으로 확인 할 수 없었다. 그러나 무처리 시료 보다 25%시료 고농도처리에서 약6%의 차이를 보이면서 느슨한 모래의 일반농도처리 정도의 Ca 함유량을 가지게 되었다. 앞에서 언급한 것처럼 추가적인 실험 및 분석이 더 필요하나, 실트질에서도 고결화의 가능성이 있으며 미생물 배양방법의 조건 변화를 통해 실험을 진행 시키면 느슨한 모래의 처리와 같은 눈에 떨만한 결과를 가져올 수 있을 것이다.

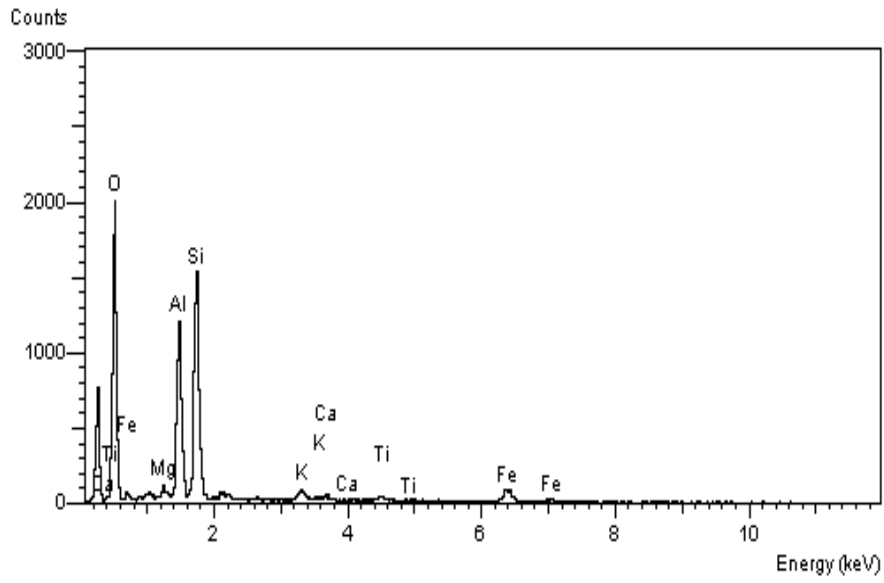


그림 4.22 실트 무처리 7일 시료에 대한 EDX 분석

표 4.8 실트 무처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량

| 광 물 | 함유량(%) |
|-----|--------|
| Si  | 48.06  |
| Al  | 27.72  |
| K   | 3.69   |
| Ca  | 1.48   |

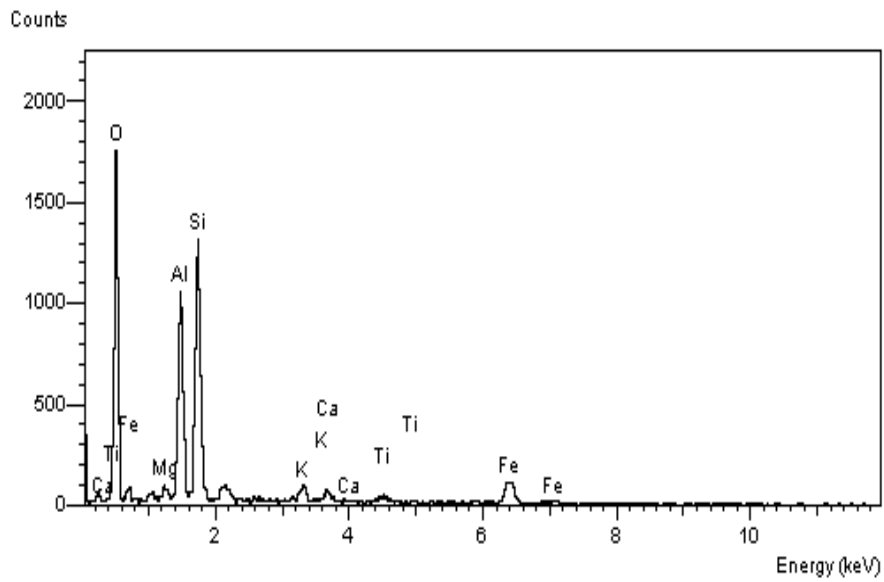


그림 4.23 실트 일반농도처리 7일 시료에 대한 EDX 분석

표 4.9 실트 일반농도처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량

| 광 물 | 함유량(%) |
|-----|--------|
| Si  | 41.57  |
| Al  | 25.84  |
| K   | 3.94   |
| Ca  | 2.58   |

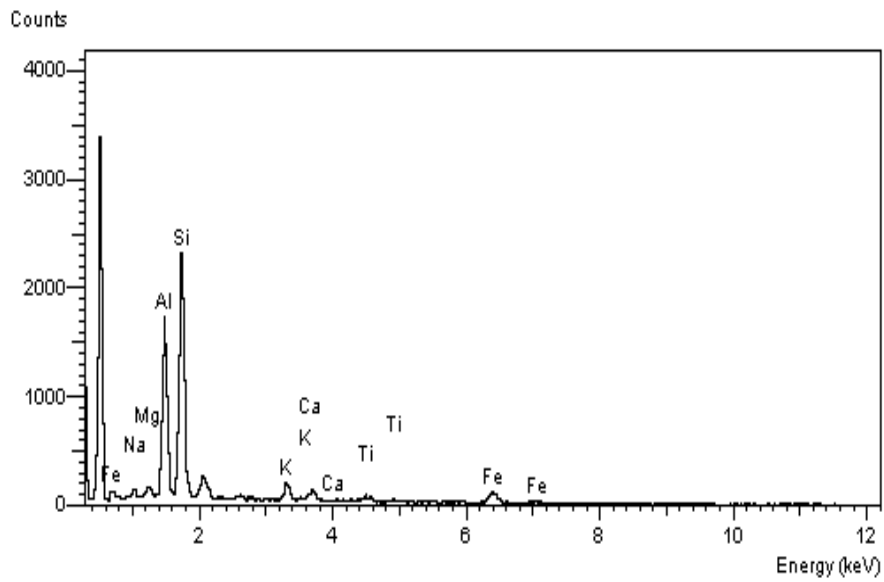


그림 4.24 실트 고농도처리 7일 시료에 대한 EDX 분석

표 4.10 실트 고농도처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량

| 광 물 | 함유량(%) |
|-----|--------|
| Si  | 46.94  |
| Al  | 25.41  |
| K   | 5.13   |
| Ca  | 3.24   |

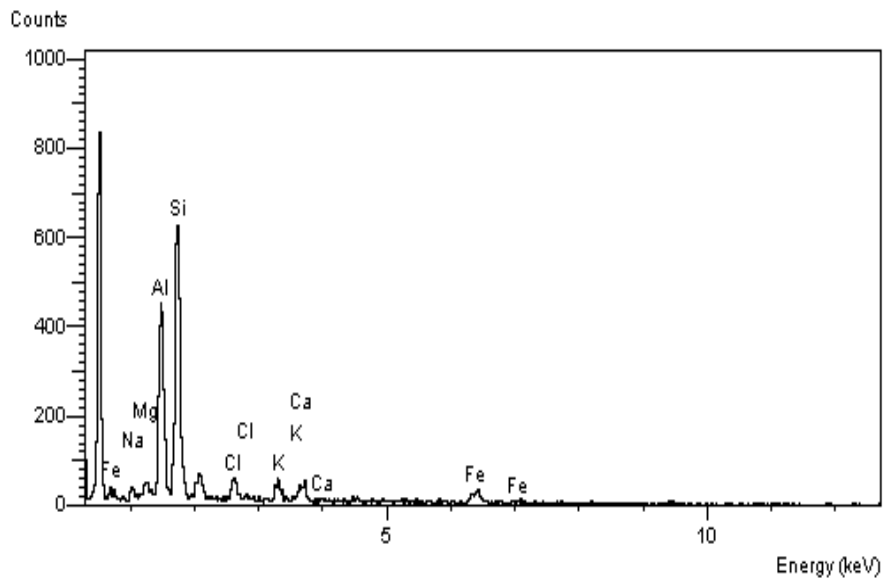


그림 4.25 실트 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 EDX 분석

표 4.11 실트 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 EDX 광물 함유량

| 광 물 | 함유량(%) |
|-----|--------|
| Si  | 44.15  |
| Al  | 24.95  |
| K   | 5.68   |
| Ca  | 5.43   |

### 4.3.3 Mapping 분석 결과

Mapping 분석 방법은 전자현미경과 동일한 분석방법으로 광물의 함유량 정도를 3차원 입자상으로 나타내는 것으로 본 연구에서는 모래 시료에 대해서 무처리, 일반농도 처리, 고농도 처리 7일 반응에 대해서 각각 나타내었다. 무보강의 경우 탄산칼슘 계열 원소인 칼슘(Ca) 성분이 나타나지 않았으며, 일반농도 처리 및 고농도 처리에서는 칼슘 성분의 입자상이 고농도로 갈수록 약간 증가하는 것을 알 수 있고 25%시료 고농도 처리에서 하얀색의 점이 입자 표면 주위에 많다는 것을 알 수 있다. 이러한 실험 결과는 EDX 분석결과에서 나타난 칼슘 함유량과 일치하며, 연구에서 확인된 칼슘 성분의 검출은 탄산칼슘 계열이고 칼슘의 함유량이 높을수록 생성되는 탄산칼슘의 양은 많아짐을 알 수 있다.

표 4.12 모래 7일 Mapping(Ca 함유량) 분석

| 1. 일반농도처리 | 2. 고농도처리 | 3. 상층액처리 | 4. 고농도처리 X2 | 5. 25%시료 고농도처리 |
|-----------|----------|----------|-------------|----------------|
|           |          |          |             |                |

## 4.4 X-회절 분석(XRD)

본 실험에서는 미생물 용액, 염화칼슘 용액을 미리 혼합한 후 흙에 섞어 나타나는 반응 생성물을 조사하기 위해서 X-회절 분석을 수행하였다. 시험 방법은 느슨한 모래 무처리, 일반농도처리, 고농도처리, 상층액처리, 고농축처리X2, 25%시료 고농도처리 그리고 실트 무처리, 일반농도처리, 고농도처리, 25%시료 고농도처리 7일차에 대해 XRD 분석을 실시하였다.

### 4.4.1 X-회절 모래 분석(XRD) 결과

먼저, 모래의 XRD 결과를 살펴보면

- ① 무처리 모래 7일차의 경우 그림 4.26 및 표 4.13에서 알 수 있듯이 Ca계열의 광물이 발견되지 않았고, 모래가 기본적으로 가지고 있는 성분 Quartz와 Microcline, Albite를 확인 할 수 있었다.
- ② 일반농도처리 모래 7일차의 경우 그림 4.27 및 표 4.14에 나타낸 것처럼, 칼슘 소듐 알루미늄 실리케이트(Calcium Sodium Aluminum Silicate)가 생성됨을 알 수 있다. 이는 규산칼슘 계열이고, 흙에 존재하는 알루미늄과 추가적인 반응을 보였음을 알 수 있다.
- ③ 고농도처리 모래 7일차의 경우 그림 4.28 및 표 4.15에 나타낸 것처럼, 칼슘 실리케이트 옥사이드(Calcium Silicate Oxide)가 생성됨을 알 수 있다. 이 역시 칼슘 계열로서 규산칼슘이라고 하며, 포틀랜드 시멘트의 주요 성분이기도 하다.
- ④ 상층액처리 모래 7일차의 경우 그림 4.29 및 표 4.16에 나타낸 것처럼, 아놀사이트 올더(Anorthite orderd)가 생성됨을 알 수 있다.
- ⑤ 고농도처리X2 모래 7일차의 경우 그림 4.30 및 표 4.17에 나타낸 것처럼, 칼슘 설페이트(Calcium Sulfate)가 생성됨을 알 수 있다.
- ⑥ 고농도처리 25%모래 7일차의 경우 그림 4.31 및 표 4.18에서 나타낸 것처럼, 기존의 연구에서 확인 되지 않았던 탄산칼슘(Calcite, syn)이 흙 속에 존재함을 XRD상에서 명확하게 확인 할 수 있었고 이를 통해 미생물을 이용한 고결화의 강도증가를 이루었다.



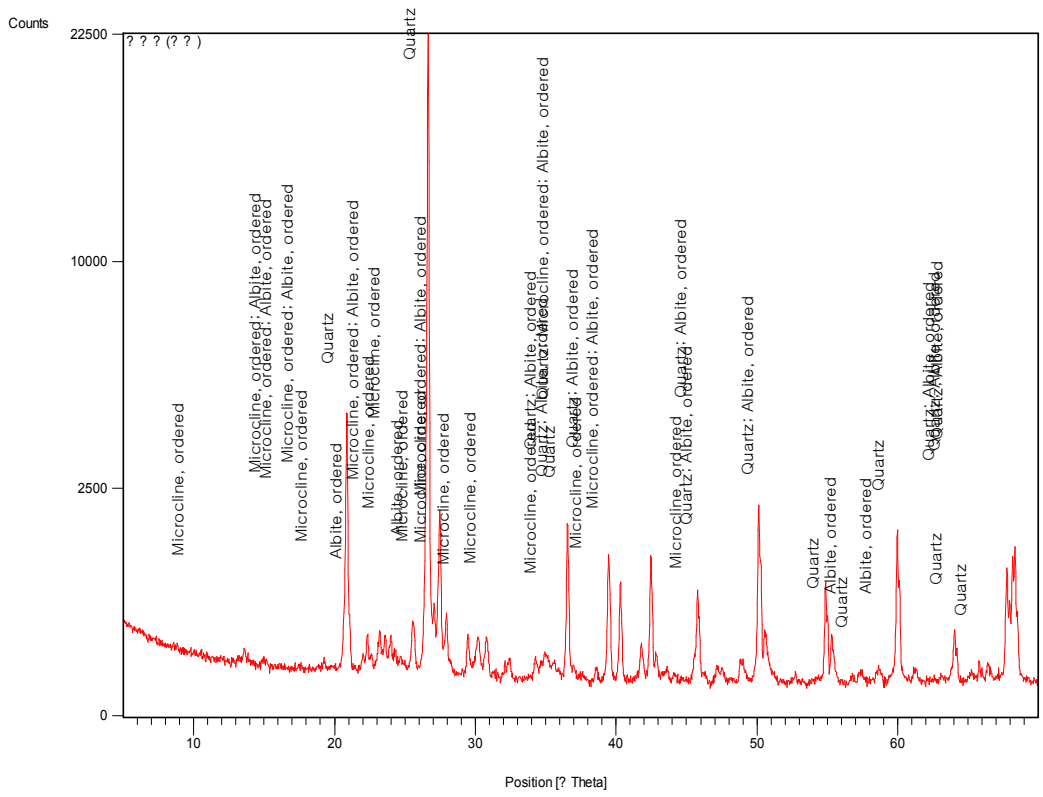


그림 4.26 모래 무처리 7일 시료에 대한 XRD 분석

표 4.13 모래 무처리 7일 시료에 대한 XRD광물 분석

| Ref. Code   | Scale Factor | 광물명칭<br>(Mineral Name) | 화학식           |
|-------------|--------------|------------------------|---------------|
| 01-086-1560 | 0.864        | Quartz                 | $SiO_2$       |
| 00-022-0687 | 0.067        | Microcline, ordered    | $KAlSi_3O_8$  |
| 00-020-0554 | 0.022        | Albite, ordered        | $NaAlSi_3O_8$ |

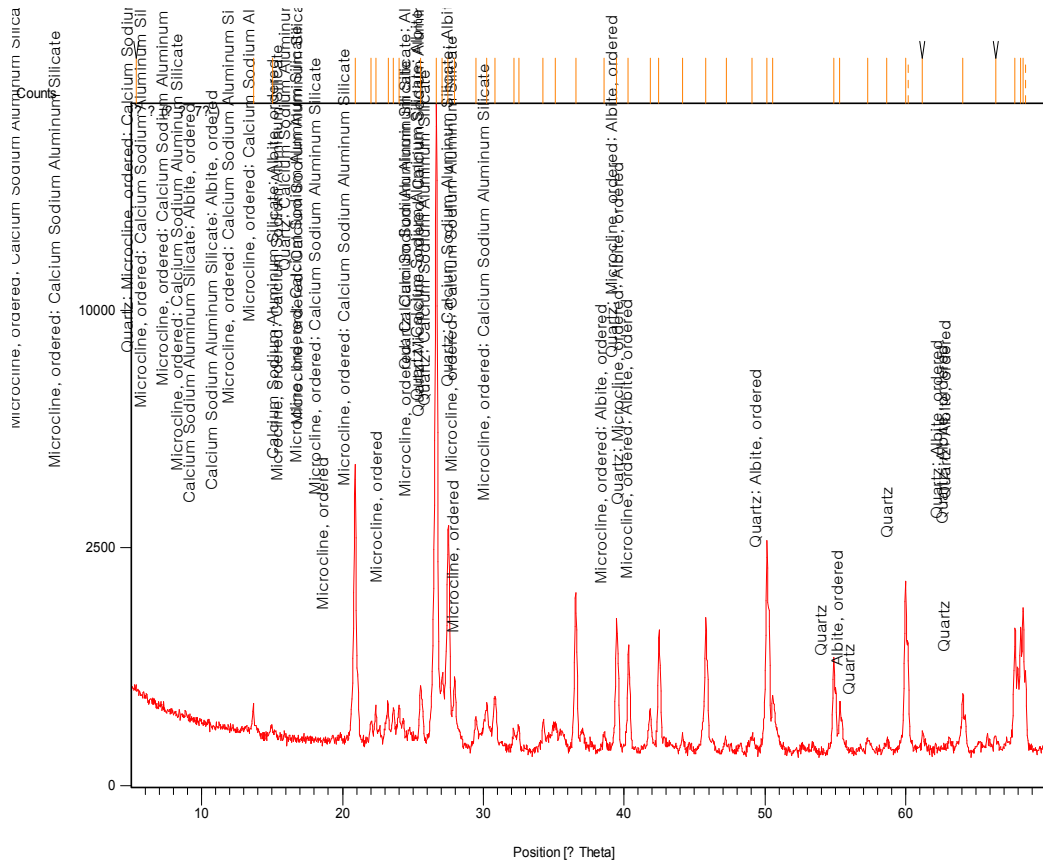


그림 4.27 모래 일반농도처리 7일 시료에 대한 XRD 분석

표 4.14 모래 일반농도처리 7일 시료에 대한 XRD 광물 분석

| Ref. Code   | Scale Factor | 광물명칭<br>(Mineral Name)              | 화학식                                   |
|-------------|--------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 01-078-2315 | 1.001        | Quartz                              | $SiO_2$                               |
| 00-019-0926 | 0.054        | Microcline, ordered                 | $KAlSi_3O_8$                          |
| 01-076-0766 | 0.034        | Calcium Sodium<br>Aluminum Silicate | $Ca_{0.8}Na_{0.2}Al_{1.8}Si_{2.2}O_8$ |
| 00-020-0554 | 0.025        | Albite, ordered                     | $NaAlSi_3O_8$                         |

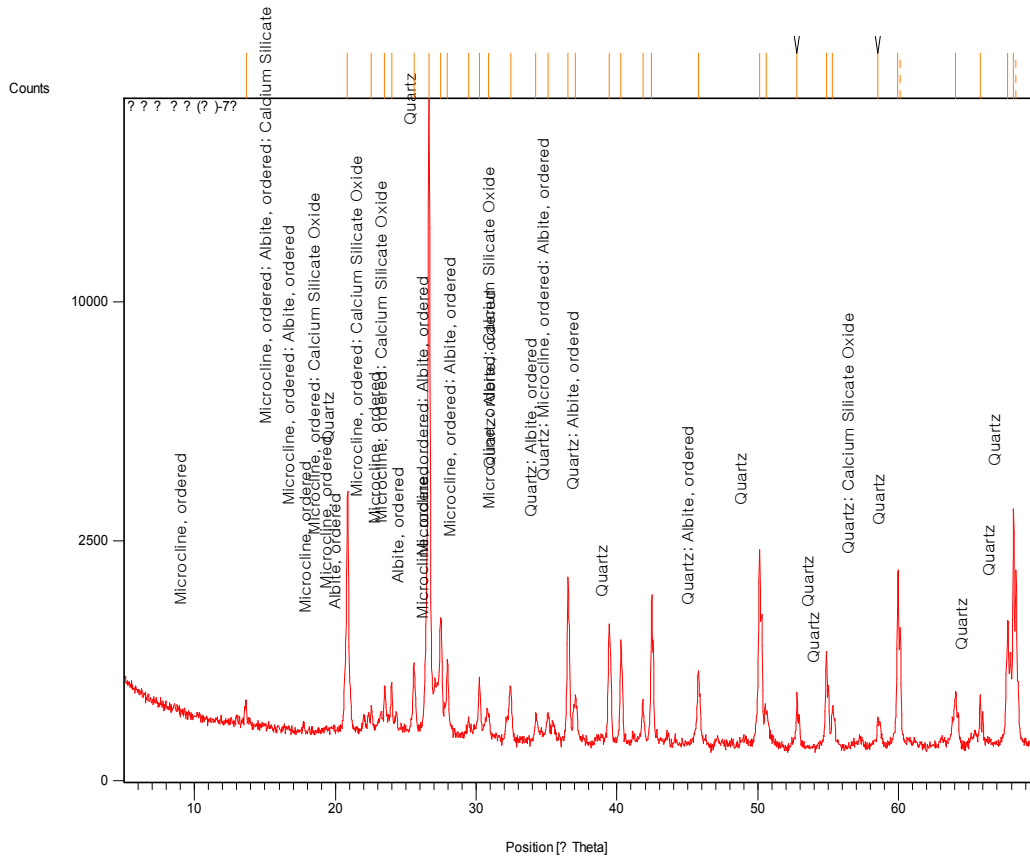


그림 4.28 모래 고농도처리 7일 시료에 대한 XRD 분석

표 4.15 모래 고농도처리 7일 시료에 대한 XRD 광물 분석

| Ref. Code   | Scale Factor | 광물명칭<br>(Mineral Name)    | 화학식           |
|-------------|--------------|---------------------------|---------------|
| 01-070-3755 | 0.742        | Quartz                    | $SiO_2$       |
| 00-022-0687 | 0.046        | Microcline, ordered       | $KAlSi_3O_8$  |
| 00-009-0466 | 0.028        | Albite, ordered           | $NaAlSi_3O_8$ |
| 00-013-0209 | 0.005        | Calcium Silicate<br>Oxide | $Ca_3SiO_5$   |

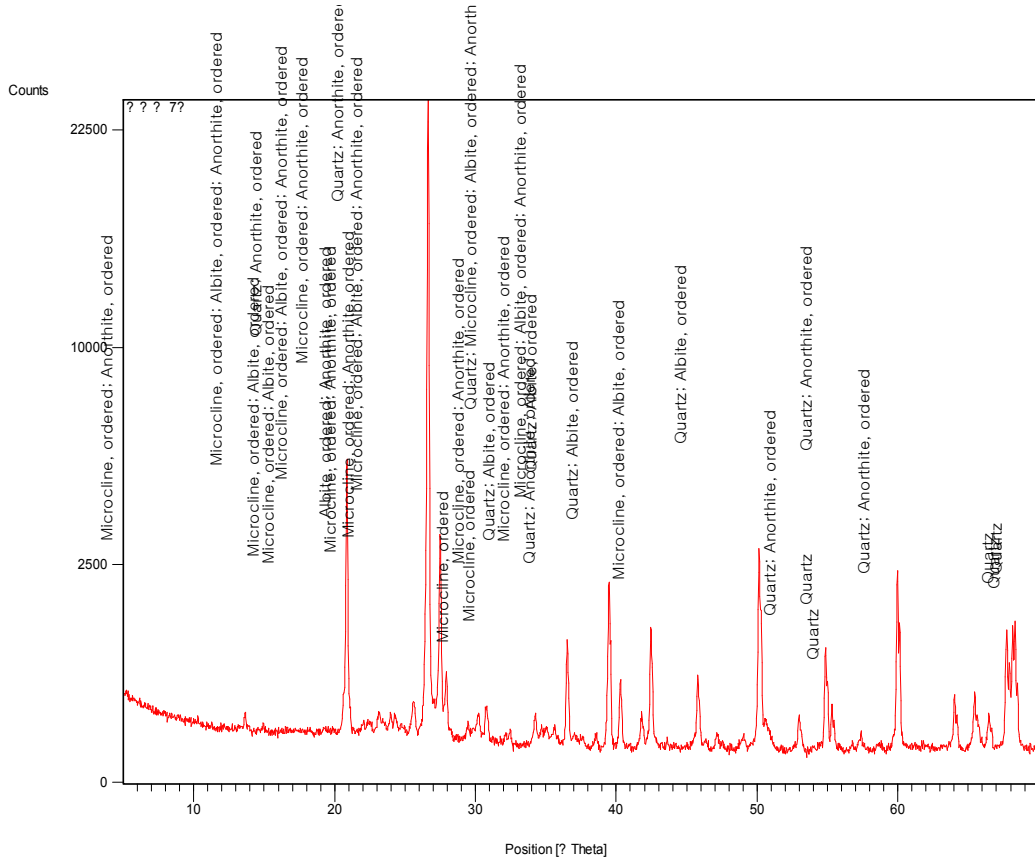


그림 4.29 모래 상층액처리 7일 시료에 대한 XRD 분석

표 4.16 모래 상층액처리 7일 시료에 대한 XRD 광물 분석

| Ref. Code   | Scale Factor | 광물 명칭 (Mineral Name) | 화학식             |
|-------------|--------------|----------------------|-----------------|
| 01-086-1560 | 0.932        | Quartz               | $SiO_2$         |
| 00-022-0687 | 0.070        | Microcline, ordered  | $KAlSi_3O_8$    |
| 00-009-0466 | 0.027        | Albite, ordered      | $NaAlSi_3O_8$   |
| 00-020-0020 | 0.020        | Anorthite, ordered   | $CaAl_2Si_2O_8$ |



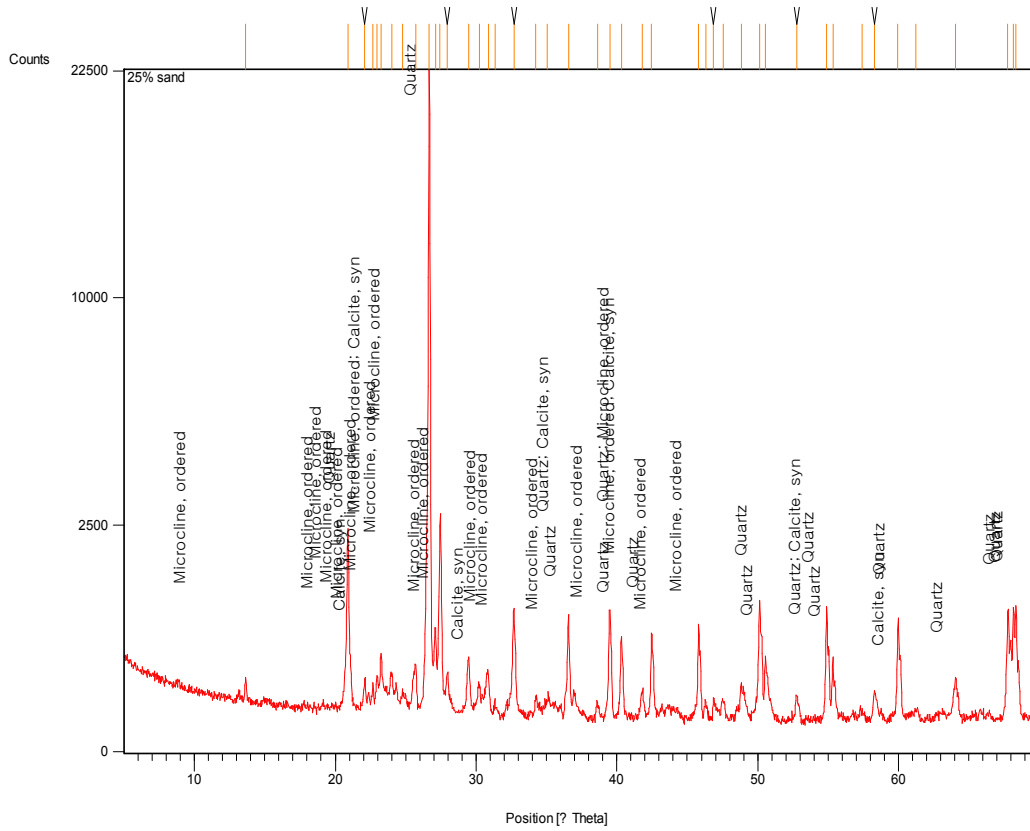


그림 4.31 모래 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 XRD 분석

표 4.18 모래 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 XRD 광물 분석

| Ref. Code   | Scale Factor | 광물명칭<br>(Mineral Name) | 화학식          |
|-------------|--------------|------------------------|--------------|
| 01-085-0930 | 0.804        | Quartz                 | $SiO_2$      |
| 00-022-0687 | 0.074        | Microcline, ordered    | $KAlSi_3O_8$ |
| 00-005-0586 | 0.014        | Calcite, syn           | $CaCO_3$     |

#### 4.4.2 X-회절 실트 분석(XRD) 결과

실트의 XRD 결과를 살펴보면

- ① 무처리 실트 7일차의 경우 그림 4.32 및 표 4.19에서 나타낸 것처럼, Ca계열의 광물이 발견되지 않았고, 실트가 기본적으로 가지고 있는 성분 Quartz와 Albite, Illite를 확인 할 수 있었다.
- ② 일반농도처리 실트 7일차의 경우 그림 4.33 및 표 4.20에서 나타낸 것처럼, 칼슘 알루미늄 실리케이트(Calcium Aluminum Silicate)가 생성됨을 알 수 있다. 이는 규산칼슘 계열이고, 흙에 존재하는 알루미늄과 추가적인 반응을 보였음을 알 수 있다.
- ③ 고농도처리 실트 7일차의 경우 그림 4.34 및 표 4.21에 나타낸 것처럼, 칼슘 알루미늄 실리케이트(Calcium Aluminum Silicate)가 생성됨을 알 수 있다. 이것 역시 규산칼슘 계열이고, 흙에 존재하는 알루미늄과 추가적인 반응을 보였음을 알 수 있다.
- ④ 고농도처리 25%실트 7일차의 경우 그림 4.35 및 표 4.22에서 나타낸 것처럼, 상기 일반농도처리 7일 및 고농도처리 7일에서와 마찬가지로 같은 광물이 존재함을 할 수 있었다.

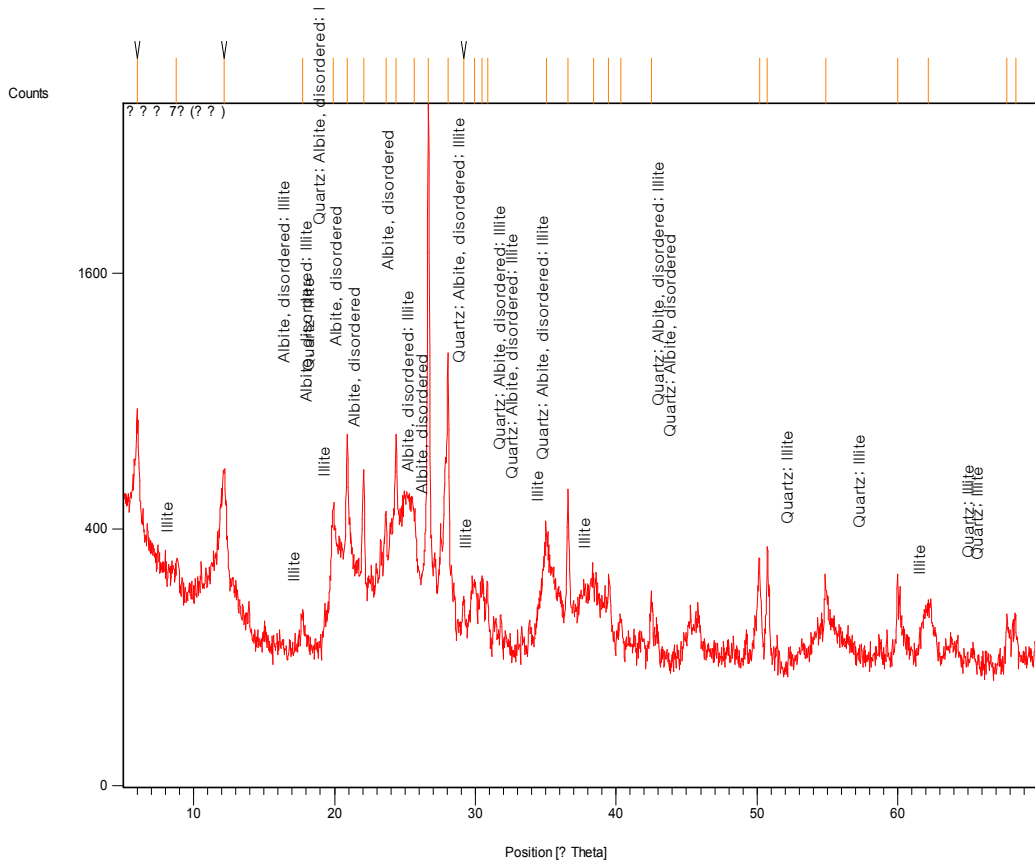


그림 4.32 실트 무처리 7일 시료에 대한 XRD 분석

표 4.19 실트 무처리 7일 시료에 대한 광물 분석

| Ref. Code   | Scale Factor | 광물명칭<br>(Mineral Name) | 화학식                    |
|-------------|--------------|------------------------|------------------------|
| 01-085-0796 | 0.999        | Quartz                 | $SiO_2$                |
| 00-010-0393 | 0.327        | Albite, disordered     | $Na(Si_3Al)O_8$        |
| 01-070-3754 | 0.287        | Illite                 | $K(Al_4Si_2O_9(OH)_3)$ |



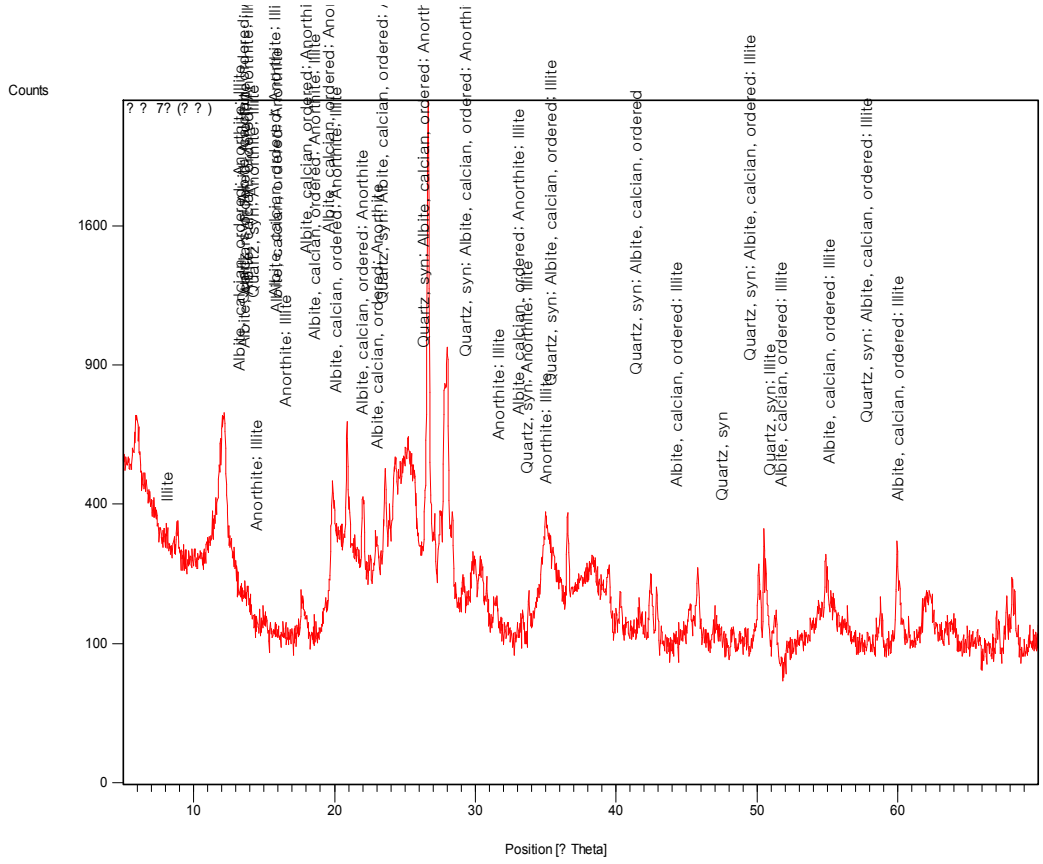


그림 4.33 실트 일반농도처리 7일 시료에 대한 XRD 분석

표 4.20 실트 일반농도처리 7일 시료에 대한 XRD 광물 분석

| Ref. Code   | Scale Factor | 광물명칭 (Mineral Name)        | 화학식                     |
|-------------|--------------|----------------------------|-------------------------|
| 00-046-1045 | 0.903        | Quartz, syn                | $SiO_2$                 |
| 00-020-0548 | 0.377        | Albite, calcian, ordered   | $(Na, Ca)(Si, Al)_4O_8$ |
| 01-070-3754 | 0.340        | Illite                     | $K(Al_4Si_2O_9(OH)_3)$  |
| 01-070-0287 | 0.319        | Calcium Aluminium Silicate | $CaAl_2Si_2O_8$         |

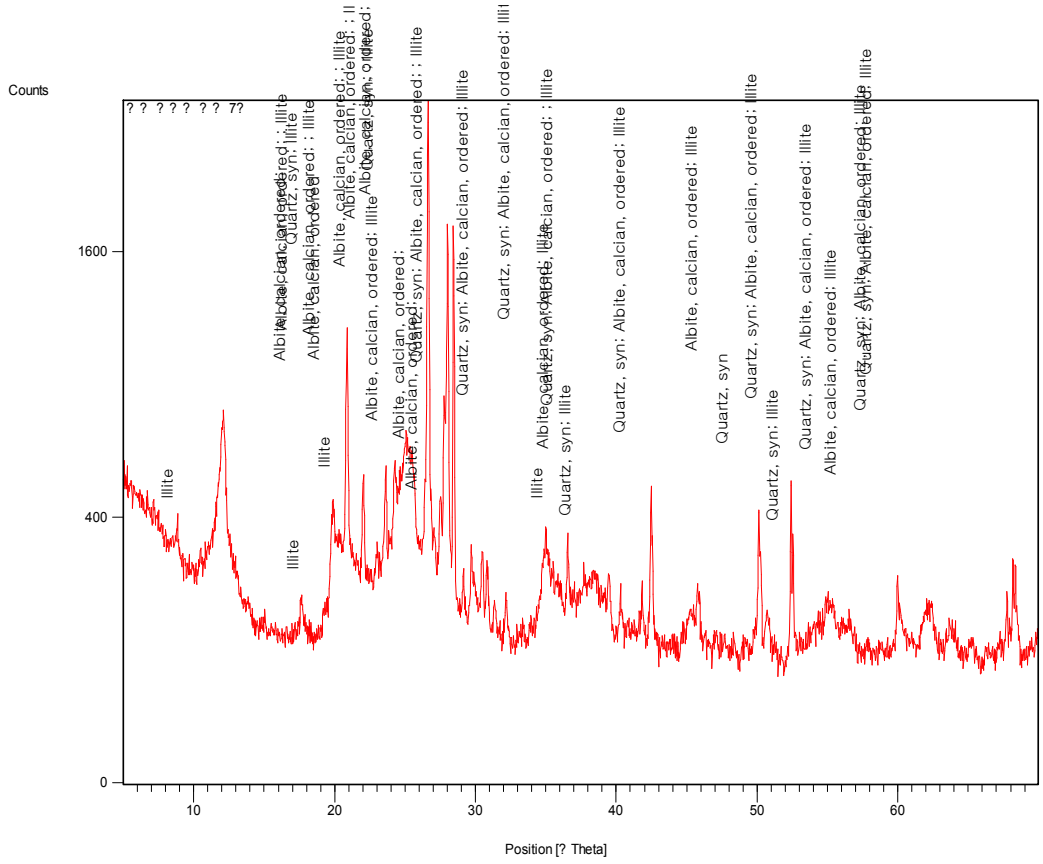


그림 4.34 실트 고농도처리 7일 시료에 대한 XRD 분석

표 4.21 실트 고농도처리 7일 시료에 대한 XRD 광물 분석

| Ref. Code   | Scale Factor | 광물명칭<br>(Mineral Name)       | 화학식                     |
|-------------|--------------|------------------------------|-------------------------|
| 00-046-1045 | 1.023        | Quartz, syn                  | $SiO_2$                 |
| 00-052-1344 | 0.623        | Calcium<br>Aluminum Silicate | $CaAl_2Si_2O_8$         |
| 00-020-0548 | 0.398        | Albite, calcian,<br>ordered  | $(Na, Ca)(Si, Al)_4O_8$ |
| 01-070-3754 | 0.357        | Illite                       | $K(Al_4Si_2O_9(OH)_3)$  |

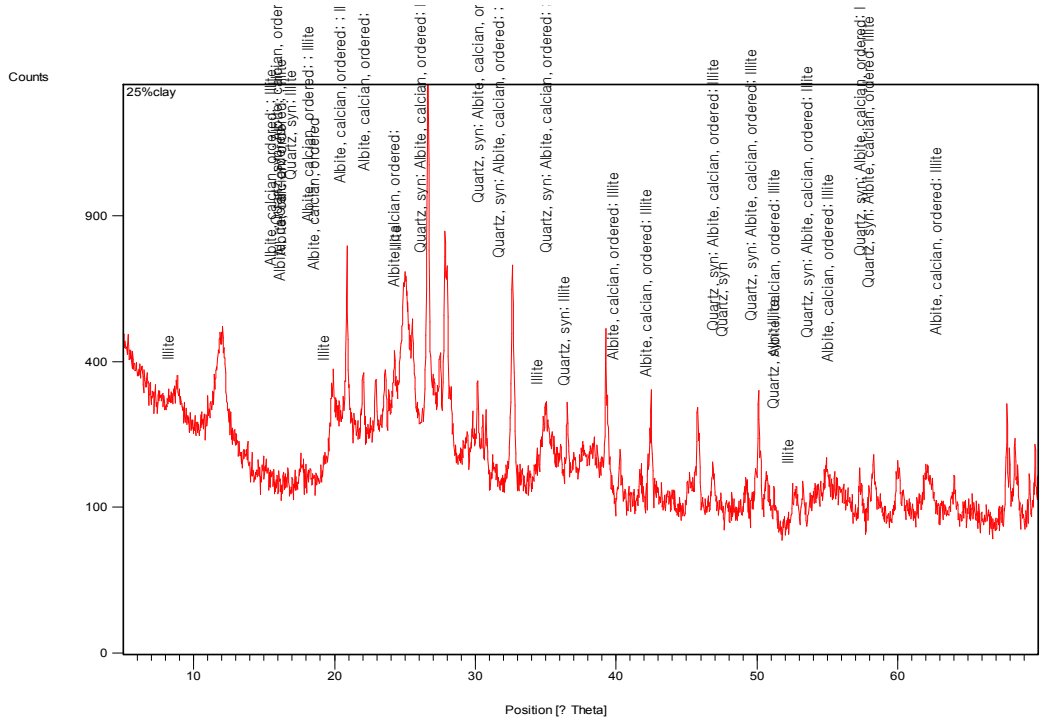


그림 4.35 실트 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 XRD 분석

표 4.22 실트 25%시료 고농도처리 7일 시료에 대한 XRD 광물 분석

| Ref. Code   | Scale Factor | 광물명칭<br>(Mineral Name)       | 화학식                     |
|-------------|--------------|------------------------------|-------------------------|
| 00-046-1045 | 1.038        | Quartz, syn                  | $SiO_2$                 |
| 00-052-1344 | 0.437        | Calcium<br>Aluminum Silicate | $CaAl_2Si_2O_8$         |
| 00-020-0548 | 0.384        | Albite, calcian,<br>ordered  | $(Na, Ca)(Si, Al)_4O_8$ |
| 01-070-3754 | 0.383        | Illite                       | $K(Al_4Si_2O_9(OH)_3)$  |

## 제 5 장 결론

본 연구는 느슨한 모래와 실트에 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 첨가하여 탄산칼슘의 생성과 흙의 고결화 특성을 살펴보고자 하였다. 무처리 시료 및 일반농도처리 시료, 고농도처리 시료, 상층액처리 시료, 고농도처리 X2 시료, 25%시료 고농도처리에 대해 기초 물성 및 역학적 특성을 파악하였고, 전자현미경(SEM), EDX, Mapping 분석 및 X-회절(XRD) 분석과 포켓관입 시험을 통해 미생물 고결화 메커니즘 반응을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 미생물 고결의 효율을 높이고자 시료의 양을 75%로 줄인 25%시료 고농도처리 7일 시험을 확인해 본 결과, 포켓관입시험기의  $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 를 견디는 단단한 모래층이 생성됨을 확인 할 수 있었다.

2. 미생물의 고결화 정도 확인을 위해 전자현미경(SEM)으로 분석한 결과, 모래의 경우 입자와 입자 간에 탄산칼슘 입자가 생성되었음을 표면검사 결과를 통해 확인하였으며, 이러한 입자는 EDX와 Mapping에서 나타난 Ca 광물 함유량 증가와 일치한다.

실트의 경우 EDX에서 나타난 것 같이 Ca 광물 함유량은 증가 하였으나, 그 양이 미미함을 알 수 있다. 따라서 미생물이 성장하기 위해서는 입자와 입자 사이의 공극이 필요하므로 공극이 작은 실트질에서는 탄산칼슘이 거의 생성되지 않은 것을 확인 할 수 있었다.

3. X-회절분석(XRD)로 분석한 결과, 모래 및 실트 무처리에서는 Ca계열의 광물이 생성되지 않았으며, 기타 처리에서는 Ca의 계열의 특성상 다른 광물과 결합력이 좋고, 변질이 되기 쉬운 물질이므로 흙 속에 있는 다른 광물과 혼합되어  $\text{CaCO}_3$ 가 아닌 광물로 나타나게 되었다. 그러나 모래 25%시료 고농도처리에서 흙 속에 존재하는  $\text{CaCO}_3$ 를 확인 할 수 있었다.

4. 25%시료 고농도처리에서  $\text{CaCO}_3$ 를 확인하였고, 포켓관입시험을 통해  $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 강도를 확인하므로 이전의 실험으로 흙의 고결화 가능성을 보았다면, 이번 실험을 통하여 미생물을 이용한 흙의 고결화를 이루게 되었다.

5. 호기성 미생물의 특성상 공기 중에 닿는 부분에서 1.5cm 두께 정도는 매우 단단한 지반으로 강도가 개선되나, 공기가 닿지 않는 부분의 경우 느슨한 지반 그대로의 모습을 보이고 있다. 이는 미생물이 한번 주입에 생성할 수 있는 탄산칼슘의 양이 한계가 있는 것으로 판단되며, 호기성 미생물의 특성과 주입공법을 통해 주기적으로 미생물과 방응용액을 주입하여 연약지반의 강도를 개선하는 연구가 필요하다.

## 참고문헌

1. 김대현, 김호철, 박경호(2010), “Bacteria를 이용한 연약한 흙의 고결화 가능성”, 한국지반공학학회, 2010, pp. 379-391
2. 김대현, 박경호(2011), “미생물을 이용한 탄산칼슘 생성과 흙의 고결화”, 한국지반공학학회, pp. 661-671
3. 김호철(2010), “미생물 이용한 흙의 고결화 특성”, 조선대학교대학원 석사논문
4. 김화중, 김성태, 박성진, 김사열, 천우영(2009), “미생물의 생체광물형성작용을 이용한 자기치유 스마트 콘크리트 개발에 관한 기초연구”, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 21, No.4, pp. 501-511
5. 백태선, “주사전자현미경(SEM)”, 2003. 9
6. 사단법원 한국지반공학학회 (2005), “지반공학시리즈 6, 연약지반”, Chapter 1, pp. 2-3
7. 사단법원 한국지반공학학회 (2005), “지반공학시리즈 6, 연약지반”, Chapter 5, pp. 192-201
8. 오종신(2008), “미생물 고결토의 공학적 특성 연구”, 전남대학교대학원 석사논문
9. 윤준도, “주사전자현미경 분석과 X선 미세분석”, 청문각, 2005
10. 일반미생물학 7판, 라이프사이언스
11. 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, pp. 171-181
12. Dejong, J. T., Fritzsche, 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
13. Jason T. Dejong., Brina M. Mortensen., Brian C. Martinez., and Douglas C. nelson. (2010). “Bio-mediated soil improvement”, Ecological Engineering, 36, pp. 197-210
14. Ferris, F. G., Stehmeier, L. G., Kantzas, A., and Mourits, F. M. (1996). “Bacteriogenic mineral plugging” Journal of Canadian Petroleum Technology, 35(8), pp. 56-61

15. Janssen, P. H. (2006). "Identifying the dominant soil bacterial taxa in libraries of 16S rRNA genes" *American Society for Microbiology*, 72(3), pp. 1719-1728
16. Karol, R. H. (2003). *Chemical grouting and soil stabilization*, Marcel Dekker, Inc., New York
17. Khachatourian, R., Petrisor, I. B., Kwan, C.-C., and Yen, T. F. (2003). "Biopolymer plugging effect: Laboratory-pressurized pumping flow studies" *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 38(1-2), pp. 13-21
18. 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: a biological ground reinforcement method", *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 2328-2333
19. 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 - Soft Rocks and Karst - Vrkljan* (ed), pp. 405-410
20. 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
21. Mueller, R. F. (1996). "Bacterial transport and colonization in low nutrient environments" *Applied and Environmental Microbiology*, 30(11), pp. 2681-2690
22. Michell, J. K., and Santamarina, J. C. (2005). "Biological considerations in geotechnical engineering" *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 131(10), pp. 1222-1233
23. Nelson, S. J., and Launt, P. D. (1991). "Stripper well production increased with MEOR treatment" *Oil & Gas Journal*, 89, pp. 114-118
24. 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
25. Ramakrishnam, V. Ramesh, K. P. and Bang, S. S. (2001), "Bacterial concrete" *Proc. of SPIE-Int. Society of Optical Engineering*, 4234, pp. 168-176

26. Stocks-Fisher, S. Galinat, J. K and Bang S. S. (1999). "Microbiological precipitation of  $CaCO_3$ " *Soil Biology and Biochemistry*, 31(11), pp. 1563-1571
27. 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
28. 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 완성하면서 대학원 생활을 해왔던 1년 6개월이라는 시간이 빠르게 지나갔구나 하는 생각이 들었습니다. 처음 대학원을 진학 하였을 때, 그때의 꿈과 목표에 다가하려고 노력하면서 지치고 힘들어 하던 저에게 용기를 잃지 않게 격려해주시고, 위로를 아끼지 않으셨던 교수님과 선·후배님들 모두 감사드립니다.

먼저 학·석사 연계과정으로 들어와서 막연한 꿈만 꾸던 제게 꿈에 대한 확신을 심어 주신 故안종필 교수님께 감사드립니다. 짧은 기간이었지만, 이야기를 나눌 수 있는 기회도 많지 않았지만, 함께 산행을 가며 쌓았던 추억 하나하나가 가슴에 묻히는 것 같습니다. 교수님께서 대기업 다니는 사람이나 공기업 다니는 사람들이 부럽냐고 물어보시고는 너에게는 꿈이 있으니 그 사람들보다 더 행복한 사람이라고 말씀해 주신 것이 아직도 귓가에서 울리는 것 같습니다. 이제는 그 꿈을 실현시키는 사람이 되겠습니다.

또한, 이렇게 부족한 저에게 따뜻한 웃음과 관심을 보여주시고, 제자들에게 훌륭한 교수가 되기 위해 날마다 노력하시는 지도교수님이신 김대현 교수님께 감사드립니다. 저에게 전공지식은 물론 불안해하는 미래에 대해 여러 가지 새로운 방향을 제시해 주시고, 생각의 깊이를 더해 주신 교수님. 훌륭한 교수님 지도가 없었다면 지금의 저 또한 없었을 것이고, 석사 학위논문 또한 완성 되지 못했을 것입니다. 저의 모든 문제를 아버지와 같은 마음으로 걱정해주시고, 위로해 주신 교수님께 너무나 감사드립니다.

대학원 생활을 하면서 많은 가르침을 주신 교수님들께도 감사의 말씀을 드립니다. 멀리서 인사를 드려도 따뜻하게 이름을 불러주셨던 박길현 교수님, 바쁘신 와중에도 시간을 내어 논문 수정에 도움을 주신 김운중 교수님, 마지막 학기 수업인 유한요소 해석을 열정적으로 가르쳐 주신 박정웅 교수님, 프로그래밍에 대한 새로운 관심을 가지게 하여 주신 김성홍 교수님, 항상 저에게 친절하게 대해주셨던 이원희 교수님께 다시 한 번 감사의 말씀을 드립니다.

또 대학원 생활 동안에 도움을 주신 겸임교수님들께도 감사의 말씀을 드립니다. 1년 반 동안 토질실험실에서 논문에 대해 항상 걱정해주시고 도와주신 김선학 교수님, 스트레스로 답답한 마음을 날려 보낼 수 있도록 도와주신 박상범 교수님, 친절하게 모르는 부분에 대해서 내 일처럼 자세히 알려주신 양승현 교수님께도 감사의 말씀을 전하고 싶습니다.

그리고 토질실험실에서 가장 미안하고 고마운 친구 호철이 지금은 좋은 곳으로 취직이 되어 내 마음이 더 기쁘다는 말을 전하고 싶고, 항상 정신적으로 영적으로 도움을 주는 광기에게도 함께 하면서 미안한 일도 많았는데 이 기회를 통해 고맙다는 말을 전합니다. 그리고 나이는 제일 많지만 토질실험실 막내인 성우형, 묵묵히 맡은 일을 열심히 해주시고, 미생물 연구에 도움을 많이 준 성우형에게도 감사의 말을 전합니다.

대학원 생활 내내 조언을 아끼지 않고, 대학원 생활에 직면하는 어려움에 대해서 내일처럼 걱정해 주시고, 도움을 주신 정원이형, 지금은 졸업을 했지만 여러 가지로 개인적인 문제에 대한 많은 조언을 해준 승엽이형, 그리고 같은 졸업 동기이자 나이는 어리지만 속이 매우 깊은 맹선이, 대학원 대의원이자 모든 학과 업무를 도맡아하면서 도움을 많이 준 정환이, 아직 대학원생은 아니지만 학·석사연계과정으로 일 처리 하나는 똑 부러지게 잘하는 신규, 태훈이, 마지막으로 대학원 생활이 있기까지 여러 가지로 많은 도움을 주셨던 영민이형, 진우, 민아, 준석이, 홍기, 진수이외에 모든 분들께 감사의 말을 전합니다.

고등학교부터 지적과에 함께 하면서 지금까지 많은 도움을 주는 명권이, 명훈이, 영기, 지금은 직장으로 인해 잘 보지 못하는 친구 수재, 명관이, 항상 긍정의 마인드로 나를 도와주는 승태, 새로운 학문과 신앙에 대해 눈을 뜨게 도와준 현석이, 그리고 힘들 때마다 제게 힘을 주도록 기도해주는 충청교회식구 이들이 있어 지금의 결실이 더욱 더 값진 것 같습니다.

마지막으로 외아들이 학문에 전념할 수 있도록 전적으로 믿어주시고, 자신의 꿈이 아닌 아들의 꿈을 위해 오늘도 꾀은일을 마다하지 않으시고, 고생하시는 부모님. 말로 표현 할 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.

2011년 8월  
박 경 호