(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2011년04월26일
(11) 등록번호 10-1030761
(24) 등록일자 2011년04월15일

(51) Int. Cl.
E02D 3/12 (2006.01) *C09K 17/06* (2006.01)
(21) 출원번호 10-2010-0117624
(22) 출원일자 2010년11월24일
심사청구일자 2010년11월24일
(56) 선행기술조사문헌
JP2006169940 A*
JP2008008023 A
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
조선대학교산학협력단
광주광역시 동구 서석동 375 조선대학교 내
(72) 발명자
김대현
광주광역시 남구 주월동 호반베르디움2차아파트 202동 202호
김호철
전라남도 고흥군 풍양면 풍남리 216
박경호
전라남도 여수시 미평동 삼익맨션 2동 105호
(74) 대리인
특허법인세신

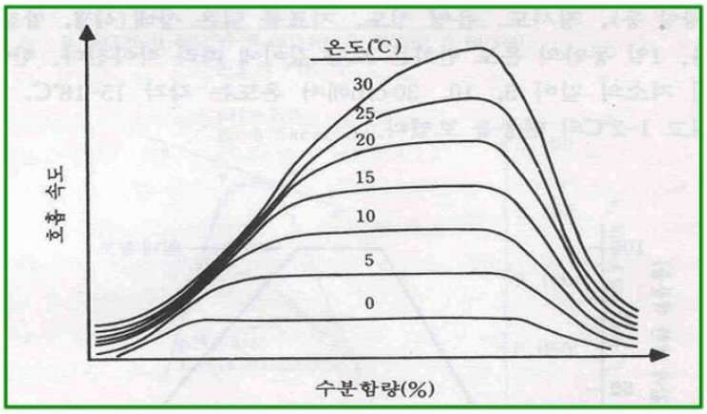
전체 청구항 수 : 총 8 항 심사관 : 임형남

(54) 미생물을 이용한 연약 지반의 고결화 방법

(57) 요 약

본 발명에 의하면 연약 지반에 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 적용함으로써 상기 미생물용액의 미생물의 분해로부터 얻어지는 탄산염 이온과 상기 염화칼슘 용액으로 부터 얻어지는 칼슘이온의 반응으로 흙입자 사이의 공극에 탄산칼슘을 침전시키는 것을 포함하는 연약 지반의 고결화 방법이 제공된다.

대 표 도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 2010-0003391
부처명 교육과학기술부 한국연구재단
연구관리전문기관 조선대학교
연구사업명 기초연구사업-일반연구자지원사업-신진연구지원사업(연구비지원)
연구과제명 미생물을 이용한 흙의 고결화(Cementation) 특성 규명 및 지반개량 신공법 개발
기여율 1/1
주관기관 조선대학교
연구기간 2010.05.01 ~ 2013.04.30

특허청구의 범위

청구항 1

연약 지반에 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 적용함으로써 상기 미생물용액의 미생물의 분해로부터 얻어지는 탄산염 이온과 상기 염화칼슘 용액으로부터 얻어지는 칼슘이온의 반응으로 흙입자 사이의 공극에 탄산칼슘을 침전시키는 것을 포함하는 연약 지반의 고결화 방법으로서,

상기 미생물 용액은 물, 미생물 배지, 요소 및 미생물 액을 배합하여 얻어지는 것으로, 상기 미생물 배지 0.4 내지 1.6%, 요소(Urea) 1 내지 4%, 그리고 잔부는 물과 10^4 내지 10^8개/㎖의 미생물 액을 배합하여 얻어지는 것을 특징으로 하는 연약 지반의 고결화 방법.

청구항 2

삭제

청구항 3

삭제

청구항 4

제1항에 있어서, 상기 미생물 용액의 미생물 농도를 10 내지 200배의 고농도로 농축하여 사용하는 것을 특징으로 하는 연약 지반의 고결화 방법.

청구항 5

제1항에 있어서, 상기 염화칼슘 용액의 몰농도는 0.1M 내지 5M의 범위에서 선택되는 것을 특징으로 하는 연약 지반의 고결화 방법.

청구항 6

제1항에 있어서, 상기 미생물 용액과 상기 염화칼슘 용액의 적용 비는 1:1인 것을 특징으로 하는 연약 지반의 고결화 방법.

청구항 7

제1항에 있어서, 상기 미생물은 호기성 세균인 것을 특징으로 하는 연약 지반의 고결화 방법.

청구항 8

제1항에 있어서, 상기 연약 지반은 사질 또는 실트질로 이루어지는 것을 특징으로 하는 연약 지반의 고결화 방법.

청구항 9

제8항에 있어서, 상기 사질의 토양 입자는 0.075㎜이상 ~ 4.75㎜미만의 입경를 갖는 것을 특징으로 하는 연약 지반의 고결화 방법.

청구항 10

제8항에 있어서, 상기 실트질의 토양 입자는 0.002㎜이상 ~ 0.075㎜미만의 입경을 갖는 것을 특징으로 하는 연약 지반의 고결화 방법.

명 세 서

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 미생물을 이용한 연약 지반의 고결화 방법에 관한 것이다. 보다 상세하게는 본 발명은 고농도 처리

미생물 용액을 이용한 연약 지반의 고결화 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 최근 급속한 산업발전에 따른 국가 기간산업의 양적, 질적 확대로 인하여 부지의 확보가 용이하지 않은 실정이다. 이에 효율적인 토지 이용을 위하여 그동안 건설부지로 고려치 않았던 느슨한 사질토나 연약한 점성토로 구성된 연약지반의 개량에 대한 관심이 상당히 높아지고 있다.

[0003] 국내에서는 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. 이런 문제점을 해결하기 위해서 시공 전 지반의 표층을 처리하는 공법으로 Mat 공법, Drain 공법, 치환 공법 및 약액 주입 공법 등이 사용되고 있으나, 원자재 값 상승과 건설 재료의 부족으로 친환경적인 지반 개량 공법의 개발이 필요하다.

[0004] 미생물을 이용한 흙의 고결화(Cementation)에 관한 연구는 국내·외적으로 아직 초기단계에 머무르고 있으며, 최근 미국을 중심으로 Dejong(2006)등, 몇몇 연구자들에 의해서 미생물을 흙에 사용하여 고결화 정도를 확인하기 위한 여러 가지 실험을 실시하였으나, 반복적인 실험으로 과정이 복잡하여 적용상에 많은 어려움이 있을 것으로 판단된다. 미생물을 이용한 흙의 고결화(Cementation) 원리는 흙 입자와 흙 입자 간의 탄산칼슘($CaCO_3$)을 생성시켜 이를 침전시키는 반응과 밀접한 관련이 있다.

[0005] 종래의 연구중에서, Stock-Fischer(1999)등은 미생물학적으로 유발된 탄산칼슘 결정 침전이 pH 8.3 ~ 9.0에서 발생된다고 하였다. 탄산칼슘의 형성은 박테리아 대사활성 결과로써 발생하며, 또한 인접 환경의 pH를 상승시키는 문제점이 있다.

[0006] 또한, Dejong(2006)등은 Ottawa 50-70 모래를 이용하여 무 처리된 모래시료, 석고로 처리된 모래시료, 박테리아로 처리된 모래시료에 대해 각각 입자간의 고결화 정도를 확인하였다. 각각의 모래 시료는 상대밀도 40%로 맞추어 실험이 실시되었고, 석고로 처리된 모래시료 및 미생물로 처리된 모래시료는 시료의 구성 성분을 평가하기 위해서 삼축압축시험을 실시하였다. 하지만 이 방법은 고체 배양법을 사용하여 배양 과정에서 두 번의 새로운 배양액으로 옮겨져야 하고 5가지 화학 요소를 섞으므로 그 과정이 상당히 복잡하고, 삼축 공시체에 강도증진을 위해서 여러번 반복적인 방법으로 미생물 용액을 주입함으로 과정이 번잡한 등의 문제점이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명에서는 미생물을 연약 지반에 적용하여 미생물의 반응을 통해 탄산칼슘($CaCO_3$)을 생성시켜 흙 입자와 흙 입자 간의 공극을 채워줌으로써 지반의 고결화(Cementation) 가능성을 살펴보았고, 이러한 반응의 결과를 이용하여 연약지반 개량공법의 환경적인 측면에서도 긍정적인 효과를 나타낼 수 있도록 기여하고자 하는데 목적을 두고 있다.

과제의 해결 수단

[0008] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 연약 지반의 고결화 방법은, 연약 지반에 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 적용함으로써 상기 미생물용액의 미생물의 분해로부터 얻어지는 탄산염 이온과 상기 염화칼슘 용액으로부터 얻어지는 칼슘이온의 반응으로 흙입자 사이의 공극에 탄산칼슘을 침전시키는 것을 포함한다.

[0009] 바람직하게는, 상기 미생물 용액은 증류수, 미생물 배지, 요소 및 미생물 액을 배합하여 얻어진다.

[0010] 바람직하게는, 상기 미생물 용액은 상기 미생물 배지 0.4 내지 1.6%, 요소(Urea) 1 내지 4%, 그리고 잔부는 물과 10^4 내지 10^8개/㎖의 미생물 액을 배합하여 얻어진다.

[0011] 바람직하게는, 상기 미생물 용액의 미생물 농도를 10 내지 200배의 고농도로 농축하여 사용한다.

[0012] 바람직하게는, 상기 염화칼슘 용액의 몰농도는 0.1M 내지 5M의 범위에서 선택된다.

[0013] 바람직하게는, 상기 미생물 용액과 상기 염화칼슘 용액의 적용 비는 1:1이다.

[0014] 바람직하게는, 상기 미생물은 호기성 세균이다.

[0015] 바람직하게는, 상기 연약 지반은 사질 또는 실트질로 이루어진다.

[0016] 바람직하게는, 상기 사질의 토양입자는 0.075㎜이상 ~ 4.75㎜미만의 입경를 갖는다.

[0017] 바람직하게는, 상기 실트질의 토양입자는 0.002㎜이상 ~ 0.075㎜미만의 입경을 갖는다.

발명의 효과

[0018] 본 발명은 지반공학적으로 문제가 되고 있는 연약한 점토지반 및 느슨한 모래지반에 미생물을 이용하여 생화학적 반응을 통해 흙을 고결화할 수 있다. 이를 통해 연약지반 초기 시공성 확보에 있어 지지력 개선 및 구조물의 안정성 증대, 공사비 절감과 함께 친환경적인 공법으로 기여한다.

[0019] 또한, 본 발명은 액체 배양법을 사용하여 2가지 화학요소로 배합된 배양액으로 접종하므로 실용성이 뛰어나고, 고농축을 실시하여 한번에 고결화 반응을 나타낼 수 있다.

[0020] 한편, 본 발명에 의한 탄산칼슘의 생성을 3D Mapping으로 확인함으로써 보다 정밀하고 EDX 분석으로 실질적인 탄산칼슘의 함유량을 파악할 수 있었고, XRD 분석을 통해 미생물과 염화칼슘 수용액의 혼합으로 탄산칼슘 생성을 확인함으로써 미생물 고결화 매커니즘을 증명하였다.

도면의 간단한 설명

[0021] 도 1은 수분함량, 온도 그리고 미생물 호흡속도의 관계를 나타내는 그래프이다,

도 2는 모래 무처리, 그리고 본 발명에 따른 고농도처리 7일, 고농도처리 25%모래 7일 반응을 통한 흙의 변화를 나타낸다,

도 3은 모래 무처리, 그리고 본 발명에 따른 일반농도처리와 고농도처리 7일, 고농도처리 25%모래 7일 SEM 분석 결과이다,

도 4는 실트 무처리, 그리고 본 발명에 따른 일반농도처리와 고농도처리 7일, 고농도처리 25%실트 7일 SEM 분석 결과이다,

도 5a 내지 5e는 모래 무처리, 그리고 본 발명에 따른 일반농도처리와 고농도처리 7일, 고농도처리 25%모래 7일에 대한 EDX 실험 결과표이다,

도 6a 내지 6e는 실트 무처리, 그리고 본 발명에 따른 일반농도처리와 고농도처리 7일, 고농도처리 25%실트 7일에 대한 EDX 실험 결과표이다,

도 7a 및 7b는 본 발명에 따른 일반농도처리 모래 7일차 XRD 분석결과이다,

도 8a 및 8b는 본 발명에 따른 고농도처리 모래 7일차 XRD 분석결과이다,

도 9a 및 9b는 본 발명에 따른 고농도처리 25%모래 7일차 XRD 분석결과이다,

도 10a 및 10b는 본 발명에 따른 일반농도처리 실트 7일차 XRD 분석결과이다,

도 11a 및 11b는 본 발명에 따른 고농도처리 실트 7일차 XRD 분석결과이다,

도 12a 및 12b는 본 발명에 따른 고농도처리 25%실트 7일차 XRD 분석결과이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0022] 본 발명자들은 연약 지반에 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 적용함으로써 상기 미생물용액의 미생물의 분해로부터 얻어지는 탄산염 이온과 상기 염화칼슘 용액으로부터 얻어지는 칼슘이온의 반응으로 흙입자 사이의 공극에 탄산칼슘을 침전시켜 다음과 같이 연약 지반을 고결화할 수 있었다.

[0023] 1. 미생물 용액의 준비

[0024] 1.1 사용 미생물

[0025] 본 발명에 사용가능한 미생물은 호기성 세균이다. 바람직하게는 본 발명에서는 Sporosarcina pasteurii라는 균으로서, 한국생명공학 연구원 생물자원센터에서 균배양체로 분양을 받아서 사용하였다.

[0026] 1.2 일반 농도 처리 미생물 용액 제조

[0027] 먼저, 증류수 900㎖ 메스실린더에 담아서 비커에 넣고 시료 교반기 위에 놓고 속도를 조절한다.

[0028] 그 다음 바람직하게는 미생물 배지 0.4 내지 1.6%(용액 1000㎖ 기준으로 4 내지 16g 넣음), 보다 바람직하게는 0.6 내지 1%(용액 1000㎖ 기준으로 6 내지 10g 넣음), 더 좋게는 0.8%(용액 1000㎖ 기준으로 8g을 넣음)를 비커에 넣고 섞는다.

[0029] 그 다음, 바람직하게는 요소(Urea) 1 내지 4%(용액 1000㎖ 기준으로 10 내지 40g 넣음), 보다 바람직하게는 1.5 내지 3%(용액 1000㎖ 기준으로 15 내지 30g), 더 좋게는 2%(용액 1000㎖ 기준으로 20g을 넣음)를 비커에 넣고 섞는다.

[0030] 그 다음 섞어진 미생물 배지 용액 900㎖를 다시 메스실린더에 담아 1000㎖를 만든다.

[0031] 그 다음 삼각플라스크에 담아진 1000㎖ 배지 용액을 각각 호일을 이용하여 막고 멸균기에서 121도에서 15분간 멸균을 시킨다(멸균 과정에서 습기가 위로 올라와서 폭발하게 되는 것을 방지하기 위해서 호일로 감싼다).

[0032] 그 다음, 멸균된 1000㎖를 클린벤츠로 가져와서 기존에 있던 미생물 액(농도 : 10^4 내지 10^8개/㎖, 바람직하게는 약 10^6개/㎖)을 가져와서 계대배양(1000㎖이므로 1%인 10㎖)을 스포이드로 맞춘 후 10㎖인 미생물 액을 멸균했던 새로운 영양배지에 접종시킨다(만약 1000㎖를 접종한다면 5000㎕의 스포이드로 두번 접종을 하면 1%인 10㎖가 접종된다).

[0033] 그 다음 접종한 1000㎖의 삼각 플라스크를 인큐베이터에 넣고 24시간 정도 온도 30도에서 rpm 180으로 미생물을 키워 미생물 용액을 얻는다.

[0034] 1.3 고농도 처리 미생물 용액 제조

[0035] 1.2에서 설명된 절차에 따라 얻어진 일반 농도 처리 미생물 용액 2L를 만들어 1L씩 부어 저울을 이용하여 수평을 맞춘다.

[0036] 수평을 맞춘 용액을 원심분리기에 넣고 온도 4도와 rpm 8000에서 8분간 회전을 시켜서 용액 안에 존재하는 미생물을 농축시킨다. 바람직한 고농도 처리 미생물 용액의 농축 비율은 10 내지 200배, 보다 바람직하게는 20 내지 100배, 더 좋게는 40 내지 50 배 정도이다. 농축 비율을 위와 같이 설정한 이유는 200배 이상에서는 미생물의 입자가 너무 적은 양으로 한곳으로 모으면 미생물균이 스트레스를 받아 짧은 시간에 세포가 많이 죽고, 10배 미만에서는 농축의 효과를 볼 수 없기 때문이다.

[0037] 농축 방법은 1000ml 미생물 용액을 원심분리로 사용하여 농축을 시키면 미생물의 입자들이 한곳으로 모이고, 이때 용액들은 모두 버리고 농축된 미생물 세포들에게 스포이드를 이용하여 다시 풀어주게 되는데, 풀어줄 때 몇 ml로 만드냐에 따라서 용액의 배율이 정해진다. 즉, 1000ml 농축 후 용액을 버리고 새로운 영양배지 용액으로 농축된 입자들에게 스포이드로 쏘아서 25ml를 만드면 40배가 되게 된다.

[0038] 바람직한 실시예에서, 뭉쳐 있는 미생물을 스포이드로 이용하여 배양액을 뿌려 줌으로써 농도를 결정할 수 있는데 1L 미생물 용액을 농축된 25㎖로 만들어 사용하여 약 40배의 농도로 농축하였다.

[0039] 2. 염화칼슘 용액의 준비

[0040] 본 발명에서 사용되는 염화칼슘 용액은 염화칼슘을 물에 용해함으로써 얻어진다. 바람직한 염화칼슘의 용액의 농도 범위는 0.1M 내지 5M, 보다 바람직하게는 0.25M 내지 3M, 더 좋게는 0.5 내지 1M이다. 이렇게 염화칼슘 용액의 농도 범위를 설정한 이유는 염화칼슘의 농도가 0.1M 미만에서는 염화칼슘 수용액에 녹아있는 칼슘의 양이 적으므로 고농도처리 미생물용액과 반응시 탄산칼슘의 생성이 잘 나타나지 않으며, 5M를 초과하면 염화칼슘 수용액과 고농도처리 미생물용액이 반응하는 정도가 한정되어 있어 탄산칼슘의 양이 더 이상 증가하지 않기 때문이다.

[0041] 3. 미생물 용액과 염화칼슘 용액의 연약 지반에 대한 적용

[0042] 상기 1.과 2.에서 각각 준비된 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 토양, 바람직하게는 사질 또는 실트질로 이루어진 연약 지반에 적용한다.

[0043] 바람직한 미생물용액과 염화칼슘의 용액의 비율은 약 1:1이고, 미생물의 용액양에 따라서 염화칼슘 용액의 양이 결정될 수 있다. 바람직한 실시예에서, 모래(실트)는 기본적인 물성치 실험을 통해 371.3g(185.6g)을 사용할때에 최적함수비가 약 50ml(22ml)이므로 미생물 용액과 염화칼슘 용액 1(25ml) : 1(25ml)로 사용하였다.

[0044] 일반적으로 연약 지반의 고결화 방법으로 지반에 적용하는 방법과 콘크리트에 적용하여 고결화하는 방법이 있는데 후자는 콘크리트의 특성상 시멘트가 들어가고 시멘트 성분 자체가 고결화 기능을 가지므로 온전한 미생물의 반응으로 고결화가 되었다고 할 수 없다. 또한 전자인 지반에 적용하는 방법에 있어서도 소석회를 일정량 섞어서 사용한 방법들이고 이 역시 소석회가 점토의 지반을 단단하게 하는 기능을 가지므로 온전한 미생물의 반응으로 볼 수 없다.

[0045] 이들와 달리 본 발명은 순수한 미생물 용액과 염화칼슘 수용액의 반응을 통하여 토양 입자 사이 공극에 탄산칼슘을 침전시켜 연약지반의 고결화를 얻을 수 있다.

[0046] 4. 흙의 고결화 특성

[0047] 4.1 흙의 고결화(Cementation) 개념

[0048] 흙의 고결화(Cementation)는 흙이 단단해 지는 일련의 과정이며, 퇴적물이 퇴적암으로 진행 되어지는 과정 또한 장기적인 고결화 과정으로 볼 수 있을 것이다. 이러한 고결화는 공극을 통하여 고결물(Cement)이라 부르는 고형물질들이 공극 내에 침전되어 퇴적물 입자들을 서로 묶어주어 흙 입자들을 단단하게 형성하도록 하는 것이다.

[0049] 자연적인 고결작용은 소규모, 일반 규모, 또는 대규모에서의 지층상 간격은 각기 다르게 나타난다. 또한 침전물 내부의 고결작용 정도는 환경적인 조건의 특성에 따라 조절이 가능하며, 많은 차이가 발생하기도 한다(Dejong et al. 2006).

[0050] 인공적인 고결작용의 예로는 그라우팅 방법을 생각할 수 있을 것이다. 비배수 그라우팅의 중요한 특성은 자연성질을 이용한 것이며, 비배수 그라우팅 방법은 흙 퇴적물의 원상태를 유지하면서 지반보강을 하는 방법이다. 화학적 그라우팅은 보통 10^{-1}~10^{-4}㎝/sec 범위의 침투성을 가진 토양을 처리하는데 사용된다(Karol 2003; Leonard and Moller 1963). 빈 공간을 중합된 겔로 채움으로써 전단강도를 증가시키게 되었으며, 이는 흙의 안정성을 증가시킴과 동시에 침하로 인한 붕괴 가능성을 줄이고, 흙 입자를 고정시키는 결과를 가져온다.

[0051] 4.2 미생물을 이용한 흙의 고결화 시 고려해야 할 요인들

[0052] 4.2.1 미생물 용액의 pH

[0053] 미생물 반응으로 생성되는 탄산칼슘결정 침전은 pH 8.3에서 시작하며, 탄산칼슘 결정 침전이 증가하는 비율은 pH 9이상에서 발생된다고 하였다(Stock-Fischer 1999). 이에 본 발명에서 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 섞어 pH를 확인한 결과 9.0 이상이 되었으며, 미생물 용액과 염화칼슘의 반응 pH는 무처리 된 시료에 적용한 경우 6.5, 일반농도 처리된 시료에 적용한 경우 7.0으로 나타났으며, 이는 미생물, 염화칼슘 용액을 흙에 적용 시 pH가 낮아짐을 알 수 있다.

[0054] 4.2.2 흙 입자의 크기 및 공극비

[0055] 흙 입자의 크기 및 공극비는 미생물 반응 실험이 실질적으로 이루어 질 수 있는 조건으로 미생물 생장에 중요한 요인이라고 할 수 있다. 지반공학적으로 통일분류법을 참고하여 흙을 분류 했을 때 직경을 보면 자갈의 경우 4.75㎜이상의 입자들을 말하며, 모래의 경우 0.075㎜이상 ~ 4.75㎜미만의 입자들을 나태내고, 실트의 경우 0.002㎜이상 ~ 0.075㎜미만의 입자들이며, 점토의 경우 0.002㎜미만의 입자들을 나타낸다. 실험에 사용된 미생물의 지름 길이는 보통 0.0030㎜~0.0005㎜ 정도로 흙 입자와 흙 입자 사이의 공극을 자유롭게 통과할 수

있으나, 세포 밖에서 방해석 침전이 일어날 경우 미생물의 크기는 원래의 크기보다 약 20배 정도 커지게 되어 미생물의 원활한 통과가 이루어지지 않을 수도 있다(Mitchell and Santamarina 2005). 그러므로 미생물이 흙 입자 사이에서 생장하기 위해서는 0.006㎜ ~ 0.01㎜의 흙 입자의 크기가 필요하고, 미생물이 충분히 움직일 수 있는 공극이 확보 되어야 한다.

[0056] 4.2.3 흙의 종류

[0057] 미생물의 생장에 있어서 흙의 선정도 반응이 이루어지는 다른 요인과 마찬가지로 중요한 요인으로 작용한다. 2.2.2절에서 언급한 바와 같이 흙의 종류는 크게 자갈, 모래, 실트, 점토로 구분되어지며, 미생물 생장에 있어서 가장 적합 흙은 흙 입자의 크기를 통해 살펴 본 결과로써, 모래와 실트가 가장 적합한 흙임을 알 수 있다. 이에 본 발명에서는 모래와 실트에 미생물 용액을 첨가하여 미생물 반응을 살펴보았다.

[0058] 4.2.4 수분함량 및 온도

[0059] 미생물의 생장은 수분의 함량과 온도의 영향을 받는다. 아래 그림 2는 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, 도 1에서 볼 수 있듯이 본 발명에서 사용된 미생물 최적의 생장 온도는 30° C이며, 이에 본 발명에서는 온도 조건을 30° C로 하여 미생물을 인큐베이터에서 배양하였다.

[0060] 4.3 미생물과 요소(Urea)의 반응과 탄산칼슘 생성

[0061] 미생물을 이용한 흙의 고결화(Cementation)는 미생물의 생장 반응을 통한 결과라고 할 수 있다. 본 발명에서는 미생물을 배양하기 위해 배양배지를 만들었으며, 배양배지는 영양배지(NB)와 요소 혼합액을 섞어서 사용하였다. 미생물과 요소의 반응은 식1과 같으며, 미생물 생장을 통해 요소와 반응하여, 아래와 같이 탄산이온(CO_3^{2-})과 두 개의 암모늄이온(NH_4^+)으로 가수분해 된다.

[0062] $$CO(NH_2)_2 + 2H_2O \xrightarrow{Urease\ 반응} CO_3^{2-} + 2NH_4^+ \quad (1)$$

[0063] 미생물은 요소를 먹잇감으로 삼아 반응을 통해 생성된 탄산이온(CO_3^{2-})과 염화칼슘($CaCl_2$) 수용액의 칼슘이온(Ca^{2+})이 반응하여 탄산칼슘($CaCO_3$)이 생성되며, 탄산칼슘 침전 반응은 식2와 같다.

[0064] $$CO_3^{2-} + Ca^{2+} \rightarrow CaCO_3 \quad (2)$$

[0065] 결국 미생물 반응을 통해서 생성된 탄산칼슘($CaCO_3$)은 지반 내의 공극을 채워 주고 결합력을 높여주어 지반의 고결화(Cementation)가 형성된다.

[0066] 5. 미생물 고결화 특성 규명을 위한 실내시험

[0067] 미생물을 이용한 흙의 고결화(Cementation)는 아직 전 세계적으로 초기 단계에 머무르고 있으며, 지반공학분야 이외에도 다양한 분야에서 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 강도의 증가가 발생한다.

[0068] 본 발명에서는 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. 다짐시험을 통하여 최대건조단위중량($r_{d(max)}$) 및 최적함수비(OMC)를 결정하였고, 탄산칼슘($CaCO_3$) 생성을 위해서 0.75M의 염화칼슘($CaCl_2$)을 첨가하여, 재령 7일에 따른 고결정도를 확인하였다.

[0069] 5.1 시험 시료 배합비

[0070] 5.1.1 모래 시험 시료 배합비

[0071] 본 발명에 사용된 모래시험시료의 배합비는 다짐시험을 통해 얻어진 최적 함수비 14.92% 기준으로 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액을 첨가했으며, 느슨한 모래의 상태를 재현하기 위하여 상대밀도 40%를 맞추어 시험을 실시하였다.

표 1

[0072] 모래 시험 시료 배합비(단위:g)

시료	재령일	Soil	염화칼슘 용액	미생물 용액	물
모래	무처리 7일	317.32	-	-	50
	일반농도 처리 7일	317.32	25	25	-
	고농도 처리 7일	317.32	25	25	-
	고농도 처리 25% 모래 7일	79.33	25	25	-

[0073] 5.1.2 실트 시험 시료 배합비

[0074] 본 실험에 사용 된 실트 시험 시료 배합비는 다짐시험을 통해 얻어진 최적 함수비 11.6% 기준으로 미생물 용액 및 염화칼슘 수용액을 첨가했으며, 상대다짐도(R_c) 70%를 맞추어 시험을 실시하였다.

표 2

[0075] 실트 시험 시료 배합비(단위:g)

시료	재령일	Soil	염화칼슘 용액	미생물 용액	물
실트	무처리 7일	185.6	-	-	22
	일반농도 처리 7일	185.6	11	11	-
	고농도 처리 7일	185.6	11	11	-
	고농도처리 25% 실트 7일	46.4	11	11	-

[0076] 6. 실험결과 및 고찰

[0077] 6.1 미생물 반응을 통한 흙의 변화

[0078] 미생물 반응 실험 결과를 살펴보면, 도 2는 무처리 7일 모래시료를 121° C로 24시간 건조시킨 후 살펴본 결과를 나타낸 것으로 응집효과가 전혀 나타나지 않았음을 알 수 있으며, 고농도 처리 7일 시료도 무처리 모래시료와 동일하게 121° C로 24시간 건조시킨 후 살펴본 결과를 나타내었으며, 실험 결과 미세하게 응집효과가 나타났음을 확인 할 수 있었다. 이러한 흙의 응집 효과는 가벼운 충격에 허물어지지는 않았으나, 포켓관입시험기를 이용해 강도 측정을 하기에는 그만큼의 지지력이 존재하지 않았으며, 실험 결과 흙 자체가 느슨함을 확인할 수 있었다. 고농도처리 25%모래 시료는 30° C 인큐베이터에서 3일 동안 공기건조 시킨 후 살펴본 결과 포켓관입시험기의 최대치인 5.0kg/cm^2에서도 깨어지지 않았으며, 응집의 두께도 약 1.5cm 정도 되었다. 이러한 결과로 호기성 미생물의 특성상 공기와 접촉되는 부분에서 높은 강도를 나타냄을 알 수 있었다.

[0079] 6.2 전자현미경(SEM) 분석 결과

[0080] 6.2.1 SEM 분석(7일차 시험결과)

[0081] 모래 무처리 7일의 경우 도 3의 5000배 사진을 보면 입자 주위에 어떠한 침전물도 생기지 않았음을 알 수 있다. 그러나 일반농도 처리 7일의 경우 5000배 사진을 보면 입자 주위에 미세한 조각들이 존재함을 확인 할 수 있으며, 이는 무처리 7일 사진에서 발견할 수 없는 조각들이다. 고농도 처리 7일의 경우 5000배의 경우 무처리 및 일반보강 처리에 비해 미세한 알갱이가 입자 주위에 많이 붙어 있음을 볼 수 있으며, 이러한 알갱이는 미생물 반응으로 생성되는 탄산칼슘으로 추정할 수 있다. 고농도처리 25%모래 7일의 5000배 경우 확연하게 모래 알갱이 입자 주변에 정육각형 모양인 탄산칼슘의 존재를 확인 할 수 있었다.

[0082] 실트의 경우 도 4의 무처리 7일과 일반농도 처리 7일, 고농도 처리 7일, 그리고 고농도처리 25% 실트 7일의 결과를 실트 자체가 매우 미세한 광물이기 때문에 표면에 존재하는 물질이 탄산칼슘임을 확인하기 어려웠고, 이는 선행연구를 통해서 살펴본 바와 같이 Dejong 및 Mitchell이 제시한 미생물의 실질적인 이동을 하기 위해서는 0.006㎜ 내지 0.01㎜의 흙 입자의 크기가 필요함에서 알 수 있듯이 미생물의 생장이 어려운 것으로 판단이 되나, 향후 실험 및 추가적인 분석이 필요하다.

[0083] 6.2.2 EDX 분석 결과(7일차 시험결과)

[0084] 실험결과 모래의 경우 도 5a 내지 5e의 무처리 7일의 칼슘(Ca) 함유량은 0.72%, 일반농도 처리 7일은 6.84%, 고농도 처리 7일은 11.82%, 고농도처리 25%모래 7일은 26.72%로 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 있다.

[0085] 실트의 경우 도 6a 내지 6e의 무처리 7일의 칼슘(Ca)함유량은 1.14%, 일반농도 처리 7일은 2.08%, 고농도 처리 7일은 1.96%, 고농도처리 25%실트 7일은 5.43%로 각각 나타났다. 일반농도처리 7일이나 고농도처리 7일은 미생물 작용이 거의 이루어지지 않았다고 볼 수 있으며, 앞에서 언급한 것처럼 추가적인 실험 및 분석이 필요하다. 그러나 고농도처리 25%실트 7일의 경우에는 모래의 일반농도처리 정도의 칼슘이 생성이 되었고, 실트에서도 고결화의 가능성을 확인 할 수 있었다.

[0086] 6.2.3 Mapping 분석 결과(7일차 시험결과)

[0087] Mapping 분석 방법은 전자현미경과 동일한 분석방법으로 광물의 함유량 정도를 3차원 입자상으로 나타내는 것으로 본 발명에서는 모래 시료에 대해서 무처리, 일반농도 처리, 고농도 처리 7일, 고농도처리 25%모래 7일 반응에 대해서 각각 분석하였다. 무처리의 경우 탄산칼슘 계열 원소인 칼슘(Ca) 성분이 거의 나타나지 않았으나, 일반농도 처리 및 고농도 처리에서는 칼슘 성분의 입자상이 고농도로 갈수록 약간 증가하였다. 이러한 실험 결과는 EDX 분석결과에서 나타난 칼슘 함유량과 일치하며, 분석결과 확인된 칼슘 성분의 검출은 탄산칼슘 계열로 추정할 수 있으며, 칼슘의 함유량이 높을수록 생성되는 탄산칼슘의 양은 많아짐을 알 수 있다.

[0088] 6.3 X-회절 분석(XRD) 결과(7일차 실험결과)

[0089] 본 실험에서는 일반농도처리 모래 7일차, 고농도처리 모래 7일차, 고농도처리 25%모래 7일차 그리고 일반농도처리 실트 7일차, 고농도처리 실트 7일차, 고농도처리 25%실트 7일차에 대해 XRD 분석을 실시하였다.

[0090] 일반농도처리 모래 7일차의 경우 도 7a 및 7b에 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.

[0091] 그리고, 고농도처리 모래 7일차의 경우 도 8a 및 8b에 나타낸 것처럼, 칼슘 실리케이트 옥사이드(Calcium Silicate Oxide)가 생성됨을 알 수 있다. 이것 역시 칼슘 계열로서 규산칼슘이라고 하며, 포틀랜드 시멘트의 주요 성분이기도 하다.

[0092] 또한, 고농도처리 25%모래 7일차의 경우 도 9a 및 9b에서 나타낸 것처럼, 탄산칼슘(Calcite, syn)이 존재함을 XRD상에서 명확하게 확인 할 수 있다.

[0093] 그 다음, 일반농도처리 실트 7일차의 경우 도 10a 및 10b에 나타낸 것처럼, 칼슘 알루미늄 실리케이트(Calcium Aluminum Silicate)가 생성됨을 알 수 있다. 이는 규산 칼슘 계열이고, 흙에 존재하는 알루미늄과 추가적인 반응을 보였음을 알 수 있다.

[0094] 그리고, 고농도처리 실트 7일차의 경우 도 11a 및 11b에 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.

[0095] 마지막으로, 고농도처리 25%실트 7일차의 경우 도 12a 및 12b에서 나타낸 것처럼, 상기 일반농도처리 7일 및 고농도처리 7일에서와 마찬가지로 같은 광물이 존재함을 할 수 있었다.

[0096] **7. 결론**

[0097] 본 발명은 느슨한 모래와 실트에 미생물 용액과 염화칼슘 용액을 첨가하여 고결화 가능성을 살피고자 하였다. 무처리 시료 및 일반농도 처리 시료, 고농도 처리 시료에 대해 기초 물성 및 역학적 특성을 파악하였고, 전자현미경(SEM) 분석 및 X-회절 분석(XRD) 시험을 통해 메커니즘 반응을 분석 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

[0098] (1) 미생물 용액과 염화칼슘($CaCl_2$) 수용액의 반응으로 탄산칼슘($CaCO_3$)이 미세하게 생성되었으며, 침전물은 백색의 결정이다.

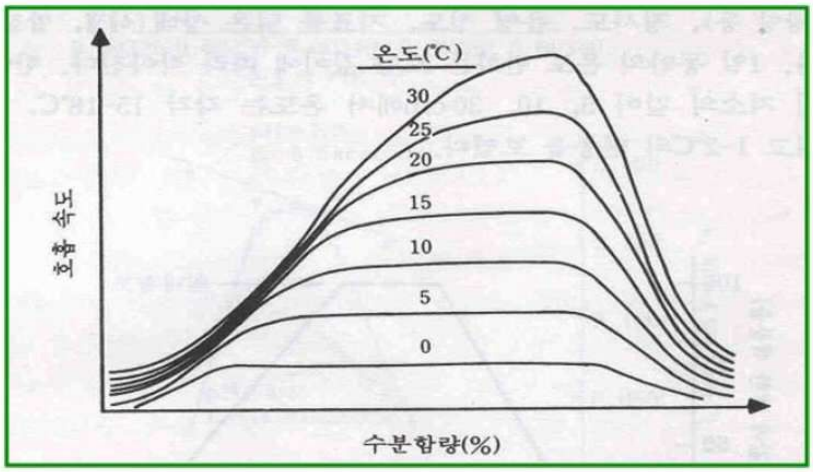
[0099] (2) 미생물의 고결화 정도 확인을 위해 전자현미경(SEM) 분석한 결과 모래의 경우 미생물과 염화칼슘($CaCl_2$)의 반응을 통해 입자와 입자 간에 탄산칼슘으로 추정되는 미세한 입자가 생성되었음을 확인하였으며, 이러한 입자는 EDX와 맵핑(Mapping)에서 나타난 칼슘 광물 함유량 증가와 일치하고, 무처리된 시료보다 고농도 처리에서 높게 나타났다. 실트의 경우 EDX에서 나타난 것 같이 칼슘 광물 함유량은 증가 하였으나 그 양이 미미함을 알 수 있다. 이는 미생물이 실질적인 이동을 하기 위해서는 0.006㎜~0.01㎜ 흙 입자의 크기가 필요한 것에서 알 수 있듯이 공극의 크기가 작아 미생물이 생장함에 어려움이 있어서 칼슘이 거의 생성 되지 않은 것으로 판단된다.

[0100] (3) X-회절분석(XRD) 시험결과 일반농도처리와 고농도처리(7일)에서 모래 및 실트 모두에서 규산칼슘 계열의 생성물이 생성됨을 확인할 수 있었고, 고농도처리 25%모래에서 탄산칼슘($CaCO_3$)의 존재를 입증하였다.

[0101] (4) 요컨대 본 발명에 의하면 미생물 반응을 통한 흙의 고결화 원리를 이용하여 획기적으로 연약 지반의 강도를 증진시킬 수 있을 것으로 기대된다.

도면

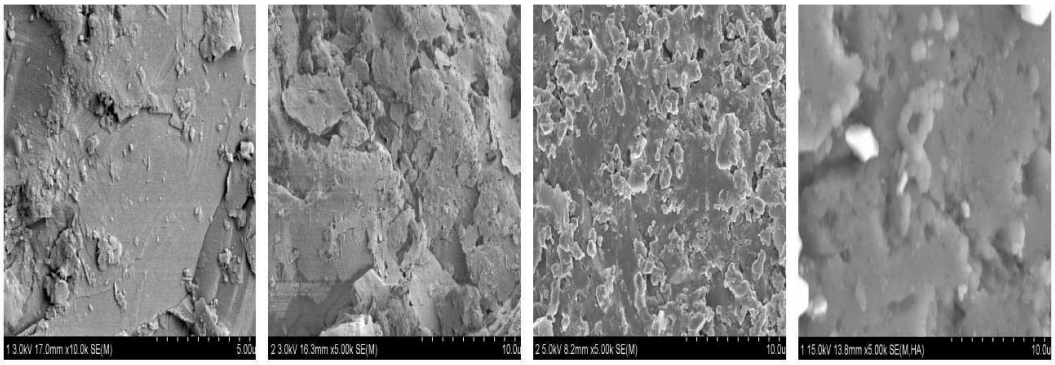
도면1



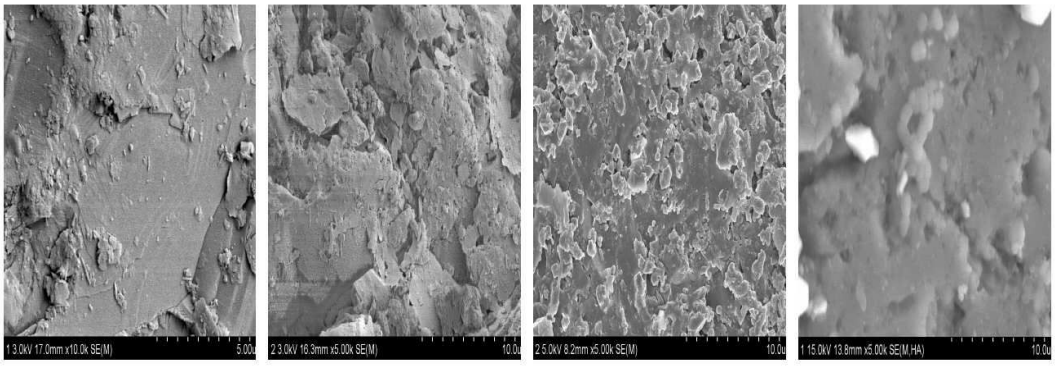
도면2



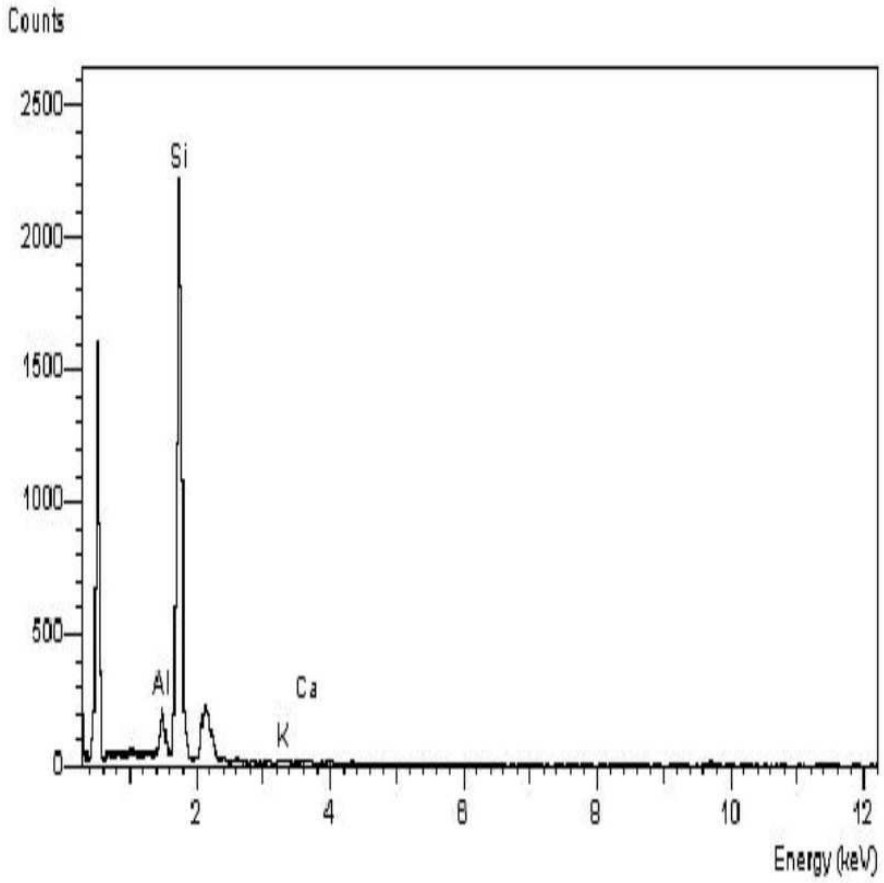
도면3



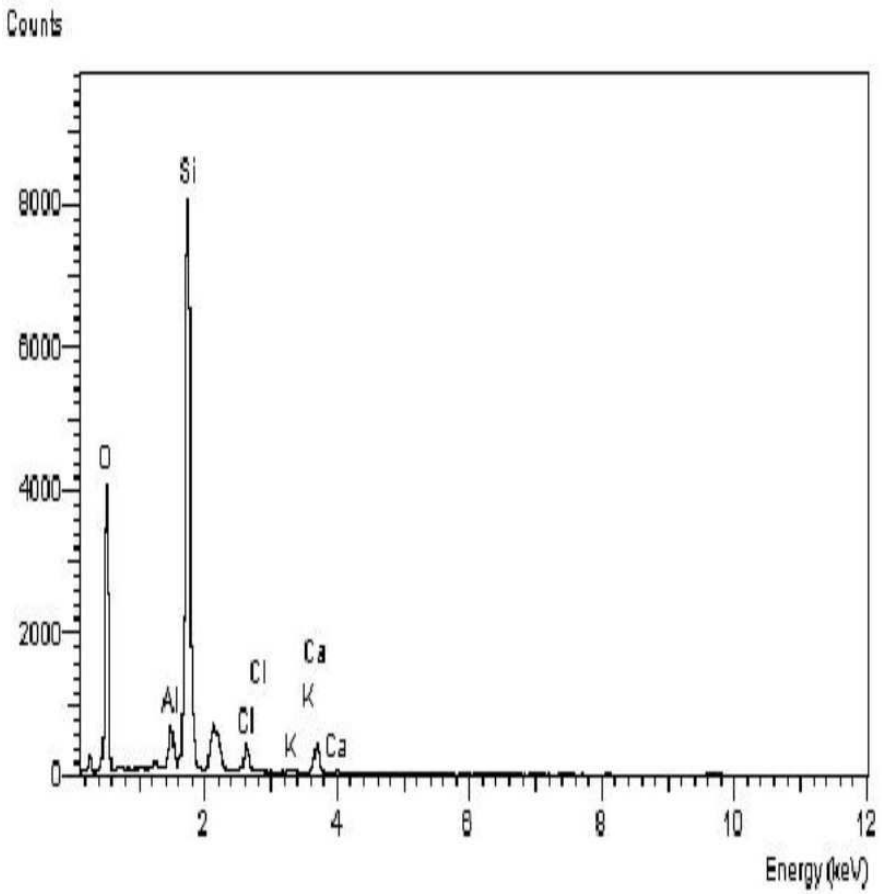
도면4



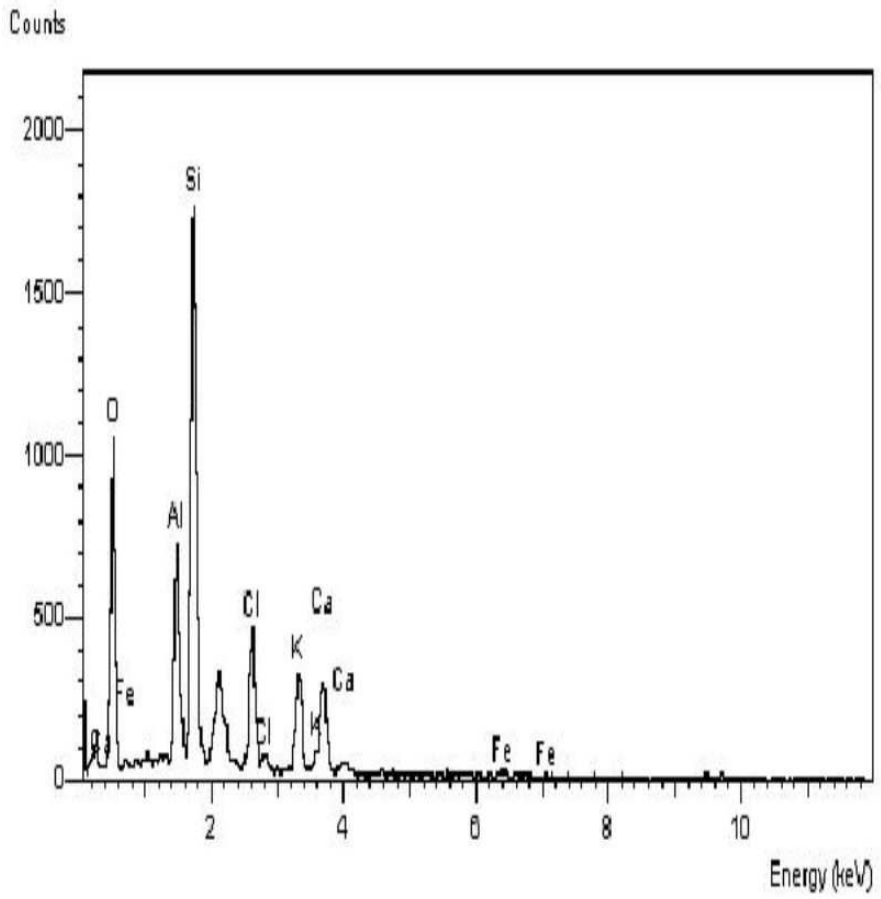
도면5a


Counts
2500
2000
1500
1000
500
0
Si
Al
Ca
K
2
4
6
8
10
12
Energy (keV)

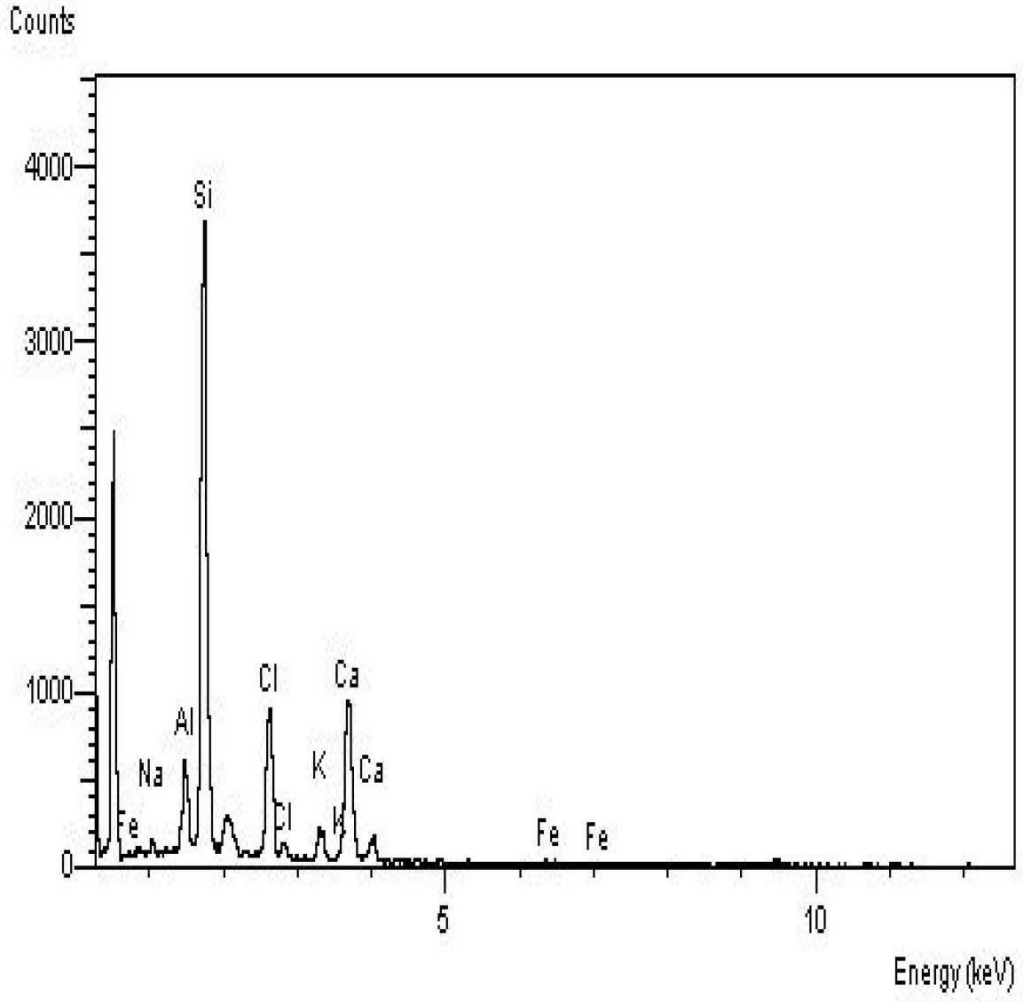
도면5b


Counts
8000
6000
4000
2000
0
O
Si
Al
Cl
Cl
Ca
K
K
Ca
2
4
6
8
10
12
Energy (keV)

도면5c


Counts
2000
1500
1000
500
0
O
Si
Al
Cl
K
Ca
Ca
Fe
Fe
Fe
2
4
6
8
10
Energy (keV)

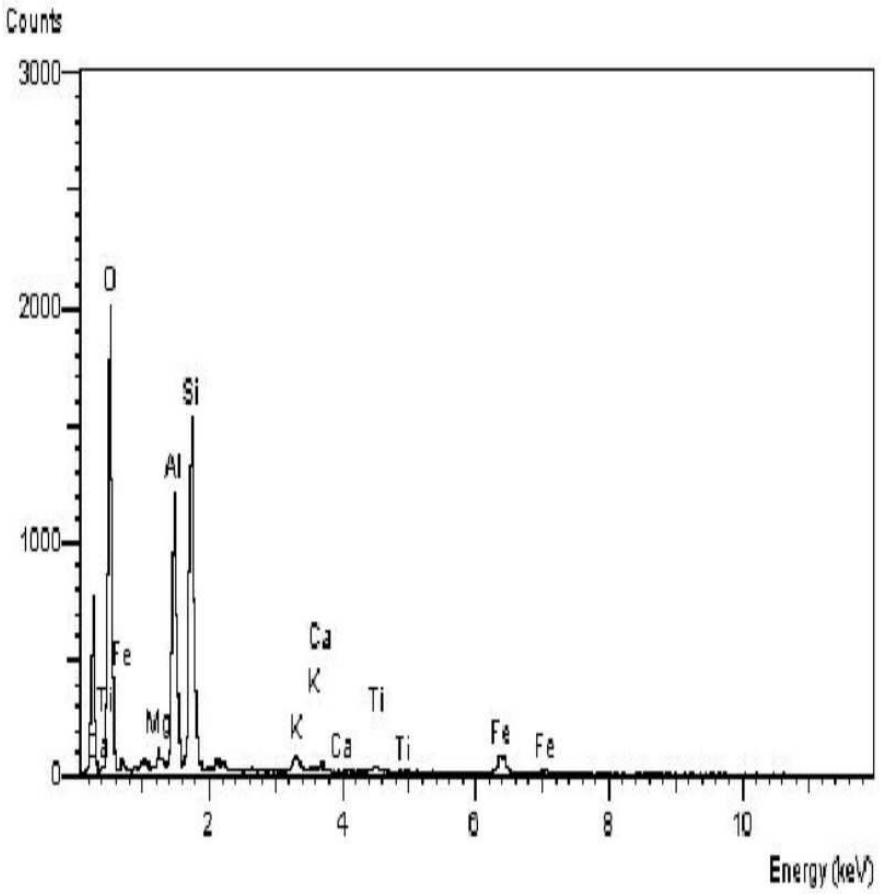
도면5d



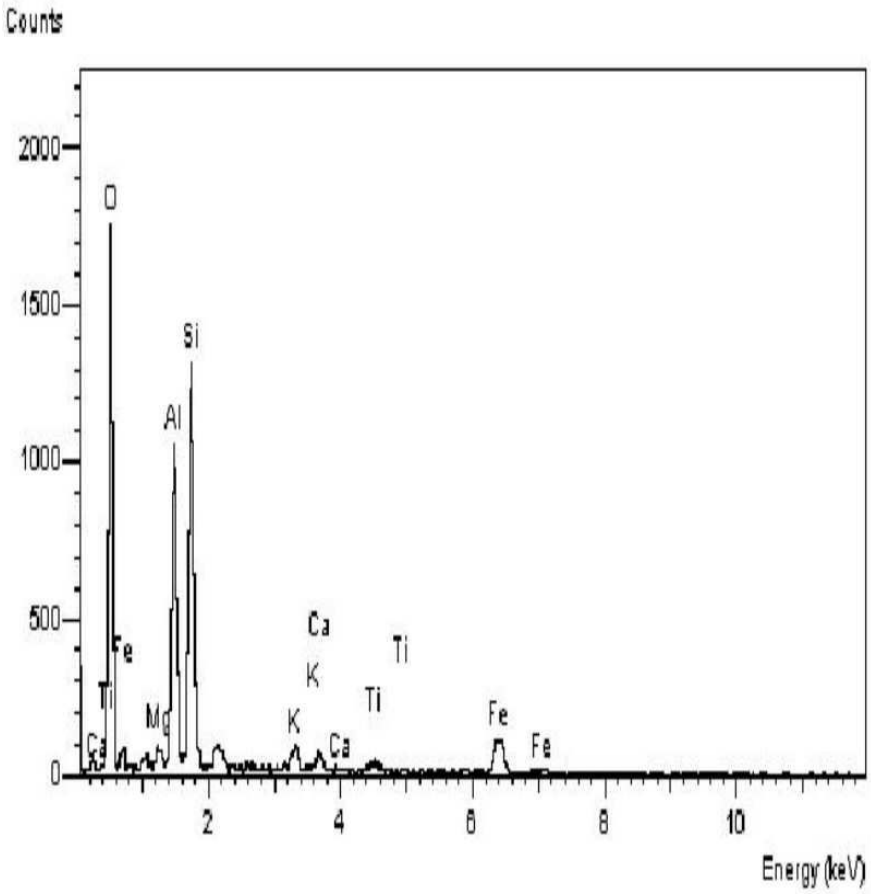
도면5e

광 물	함유량(%)	광 물	함유량(%)	광 물	함유량(%)	광 물	함유량(%)
Si	92.06	Si	81.79	Si	45.74	Si	42.99
Al	6.02	Cl	5.73	Al	14.95	Cl	18.14
K	1.20	Al	4.81	Cl	14.42	Al	5.21
Ca	0.72	Ca	6.84	Ca	11.82	Ca	26.72

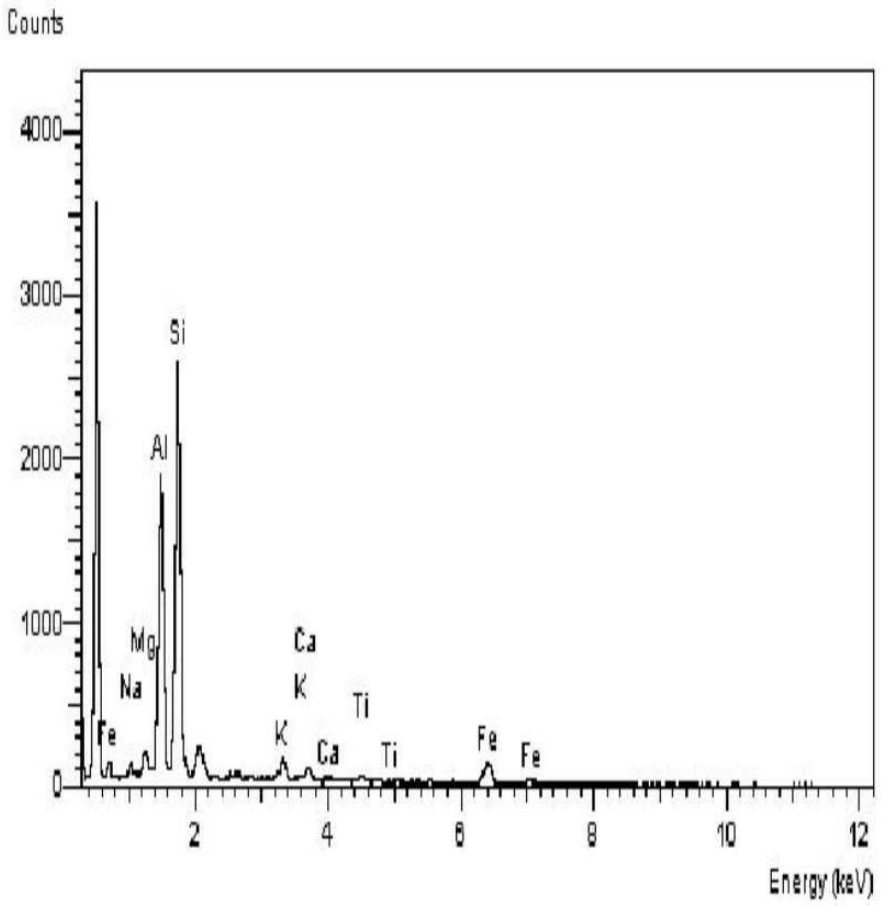
도면6a


Counts
3000
2000
1000
0
O
Si
Al
Fe
Ti
Ca
Mg
K
Ca
K
Ti
Ti
Fe
Fe
2
4
6
8
10
Energy (keV)

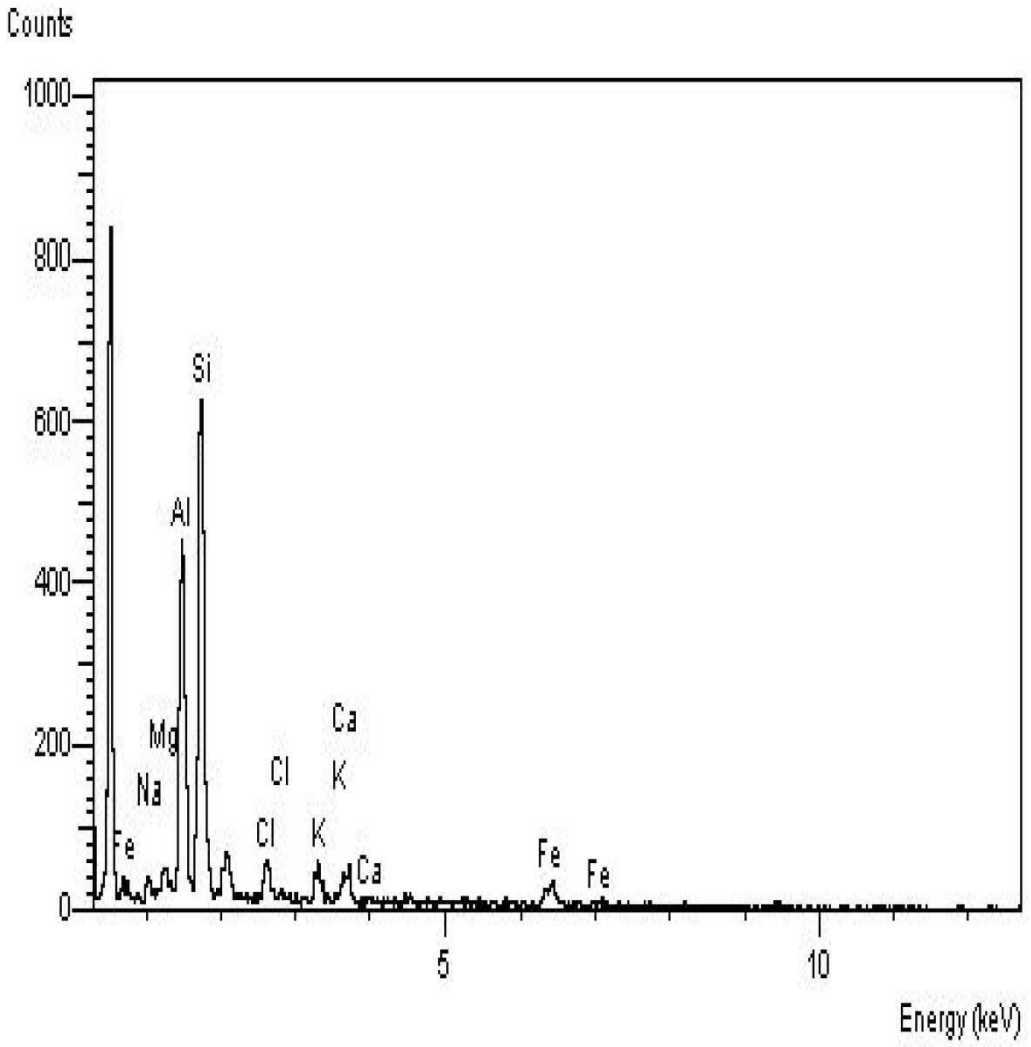
도면6b


Counts
2000
1500
1000
500
0
O
Si
Al
Fe
Ti
Mg
Ca
K
Ca
K
Ti
Ti
Fe
Fe
2
4
6
8
10
Energy (keV)

도면6c


Counts
4000
3000
2000
1000
0
Si
Al
Mg
Na
Fe
Ca
K
Ti
K
Ca
Ti
Fe
Fe
2
4
6
8
10
12
Energy (keV)

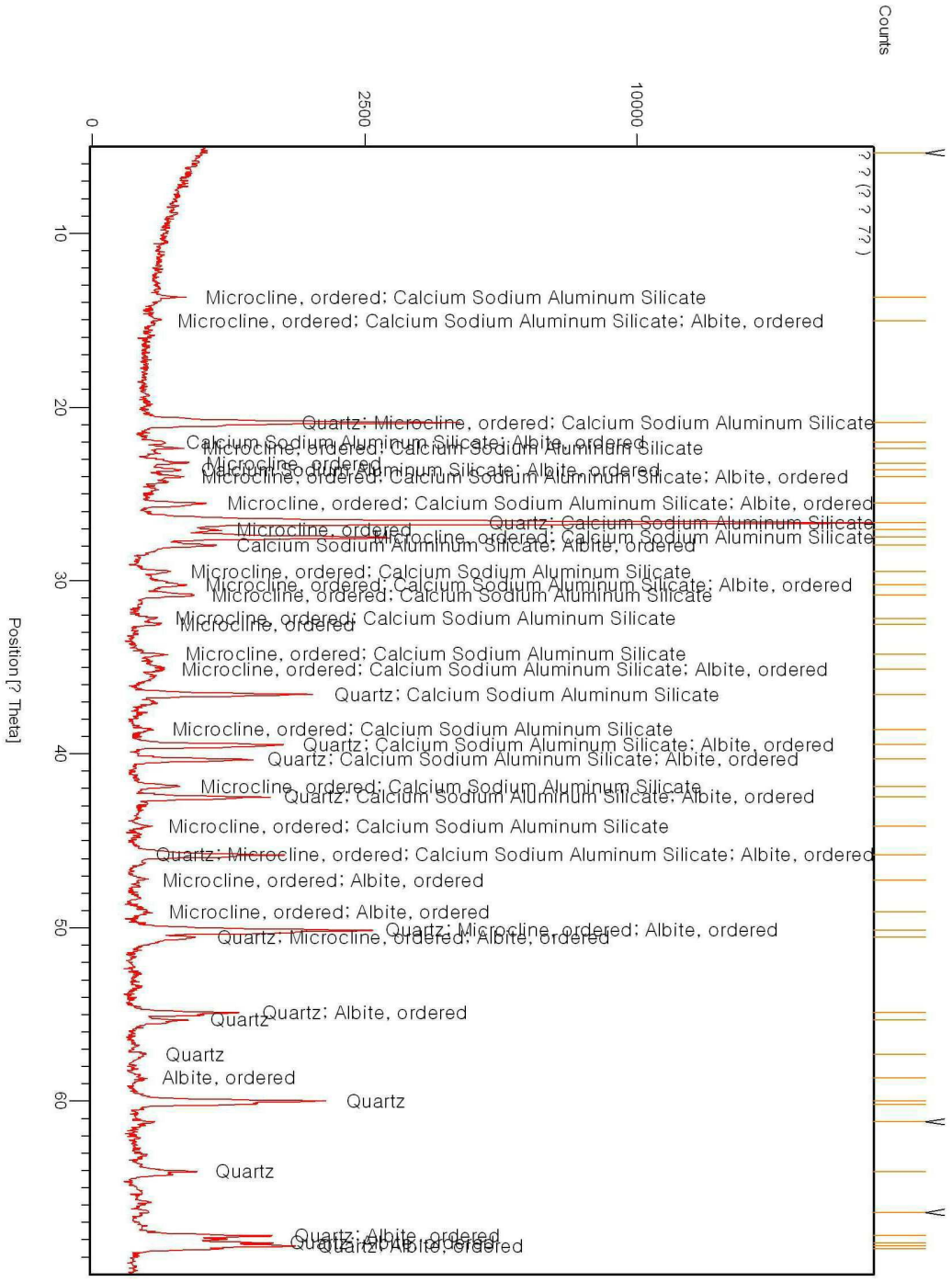
도면6d



도면6e

광 물	함유량(%)	광 물	함유량(%)	광 물	함유량(%)	광 물	함유량(%)
Si	52.57	Si	47.64	Si	50.91	Si	44.15
Al	31.56	Al	30.83	Al	29.92	Al	24.95
Fe	8.51	Fe	13.00	Fe	8.74	Fe	11.66
Ca	1.14	Ca	2.08	Ca	1.96	Ca	5.43

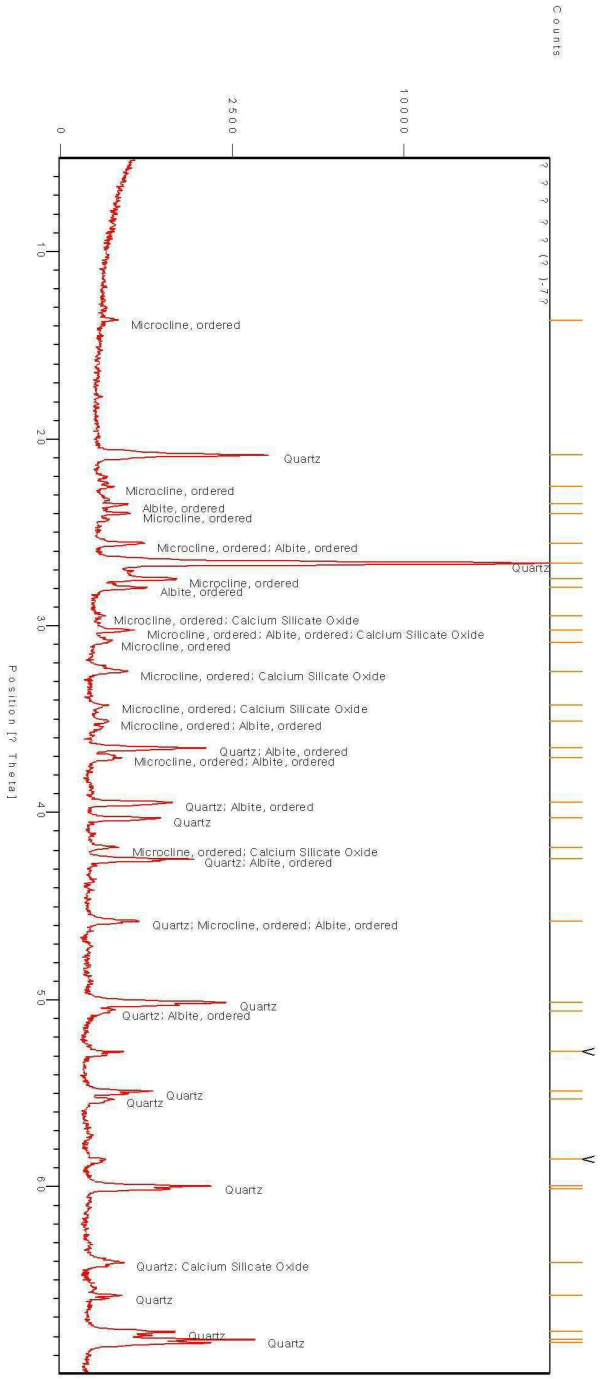
도면7a


Counts
0
2500
10000
Position [? Theta]
10
20
30
40
50
60
Microcline, ordered; Calcium Sodium Aluminum Silicate
Microcline, ordered; Calcium Sodium Aluminum Silicate; Albite, ordered
Quartz; Microcline, ordered; Calcium Sodium Aluminum Silicate
Quartz; Calcium Sodium Aluminum Silicate
Quartz; Calcium Sodium Aluminum Silicate; Albite, ordered
Quartz; Microcline, ordered; Calcium Sodium Aluminum Silicate; Albite, ordered
Microcline, ordered; Albite, ordered
Quartz; Albite, ordered
Quartz
Albite, ordered

도면7b

Score	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula
75	Quartz	1.001	Si O2
47	Microcline, ordered	0.054	K Al Si3 O8
24	**Calcium Sodium Aluminum Silicate**	0.034	Ca0.8 Na0.2 Al1.8 Si2.2 O8
25	Albite, ordered	0.025	Na Al Si3 O8

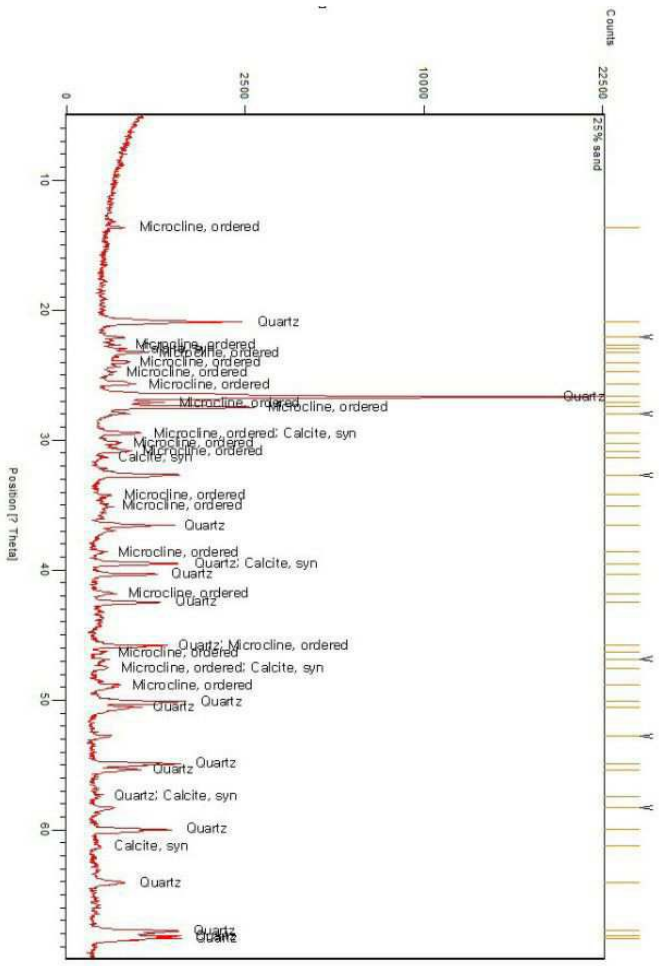
도면8a


Counts
0
2500
10000
Position [? Theta]
10
20
30
40
50
60
Microcline, ordered
Quartz
Microcline, ordered
Albite, ordered
Microcline, ordered
Microcline, ordered; Albite, ordered
Quartz
Microcline, ordered
Albite, ordered
Microcline, ordered; Calcium Silicate Oxide
Microcline, ordered; Albite, ordered; Calcium Silicate Oxide
Microcline, ordered
Microcline, ordered; Calcium Silicate Oxide
Microcline, ordered; Calcium Silicate Oxide
Microcline, ordered; Albite, ordered
Quartz; Albite, ordered
Microcline, ordered; Albite, ordered
Quartz; Albite, ordered
Quartz
Microcline, ordered; Calcium Silicate Oxide
Quartz; Albite, ordered
Quartz; Microcline, ordered; Albite, ordered
Quartz
Quartz; Albite, ordered
Quartz
Quartz
Quartz
Quartz; Calcium Silicate Oxide
Quartz
Quartz
Quartz

도면8b

Score	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula
75	Quartz	0.742	Si O2
42	Microcline, ordered	0.046	K Al Si3 O8
32	Albite, ordered	0.028	Na Al Si3 O8
18	**Calcium Silicate Oxide**	0.005	Ca3 Si O5

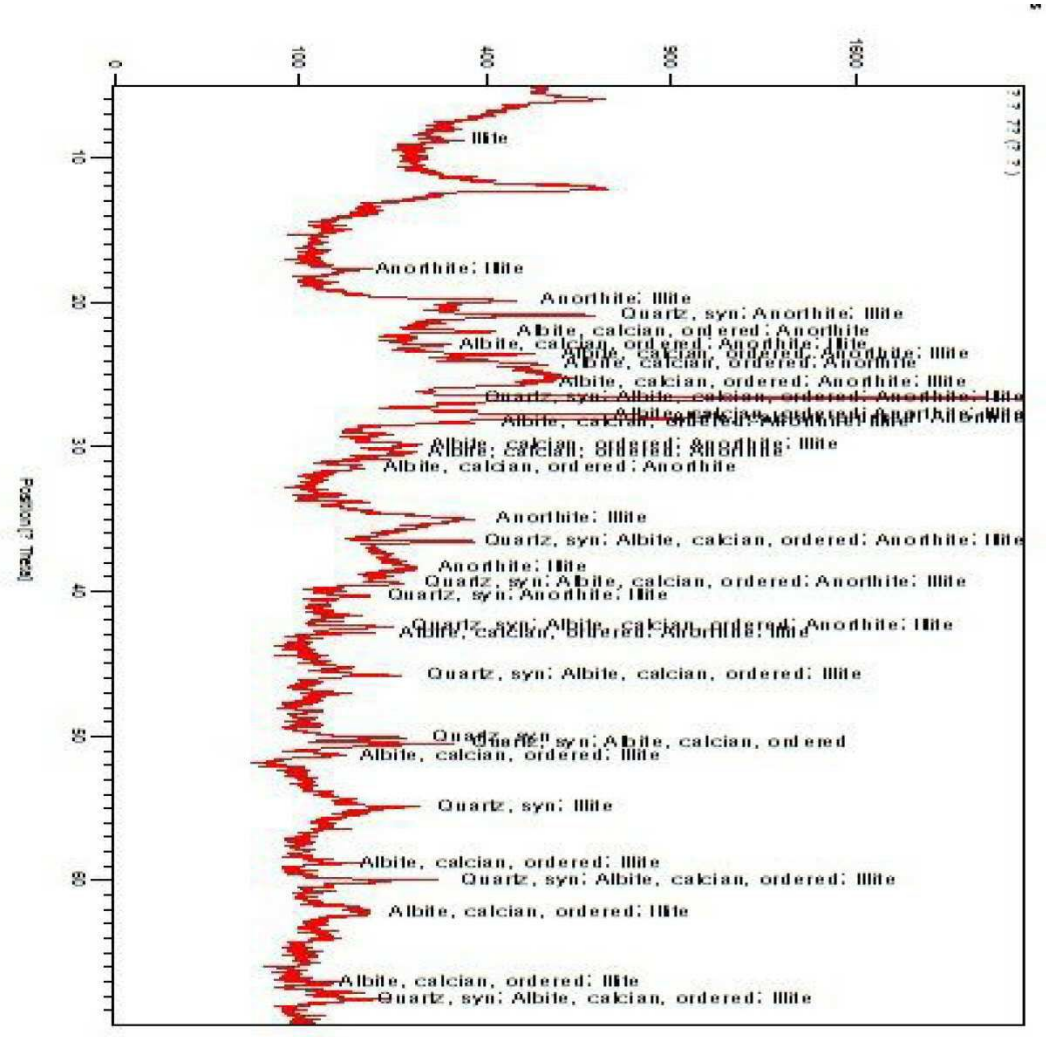
도면9a


Counts
2500
10000
22500
25% sand
Position [? Theta]
Microcline, ordered
Quartz
Microcline, ordered
Microcline, ordered
Microcline, ordered
Microcline, ordered
Quartz
Microcline, ordered
Microcline, ordered
Microcline, ordered
Microcline, ordered

도면9b

Score	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula
67	Quartz	0.804	Si O2
48	Microcline, ordered	0.074	K Al Si3 O8
30	Calcite, syn	0.014	Ca C O3

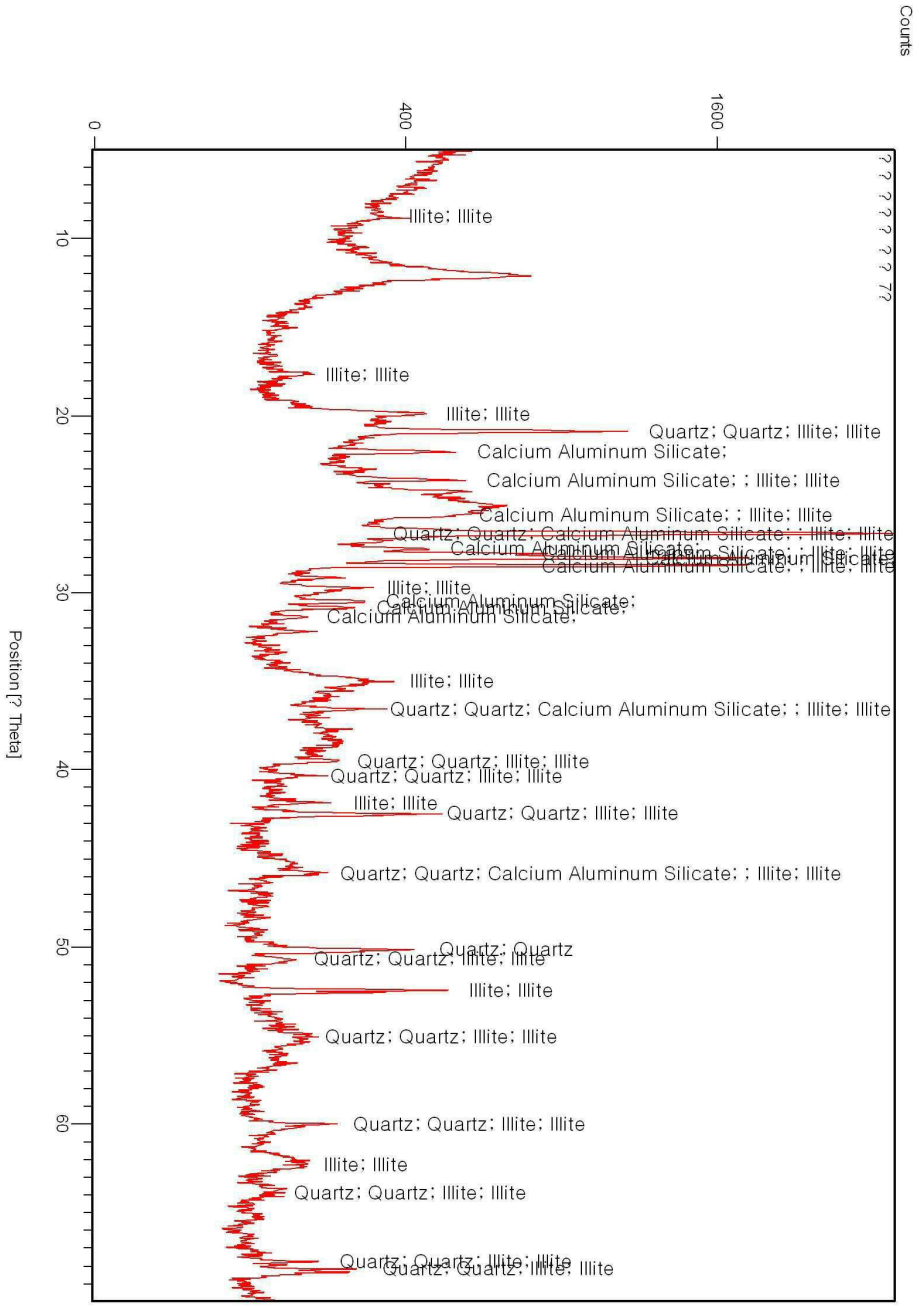
도면10a



도면10b

Score	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula
66	Quartz, syn	0.903	Si O2
48	Albite, calcian, ordered	0.377	(Na, Ca) (Si, Al)4 O8
36	calcium aluminium silicate	0.319	Ca Al2 Si2 O8
34	Illite	0.340	K(Al4 Si2 O9)

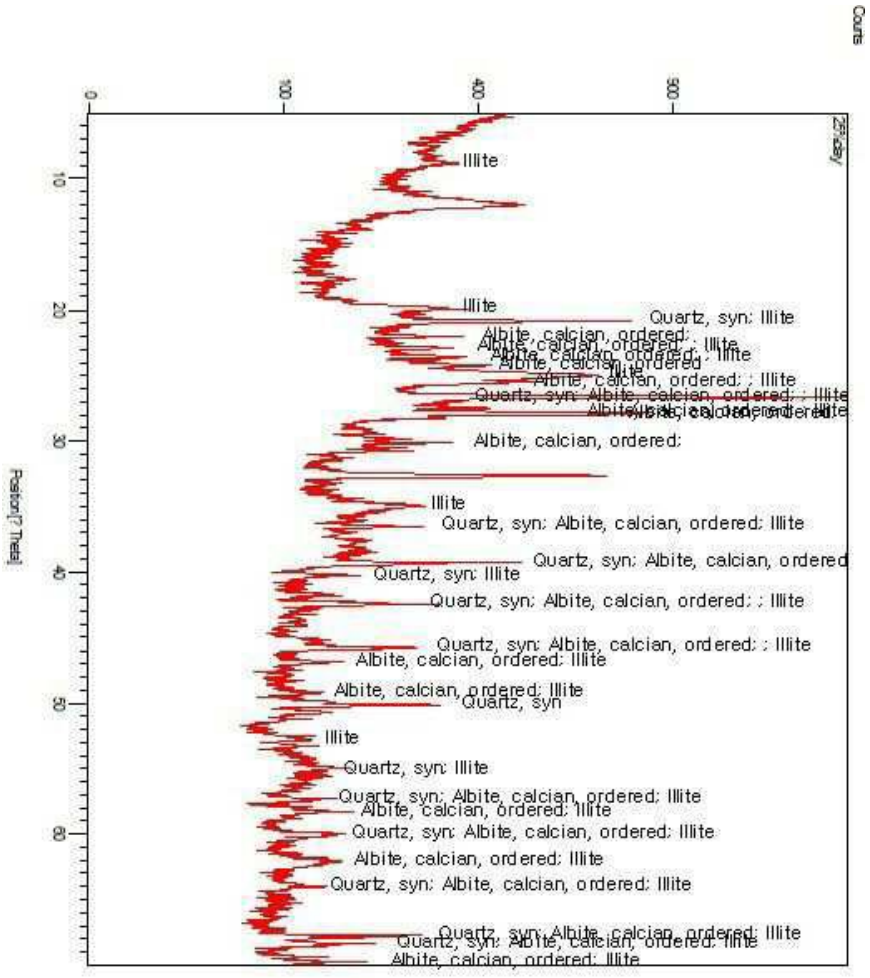
도면11a


Counts
0
400
1600
Position [? Theta]
10
20
30
40
50
60
? ? ? ? ? ? ? ?
Illite; Illite
Illite; Illite
Illite; Illite
Quartz; Quartz; Illite; Illite
Calcium Aluminum Silicate;
Calcium Aluminum Silicate; ; Illite; Illite
Calcium Aluminum Silicate; ; Illite; Illite
Quartz; Quartz; Calcium Aluminum Silicate; ; Illite; Illite
Illite; Illite
Calcium Aluminum Silicate;
Illite; Illite
Quartz; Quartz; Calcium Aluminum Silicate; ; Illite; Illite
Quartz; Quartz; Illite; Illite
Quartz; Quartz; Illite; Illite
Illite; Illite
Quartz; Quartz; Illite; Illite
Quartz; Quartz; Calcium Aluminum Silicate; ; Illite; Illite
Quartz; Quartz
Quartz; Quartz; Illite; Illite
Illite; Illite
Quartz; Quartz; Illite; Illite
Quartz; Quartz; Illite; Illite
Illite; Illite
Quartz; Quartz; Illite; Illite
Quartz; Quartz; Illite; Illite

도면11b

Score	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula
69	Quartz, syn	1.023	Si O2
45	Albite, calcian, ordered	0.398	(Na, Ca) (Si, Al)4 O8
53	Calcium Aluminum Silicate	0.623	Ca0.88 SXS0.12 Al1.77 Si2.23 O8
37	Illite	0.357	K(Al4 Si2 O9)

도면12a



도면12b

Score	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula
64	Quartz, syn	1.038	Si O2
41	Albite, calcian, ordered	0.384	(Na, Ca) (Si, Al)4 O8
54	Calcium Aluminum Silicate	0.437	Ca0.88 SXS0.12 Al1.77 Si2.23 O8
35	Illite	0.383	K(Al4 Si2 O9)