

미생물에 의해 생성된 광물질이 고결모래의 강도에 미치는 영향

Effect of Biomineralization on the Strength of Cemented Sands

박 성 식¹ Park, Sung-Sik

김 화 중² Kim, Wha-Jung

이 준 철³ Lee, Jun-Cheol

Abstract

There are some kinds of microorganisms within soils which can precipitate some minerals such as calcite under suitable conditions. Such precipitated calcites within pores of soil may reduce permeability and also cement soil particles. In this study, whether such microorganisms can fill pores within soil and increase the strength is investigated. *Basillus pasteurii* was repeatedly injected into weakly cemented sand with 3% cement ratio up to 10 times for 20 days. Then, cemented sand injected with microorganisms was tested for an unconfined compressive strength and evaluated for filling voids between soil particles. The unconfined compressive strength of one time injected specimen showed a 5% increase compared to untreated specimen. However, for more than two times the strength of injected specimens gradually decreased up to 50% of the untreated specimen by microorganisms. As the number of microorganism injection increased, the amount of calcite precipitation slightly increased within voids. However, over-precipitated calcites may result in strength decrease of slightly cemented soils.

요 지

흙 속에 존재하는 미생물 중에는 탄산칼슘과 같은 광물질을 생성시키는 미생물이 있으며, 이렇게 생성된 탄산칼슘은 지반 내의 공극에 침전되어 수밀성을 높이거나 지반을 고결시킬 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 미생물이 지반 내에서 광물질을 어느 정도 생성하는지와 생성된 광물질이 지반의 강도에 어떤 영향을 미치는지 분석하였다. 현장 지반의 약한 고결상태를 모사하기 위하여 모래에 3%의 시멘트를 섞어 3일 동안 양생시킨 원형공시체를 제작하였다. 약하게 고결된 공시체에 *Sporosarcina pasteurii* 균 용액을 20일 동안 최대 10회 반복 주입한 다음 공시체의 일축압축강도와 공극을 채운 광물질을 분석하였다. 미생물을 1회 주입한 경우 공시체의 일축압축강도는 미생물이 들어가지 않은 경우보다 5% 정도 증가하였으나, 2회 이상 주입할 경우 강도는 오히려 감소하였으며 주입 횟수가 증가할수록 일축압축강도는 계속 감소하여 최대 50%까지 감소하였다. 미생물을 반복 주입할 경우 주입 횟수에 따라 고결모래 내에 탄산칼슘이 지속적으로 생성되면서 공극을 채우는 정도가 증가하였다. 하지만, 약하게 고결된 지반 내에 탄산칼슘이 일정 이상 침전될 경우 강도는 오히려 감소하였다.

Keywords : Cemented sand, Microorganism, Calcite, Strength

1 정회원, 경북대학교 건축토목공학부 토목공학전공 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.)

2 경북대학교 건축토목공학부 건축공학전공 교수 (Prof., Dept. of Architectural Engrg., Kyungpook National Univ.)

3 경북대학교 건축토목공학부 건축공학전공 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Architectural Engrg., Kyungpook National Univ., uggenius@hanmail.net, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

다양한 종류의 세균을 비롯한 미생물은 주어진 pH, 온도, 습도, 물에 녹아 있는 이온 등의 조건이 적합할 경우 탄산칼슘과 같은 광물질을 생성하게 되는데 이러한 현상을 Microbially Induced Carbonate Precipitation(MICP)이라 한다. MICP 작용을 건설재료에 응용할 경우 적용 분야는 크게 Biodeposition과 Biocementation으로 나눌 수 있다(De Muynck et al., 2010). 어떤 재료의 표면이나 분리된 공간 사이에 미생물로 인하여 광물질이 쌓이거나 형성되는 것을 Biodeposition이라 하고, 어떤 입자 사이에 미생물 작용으로 생성된 광물질이 고결을 일으키는 것을 Biocementation이라 한다. 해외 여러 연구자(Ghosh et al., 2005, 2009; Ramakrishnan et al., 1998, 1999; Tittelboom et al., 2010)에 의해 다양한 미생물을 이용한 MICP 작용에 의한 콘크리트의 압축강도 증진과 균열 보수를 위한 연구가 실시되었으며, 국내에서는 천우영 등(2008), 김화중 등(2009)과 박성진 등(2010)이 콘크리트에 발생한 균열을 치유하기 위하여 독도 및 제주도에서 분리한 미생물을 이용한 연구를 수행하였다. 하지만 미생물을 콘크리트에 적용하기 위한 연구는 시멘트의 pH가 상당히 높기 때문에 미생물이 활동하기에 적합한 조건으로 어떻게 pH를 맞추느냐 하는 어려움이 있다. 따라서 대부분의 연구에서는 영양배지나 모래 입자 사이에 미생물을 주입하였을 때 탄산칼슘과 같은 광물이 석출되는 것을 SEM(Scanning Electron Microscopy)사진이나 XRD(X-ray diffraction) 분석으로 확인하는 연구를 주로 수행하였으며, 일부 연구(Ghosh et al., 2009)에서만 미생물을 직접 콘크리트에 배합하여 뚜렷한 강도 증가를 얻을 수 있었다. 더욱이 콘크리트나 모르타르의 높은 pH와 치밀한 구조는 미생물이 활동하기에 적합하지 않을 뿐 아니라 광물질이 생성되면서 오히려 균열을 유발할 수도 있기 때문에 미생물을 콘크리트에 적용하는 것은 상당히 제한적일 수도 있다. 하지만 느슨한 상태에 있는 사질토 및 점성토 지반의 경우에는 이미 다양한 미생물이 존재하고 있을 뿐 아니라 미생물로 광물질이 생성될 수 있는 지반 내 빈 공간이 비교적 넓게 존재하기 때문에 상대적으로 훨씬 유리할 수 있다.

Biocementation과 관련된 부분은 주로 plugging, 지반보강이나 개량과 같은 지반공학과 많은 연관이 있다(Ferris et al., 1996). 하지만 지반공학 분야에서 미생물을 이용하여 흙의 고결력을 유발시키려는 연구는 아직 국내에

서 큰 주목을 받지 않고 있다. 하지만 시멘트와 같은 고결제를 대신하여 흙 입자의 고결을 유발시키는 미생물을 활용하면 암반의 틈새나 지반의 공극을 메우고 연약 지반 또는 일반 토사의 공학적 성질을 개선할 수 있는 친환경 재료를 개발할 수 있다. 이와 같은 미생물을 활용한 친환경 재료는 시멘트 생산 시에 발생하는 이산화탄소를 줄일 수 있을 뿐 아니라 지반 내에 들어가는 시멘트로 인한 다양한 중금속 성분의 유출로부터 자유로울 수 있다. 따라서 지반 개량이나 보강을 위한 그라우팅 시에 사용하는 시멘트밀크를 미생물로 대체하기 위한 연구가 Delft공대의 Van Paassen교수에 의해 활발히 진행되고 있다(Whiffin et al., 2007; Van Paassen et al., 2010). 최근 미국을 비롯한 해외의 몇몇 연구자(Mitchell and Santamarina, 2005; DeJong et al. 2006; Whiffin et al., 2007; Terajima et al., 2009; Kawasaki et al., 2010)들도 *Basillus pasteurii*라는 미생물을 활용한 흙의 고결화 연구를 수행하고 있다. 대부분의 연구에서 현장에 적용할 정도로 충분한 강도 증가가 발견되지 않았지만, 최근 Van Paassen et al.(2010)은 미생물로 그라우팅한 모래지반의 일축압축강도를 최대 12MPa까지 얻을 수 있었다. DeJong et al.(2010)도 그림 1과 같이 모형기초 아래 모래지반을 미생물로 고결시킨 다음 실시한 기초재하 실험에서 비록 30kPa의 작은 하중이었지만 기초의 침하

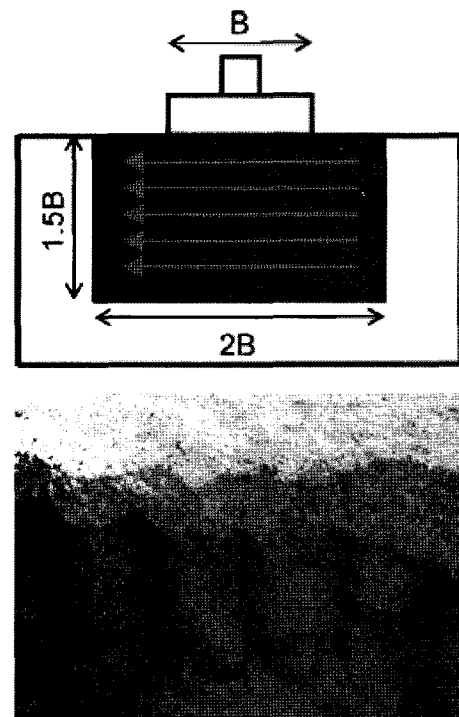


그림 1. 기초지반 아래를 미생물로 고결시킨 모습(DeJong et al., 2010)

량이 1/5로 감소하는 지반개량 효과를 얻었다. Mitchell and Santamarina(2005)는 미생물이 흙이나 암반의 거동에 미치는 영향에 대하여 언급하면서 아직까지 생물학적 작용이 토질역학에 미치는 영향은 미개척지대일 뿐 아니라 더 많은 연구가 필요하다고 강조하였다. 국내에서도 김대현 등(2010)에 의해 미생물을 이용한 흙의 고결화 연구가 수행되고 있으며, 실내에서 소량의 모래 입자를 대상으로 입자 사이에 광물질이 형성되는 것은 확인하였으나 Van Paassen et al.(2010)과 같은 뚜렷한 강도 증가는 나타나지 않았다. 마찬가지로 오종신(2008)도 화강토에 물과 미생물을 혼합하여 다짐한 공시체에 대한 일축압축강도시험에서 미생물의 혼합에 따른 강도 증가는 아주 미미하였다. 이와 같이 미생물을 혼합한 지반에서 뚜렷한 강도증가와 실용화를 위해서는 아직도 많은 연구가 필요하다.

지금까지 미생물을 이용한 대부분의 연구는 미고결된 모래에 미생물을 주입하여 고결을 확인하는 연구였다(DeJong et al., 2006). 하지만 실제 지반은 대부분 약하게 고결된 상태로 존재하므로 본 논문에서는 이와 같이 이미 고결된 지반에 미생물이 들어가 생체광물형성 작용(Biomineralization)으로 탄산칼슘이 생성될 경우에 지반의 강도가 어떻게 되는지를 실내시험과 화학성분 분석을 통하여 연구하였다.

2. 공시체 제작방법 및 종류

2.1 모래와 시멘트

본 연구에서 사용한 모래는 낙동강 유역에서 채취된 것으로 1.18mm체를 통과하고 0.6mm체에 잔류하는 모래를 물로 씻은 다음 건조하여 사용하였다. 모래 입자는 약간 모난 형태를 하고 있으며 색깔은 다소 붉은 색을 띠고 있다. 표 1은 X선을 이용한 낙동강모래의 성분분석(XRF) 결과를 나타내고 있으며, 분석 결과에 의하면 낙동강모래는 실리카(이산화규소)가 78% 이상인 실리카질 모래이다. 본 연구에서는 약하게 고결된 지반의 일축압축강도를 평가하기 위해 모래 입자가 자립할 수 있도록 고결제로 3시간에 7일 강도 발현이 가능한 국내

표 1. 낙동강모래의 성분분석

Classification	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂
Content (%)	78.23	11.32	4.03	2.43	1.98	1.66	0.35

S사의 초속경시멘트를 사용하였다. 모르타르의 압축강도는 3시간 후 25MPa, 1일 후 30MPa, 3일 후 35MPa, 7일 후 40MPa이다. 고결모래의 성형방법은 시멘트비 3%와 함수비 10%(모래 350g, 시멘트 10g, 멸균 증류수 36g)로 모래를 섞은 다음 양쪽으로 분리 가능한 공시체 성형 몰드에 1/3씩 나누어 넣고 다짐봉으로 각층을 다짐하여 공시체를 완성하였다. 완성된 공시체의 크기는 직경 5cm, 높이 10cm로 자립이 가능하며, 약하게 고결된 공시체는 25℃에서 상대습도 60%로 3일간 기건 양생하였다.

2.2 미생물과 공시체 종류

광물질을 생성할 수 있는 미생물의 종류는 다양하다

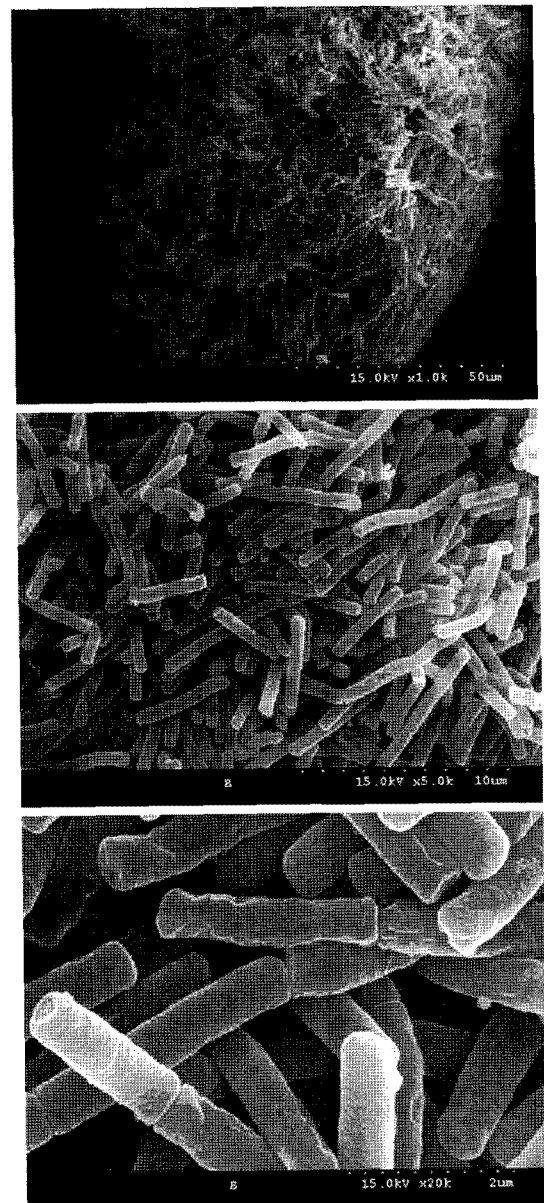


그림 2. Sporosarcina pasteurii 미생물의 SEM 사진

(Whiffin, 2004). 본 연구에서 사용한 미생물은 생물자원센터(BRC)에서 균주를 제공받은 호기성 미생물로 그림 2와 같은 *Sporosarcina pasteurii*이다. 흔히 *Bacillus pasteurii*로도 불리며 pH 9.0 정도의 알칼리 환경을 좋아하므로 공시체에는 시멘트비를 3% 정도로 소량 사용하였다. 요소(Urea)와 염화칼슘(CaCl_2)을 포함하여 미생물로 인한 광물생성에 사용하는 배지의 구성성분은 표 2와 같으며, 이것이 가장 일반적으로 사용되는 배지이다(DeJong et al., 2006). 미생물이 포함된 배지는 다음과 같은 순서로 제조하였다; (i) 미생물을 TSB(Tryptic Soy Broth)배지에 접종, 30°C에서 24시간 170rpm으로 진탕배양. (ii) 8,000rpm으로 미생물을 원심분리 후, 멸균1차 증류수로 2회에 걸쳐 씻어냄. (iii) OD600(Optical Density 600)에서 흡광도가 1.0(약 10^7 cell/ml)이 되도록 400ml의 Urea- CaCl_2 액체배지에 희석. (iv) 희석법을 이용하여 미생물 농도가 10^5 cell/ml인 미생물배지를 제조.

완성된 공시체에 주입되는 액체의 종류는 미생물이 포함되지 않은 액상 배지(이하 '배지'라 함)와 미생물이 포함된 액상 배지(이하 '미생물배지'라 함) 2 종류이다. 3일 양생 후에 시멘트로 인한 모래의 고결이 거의 완료되었다고 가정된 다음 공시체에 배지 또는 미생물배지

를 반복적으로 주입하였다. 배지는 스포이드를 이용하여 공시체의 윗부분에 30ml를 수회에 나누어 떨어뜨리는 방식으로 주입하였으며, 최초 주입 시에는 공시체의 색깔이 변하면서 아래 부분까지 배지가 스며드는 것을 확인할 수 있었다. 배지와 미생물배지의 주입시기는 표 3과 같으며, 날짜에 따라 20일 동안 1회에서 최대 10회까지 반복적으로 배지 또는 미생물배지를 주입하였다. 공시체의 종류는 어떤 액체도 주입하지 않은 고결모래인 CS, 미생물배지를 1, 2, 4, 5, 10회 주입한 CSUM-1, CSUM-2, CSUM-4, CSUM-5, CSUM-10, 그리고 미생물로 인한 효과를 비교하기 위하여 미생물이 혼합되지 않은 배지를 10회 주입한 CSU-10으로 구성되었다. 실험 결과의 반복성을 확인하기 위하여 모든 공시체는 2개씩 제작하였다.

3. 실험 결과 및 성분 분석

3.1 MICP 실험

우레아제(Urease, 요소분해효소)는 아래 화학식 (1)과 같이 요소의 가수분해작용을 활성화시켜 이산화탄소와 암모니아를 생산하여 주변의 pH를 높임으로 광물이온인 Ca^{2+} 과 CO_3^{2-} 가 CaCO_3 로 이온결합을 유도하게 된다. *Sporosarcina pasteurii*와 같은 미생물이 우레아제를 생성하여 자신의 표면 내외에 탄산칼슘과 같은 광물이 석출되는 과정을 MICP라 하였으며, 미생물로 인한 광물생성 메카니즘은 아래 화학식으로 표현할 수 있다(Ramachandran et al., 2001). 그림 3은 미생물(cell)에 요소가 들어가면 암모니아와 탄산이온으로 바뀌면서 주변에 있는 칼슘

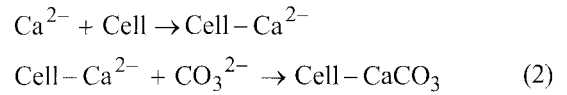
표 2. Urea- CaCl_2 배지의 구성

Distilled water	1L
NB(nutrient broth)	3g
NH_4Cl	10g
NaHCO_3	2.12g
$\text{CaCl}_2(\text{Ca}^{2+} 25.2\text{mM})$	3.70g
Urea($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)	20g

표 3. 배지 및 미생물배지 주입시기

Test ID.	Injected Solution	Days																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
CS	N/A																				
CSU-10	Urea- CaCl_2	■		■		■		■		■		■		■		■		■		■	
CSUM-1	Urea- CaCl_2 + Microorganism	■																			
CSUM-2	Urea- CaCl_2 + Microorganism	■									■										
CSUM-4	Urea- CaCl_2 + Microorganism	■						■									■				
CSUM-5	Urea- CaCl_2 + Microorganism	■				■				■				■					■		
CSUM-10	Urea- CaCl_2 + Microorganism	■		■		■		■		■		■		■		■		■		■	

이온과 결합하여 탄산칼슘과 같은 광물이 생성되는 과정을 보여주고 있으며, 화학식으로 설명하면 아래 식 (2)와 같이 표현할 수 있다(De Muynck et al., 2010). 미생물의 MICP 작용 확인을 위하여 Urea-CaCl₂ 배지에 미생물을 배양한 후에 광물이 석출되는지를 확인하였다. 그 결과 그림 4와 같이 시간이 지남에 따라 *Sporosarcina pasteurii*는 Urea-CaCl₂가 포함된 영양배지에서 광물을 생성시켰다. 그림 5는 석출된 광물의 SEM사진을 보여주고 있으며 길쭉하게 생긴 것이 미생물 주위에 탄산칼슘이 결합되어 생긴 결정질이다. 그림 6은 XRD 분석 결과로 생성된 광물에 탄산칼슘(calcite)이 포함되어 있음을 알 수 있다.



본 연구에서 사용한 공시체의 건조단위중량은 미생물을 주입하기 전에는 평균 1844kg/m³이었다. 하지만 공시체에 미생물배지를 반복 주입한 경우 건조단위중량이 약간씩 증가하였으며, 최대 건조단위중량은 1868kg/m³으로 약 1.3% 정도 소량 증가하였다. 공시체 내에 탄산칼슘과 같은 결정질이 생성되면서 공시체 내의 공극을 메워 건조단위중량이 증가한 것으로 판단된다. 한편 Van Paassen et al.(2010)은 8.0m×2.6m×2.5m 크기의 콘크리트 상자에 건조단위중량 1560kg/m³로 모래를 채운 다음 미생물로 지반을 그라우팅하는 실험을 실시하였으며, 그라우팅이 완료된 다음 채취된 코어의 건조단위중량은 1734-2137kg/m³으로 최대 37% 증가하였다. 모래가 고결되지 않은 상태에서는 공극 내에 탄산칼슘의 생성이 자유롭기 때문에 건조단위중량이 상당히 증가한 것으로

↓ Urease

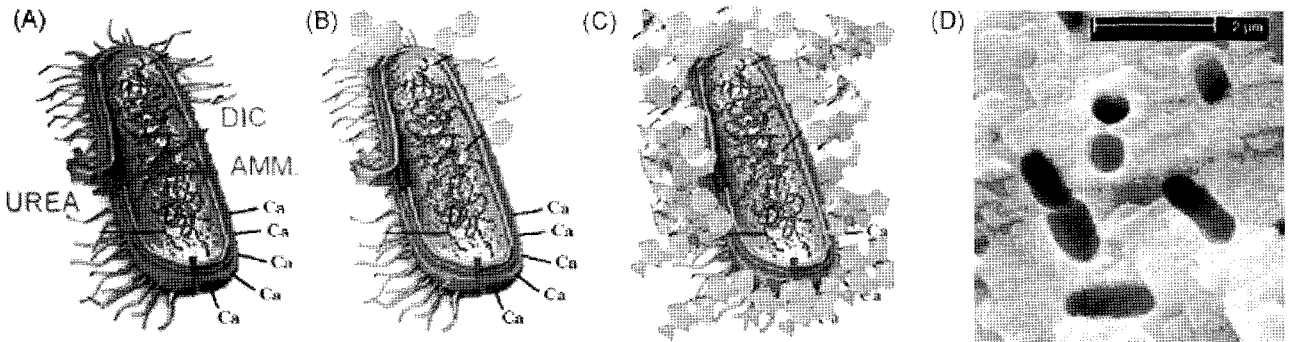
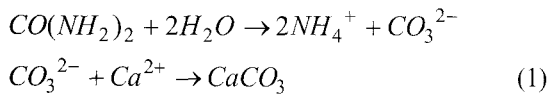


그림 3. 요소분해에 의한 탄산염 침전과정(De Muynck et al., 2010)

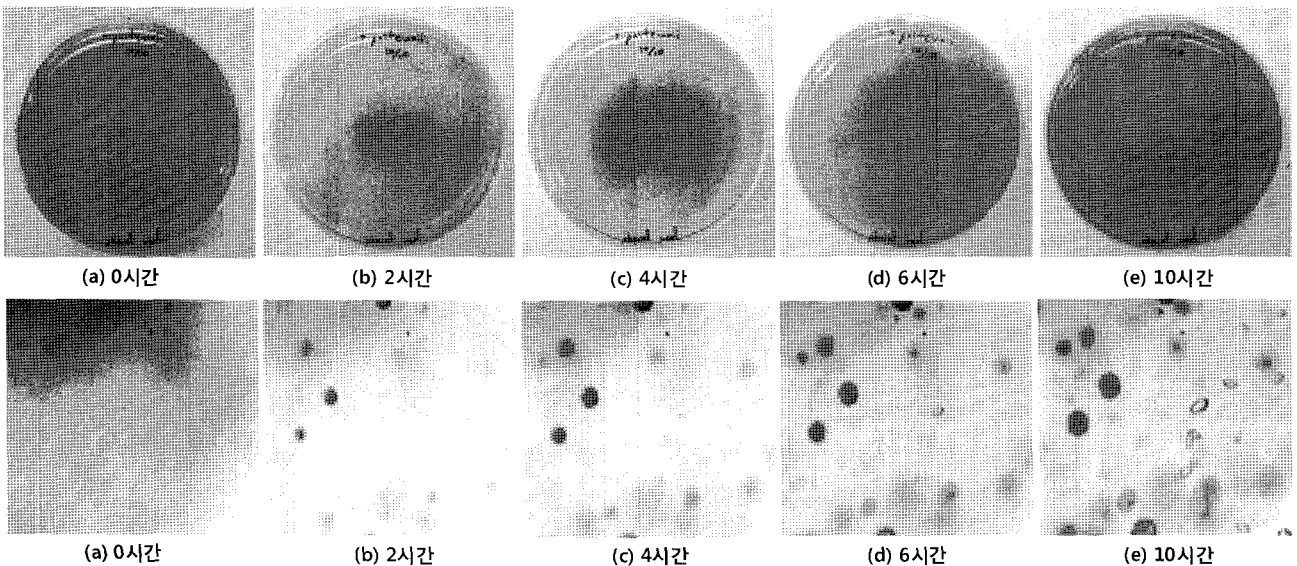


그림 4. Urea-CaCl₂ 배지 상에서 광물의 석출 모습

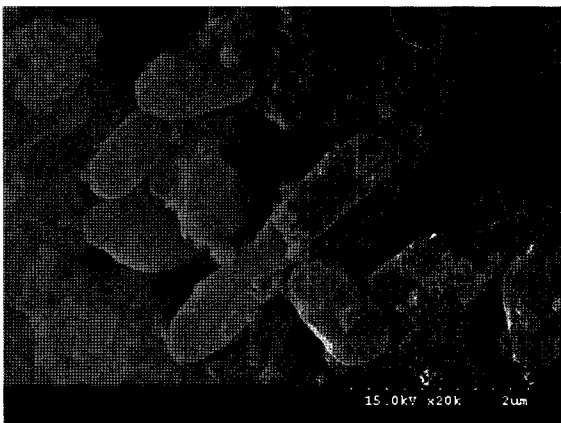
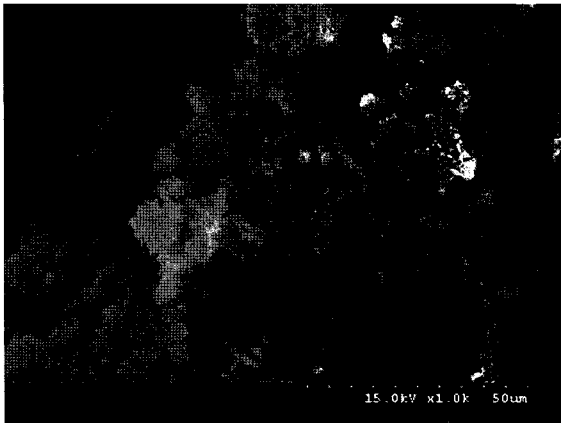


그림 5. 석출된 광물의 SEM 사진

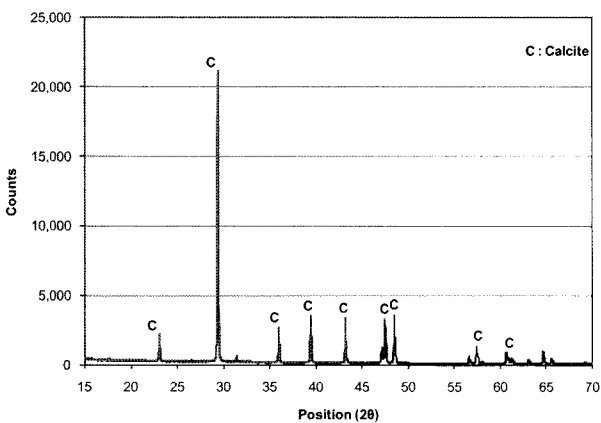


그림 6. 생성된 광물의 XRD분석 결과

로 판단된다.

3.2 일축압축시험

표 3에 있는 공시체에 대하여 1%/min의 전단속도로 일축압축강도시험을 실시하였다. 공시체의 실험 전과 후의 모습은 그림 7과 같다. 그림 8은 각각의 공시체에 대한 일축압축강도를 서로 비교하고 있다. 고결토의 일축압축강도는 수침 직후 함수비 차이에 따라 상당히 감소할 수 있다(박성식 등, 2009). 따라서 20일 동안의 약액 주입이 완료되면 함수비에 따른 강도 차이를 최소화하기 위하여 1일 동안 건조로에서 모든 공시체를 건조시켰다. 건조 후의 공시체의 함수비는 0.1%로 거의 모든 공시체가 동일하였으므로 함수비가 강도에 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 아무것도 주입하지 않은 고

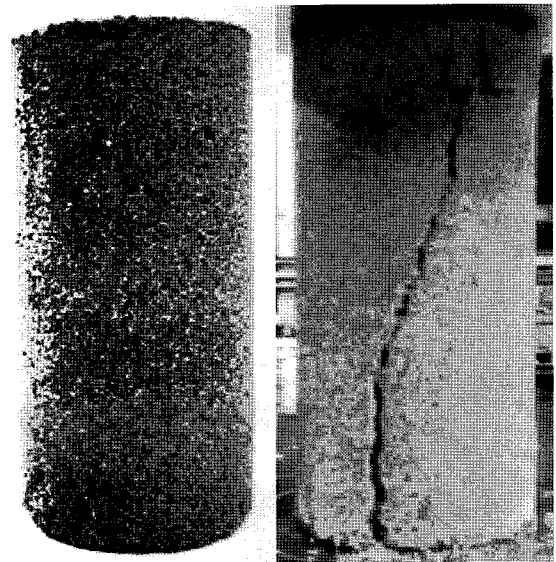


그림 7. 일축압축시험 전(왼쪽)과 후(오른쪽)의 공시체 모습

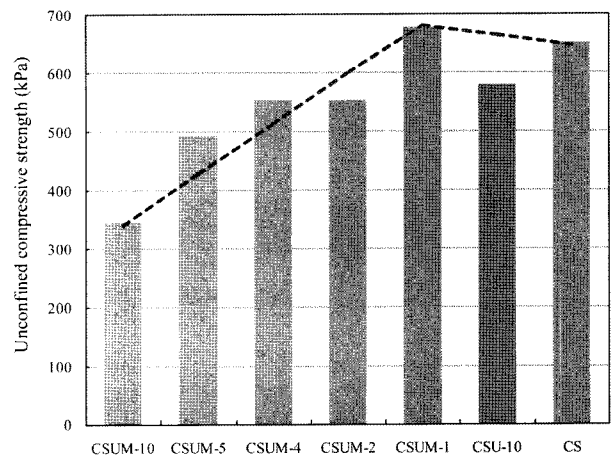


그림 8. 일축압축강도 비교

결모래인 CS 공시체의 강도는 650kPa로 나타났다. 미생물이 들어가지 않은 배지만 10회 주입한 CSU-10 공시체의 강도는 CS 공시체보다 약간 작은 값을 보였으나 거의 유사하게 나타났다. 미생물을 1회 주입한 CSUM-1 공시체의 강도는 CS 공시체보다 약 5% 정도 증가하였지만, 2회부터 10회까지 미생물을 반복 주입할수록 일축압축강도는 그림 8의 점선과 같이 감소하는 경향을 나타내었다. 결국 미생물배지를 10회 주입한 CSUM-10 공시체는 CS 공시체보다 일축압축강도가 약 50% 정도 감소하였다. 이와 같은 강도 감소는 미생물로 생성된 탄산칼슘이 약하게 고결된 기존 입자 간의 고결을 일부 끊으면서 발생한 것으로 판단된다. 약하게 고결된 지반에서 미생물로 생성되는 탄산칼슘의 양이 일정 이상이 될 경우 기존 고결이 약해지면서 지반의 강도를 저하시킬 수 있다. 따라서 미생물로 탄산칼슘이 침전될 경우 지반의 강도가 반드시 증가하는 것은 아니었다. 본 연구 결과와 유사하게 Ghosh et al.(2009)는 미생물의 농도가 높을수록 모르타르의 강도가 증가하다가 어느 일정 농도 이상이 되면 모르타르의 강도가 오히려 감소하는 결과를 얻었다. 또한 박성진(2010)에 의하면 여러 종류의 미생물을 사용하여 탄산칼슘 결정은 생성되었으나, 탄산칼슘 결정의 생성이 항상 시멘트 모르타르의 강도를 증가시키는 것이 아니라 오히려 감소시킨 경우도 있었다.

한편 본 연구결과와 달리 미생물 반응을 통하여 생성된 탄산칼슘이 흙 입자 사이의 공극을 메우고 입자 사이의 고결력을 유발하여 흙의 강도를 상당히 증가시킨 연구사례도 있다. 예를 들면, Ramachandran et al.(2001)은 미생물과 Urea-CaCl₂ 배지를 사용한 모르타르의 압축강도가 증가된다는 연구결과를 얻었다. Martinez et al.(2003)은 실트질 흙에 미생물을 혼합하여 다짐한 공시체를 21일 동안 양생한 다음 실시한 실험에서 배수강도가 20-100% 정도 증가하였으며 배수강도는 10-50kPa 정도 증가하였다. DeJong et al.(2006)도 모래에 미생물을 순환시켜 고결시킨 시료의 삼축시험에서 강도가 증가한다는 결과를 얻었다. Van Paassen(2010)은 모래에 미생물을 주입하여 고결시킨 지반에서 채취된 코어의 일축압축강도가 최대 12MPa까지 나왔다.

3.3 성분분석 실험

3.3.1 SEM 분석

일축압축시험이 완료된 후에 공시체 시편을 사용하

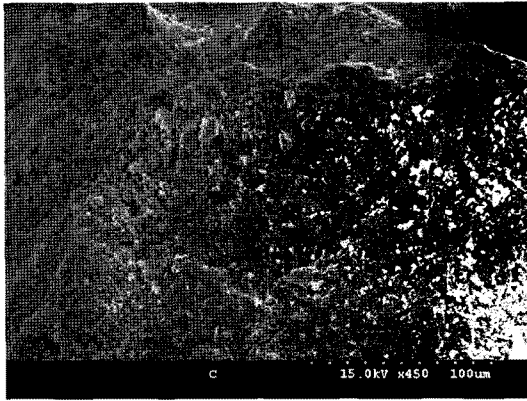
여 다양한 성분분석 실험을 실시하였다. 각 공시체에 대한 SEM사진 분석 결과는 그림 9와 같다. 먼저 그림 9(a)에 있는 CS 공시체의 경우 골재 입자 주변에 생성된 시멘트 수화물의 결정상이 확인되었다. 그림 9(b)에 있는 CSU-10 공시체의 경우 골재 입자 주변에 시멘트 수화물과 Urea-CaCl₂ 배지에 의해 생성된 하이드록시아파타이트(hydroxyapatite), 탄산칼슘(순수 탄산칼슘을 의미)의 결정상이 확인되었다. 그림 9(c)에서 9(g)에 있는 CSUM 공시체의 경우에도 골재 입자 주변에 시멘트 수화물과 하이드록시아파타이트, 탄산칼슘(Cell-CaCO₃ 를 의미)의 결정상이 확인되었다. 주입횟수가 많을수록 골재 입자 주변에 광물질의 결정크기가 성장하는 것을 확인할 수 있었다.

3.3.2 XRD 분석

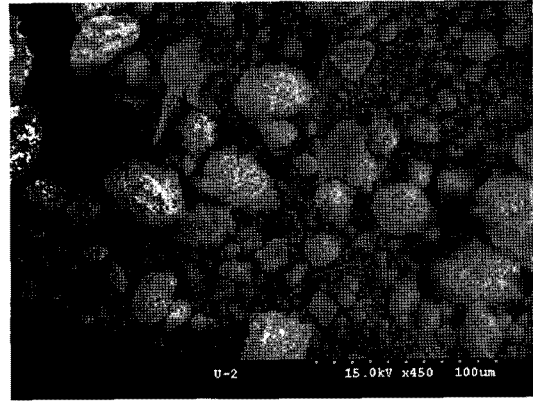
XRD분석을 통해 미생물의 생체광물형성작용으로 인해 각 공시체 내에서 생성된 광물을 식별하였다. 각 시료는 분석이 용이한 미세한 분말로 분쇄하였으며, X선의 회절각도 2θ값은 5~70°로 설정하였다. 그림 10은 각 시료의 XRD 분석결과를 나타낸 것이다. CS 공시체의 경우 CaCO₃가 검출되었으며 2θ=29.3°에서 최대 피크를 나타내고 있다. 이는 일반 탄산칼슘의 피크와 유사하였다. 이것은 모래 고결에 사용된 시멘트 내에 존재하는 CaCO₃이거나 양생 시 중성화에 의해 발생한 것으로 판단된다. CSU-10 공시체의 경우도 CaCO₃가 검출되었으며 피크가 CS 공시체와 비교하여 높게 나타났다. CSU-10 공시체에 존재하는 탄산칼슘도 CS 공시체와 동일한 원인으로 판단되지만, 배지 내 Ca성분이 대기중의 CO₂와 결합하여 생성되었을 가능성도 있다. 이로 인해 CS 공시체보다 탄산칼슘의 결정성이 높아진 것으로 판단된다. CSUM 공시체의 경우에도 CaCO₃가 검출되었으며 CSUM-10의 피크는 일반 탄산칼슘과 달리 상당히 높았다. 이것은 미생물의 생체광물형성작용에 의해 결정성이 높은 CaCO₃가 만들어졌기 때문이다(김화중 등, 2009).

3.3.3 TGA 분석

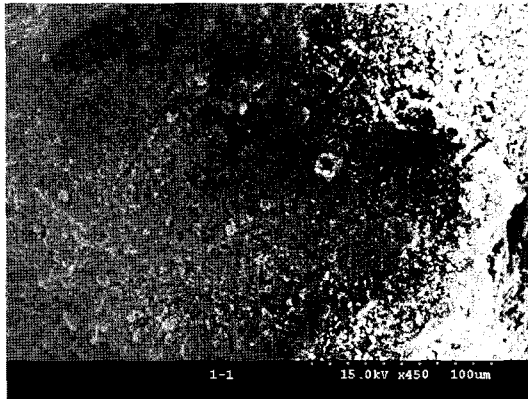
열중량 분석법(Thermogravimetry analysis, TGA)을 이용하여 미생물의 생체광물형성작용으로 인해 생성된 탄산칼슘의 양을 정량적으로 평가하였다. 열중량 측정 온도 구간은 20~1000°C의 범위로 설정하였으며, 온도를 10°C/min의 속도로 올리면서 열중량이 감소하는 것을 측정하였다. 탄산칼슘은 650~750°C의 온도에서 탈탄



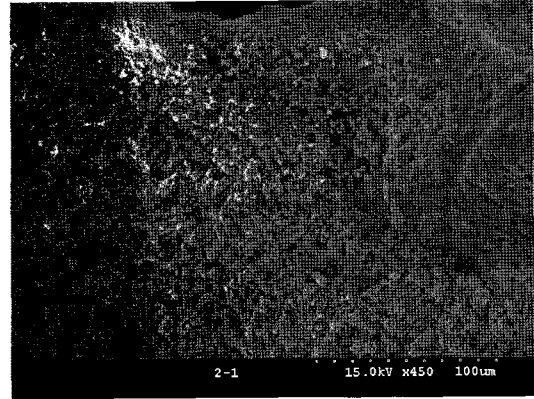
(a) CS



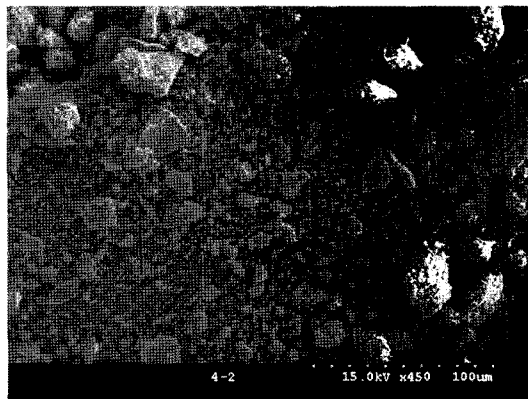
(b) CSU-10



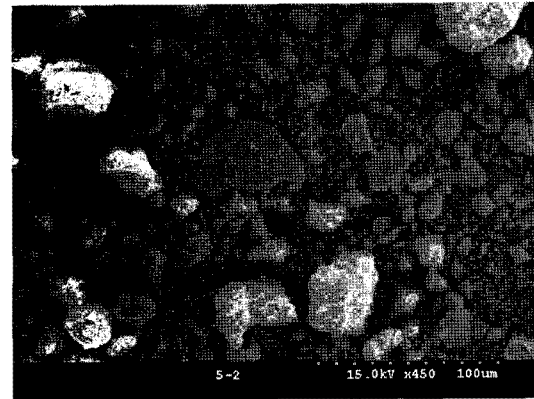
(c) CSUM-1



(d) CSUM-2



(e) CSUM-4



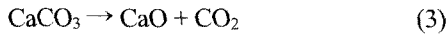
(f) CSUM-5



(g) CSUM-10

그림 9. 각 공시체의 실험 후 SEM 사진

(decarburation)이 발생하여 식 (3)과 같이 열분해가 일어나게 된다. 따라서 샘플 내에 있는 탄산칼슘의 양은 TGA곡선의 열중량 감소량으로 탈탄량을 계산하여 구할 수 있다.



탄산칼슘 및 이산화탄소의 분자량은 각각 100.09(g/mol), 44.01(g/mol)이며, 탄산칼슘과 이산화탄소가 1몰: 1몰의 비율로 생성되기 때문에, 탈탄에 의한 감량으로부터 탄산칼슘의 양을 계산하기 위해서는 환산계수(=2.27)를 이용하여 탈탄에 의한 감량에 곱한다. 그림 11은 각 공시체의 TGA 곡선을 나타내고 있다. 표 4는 TGA를 이용하여 각 공시체에 생성된 탄산칼슘의 양을 CS공시체

에 대한 상대적인 값으로 표현하였다. 미생물의 주입횟수가 높을수록 탄산칼슘의 양은 증가하는 경향을 나타냈으나, 공시체의 강도에 영향을 미칠 만큼의 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다. 한편 공시체의 상부에서 스포이드로 배양액을 조금씩 주입하였으므로 공시체 내에 탄산칼슘이 공간적으로 상당히 불균등하게 생성될 수도 있으며, 각각의 공시체에서 분석을 위하여 샘플링한 시료가 각각의 공시체를 대표하기에는 샘플링 개수가 부족했던 것으로 판단된다.

4. 결론

사질토 지반에 미생물을 활용하여 탄산칼슘과 같은 광물질의 침전을 유도할 경우 지반을 친환경적으로 매우거나 고결시켜 지반의 강도 증가 및 투수계수 저하로 인한 오염물질의 차단 등과 같은 효과를 기대할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 미생물 배양액을 약하게 고결된 공시체에 반복적으로 주입한 다음 강도실험과 화학성분 분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 미생물이 탄산칼슘과 같은 광물질을 생성하여 지반 내 공극을 메우는 것으로 확인되었으나 입자가 상당히 조밀한 경우 약 1% 정도의 탄산칼슘이 생성되었다.
- (2) 미생물을 1회 주입한 경우 공시체의 일축압축강도

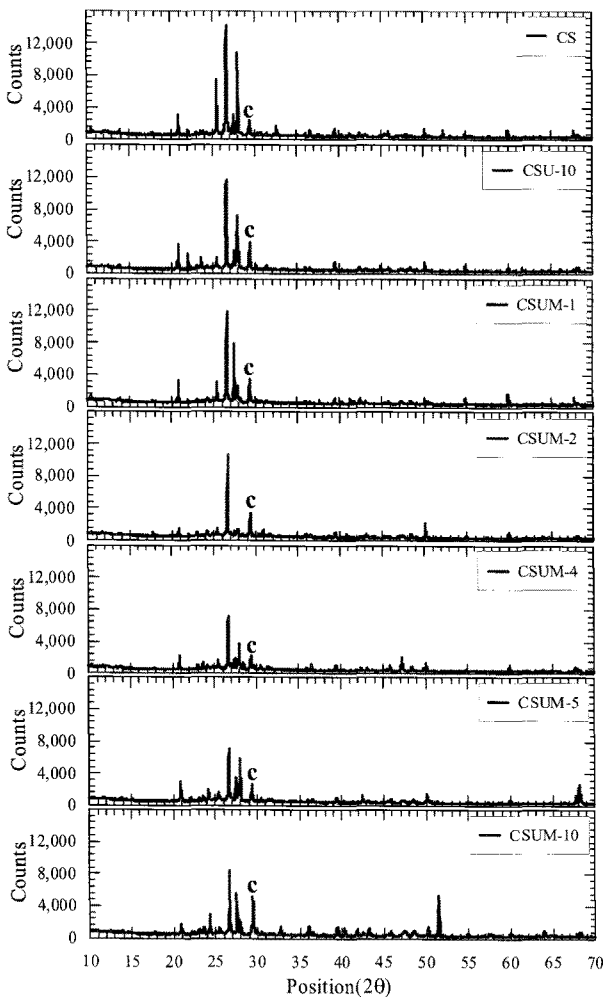


그림 10. 각 공시체의 XRD분석 결과

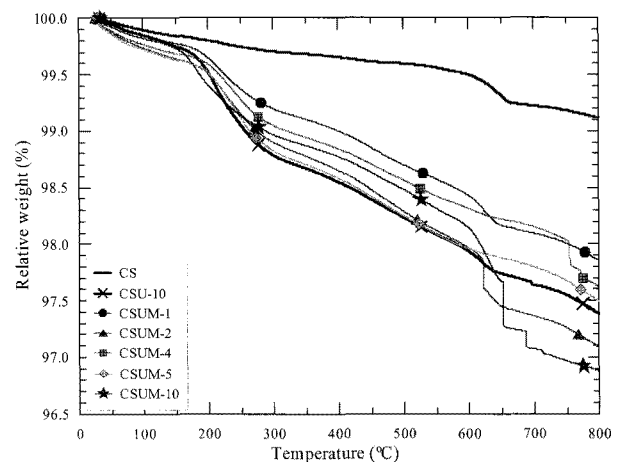


그림 11. 각 공시체의 TGA분석 결과

표 4. 탄산칼슘 정량

Test ID.	CS	CSU-10	CSUM-1	CSUM-2	CSUM-4	CSUM-5	CSUM-10
Relative quantity of calcite (%)	0.00	0.14	0.07	0.14	0.13	0.17	1.30

는 미생물이 들어가지 않은 경우보다 5% 정도 증가 하였으나, 2회 이상 주입할 경우 강도는 오히려 감소하였으며 주입 횟수가 증가할수록 일축압축강도는 계속 감소하여 최대 50%까지 감소하였다.

- (3) 약하게 고결된 지반에서 미생물로 탄산칼슘이 침전될 경우 입자 사이에 미소균열이 발생할 수도 있으며 이는 기존 입자 사이에 존재하는 고결을 끊으면서 지반의 강도를 저하시킬 수 있다. 따라서 탄산칼슘의 생성이 지반의 강도를 반드시 증가시키지는 않았다.
- (4) 기존에 수행된 일부 연구에서 탄산칼슘은 생성되었으나 강도 증가가 뚜렷이 나타나지 않은 경우는 일정량 이상 생성된 탄산칼슘 결정이 기존의 고결을 파괴시켰기 때문으로 판단된다. 따라서 무조건적으로 탄산칼슘의 침전량이 많을수록 강도가 증가하는 것이 아니라 지반 내에 존재하는 공극의 분포나 정도 그리고 기존 지반의 고결도 등을 고려하여 미생물로 인한 생체광물형성작용을 유도하는 것이 강도 증가에 유리하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- 김대현, 김호철, 박경호 (2010), "Bacteria를 이용한 연약한 흙의 고결화 가능성", *한국지반공학회 가을학술발표회 논문집*, pp.379-391.
- 김화중, 김성태, 박성진, 김사열, 천우영 (2009), "미생물의 생체광물형성작용을 이용한 자기치유 스마트 콘크리트 개발에 관한 기초연구", *한국콘크리트학회 논문집*, 제21권, 제4호, pp.501-511.
- 박성식, 김기영, 김창우, 최현석 (2009), "수침이 고결모래의 강도에 미치는 영향", *대한토목학회논문집*, 제29권, 제6호, pp.303-311.
- 박성진, 이나영, 김화중, 김사열 (2010), "독도산 탄산칼슘형성세균에 의한 모르타르 균열보수와 압축강도 증진", *Korean Journal of Microbiology and Biotechnology*, Vol.38, No.2, pp.216-221.
- 오종신 (2008), *미생물 고결토의 공학적 특성 연구*, 전남대학교 대학원 석사논문.
- 천우영, 박성진, 김화중, 김사열 (2008), "미생물의 생체광물형성작용을 이용한 스마트 콘크리트 개발에 관한 기초연구", *대한건축학회지회연합회 학술발표대회논문집*, pp.379-384.
- DeJong, J.T., Fritzges, M.B., and Nüslin, K. (2006), "Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 1381-1392.
- DeJong, J.T., Mortensen, B.M., Martinez, B.C., and Nelson, D.C. (2010), "Bio-mediated soil improvement", *Ecological Engineering*, Vol.36, pp.197-210.
- De Muynck, W., De Belie, N., and Verstraete, W. (2010), "Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review", *Ecological Engineering*, Vol.36, pp.118-136.
- 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.
- Ghosh, P., Mandal, S., Chattopadhyay, B.D., and Pal, S. (2005), "Use of microorganism to improve the strength of cement mortar", *Cement Concrete Research*, Vol.35, No.10, pp.1980-1983.
- Ghosh, S., Biswas, M., Chattopadhyay, B.D., and Mandal, S. (2009), "Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar", *Cement and Concrete Composites*, Vol.31, pp.93-98.
- Kawasaki, S., Ogata, S., Hiroyoshi, N., Tsunekawa, M., Kaneko, K. and Terajima, R. (2010), "Effect of temperature on precipitation of calcium carbonate using soil microorganisms", *Journal of Japan Society of engineering Geology*, Vol.51, No.1, pp.10-18.
- Martinez, G.A., Maya, L.F., Rueda, D.A., and Sierra, G.D. (2003), *Aplicaciones estructurales de bacterias en la construccion de nuevas obras de infraestructura*, Thesis submitted in partial fulfillment for the degree of Ingeniero Civil, Estabilizacion de Suelos, Universidad Nacional de Colombia, Medellin.
- Mitchell, J.K. and Santamarina, J. C. (2005), "Biological Considerations in Geotechnical Engineering", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(10), pp.1222-1233.
- Ramachandran, S.K., Ramakrishnan, V., and Bang, S.S. (2001), "Remediation of concrete using micro-organisms", *ACI Materials Journal*, pp.3-9.
- Ramakrishnan, V., Deo, K.S., Duke, E.F., and Bang, S.S. (1999), "SEM investigation of microbial calcite precipitation in cement", *Proc. Of 21st International Conference on Cement Microscopy*, Las Vegas, NV, pp.406-414.
- Ramakrishnan, V., Bang, S.S., and Deo, K.S. (1998), "A Novel Technique for Repairing Cracks in High Performance Concrete Using Bacteria", *Proc. of The Int. Conf. on HPHSC*, Perth, Australia, pp.597-618.
- Terajima, R., Shimada, S., Oyama, T., and Kawasaki, S. (2009), "Fundamental study of siliceous biogROUT for eco-friendly soil improvement", *Journal of Japan Society of Civil Engineers C*, Vol. 65, No.1, pp.120-130.
- Tittelboom, K.V., Belie, N.D., De Muynck, W., and Verstraete, W. (2010), "Use of bacteria to repair cracks in concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.40, pp.157-166.
- Van Paassen, L.A., Ghose, R., van der Linden, T.J.M., van der Star, W.R.L., and van Loosdrecht, M.C.M. (2010), "Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogROUT experiment", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.136, No.12, pp.1721-1728.
- Whiffin, V.S. (2004), *Microbial CaCO₃ precipitation for the production of Biocement*, Ph.D. Thesis, Murdoch University, Western Australia.
- Whiffin, V.S., van Paassen, L.A., and Harkes, M.P. (2007), "Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique", *Geomicrobiology Journal*, 24, pp.417-423.

(접수일자 2011. 1. 28, 심사완료일 2011. 5. 3)