미생물 고결토의 공학적 특성 연구

A Study on the Properties of Microbial Cementation Soil for Engineering Applicability

오종신[1], Jong-Shin Oh, 황성원[2], Soung-Won Hwang, 강희복[3], Hee-Bog Kang, 강권수[4], Keon-Soo Kag, 김종렬[5], Jong-Ryeol Kim

[1] 전남대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chonnam National University
[2] 전남대학교 토목공학과 박사, Doctor, Dept. of Civil Engineering, Chonnam National University
[3] 한영대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyeong University
[4] 서남대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Seonam University
[5] 전남대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Chonnam National University

SYNOPSIS : The purpose of this study was to investigate the feasibility of using sedimentation calcium carbonate production based on microorganism activities in the strength manifestation of various soil conditions including ground. For analysis and comparison of microbial cementation soil's strength, unconfined compression test was executed by each content of soil(S), water(W), microorganism(B), microorganism and deposit (BF), microorganism, admixture and deposit(BCF) at specimen. The result, the strength of SB(soil+microorganism) and SBF(soil+microorganism+deposit) increased about 8%, 15% than SW(soil+water). Also, initial strength increased. But the strength of SBC(soil+microorganism+admixture) and SBCF(soil+microorganism+deposit+ admixt ure) increased about 71%, 115% than SW(soil+water). The results of the SEM analysis, leading to the formation of an adhesive substance layers at the surface and resulting in firm particle configuration. The XRD examination of the sediment resulting from the reaction between the microorganism and the deposit control agent confirmed the presence of a type of calcium carbonate ($CaCo_3$) vaterite, which affects soil strength formation, as well as sodium silicate, silicides and so forth. This indicates that microorganism plays an important role in the production of carbonate ($CaCo_3$), sodium silicate and silicides. It affects to revelation of ground strength.

Key words : microorganism, calcium carbonate ($CaCo_3$), vaterite, sodium silicate, ground strength

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 환경적인 문제로 천연골재채취가 점차 어려워지고, 경제성이나 시공성 차원에서 볼 때 기존의 일반적인 지반개량공법은 점차 한계를 나타내리라 판단된다. 따라서 기존의 공법을 대체할 수 있는 경제적이고 친환경적인 공법의 필요성이 요구된다. 최근에는 미생물의 다양성과 환경에 대한 넓은 적응력을 이용하여 환경 폐기물 제거, 에너지 생산, 의약, 산업 공정, 농업 및 다양한 생명공학산업에서 오랫동안 풀지 못했던 숙제들의 해답을 얻기 위해 많은 관심과 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 미생물을 이용하여 토립자 사이를 접착 일체화(고결)시켜 지반을 개량시키고자 한다. 미생물이 탄산칼슘($CaCo_3$)의 합성에 중요한 역할을 수행하여 반응생성물인 이산화규소(SiO_2)가 생성되어 토립자 사이가 견고하게 연결되고 3차원적 결합층을 형성하여 지반강도가 증진되는 것을 이론적으로 고찰하고 반응실험을 실시하였다.

1.2 연구 동향

Chadda(1970)는 흙에 고화재를 첨가하면 수화반응에 의해서 발생한 가변성을 띤 Ca^{2+}이온이 증가하게 되어 K^{+}, Na^{+}이온으로 완전히 대치하게 된다고 하였고, 양전하를 띤 Ca^{2+}이온이 음전하를 띤 토립자의 표면으로 흡착되어지는 현상을 보인다고 하였다.[1)]

진병익, 유재일(1985)은 차수효과 및 일축압축강도는 약액농도가 높을수록, 시료토의 평균입경이 작을수록 그리고 시료토의 밀도가 물유리계용액형의 경우는 클수록, 혼탁액형의 경우는 작을수록 증대됨을 알 수 있었다고 한다.[2)] 김도수, 백은상, 노재성(1999)은 탄산칼슘을 규불화수소산으로 처리시 반응생성물로 0.1~1㎛의 입도를 지닌 다량의 이산화규소(SiO_2)가 생성되는데 이들 이산화규소(SiO_2)는 비정질(amorphous)로 반응성이 매우 우수하며 이들 역시 공극에 대한 우수한 충전효과를 지닐 수 있다고 하였다.[3)] 윤봉구, 신대용, 한상목(2003)은 $CaCl_2 \cdot 2H_2O(NH_4)2CO_3$계에 NH_4OH를 첨가하여 수용액 반응에 의해 탄산칼슘($CaCo_3$)을 합성되었다고 발표한 바 있다.[4)] 김주범(1985)은 탄산칼슘은 이산화탄소(CO_2)양의 감소, pH의 변화, 수분의 증발 등에 의하여 석회연이(軟泥)로 생성되어 점차 결정화되어 방해석이 되고, 탄산염의 침전은 해수와 담수(하천수, 지하수 등)가 잘 섞이는 곳에서 활발하게 진행된다고 하였다.[5)] Tyler(1978)은 우레아제는 요소를 두 개의 암모니아 분자로 가수분해함으로써 시작하고 이들은 글루타민 합성글루타민 신타아제(GS-GOGAT)의 경로를 거쳐 생물량으로서 직접적으로 흡수되거나 글루타민산염 탈수소효소(GDH)의 작용에 의해 흡수된다고 하였다.[6)] Mörsdorf, Kaltwasser (1989)은 같은 유기체 내의 우레아제의 부산물들은 암모니아의 발생으로 억압되고, Proteus vulgaris 처럼 고농축 암모니아가 발생되어 우레아제를 형성할 수 있다고 했다.[7)] Jahns(1996)은 Sporosarcina pasteurii에서 나온 양이온은 ATP (adenosine triphosphate) 합성물질이 암모니아가 되도록 세포막 포텐셜을 형성하는게 보통이며, 암모니아와 같이 직접적으로 혹은 요소와 같이 간접적으로 제공하기도 한다고 발표한 바 있다.[8)] Whiffin(2004)은 생물학적 고결 작용은 암모니아의 고농집을 발생시키는 결과를 야기하며, 이러한 박테리아 물질은 단지 암모니아의 발생을 조정하여 우레아제가 저하되지 않는 경우에 유용하다. 이러한 유기체로는 Sporosarcina pasteurii와 Proteus vulgaris가 있다고 하였다.[9)]

1.3 연구 방법

미생물 배양과 침강제를 제조한 다음 미생물 고결토의 공학적 특성을 알아보기 위해 두 가지 측면에서 연구하였고, 실내시험을 통해 기초 물성 시험 및 강도 특성을 파악하고 반응 메카니즘 분석을 실시하였다. 미생물 고결토의 강도 특성에 대해 다음과 같이 여섯 단계로 분석하였다. 첫 번째로 물(SW) 함유량에 따른 강도 특성에 대해 알아보았으며, 두 번째로 미생물(SB) 함유량에 따른 강도 특성을 알아보았다. 세 번째로 미생물과 침강제 (SBF)함유량에 따른 강도 특성에 대하여 평가하였다. 네 번째로 혼화제가 첨가된 공시체의 미생물(SBC) 함유량에 따른 강도 특성을 평가하였다. 다섯 번째로 혼화제가 첨가된 공시체의 미생물 및 침강제(SBCF) 함유량에 따른 강도 특성으로 구분하여 실험을 실시하였다. 반응 메카니즘 분석은 재료의 성질 분석을 위하여 전자 현미경 분석(SEM)을 통하여 각 조건에 따른 결정형상, 입자 크기의 변화 과정을 살펴보았고, X-선회절 분석(XRD)시험을 수행하여 각 조건에 따른 화학분자식 및 명칭을 파악하고 반응 생성물을 알아 보았다.

2. 이론적 고찰

2.1 미생물 고결토의 특성

미생물을 이용하여 토립자 사이를 접착 일체화(고결)시켜 지반을 개량하고자 한다. 지반강도 증진을 위한 미생물 고결작용은 실제 토양입자 사이에서 미생물의 반응을 촉진시킬 수 있는 환경을 조성하는데 달려있다. 이는 탄산칼슘결정을 생성시키는 미생물을 주입 또는 혼합하여 토양입자의 고결작용을 통해 지반을 강화시키는 것이다. 미생물은 탄산칼슘($CaCo_3$)의 생성에 중요한 역할을 하며 공극을 채우고 또 다른 반응생성물을 중합하여 강도와 강성을 개선한다. 이 생성물들은 토양입자 사이에 결합층을 형성한다. 또한

전통적인 그라우팅에 비해서 순차적인 방법으로 강도증가가 발현된 경우보다 더 최종강도를 제어할 수도 있다. 이런 특성으로 인해 투수성 물질(약액)과 함께 적용이 가능하며 단일침투방법 보다 넓은 영향반경을 제공할 수 있다. 미생물 성장 배지로 사용되는 요소액은 침투성이 좋은 편이며 약액중 강도효과가 가장 우수하고 다른 약액에 비해 비교적 경제적이다.

2.2 미생물 고결토의 화학적 기본 원리

지반 안에 주입된 미생물의 영양분($CO(NH_2)_2$)은 미생물의 우레아제 활동으로 탄산염(CO_3^{2-})과 암모늄($2NH_4+$)이온으로 가수분해 된다. 이 과정이 연속적으로 발생하면 탄산염(CO_3^{2-})과 칼슘이온(Ca^{2+})의 화학적 반응으로 침강성 탄산칼슘($CaCO_3$) 생성된다. 그리고 이 침강성 탄산칼슘($CaCO_3$)이 지반의 간극을 충진하고 이 과정이 반복되면 지반의 차수효과 및 강도가 증진된다.
이 과정을 도표로 나타내면 다음과 같다.
이들의 생물화학적 작용인 우레아제 활동으로 요소(urea)를 하나의 탄산염(CO_3^{2-})과 두 개의 암모니아(NH_4^+)로 가수분해되는 식은 (1)이며. 이를 통해 칼슘이온(Ca^{2+})과 탄산염(CO_3^{2-})의 화학적 작용으로 탄산칼슘이 생성, 침강된다는 식은 (2)이다.

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

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \longrightarrow CaCO_3\downarrow \quad (2)$$

3. 공학적 특성 평가를 위한 실내시험

3.1 시험 시료

3.1.1 흙

본 연구에 사용된 시험 시료는 국내에 일반적으로 분포하고 광주 지역을 중심으로 널리 분포 되어 있는 화강 풍화토 계열의 흙을 선정했으며 광주 진월지구 택지조성공사 현장사면에서 채취하여 No. 10체를 통과한 시료를 이용하여 다짐 및 강도특성과 같은 시험의 공시체 제작에 이용하였다. 시료의 물리적 성질을 파악하기 위해 한국 공업규격에 정해진 절차에 준하여 시료의 비중(KS F 2308), 체가름(KS F 2309), 입도(KS F 2302), 다짐시험을 수행하였다.

3.1.2 미생물 용액 배양 방법

Sporosarcina pasteurii의 박테리아 용액(Bacteria solution)을 배양하는 방법은 그림 3.1와 같다. Yeast Extract의 양은 증류수 1리터당 20g과 요소($CO(NH_2)_2$)의 농도는 1.5M로 하여 증류수와 잘 섞이도록 저어 완전히 녹였으며 이렇게 만든 액체배지에 박테리아를 접종하였다. 토양에 미생물을 접종한 후의 모든 실험은 실험실 실내온도 27℃～29℃로에서 수행하였다.

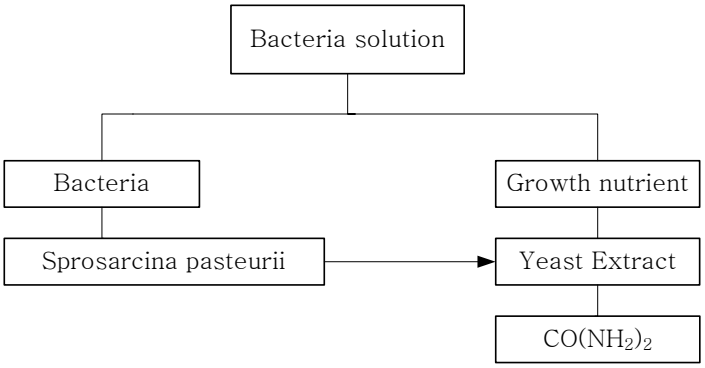


그림 3.1 미생물 용액의 배양 방법

3.1.3 침강제 조성 방법

침강제를 조성하는 방법은 그림 3.2와 같으며 농도는 각 0.75M로 하였다.

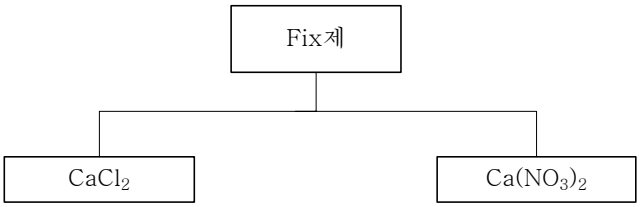


그림 3.2 침강제 조성 방법

3.1.4 혼화제

소석회는 칼슘의 수산화물로 화학식 $Ca(OH)_2$의 백색 분말 형태의 염기성 화합물인데, 석회석, 석회질 흙에서 강도를 예상하기 위해 사용하였으며 양은 3% (11.31g)로 하였다.

3.2 공시체 성형 방법

본 연구에 사용된 공시체는 높이 105㎜, 지름 52㎜(체적 212.37㎤)의 PVC 몰드를 제작하여 사용하였고 공시체 전체의 변형률을 파악하기 위하여 상·하판 및 PVC 몰드 내부에 실리콘 그리스를 얇게 바른 후 세팅하여 각각의 Type별로 γ_t를 일정하게 유지하며 Jack를 이용하여 일정한 압력을 가하여 정적으로 일체 다짐을 실시하였다(BS1377: Part 4:1990:5.4). 그리고 그림 3.3는 공시체를 성형하기 위한 PVC와 하판의 그림이며, 몰드에 일정한 압력을 가하기 위해 Pressure-Jack과 공시체를 성형하기 위하여 그림 3.4의 장치를 사용하였다.

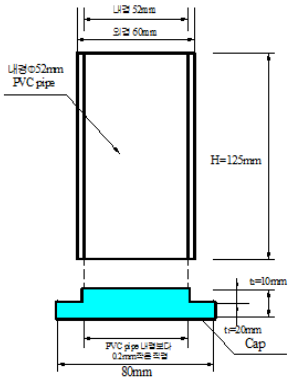


그림 3.3 사용된 PVC Mold

그림 3.4 공시체 성형장비

3.3 공시체 성형 배합비

일축압축강도시험 및 시험에 사용된 공시체는 SW, SB, SBF, SBC, SBCF 배합 5종류이며, 각각 함수비를 15%, 20%, 25%로 구분하여 3일, 7일, 14일, 28일 양생기간으로 각 3개씩 180개의 공시체를 제작하였다.

표 3.1 공시체 성형에 쓰인 배합비

배합분류 명 칭	단위(g)					혼화제함량 (%)	함유량 (%)
	Soil	혼화제 ($Ca(OH)_2$)	Bacteria solution	Water	침강제(Fix)		
SW-15	377	-	-	56.55	-	-	15
SB-15	377	-	56.55	-	-	-	15
SBF-15	377	-	28.28	-	28.28	-	15
SBC-15	377	11.31	58.25	-		3	15
SBCF-15	377	11.31	29.12	-	29.12	3	15
SW-20	377	-	-	75.4	-	-	20
SB-20	377	-	75.4	-	-	-	20
SBF-20	377	-	37.7	-	37.7	-	20
SBC-20	377	11.31	77.66	-	-	3	20
SBCF-20	377	11.31	38.83	-	38.83	3	20
SW-25	377	-	-	94.25	-	-	25
SB-25	377	-	94.25	-	-	-	25
SBF-25	377	-	47.13	-	47.13	-	25
SBC-25	377	11.31	97.08	-	-	3	25
SBCF-25	377	11.31	48.54	-	48.54	3	25

※ SW(흙, 물), SB(흙, 미생물), SBF(흙, 미생물, 침강제),
SBC(흙, 미생물, 혼화제), SBCF(흙, 미생물, 혼화제, 침강제)

4. 실험결과 및 고찰

4.1 미생물과 침강제(BF) 반응 결과

미생물 용액(Bacteria solution)과 침강제(Fix)를 비이커에 1:1 비율로 혼합해 본 결과 백색 물질이 침전되는 것을 볼 수 있었다. 이 침전물을 전자현미경분석(SEM)과 X-절분석(XRD)을 수행하였다. 그 결과 침전물의 형태는 불규칙한 크기의 미세한 구형의 형상를 보였고, 성분으로는 철, 탄산칼슘, 규산염, 규화물 등의 물질들이 생성된 것을 알 수 있었다. 또한 생성된 바테라이트(vaterite)는 분산성이 좋고, 반응성이 높은 것으로 알려진 탄산칼슘($CaCO_3$)중에 하나이다. 미생물 용액과 침강제 혼합과정을 그림 4.1은 미생물 용액과 침강제 혼합과정을 나타내고 있다.

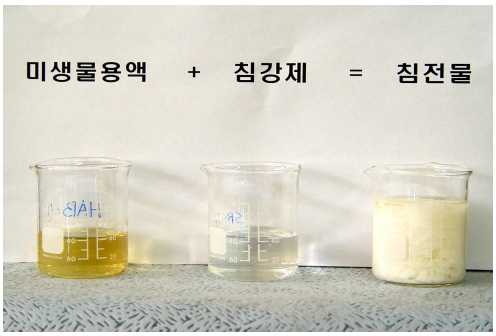


그림 4.1 미생물 용액과 침강제(BF) 혼합 후 생성 과정

그림 4.2, 4.3는 SEM분석 결과로 생성된 탄산칼슘의 형상을 나타내고 있다.

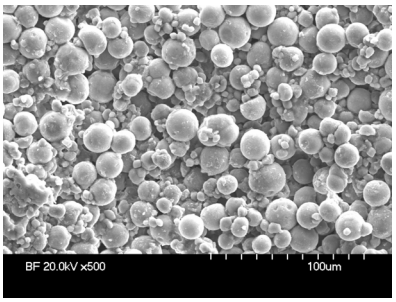


그림 4.2 (20.0kV ×500배율)

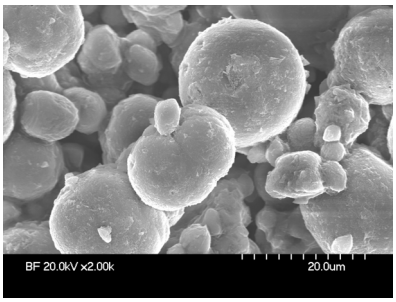


그림 4.3 (20.0kV ×2.50k배율)

표 4.1 BF에 대한 X-회절분석(XRD)의 반응 생성물 리스트

Card No	화학식	화학명칭
21-0920	Fe_2O_3	Iron Oxide
33-0268	$CaCO_3$	Vaterite
36-0018	$SrSiO_3$	Strontium Silicate
36-1148	$IrSi_3$	Iridium Silicide
40-1041	$Cs_2K2Cd_3O_5$	Cesium Potassium Cadmium Oxide
46-1185	LiHS	Lithuim Hydrogen SulFide
36-1442	$CuO.3MnO.7Cr_2S_4$	Copper Manganese Chromium Sulfide
38-0166	$Ba(PO_3)_2$	Barium Phosphate
46-0111	$K2SO_4.7KHSO_4.H_20$	Potassium Hydrogen Sulfate Hydrate

4.2 시료의 기초시험 특성

그 결과 그림 4.1의 건조밀도와 함수비 곡선과 그림4.2의 체분석을 통해 입도분포곡선을 얻을 수 있었다. 최적함수비는 17.55 %이었으며 γ_{dmax}는 1.59t/m^3, 비중은 2.69로 나타났다. 기본적인 물리적 특성치에 대한 종합적 결과는 표4.2와 같다.

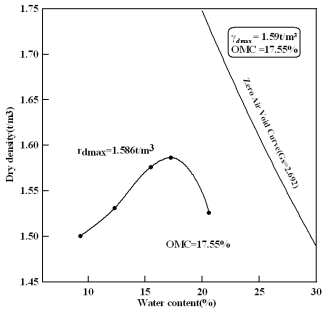


그림 4.1 시료의 건조밀도와 함수비 곡선

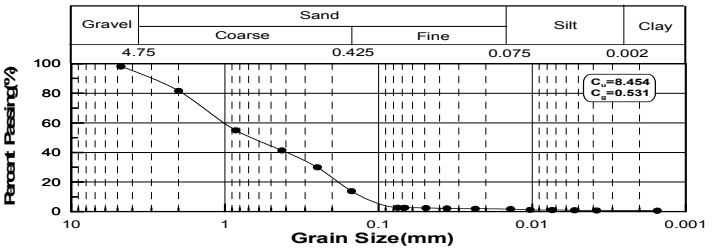


그림 4.2 시료의 입도분포곡선

표 4.2 시험 시료의 물리적 특성

구분	Gs	Wn(%)	LL	PI	#200(%)	Glavel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	USCS
화강토	2.69	18.21	N.P	N.P	2.66	1.88	95.46	1.72	0.94	SP

4.3 일축압축 실험 결과

미생물 용액과 침강제의 농도 비율을 1:1을 유지하고 함유량은 15%, 20%, 25%로 공시체를 제작하였으며, 각각의 공시체를 3일, 7일, 14일, 28일의 경과에 따라 공시체의 강도를 측정하였다.

첫째, 함유량 15%의 공시체의 경우 SW, SB, SBF의 강도는 양생 3일, 7일, 14일에서는 SB, SBF가 SW보다 초기강도발현을 나타냈으며 양생 28일에서는 비슷한 강도를 나타내었다. 양생 7일과 14일에서도 비슷한 비율로 강도 증진을 나타냈으나 양생28일에서는 강도 발현의 차가 좁혀지는 결과를 나타냈다. SBC, SBCF의 3일 강도는 SW, SB, SBF의 28일 강도와 상응한 강도발현을 하는 것으로 나타났으며 양생기간별 강도발현의 차가 큰 값들을 보였다.

둘째, 함유량 20%의 공시체의 경우에는 SW, SB, SBF의 강도는 양생 3일, 7일, 14일에서는 SB, SBF가 SW보다 초기강도발현을 나타냈으며 양생 28일에서는 비슷한 강도를 나타내었다. SBC, SBCF은 양생기간별 강도발현의 차가 일정하게 큰 값들을 보였다.

셋째, 함유량 25%의 공시체의 경우에는 SW, SB, SBF의 강도는 양생 3일에서는 SBF가 SW, SB보다 초기강도발현을 나타냈으며 양생 28일에서는 비슷한 강도를 나타내고 있다. 양생 7일과 14일에서는 비슷한 비율로 강도 증진을 나타냈으나 양생28일에서는 강도 발현의 차가 좁혀지는 결과를 나타냈다. 반면에 양생 14일 강도와 28일강도의 차가 급격하게 강도발현됨을 보였다. SBC, SBCF의 양생기간별 강도발현의 차가 완만한 증가들을 보였다. 또한 25% 함유량일 때 SBF가 SB보다 강도가 더 발현되었다.

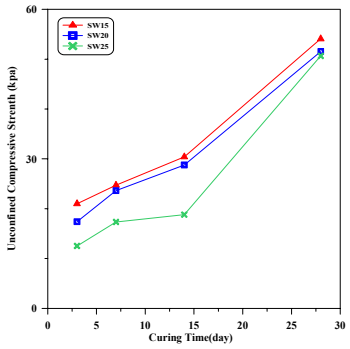


그림 4.3 SW

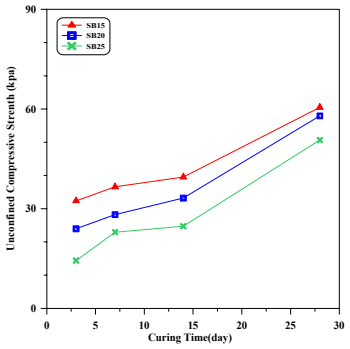


그림 4.4 SB

표 4.3 SW함유량과 양생조건에 따른 일축압축강도 결과

배합분류 (Type)	일축압축강도(kPa)				함유량 (%)
	양생 3일	양생 7일	양생 14일	양생 28일	
SW-15	21.00	24.70	30.39	54.09	15
SW-20	17.39	23.62	28.77	51.54	20
SW-25	12.52	17.34	18.81	50.66	25

표 4.4 SB함유량과 양생조건에 따른 일축압축강도 결과

배합분류 (Type)	일축압축강도(kPa)				함유량 (%)
	양생 3일	양생 7일	양생 14일	양생 28일	
SB-15	32.38	36.58	39.56	60.50	15
SB-20	23.94	28.20	33.19	57.95	20
SB-25	14.39	22.90	24.73	50.66	25

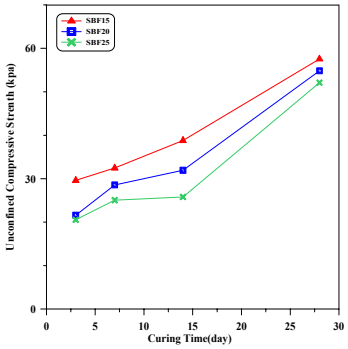


그림 4.5 SBF

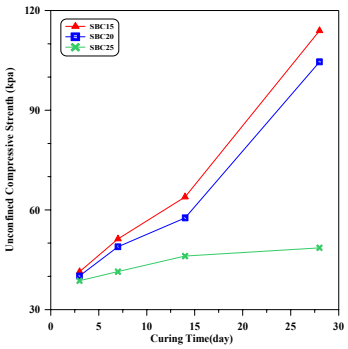


그림 4.6 SBC

표 4.5 SBF함유량과 양생조건에 따른 일축압축강도 결과

배합분류 (Type)	일축압축강도(kPa)				함유량 (%)
	양생 3일	양생 7일	양생 14일	양생 28일	
SBF-15	29.61	32.43	38.80	57.54	15
SBF-20	21.60	28.56	31.94	54.84	20
SBF-25	20.54	25.05	25.79	52.11	25

표 4.6 SBC함유량과 양생조건에 따른 일축압축강도 결과

배합분류 (Type)	일축압축강도(kPa)				함유량 (%)
	양생 3일	양생 7일	양생 14일	양생 28일	
SBC-15	41.39	51.28	63.89	113.95	15
SBC-20	40.14	48.92	57.59	104.57	20
SBC-25	38.67	41.41	46.09	48.59	25

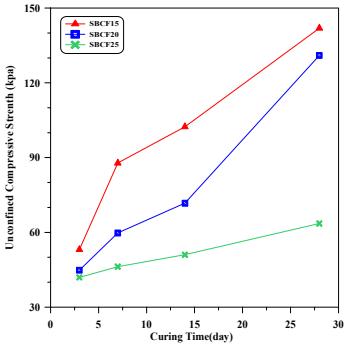


그림 4.7 SBCF

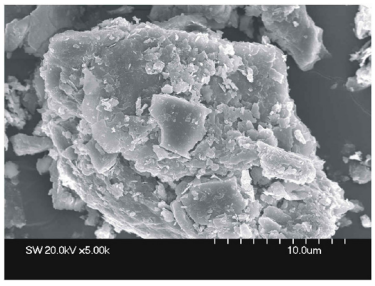
표 4.7 SBCF함유량과 양생조건에 따른 일축압축강도 결과

배합분류 (Type)	일축압축강도(kPa)				함유량 (%)
	양생 3일	양생 7일	양생 14일	양생 28일	
SBCF-15	53.10	87.82	102.38	141.94	15
SBCF-20	44.80	59.76	71.73	131.00	20
SBCF-25	41.93	46.25	51.03	63.56	25

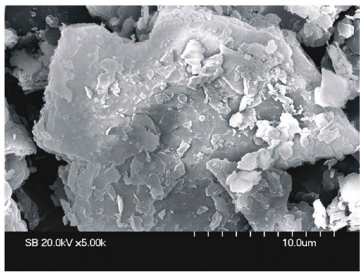
4.4 반응 메카니즘(Reaction Mechanism) 분석 결과

4.4.1 전자현미경분석(SEM) 결과

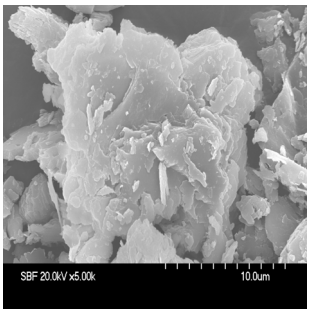
그 결과는 그림 4.7에 나타내었다. 그림 4.7(a)는 시료토에 물만을 첨가한 공시체(SW)로 그 형상은 각 입자의 주위에 크고 많은 공극이 존재하고 입자간의 결합은 엉성한 결합 상태를 보였고 강도발현도 크게 나타나지 않았다. 그림 4.7(b)는 시료토에 미생물만 첨가한 공시체(SB)로 각 입자의 주위에 큰공극들이 존재하나 입자 간의 결합상태는 SW에 비해 촘촘해진 것을 볼 수 있다. 그림 4.7(c)는 시료토에 미생물과 침강제를 첨가한 공시체(SBF)로 그 형상이 입자 간의 공극과 결합상태는 SB와 유사한 형태를 보이고 있다. 그림 4.7(d)는 혼화재가 혼합된 시료토에 미생물를 첨가한 공시체(SBC)로 그 형상이 입자 간의 공극과 결합상태가 조밀해지고 덩어리진 것을 볼 수 있다. 그림 4.7(e)는 혼화제가 혼합된 시료토에 미생물과 침강제를 첨가한 공시체(SBCF)로 입자사이의 공극이 거의 없고 촘촘해진 것을 볼 수 있다.



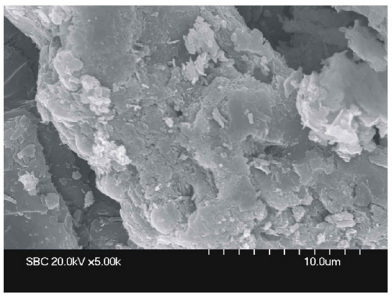
(a) SW



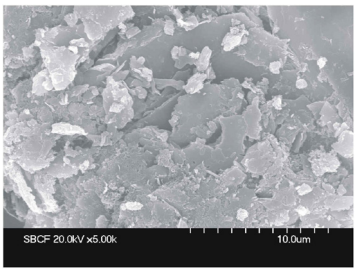
(b) SB



(c) SBF



(d) SBC



(e) SBCF

그림 4.8 전자현미경분석(SEM) 결과

4.4.2 X-회절 분석(XRD) 결과

XRD 분석결과, 미생물과 침강제에서 생성된 탄산칼슘은 다른 종류의 X-회절분석에서 나타나지 않았으나 미생물과 침강제에서 생성된 탄산칼슘 중의 하나인 바테라이트는 다른 기질들과 반응성이 좋은 특성을 지니고 있다는 것으로 판단할 수 있다. 또한 생성된 탄산칼슘과 혼화제인 소석회가 시료토와 혼합되면서 이온교환작용과 pozzolan 반응(석회를 첨가하면 흙에서 용출된 실리카나 알루미나가 증대하여 Ca^{2+}와 반응하여 지금까지 존재하지 않았던 새로운 화합물인 Ca-Si계, Ca-Al계, Ca-Si-Al계를 생성하는 반응)으로 새로운 화합물인 이산화규소(SiO_2)를 통해 고결화 효과를 내는 것으로 판단 할 수 있다.

표 4.3 SW에 대한 X-회절분석(XRD)의 반응 결과 리스트

Card No	화학식	화학명칭
35-0411	$KNd(MoO_4)_2$	Potassium Neodymium Molybdenum Oxide
39-0119	$Li_4P_4O12BH_2O$	Lithium Phosphate Hydroxide
37-0526	$Cu_3(SO_4)_2(OH)_2$	Copper Sulfate Hydroxide
29-0411	$CsLiSeO_4$	Cesium Lithium Selenate
40-0842	$BaHgS_2$	Barium Mercury Sulfide
33-0345	$CsBa(PO_3)3H_2O$	Cesium Barium Phosphate Hydrate
31-0542	$GaGeO_5WO_5O_4$	Gallium Germanium Tungsten Oxide
45-0732	CI_4 H_2I Ce_2 $CsOI_4$	Cesium Cerium Acetate
46-0275	Cs_2 $Mn(PO_3)_4$	Cesium Manganese Phosphate

표 4.4 SB에 대한 X-회절분석(XRD)의 반응 결과 리스트

Card No	화학식	화학명칭
43-0596	SiO_2	Silicon Oxide
35-0395	$CsRbWO_4$	Cesium Rubidium Tungsten Oxide
13-0487	$EuBO_3$	Europium Borate
46-1045	SiO_2	Quartz syn
39-0119	$Li_4P_4O12BH_2O$	Lithium Phosphate Hydroxide
37-0526	$Cu3(SO_4)2(OH)_2$	Copper Sulfate Hydroxide
33-1286	$Na_2S_2O_4$	Sodium Sulfate
43-0548	K3AlB8O15	Potassium Aluminum Borate
36-1149	IrSix	Iridium Silicide
31-0524	$GaGeO_5WO5O_4$	Gallium Germanium Tungsten Oxide

표 4.5 SBF에 대한 X-회절분석(XRD)의 반응 결과 리스트

Card No	화학식	화학명칭
37-0652	$K3Sc(SO_4)_3$	Potassium Scandium Sulfate
35-0395	$CsRbWO_4$	Cesium Rubidium Tungsten Oxide
37-0526	$Cu_3(SO_4)2(OH)_2$	Copper Sulfate Hydroxide
33-1286	$Na_2S_2O_4$	Sodium Sulfate
33-0394	$Cr_2H_2As_6O19$	Chromium Hydrogen Arsenate
35-0411	$KNd(MoO_4)^2$	Potassium Neodymium Molybdenum Oxide
12-0708	SiO^2	Silicon Oxide
45-0275	$CsMgPO_4$	Cesium Magnesium Phosphate
35-0160	Ba10P6O25	Barium Phosphate
37-1240	$Gd(ReO_4)^3$	Gadolinium Rhenium Oxide

표 4.6 SBC에 대한 X-회절분석(XRD)의 반응 결과 리스트

Card No	화학식	화학명칭
41-1487	C	Graphite-2H
43-0596	SiO_2	Silicon Oxide
36-1149	IrSix	Iridium Silicide
33-1286	$Na_2S_2O_4$	Sodium Sulfate
37-1430	$Ga1.56CdO.66Te_3$	Cadmium Gallium Telluride
45-1297	Cu1.50ZnO.30Te	Copper Zinc Telluride
34-0580	$LiBH_4$	Lithium Boron Hydride
10-0423	$AlPO_4$	Berlinite, syn
37-0526	$Cu_3(SO_4)2(OH)_2$	Copper Sulfate Hydroxide
45-0275	$CsMgPO_4$	Cesium Magnesium Phosphate

표 4.7 SBCF에 대한 X-회절분석(XRD)의 반응 결과 리스트

Card No	화학식	화학명칭
43-0596	SiO_2	Silicon Oxide
35-0395	$CsRbWO_4$	Cesium Rubidium Tungsten Oxide
36-1149	IrSix	Iridium Silicide
31-0524	$GaGeO_5WO_5O_4$	Gallium Germanium Tungsten Oxide
33-1286	$Na_2S_2O_4$	Sodium Sulfate
33-0394	$Cr_2H_2As_6O_{19}$	Chromium Hydrogen Arsenate
35-0411	$KNd(MoO_4)_2$	Potassium Neodymium Molybdenum Oxide
43-0548	$K_3AlB_8O_{15}$	Potassium Aluminum Borate
37-0526	$Cu_3(SO_4)2(OH)_2$	Copper Sulfate Hydroxide
36-0207	$LiSc(MoO_4)_2$	Lithium Scandium Molybdenum Oxide

5. 결 론

본 연구에서는 미생물 고결토의 강도 특성과 재료의 성질을 분석하기 위하여 공시체를 성형하고, 실내시험을 통해 기초 물성 및 강도 특성을 파악, 전자현미경분석(SEM)과 X-회절분석(XRD)시험을 통해 반응메카니즘을 분석하였다.

1. 미생물 용액과 침강제의 반응으로 침전물이 생성되었고, 미생물 용액과 침강제의 반응으로 규산염, 규화물과 탄산칼슘($CaCO_3$)의 일종인 바테라이트(Vaterite)라는 침전물이 생성되었다.

2. 전자현미경분석(SEM)한 결과 미생물과 침강제가 토립자 사이에서 반응을 일으켜 표면에 흡착성 물질층이 형성되고 공극이 채워져 단단한 입자로 결합되었다.

3. X-회절분석(XRD)시험결과 SW(흙, 물)에서 관찰되지 않았던 반응생성물인 이산화규소(SiO_2)가 모든 공시체에서 발견되고, SB(흙, 미생물)고결토에서는 이산화규소(SiO_2)의 반응도가 높게 나타났으며, SBF(흙, 미생물, 침강제)고결토는 반응도가 낮게 나타났다. 이것은 칼슘(Ca^{2+})이온 성분이 없는 토양에서도 미생물 용액 첨가만으로도 이산화규소(SiO_2)가 생성이 가능하다는 것을 의미한다. 그리고 탄산칼슘($CaCO_3$)인 바테라이트(Vaterite)는 분산성이 좋고 다른 기질과 반응성이 우수하여 변환 합성되므로 새로운 물질인 이산화규소(SiO_2)가 생성되었다.

4. SB(흙, 미생물)고결토와 SBF(흙, 미생물, 침강제)고결토는 미생물과 침강제의 함유량이 증가함에 따라 강도가 감소하였고 양생기간이 길어짐에 따라 강도는 증가하였다. 또한 SB(흙, 미생물)고결토와 SBF(흙, 미생물, 침강제)고결토의 강도는 SW(흙, 물)보다 각각 8%, 5%정도 증가하였고 초기강도도 크게 나타났다. 그리고 최적 함수비에 가까울수록 강도가 크게 나타났고 14일 이후의 강도는 급격히 증가하였다.

5. SBC(흙, 미생물, 혼화제)고결토와 SBCF(흙, 미생물, 혼화제, 침강제)고결토는 미생물과 침강제의 함유량이 증가함에 따라 강도가 감소하였고 양생기간이 길어짐에 따라 강도는 증가하였다. 또한 SB(흙, 미생물), SBF(흙, 미생물, 혼화제), SBC(흙, 미생물, 혼화제)보다 SBCF(흙, 미생물, 혼화제, 침강제)가 더 큰 강도 발현을 보였고, SW와 비교하면 SBC(흙, 미생물, 혼화제)고결토와 SBCF(흙, 미생물, 혼화제, 침강제)고결토의 강도는 각각 71%, 115%정도 증가하였다.

이와 같은 결론으로 볼 때 미생물과 침강제의 양보다는 각각에 농도를 증가시키는 것이 강도증진 효과를 가져올 수 있고, Ca^{2+}이온 성분이 존재하는 곳(석회암, 석회질토, 해성점토, 상하수도 슬러지 등)에서도 미생물을 통해 토립자 사이를 접착 일체화(고결)시켜 지반강도를 증진시킬 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. Chadda N Malone MF Doherty MF, (2001) Effect of chemical kinetics on feasible splits for reactive distillation, AICHE Journal 2001 Mar;47(3), AICHE Journal.
2. 진병익, 유재일(1985) “화학약액에 의한 표층혼합공법에 관한 연구”, 대한토질공학회지, 제1권, 2호, pp. 55~65.
3. 김도수, 백은상, 노재성., “불화물로 처리한 탄산칼슘계 미분말이 첨가된 시멘트 몰탈의 물성변화”, 한국공업화학회창립 10주년기념 1999년도 가을학술발표회 논문집, pp123-126.
4. 윤봉구, 신대용, 한상목.(2003),“침전법에 의한 구형 Vaterite 분말의 합성”, Journal of the Korean Ceramic Society, Vol.40, No.12, pp 1208~1212.
5. 김주범(1985) “고결작용(Cementation)", 대한토질공학회지, 제1권, 2호, pp.95~96.
6. Tyler, B(1978), Regulation of the assimilation of nitrogen compounds, Annual Review of Biochemistry, 47: 1127-1162.
7. Mörsdrof, G. and H. Kaltwasser(1972), Ammonium assimilation in Proteus vulgaris, Bacillus pasteurii, and Sporosarcina urease. Archives of Microbiology. 152:125-131.
8. Jahns, T.(1996), Ammonium/urea-dependent generation of a proton electrochmical potential and synthesis of ATP in Bacillus pasteurii. Journal of Bacteriology. 178:403-409.
9. Whiffin, Victoria S.(2004), Microbial $CaCO_3$ precipitation for the production of biocement, 2: pp. 18-20.