미생물의 방해석 석출 작용을 이용한 자기보수 스마트 콘크리트 개발에 관한 연구

김화중¹⁾ · 김사열²⁾ · 박성진²⁾ · 최길준¹⁾ · 천우영^{1)*}

¹⁾경북대학교 건축토목공학부 ²⁾경북대학교 생명과학부

Development of Self-Repairing Smart Concrete Using Micro-Biologically Induced Calcite Precipitation

Wha-Jung Kim,¹⁾ Sa-Youl Ghim,²⁾ Sung-Jin Park,²⁾ Kil-Jun Choi,¹⁾ and Woo-Young Chun^{1)*}

¹⁾School of Architecture and Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

²⁾School of Life Sciences, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

ABSTRACT This paper presents a study on the development of next generation smart concrete in an eco-friendly manner using micro-biologically induced calcite precipitation (MICP) via microbial biomineralization. It seems that currently, the reformation and functional improvement of concrete using MICP can be achieved using *Sporosarcina pasteurii*, which is a representative micro-organism that produces calcite precipitation. Based on previous studies on MICP the biochemical tests and crystallinity evaluation of cement using *sporosarcina pasteurii* and four additional micro-organisms from the concrete structures as identified by 16S rDNA sequence analysis were conducted. Also by applying the *Sporosarcina pasteurii* and separated four effective micro-organisms from the concrete structures to mortar, the compressive strength improvement by varying curing conditions, repair of crack were examined, and plans for future study were suggested. The effect of the application of effective micro-organisms can lead to the development of a new material that will contribute to resolution of environmental problems and facilitate repair work, and this can also serve as a new research theme in the future. In addition, the importance of this study is to use micro-organism, which is found common in concrete structures, this new microbial is not only environmentally safe but also persists in the natural environment for an extended period of time. Therefore, it seems to have a great potential to become a new environmentally low-burdened functional material.

Keywords : concrete crack, micro-organism, biomineralization, calcite(CaCO_3), self-repairing

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

미생물 기원의 암석 가운데 우리가 주목할 점은 지각 내 이산화탄소량의 많은 부분이 석회암 속에 저장되어 있다는 것이며, 이러한 석회암은 탄산칼슘(CaCO_3)으로 구성된 퇴적암으로서 구성성분인 칼슘은 지구상에 산소와 규소 다음으로 많은 것으로 알려져 있다.¹⁾ 자연환경에서 대부분의 칼슘은 탄산칼슘 광상으로 출현하고 있으며, 이것은 화학적 침전으로 이루어진 것과 유기적으로 형성된 것이 있는데, 미생물의 생화학적 작용이 동반되어 형성되는 것이 대부분이다.²⁾ 탄산칼슘으로 구성된 석

회석은 건설재료의 기본인 시멘트의 주원료로 매우 중요한 자원이며, 석회석 원광의 물리적 파·분쇄에 의해 입도만을 조절한 중질탄산칼슘(ground calcium carbonate, GCC)이 실제 산업에 널리 사용되고 있으며, 현재 콘크리트용 혼화재로 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다.^{3,4)} 최근 세계적으로 입자의 다양한 상과 형상제어 및 초미립자 분말을 통해 고기능성을 부여하기 위하여 화학적인 침전 반응을 거쳐서 합성된 침강성 탄산칼슘(precipitated calcium carbonate, PCC)에 대한 관심이 집중되고 있으나, 다양한 산업에서 응용되고 있는 탄산칼슘을 각각의 용도와 요구 물성에 만족시키기 위해서는 우선적으로 제조방법과 합성조건의 변화에 따른 상(phase) 및 형상(morphology), 입자크기의 제어를 통한 기능성 소재로의 개발에 관한 연구가 무엇보다 필요하다.⁵⁾ 또한 생산단계에서 화학적인 처리과정시 발생하는 많은 환경적인 문제점을 해결해야 한다.

따라서 이 연구는 이러한 화학적인 처리과정을 거쳐

*Corresponding author E-mail: cwy@knu.ac.kr

Received February 18, 2010, Revised March 27, 2010,

Accepted April 14, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

이용하는 방법이 아닌 환경부하저감을 위한 미생물의 생체광물형성작용(biomineralization) 중 미생물의 방해석 석출 작용(micro-biologically induced calcite precipitation, MICP)을 이용하여 환경적인 문제를 배려한 차세대 스마트 콘크리트의 개발이 목적이다.

1.2 연구의 진행 및 범위

현재 미생물의 생체광물형성작용을 이용한 광물로부터 미생물학적으로 유도된 나노 소재의 원료 물질 추출과 나노물질의 합성은 초기 연구단계에 있으며, 미생물이 환경 적응과 종족 보존을 위한 진화과정에서 발생시키는 생체 내외에 생성된 일정한 크기와 규칙성을 가진 입자를 이용하여 기능성 나노소재로 이용할 수 있는 가능성이 검토되어 왔다.⁶⁾ 뿐만 아니라 콘크리트의 개질(改質) 및 성능향상을 목적으로 미생물의 생체광물형성작용을 이용한 기술은 토양 중에 서식하고, 탄산칼슘 광상인 방해석을 석출하는 특성을 지닌 대표적 미생물인 *Sporosarcina pasteurii*에 의해 그 가능성이 제안되어 왔다.⁷⁻¹⁰⁾ 기존의 연구 동향에서는 콘크리트에 적용하기 위해 우선적으로 모르타르에 적용한 실험들이 주로 이루어졌으며, pH 9정도의 알칼리 환경을 좋아하고, 토양 중에 서식하는 *Sporosarcina pasteurii*는 pH 12의 강알칼리성인 시멘트 환경에서의 장기적인 생존력 문제가 제기되어 이를 해결하기 위한 많은 노력의 연구들이 진행되어왔다.¹¹⁻¹⁴⁾ 실제로 국내 건설 재료 분야에서 콘크리트에 관한 미생물학적 연구 중 질병을 유발시키는 유해세균, 곰팡이 등의 제거에 관한 연구는 많이 이루어졌지만, 미생물을 이용한 콘크리트의 개질 및 성능향상에 관한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 기존의 연구 동향에서 사용되었던 대표적 토양 미생물인 *Sporosarcina pasteurii*와 유사하게 탄산칼슘 광상인 방해석을 석출하는 미생물을 콘크리트 구조물로부터 탐색하여 콘크리트에 이용한다면 장기적인 측면에서 볼 때 시멘트 환경에서의 생존력이 훨씬 뛰어날 뿐만 아니라, 많은 이점이 있을 것으로 판단되어 연구를 수행하였으며, 이미 잘 알려진 표준균주 ATCC11859 : *Sporosarcina pasteurii*를 이용한 실험적 기법들을 바탕으로 콘크리트 구조물에 상생하는 유용미생물들을 탐색한 결과 그 중 탄산칼슘 광상인 방해석을 석출하는 4종의 신규 미생물자원들을 분리, 동정[KNUC401 : *Sporosarcina soli*, KNUC402 : *Bacillus massiliensis*, KNUC403 : *Arthrobacter crystallopoietes*, KNUC404 : *Lysinibacillus fusiformis*]하여 현재 기초적인 연구를 수행하였고, 각각의 미생물에 대한 특성을 발표한 바 있다.¹⁵⁾

따라서 이 연구에서는 이렇게 확보된 방해석을 석출하는 4종의 유용미생물자원들에 대한 소개와 미생물의 방해석 석출 작용에 따른 시멘트 결정성을 평가하였다. 또한 콘크리트의 개질 및 성능 향상을 목적으로 이러한 유용미생물자원들을 우선적으로 모르타르 환경에 적용하여 양생조건별 압축강도의 특성을 평가하고, 모르타르에 인

위적 균열을 만들어 미생물의 방해석 석출 작용에 따른 균열의 충전 가능성을 검토하였으며, 향후 행해져야 할 연구의 방향성이나, 발전 가능성에 대해 고찰하였다.

2. 미생물의 방해석 석출 작용(MICP)

2.1 MICP의 이용

원시지각은 화성암 또는 운석물질의 집합체였으며, 미생물은 지구의 지표에서 발생하는 암석의 풍화, 광물의 용해, 토양의 형성 등 여러 가지 지구화학적 과정에 있어서 중요한 역할을 담당하여 왔으며, 철을 포함한 다양한 금속의 침출 그리고 유기물 순환 등과 같은 다양한 생화학적 작용을 통해 지구화학적정인자와 영향을 주고 받은 것으로 알려져 있다.¹⁶⁾ 그 중 석회암은 대륙붕에서 대양저까지의 광범위한 퇴적분지를 형성하고 있으며, 이러한 지구화학적 퇴적과정에 따라 지각 내 이산화탄소량의 많은 부분이 석회암 속에 저장되어 왔다. 석회석은 탄산칼슘으로 구성된 퇴적암으로서 구성성분인 칼슘은 지구상에 산소와 규소 다음으로 많으며, 자연환경에서 대부분의 칼슘은 탄산칼슘 광상으로 출현하고 있다. 탄산칼슘은 결정형태에 따라 크게 방해석(calcite), 아라고나이트(aragonite), 바테라이트(vaterite) 3종류로 구분되며, 현재 주로 필러(충전제)의 원료로 사용되고 있다. 자연환경에서의 탄산칼슘 석출과정은 화학적인 과정과 이것이 연속적이고 지속적으로 발생할 경우 모두 미생물학적인 과정이 동반되는 생화학적 반응에 의해 일어나는 것으로서 미생물의 생체광물형성작용과 병행해서 발생된다. 이 연구에서는 미생물의 방해석 석출작용을 이용하는 것으로 방해석을 석출하는 대표적 미생물인 ATCC11859 : *Sporosarcina pasteurii*외에 Table 1과 같이 콘크리트 구조물에서 탐색하여 16S rDNA 염기서열 분석법에 의해 동정된 4종의 미생물들을 추가적으로 이용하였다. 이러한 미생물 동정 방법 중 16S rDNA 염기서열 분석법은 기존에 알려져 있는 미생물의 분석된 데이터에 의하여 균주간의 상호 유사도(similarity)와 진화적 거리를 계산하여 분석되는데, 일반적으로 미생물은 1,300~1,400 bp의 염기배열을 분석하여 동정(identification)한다.

균주간의 상호 유사도는 Table 2의 미생물 상호간의 진화적 거리 계산법에 의해 판정되었으며, 생물간의 진화적 거리는 진화과정에서 각각의 유전자에 대응하는 염기에 일어난 변형의 수에 비례하며, 동일 장소에서 여러번 변

Table 1 List of new effective micro organisms considered in this study

No.	Name	Similarity (%)
KNUC401	<i>Sporosarcina soli</i>	98.83
KNUC402	<i>Bacillus massiliensis</i>	96.60
KNUC403	<i>Arthrobacter crystallopoietes</i>	99.85
KNUC404	<i>Lysinibacillus fusiformis</i>	100.00

Table 2 The calculation method of micro-biological evolution distance

$K = -(1/2) \ln \{ (1-2P-Q)(1-2Q) / 1/2 \}$
K : micro-biological evolutionary distance
P, Q : denotes the replacement ratio for each metastasis type and changeover type among rDNA replacement ratios

이가 일어나는 경우가 있고, 또한 전이형 변이(푸리린에서 피리미딘, 또는 피리미딘 간의 거리)는 전환형의 변이(푸린에서 피리미딘, 또는 그 역으로 전환)에 의하여 일어나기 쉬운 것으로 알려져 있다.¹⁷⁾ 이 식은 이것을 고려하여 만들어 진 것이며, 미생물학 관련 보고에 따르면 인간이 지금까지 순수 동정한 균주는 4,000여종에 지나지 않아 균주간의 상호 유사도가 98.5% 이하 일 때 신종일 가능성이 높은 것으로 보고 있다. 이 연구에서 콘크리트 구조물로부터 탐색된 KNUC 402균주의 경우 *Bacillus massiliensis*와 균주간의 상호 유사도가 96.6%로 판정되어 신종일 가능성이 높은 것으로 확인되었다. 현재 건설재료 분야에서 이러한 미생물을 이용한 연구는 아직 전무한 실정이며, 이 연구를 통해 탐색된 4종의 신규 유용미생물자원들은 향후 연구의 기초적인 방향성을 제시함과 동시에 환경적 측면을 배려한 학문적 가치를 높일 것으로 기대된다.

2.2 MICP의 메커니즘

미생물학적으로 유도된 방해석 석출(MICP)의 메커니즘은 매우 복잡하다. 이는 선행의 연구에서도 언급한 바 있으나,¹⁸⁾ 좀 더 구체적으로 설명하면 일반적으로 자연 환경에서의 생화학적인 CaCO_3 의 석출은 미생물의 생체 광물형성작용과 병행해서 생기는 경우가 많으며, 이러한 미생물들은 자신의 표면에 CaCO_3 를 석출시켜 외부환경으로부터 자신의 몸을 보호한다. 이러한 생체광물형성작용은 미생물 주변의 환경으로 부터 Ca^{2+} 를 포함한 다양한 (+)양이온들(마그네슘, 나트륨, 칼륨, 칼슘 등의 원소)을 유인하여 자신의 세포막(cell membrane)에 결합시켜 CaCO_3 석출반응에 기여한다. 여기서 석출된 CaCO_3 는 유기물(Cell)과 무기물(CaCO_3)이 서로 결합되어 합성된 Cell- CaCO_3 로서 미생물의 지속적인 작용에 따라 결정질을 이루게 된다. 여기서 석출된 CaCO_3 는 순수 화학적 개념의 석출이 아닌 미생물 작용이 동반되는 생화학적 개념의 석출 반응이다. Fig. 1의 *Sporosarcina pasteurii*의 세포막은 (-)전하를 띠며, 주위 환경에서 Ca^{2+} 를 포함한 다양한 (+)양이

Fig. 1 Micro-biologically induced calcite precipitation by *Sporosarcina pasteurii*

Table 3 Mechanism of micro-biologically induced calcite precipitation by micro-organism in Urea- CaCl_2 medium

$\text{Ca}^{2+} + \text{Cell} \rightarrow \text{Cell} \cdot \text{Ca}^{2+}$
$\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^- + \text{NH}_3 \rightleftharpoons \text{NH}_4\text{Cl} + \text{CO}_3^{2-}$
$\text{Cell} \cdot \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{Cell} \cdot \text{CaCO}_3 \downarrow$

온을 유인해서, 자신의 세포막에 CaCO_3 를 석출시킨다. 이 연구의 선행 연구에서 기존의 연구동향을 토대로 콘크리트의 개질 및 성능향상을 목적으로 많이 연구되었던 토양 중에 주로 서식하고, 극한의 환경에서는 내생포자를 형성하는 *Sporosarcina pasteurii*는 우레아(urea)의 환경에서 미생물의 신진대사 작용에 따라 우레아제(urease)를 생산하고, 그 과정에서 CaCO_3 석출 반응에 기여하는 것을 Urea- CaCl_2 medium에서 확인할 수 있었다. 여기서 우레아제는 우레아를 가수분해하여 암모니아와 이산화탄소를 생성하는 반응에 관계하는 효소로서 요소분해효소라고도 하는데, 이러한 우레아제의 역할은 우레아의 분해 작용으로 인해 생성된 암모니아에 의해 주변의 pH를 상승시키고, 또한 이산화탄소를 발생시키면서 CaCO_3 석출에 유리한 환경을 만든다. 여기서 언급되는 Urea- CaCl_2 medium에서의 미생물 표면에 발생하는 CaCO_3 석출에 대한 생화학적인 석출 메커니즘은 Table 3과 같으며, 이 메커니즘은 우레아제가 탄산칼슘 석출에 큰 영향을 미치는 주요인이다. 이 연구에서 앞으로 계속적으로 사용될 배지조성 또한 미생물들과의 상호작용을 고려한 것이다.

이러한 생화학적 CaCO_3 석출의 메커니즘은 매우 복잡하므로 콘크리트의 역학적 성능 향상에 기여하는 CaCO_3 의 석출은 미생물의 농도, 이온강도(수용액 중에 포함된 이온량의 총합), 수용액의 pH에 영향을 받을 수 있다.

3. 미생물의 방해석 석출 작용이 시멘트 결정상에 미치는 영향성 평가

3.1 우레아 환경에서의 방해석 석출 반응성 검토

선행 연구에서 pH 9 정도의 알칼리 환경을 좋아하며, 내생포자(endospore)를 형성하는 *Sporosarcina pasteurii*는 우레아 환경에서 미생물의 신진대사 작용에 의해 우레아제 효소를 생산하고, 그 과정에서 방해석 석출 반응에 기여하는 특성을 파악하였다. 이 실험에서는 동일한 우레아 환경에서 4종의 신규 유용미생물들의 방해석 석출 반

Table 4 The composition of Urea- CaCl_2 medium

Urea- CaCl_2 medium composition
* Make up to 1L of distilled water
1) Nutrient Broth[NB] : 3 g (0.3%)
2) Ammonium chloride[NH_4Cl] : 10 g (1%)
3) Sodium bicarbonate[NaHCO_3] : 2.12 g (CO_3^{2-} 25.2 mM)
- Adjusting pH concentration to 6.0 with shaking
- Autoclave for 15 min. at the 121°C
4) Urea[$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$] : 20 g (2%)
5) Calcium chloride[CaCl_2] : 3.70 g (Ca^{2+} 25.2 mM)

응성을 알아보기 위해 Urea-CaCl₂ medium이 사용되었다.

Urea-CaCl₂ medium의 제조시 화학적 조성은 Table 4의 조성표와 같이 증류수 1L에 미생물의 성장에 있어 영양분이 되는 분말 상태의 1)NB(nutrient broth)와 미생물의 신진대사 작용에 따른 탄산칼슘 석출 반응시 작용하는 수용성 물질인 2)염화암모늄(ammonium chloride)과 3)중탄산나트륨(sodium bicarbonate), 그리고 4)요소(urea)와 5)염화칼슘(calcium chloride)을 각각 포함하고 있다.

이 실험에서 사용된 콘크리트 구조물에서 분리한 4종의 신규 유용미생물들은 Fig. 2의 고체배지인 Urea-CaCl₂ agar medium에서 이전의 선행 연구에 주로 사용되었던 *Sporosarcina pasteurii*와 동일한 환경에서 CaCO₃ 결정을 지닌 광물을 석출하는 것이 현미경을 통해 확인되었다.

Urea-CaCl₂ medium에서 미생물에 의한 탄산칼슘 석출 반응은 1차적으로 염화칼슘이 수용액 상태로 이온화된 칼슘(Ca²⁺)이 중탄산나트륨에서 분리된 중탄산염(HCO₃⁻)과 만나 화학적 반응에 의해 일부 탄산칼슘(CaCO₃)과 수소(H⁺)이온의 형태로 일부 녹아있게 된다[Ca²⁺ + HCO₃⁻ → CaCO₃ + H⁺]. 여기서는 순수 화학적인 반응에 의해서 CaCO₃와 H⁺가 생성되고, 탄산염(CO₃²⁻)은 CaCO₃ 석출반응 전에는 주로 중탄산염(HCO₃⁻)의 형태로 녹아있게 되는데, 이 반응에서는 광물의 결정성은 없다.

2차적으로 미생물에 의한 우레아제 생산과정 중 우레아 가수분해 작용에 따라 생성된 암모니아(NH₃)에 의해 주변의 pH를 상승시키고, 또한 이산화탄소(CO₂)를 발생시키면서 방해석(CaCO₃)의 석출 반응을 촉진시킨다. 미생물에 의한 방해석 석출의 바탕이 되는 Urea-CaCl₂ medium에서 염화암모늄(NH₄Cl)의 이용은 탄산염(CO₃²⁻)과 만나 화학적 반응에 의해 일부 염화물(Cl⁻)이온, 중탄산염(HCO₃⁻), 암모니아(NH₃)의 형태로 수용액상에 녹아있게 되는데, 이 반응은 역반응도 가능하기 때문에 상호 반

복적으로 이루어진다[Cl⁻ + HCO₃⁻ + NH₃ ⇌ NH₄Cl + CO₃²⁻]. 여기서 MICP 즉, 미생물의 방해석 석출 작용은 미생물의 신진대사 작용이 동반되는 것으로서 일반적으로 발생하는 화학적인 방법보다 훨씬 더 복잡한 과정이며, Urea-CaCl₂ medium에서 이러한 미생물들은 우레아제 생산과정 중 우레아의 가수분해 작용을 통해 암모니아를 생성시켜 주위 환경을 pH 9정도의 알칼리성으로 바꾸고, 이산화탄소(CO₂)를 발생시켜 주위 환경으로부터 자신을 보호하기 위해 자신의 세포막에 CaCO₃ 결정을 지닌 방해석을 석출시킨다. 고체배지인 Urea-CaCl₂ agar medium에서 형성되는 CaCO₃ 결정의 형상(morphology)은 Fig. 3의 SEM 이미지에서처럼 미생물의 신진대사 작용에 의해 결합되어 완성된 구형의 입자 형상으로 확인되었다.

1 μm의 배율로 자세히 확대하여 관찰한 이미지를 보면 미생물에 의해 생성된 1 μm크기의 아주 미세한 결정들이 서로 결합된 구조를 이루고 있다. 이러한 미생물에 의해 생성된 광물은 탄산칼슘 광상인 방해석 결정 상(phase)으로 나타나는데, 이것은 한천(agar)이 함유된 고체배지에서 가능한 입자의 형태이며, 수용액상태의 액체배지에서는 일정한 형상인 구형의 형태로 관찰되기는 조금 어려우며, 각기 다른 형태로 관찰되기도 한다. 그 이유는 액체 상태에서는 미생물 상호간의 활발한 활동으로 인해 미생물이 군집을 이루면서 성장하기에는 조금 곤란한 환경이기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 미생물에 의한 시멘트 결정성의 평가

이 실험은 미생물의 방해석 석출 작용을 이용한 것으로 우레아 환경에서 미생물의 신진대사 작용에 따른 시멘트 결정성을 평가한 실험이며, 앞으로 실험할 모르타르 적용에 있어서 선행적으로 평가되어야 할 기초실험이다. 실험방법은 Urea-CaCl₂ medium에서 미생물이 석출시키는 광물의 결정을 확인하기 위해 Table 5의 실험계획에 따라 선행 연구에서 사용되었던 *Sporosarcina pasteurii*와 콘크리트 구조물에서 분리한 4종의 유용미생물들을 대

Fig. 2 Variety biomass of micro-biologically induced calcite precipitation

Fig. 3 SEM image of mineral crystals induced in Urea-CaCl₂ agar medium by micro-organisms

Table 5 The experimental composition of micro-biologically induced calcite precipitation

No.	Composition	Experimental environment
		Different types of biomass
1	Urea-CaCl ₂ medium	-
2		<i>Sporosarcina pasteurii</i> (ATCC11859)
3		<i>Sporosarcina soli</i> (KNUC401)
4		<i>Bacillus massiliensis</i> (KNUC402)
5		<i>Arthrobacter crystallopoietes</i> (KNUC403)
6		<i>Lysinibacillus fusiformis</i> (KNUC404)

*Micro-organism to 500 ml of Urea-CaCl₂ medium

*Incubation at 30°C and 150 rpm shaking incubator

상으로 각각 500 ml의 액체 상태인 Urea-CaCl₂ medium을 제조하여 개별 접종을 실시하고, 온도 30°C, 교반속도 150 rpm으로 설정된 shaking incubator안에서 5일간 배양시켜 여과용 필터인 0.45 μm의 멤브레인 필터를 통해 여과하여 석출된 광물의 결정을 Fig. 4의 X-ray diffraction (XRD) 분석을 통해 광물의 결정구조를 확인하였다.

또한 우레아 환경에서 미생물의 신진대사 작용에 따른 시멘트 결정성을 평가하기 위하여 Table 6의 실험계획에 따라 500 ml의 액체 상태인 CaCl₂를 제외한 Urea medium을 만들어 각각 시멘트 15 g 정도씩 투입하고, 서로 다른 미생물들을 개별 접종하여 Table 5의 실험계획과 동일한 방법으로 5일간 배양하고, 여과를 통해 얻어진 시멘트 결정을 Fig. 5의 X-ray diffraction(XRD) 분석을 통해 시멘트 결정성을 평가하였다. Table 5의 실험방법에 따라 *Sporosarcina pasteurii*와 콘크리트 구조물에서 분리한 4종의 미생물들에 의해 석출된 광물의 결정은 Fig. 4의 XRD 분석을 통해 모두 탄산칼슘 광상인 방해석의 결정 구조로 확인되었으며, 미생물이 없는 순수 Urea-CaCl₂

Table 6 The experimental composition of cement in urea medium for micro-biologically induced calcite precipitation

No.	Material	Experimental environment	
		Composition	Different types of biomass
1	Cement	-	-
2		Distilled water	-
3		Urea medium	-
4			<i>Sporosarcina pasteurii</i> (ATCC11859)
5			<i>Sporosarcina soli</i> (KNUC401)
6			<i>Bacillus massiliensis</i> (KNUC402)
7			<i>Arthrobacter crystallopoietes</i> (KNUC403)
8			<i>Lysinibacillus fusiformis</i> (KNUC404)

* Urea medium composition to 500 ml of distilled water

1) NB(nutrient broth) 1.5 g, NH₄Cl 5 g, NaHCO₃ 1.06 g,

- Adjusting pH concentration to 6.0 with shaking

- Autoclave for 15min. at the 121°C

2) Urea(CO(NH₂)₂) 10 g

- Add 15 g cement

- Micro-organism to 500 ml of urea medium

- Incubation at 30°C and 150 rpm shaking incubator

medium에서는 배지조성 중 미생물의 영양분이 되는 NB(nutrient broth)에 함유된 hydroxylapatite 성분이 그대로 여과되어 석출된 광물은 확인되지 않았다. 따라서 여기서 석출된 방해석의 결정은 순수 미생물 작용에 의한 광물의 결정임을 확인 할 수 있다. 또한 우레아 환경에서 미생물의 신진대사 작용에 따른 시멘트 결정성을 평가한 실험에서는 Table 6의 실험방법에 따라 미생물을 처리하지 않은 시멘트와 미생물을 처리한 시멘트의 경우에 각각의 결정구조는 Fig. 5의 XRD분석을 통해 부분적으로 많은 차이를 보이는 것으로 확인되며, 우레아의 환경에서 우레아제를 생산하고, 방해석의 석출 반응에 기여하는 *Sporosarcina pasteurii*와 콘크리트 구조물에서 분리한 4종의 미생물들은 모두 시멘트 결정학적 구조를 미생물의 신진대사 작용에 의해 방해석의 결정 구조로 바꾸는 특성을 확인하였다.

Fig. 6은 액체상태의 Urea-CaCl₂ medium에서 순수 미생물 작용에 의해 석출된 방해석의 결정을 SEM을 통해 관찰한 것이며, Fig. 7은 CaCl₂를 제외한 우레아 환경인 액체상태의 Urea medium에서 미생물의 신진대사 작용에 따른 시멘트 결정의 형태를 SEM을 통해 관찰한 것이다.

액체 상태인 Urea-CaCl₂ medium에서의 방해석 석출 반응에서 미생물의 영향에 의해 석출되는 상(phase)과 형상(morphology) 및 입자 크기는 여러 가지 조건 즉, 용액의 조성, pH, 온도, 과포화도, 교반속도, 첨가 이온 등에 따라 달라진다. 용액에서 합성되는 방해석은 대부분 방추형(정사각뿔), 연쇄상(사슬처럼 생긴 모양), 능면체(마

Fig. 4 XRD analysis of mineral crystals induced in Urea-CaCl₂ medium by micro-organisms

Fig. 5 XRD analysis of cement in urea medium by micro-biologically induced calcite precipitation

름모로 둘러싸인 다면체)형의 3가지 외형으로 주로 나타난다. 일반적으로 CO_3 의 각 산소원자는 하나의 탄소원

Fig. 6 SEM image of calcite crystals induced in Urea- CaCl_2 medium by micro-organisms

Fig. 7 SEM image of cement crystals induced in urea medium by micro-organisms

자와 근접한 양이온 층(layer)의 2개의 Ca원자와 결합된다. 그러나 여기서 석출된 미생물에 의한 방해석과 미생물에 의한 시멘트 결정의 구조는 모두 능면정 구조로 격자상수 $a = 4.99\text{\AA}$, $c = 17.06\text{\AA}$ 이다. Ca원자와 CO_3 가 서로 번갈아 가면서 생성된 층(layer)을 이루고 있고, 한 층 안의 CO_3 로부터의 6개의 산소원자와 결합된 약간 왜곡된 형태로 확인되었다.

4. 미생물 모르타르의 압축강도 평가

4.1 실험계획 및 방법

이 실험은 미생물을 모르타르 환경에 적용하여 미생물의 방해석 석출작용에 따른 모르타르 압축강도의 특성을 평가한 실험이다. 실험 방법은 Table 7의 모르타르 배합 조성에 따라 실시하였으며, 모르타르 시험체의 규격은 $50.8 \times 50.8 \times 50.8$ mm짜리를 사용하였고, 시험체 1SET(3EA) 제작시 투입된 재료는 보통포틀랜드시멘트 218 g, 1.2 mm 체를 통과한 강모래 654 g, 배합수 120 ml가 사용되었다.

이 실험에서 사용된 배합수는 Table 8의 배합수 조성에 따라 증류수와 인산완충액을 각각 사용하였으며, 미

Table 7 The experimental composition of mortar mixture

Group	Name	Composition	Specimens sum
Control group	W	- Cement 1,308 g	18EA (6SET)
	Pb		18EA (6SET)
Experimental group	SP	- Sand 3,924 g,	18EA (6SET)
	401	- Mixing water 720 ml to 18EA(6SET) of mortar specimens	18EA (6SET)
	402		18EA (6SET)
	403		18EA (6SET)
	404		18EA (6SET)
Total			126EA (21SET)

*Mortar specimens size : $50.8 \times 50.8 \times 50.8$ mm

*Curing condition : Air, Urea-CaCl₂ medium, Water (Thermo-hydrostat at 25°C and 50% humidity)

Table 8 The experimental composition of mortar mixing water

Group	Name	Micro-organism/Phosphate buffer (7.6×10^3 cells/ml)
Control group	W	Only distilled water
	Pb	Only phosphate buffer
Experimental group	SP	<i>Sporosarcina pasteurii</i> (ATCC11859)
	401	<i>Sporosarcina soli</i> (KNUC401)
	402	<i>Bacillus massiliensis</i> (KNUC402)
	403	<i>Arthrobacter crystallopoietes</i> (KNUC403)
	404	<i>Lysinibacillus fusiformis</i> (KNUC404)

*Sodium phosphate buffer composition to 100 ml of distilled water contain 1 M Na₂HPO₄ 77.4 ml and 1 M NaH₂PO₄ 22.6 ml
- pH : 7.0, Ionic strength : 0.1 M
- Make up to 1 L with distilled water

생물 적용에 있어서는 증류수 대신 인산용액에 인산염을 첨가하여 만든 pH 7짜리 인산완충액(phosphate buffer)을 제조하여 사용하였다.

일반적인 미생물학 실험에서 사용되는 인산완충액은 생체물질이 존재하던 환경의 pH를 일정하게 유지시켜주는 특성이 있어서 널리 이용되고 있으며, 미생물을 모르타르 배합에 적용함에 있어서 물 대신 인산완충액을 사용한 가장 큰 이유는 모르타르 배합 적용에 있어서 시멘트의 수화반응시 발생하는 수화열과 높은 pH 상승으로 인해 발생할 수 있는 미생물 주위의 환경적 변화를 어느 정도 억제하고, 완충시켜주기 위한 목적으로 사용하였다. 이 방법은 순수 미생물에 의한 압축강도의 특성을 평가하기 위해 최대한 사실적인 실험결과를 얻기 위함이다. 적용한 서로 다른 미생물들은 각각의 흡광도를 측정하여 농도를 일정하게 약 7.6×10^3 (cells/ml)으로 유지시켰으며, 미생물을 넣지 않은 모르타르 시험체는 순수 증류수와 제조한 인산완충액을 이용하여 혼합한 것을 대조군으로서 사용하였다.

모든 시험체들은 각각 6SET(18EA)를 제작하여 하나의 그룹으로 정하고, 총 7그룹으로 나누어 총126개의 모르

타르 시험체를 제작하였다. 미생물이 들어가거나 들어가지 않은 모든 모르타르 시험체는 24시간 후에 탈형하였고, 온도 25°C 습도 50%로 일정하게 유지시킨 항온항습기에서 기중 양생, Urea-CaCl₂ medium 양생, 수중양생으로 나누어 각각 28일 동안 양생하였다. Urea-CaCl₂ medium 양생의 경우 1리터의 양생수(水)를 만들기 위해 증류수 1L당 NB(nutrient broth) 3 g, NH₄Cl 10 g, NaHCO₃ 2.12 g 첨가하여 잡균이 들어가지 않게 121°C에서 15분간 멸균처리하고, Urea(CO(NH₂)₂) 20 g, CaCl₂ 3.70 g을 첨가하여 완성된 수용액을 양생수로 사용하였으며, 28일 동안 청결한 상태를 유지시켜 주기 위해 7일마다 새것으로 교환하였다. 압축강도의 측정은 7일, 28일로 정하여 측정하였으며, 압축강도 측정시 모르타르 시험체의 표면은 완전히 말린 상태에서 Fig. 8과 같이 압축강도를 테스트 하였다.

4.2 실험 결과 및 분석

양생조건별 압축강도 테스트를 실시한 결과 전반적으로 대조군으로 사용된 순수 증류수를 배합수로 사용한 시험체와 인산완충액을 배합수로 사용한 시험체의 경우 비교적 유사한 압축강도 결과를 보였다. 이 실험결과로 볼 때 미생물을 모르타르에 적용하기 위해 사용된 인산완충액은 모르타르의 압축강도 변화에 큰 영향을 주지 않은 것으로 확인되어지며, 모르타르에 미생물을 적용함에 있어서 인산완충액의 이용은 최대한 사실적인 실험결과를 얻기 위해 적합한 것으로 판단된다.

Fig. 8 Calcite precipitation caused by micro-organism on surface and inside **Fig. 9** Compressive strength values of tests from air curing with mortar specimens mixed with different types of biomass

Fig. 9의 기중양생을 실시한 모르타르 시험체의 경우 대조군인 순수 증류수와 인산완충액을 배합수로 사용한 시험체에 비해 *Sporosarcina pasteurii*(ATCC11859)와 *Lysinibacillus fusiformis*(KNUC404)를 적용한 모르타르 시험체는 오히려 압축강도가 저하되었고, 그 외 나머지 미생물들은 모르타르 압축강도 향상에 어느 정도 기여한 것으로 확인되었다. 그 중 *Bacillus massiliensis*(KNUC402)를 적용한 모르타르 시험체가 압축강도 결과가 가장 우수한 것으로 확인되었으며, 기중 양생을 실시한 대조군인 순수 증류수로 배합한 일반 모르타르 시험체와 압축강도를 비교하였을 때 재령 7일에서는 24.7%의 압축강도 증진을 보였으며, 재령 28일에서는 8.9%의 압축강도 증진을 보인 것으로 보아 초기강도의 증진에는 확실한 효과를 보인 것으로 확인되었지만 재령 7일 이후에는 미생물의 활동에 환경적인 문제가 있어 재령 28일 압축강도에는 큰 영향을 주지 못한 것으로 판단된다.

Fig. 10의 Urea-CaCl₂ medium 양생을 실시한 모르타르 시험체의 경우 대조군인 순수 증류수와 인산완충액을 배합수로 사용한 시험체와 비교하면 전반적으로 미생물을 적용한 모든 모르타르 시험체의 압축강도가 향상되는 결과를 보였다. 이는 미생물의 서식환경과 잘 부합되고, 미생물 활동에 있어 환경적인 문제가 잘 고려된 양생방법으로 모르타르 시험체의 압축강도 증진에 보다 효과적인 실험결과를 얻을 수 있었다. 이러한 Urea-CaCl₂ medium 양생에서는 *Arthrobacter crystallopoietes*(KNUC403)를 적용한 모르타르 시험체가 압축강도 결과가 가장 우수한 것으로 확인되었으며, 기중 양생을 실시한 경우와는 다소 다른 압축강도 양상을 보였다. Urea-CaCl₂ medium 양생을 실시한 대조군인 순수 증류수로 배합한 일반 모르타르 시험체와 압축강도를 비교하면 재령 7일에서는 33.3%의 압축강도 증진을 보였고, 재령 28일에서는 40.3%의 압축강도 증진을 보인 것으로 확인되었다.

Fig. 11의 수중 양생을 실시한 모르타르 시험체의 경우 대조군인 순수 증류수와 인산완충액을 배합수로 사용한 시험체와 비교하면 Urea-CaCl₂ medium 양생을 실시한 경우와 유사하게 미생물을 적용한 모든 모르타르 시험체의 압축강도가 향상되는 결과를 보였다. 이러한 수중 양

Fig. 11 Compressive strength values of tests from water curing with mortar specimens mixed with different types of biomass

생은 기중 양생을 실시한 경우와 비교하였을 때 모르타르 압축강도 증진에 있어서 수중 양생이 미생물의 신진대사 작용에 따른 압축강도 증진에 효과적인 결과로 확인되었고, 수중 양생에서도 Urea-CaCl₂ medium 양생과 동일하게 *Arthrobacter crystallopoietes*(KNUC403)를 적용한 모르타르 시험체의 압축강도가 가장 우수한 것으로 확인되었다. 수중 양생의 경우 대조군인 순수 증류수로 배합한 일반 모르타르 시험체와 압축강도를 비교하였을 때 재령 7일에서는 38.9%, 재령 28일에서는 27.0%의 압축강도 증진을 보인 것으로 확인되었다.

5. 미생물의 방해석 석출 작용에 따른 모르타르 균열의 충전 가능성 검토

5.1 실험계획 및 방법

이 실험은 미생물의 방해석 석출작용을 이용하여 모르타르에 인위적으로 만들어진 균열의 충전성을 검토한 실험이다. 시편의 제작은 지름 50 mm짜리 페트리접시(petri dish)에 시멘트 30 g, 모래 10 g, 증류수 15 g을 넣어 두께 0.5 cm 정도가 되게 타설하고, 인위적 균열을 만들기 위해 타설 직후 온도 60°C의 건조기 안에서 10시간동안 건조시켜 제작하였다. 인위적 균열의 폭과 깊이는 일정하게 유지시킨 상태에서 발생되기 어려우므로, 많은 차이를 보였다. 이렇게 제작된 시편은 7일간 수중양생을 실시하여 표면과 균열에 남아있는 미수화 시멘트 슬러리를 제거하였고, 균열의 충전성 검토에 사용될 시편의 선정은 균열 폭이 최소 머리카락 두께인 0.1 mm에서 최대 0.7 mm까지 다양한 상태에서 임의로 선정하였다. 이렇게 선정된 균열에 주입된 액체상태의 수용액 조성은 Table 9와 같으며, 모르타르 균열부의 주입 방법은 최대 100 µl 까지 주입 가능한 피펫(pipette)을 이용하여 균열부를 중심으로 액체상태의 수용액을 1일 100 µl씩 5회 주입하고, 이러한 과정을 3일 동안 반복 실시하였으며, 온도 30°C, 습도 60%로 유지시킨 항온항습기안에 두어 모르타르 균열의 충전 가능성을 검토하였다. 모르타르 균열의 충전성 평가는 현미경을 이용하여 관찰하였고, 시편

Fig. 10 Compressive strength values of tests from Urea-CaCl₂ curing with mortar specimens mixed with different types of biomass

Table 9 The experimental composition of solution injected in mortar crack

Group	Name	Micro-organism/Urea- CaCl_2 medium (7.6×10^3 cells/ml)
Control group	W	Only distilled water
	UC	Only Urea- CaCl_2 medium
Experimental group	SP	<i>Sporosarcina pasteurii</i> (ATCC11859)
	401	<i>Sporosarcina soli</i> (KNUC401)
	402	<i>Bacillus massiliensis</i> (KNUC402)
	403	<i>Arthrobacter crystallopoietes</i> (KNUC403)
	404	<i>Lysinibacillus fusiformis</i> (KNUC404)

*Micro-organism to 30 ml of Urea- CaCl_2 medium

*Shaking incubation to adjusting pH concentration to 6.0 with micro-organism

● Incubated effective micro-organisms injection from calcite precipitation by Urea- CaCl_2 medium

Fig. 12 Repairing of mortar crack by incubated effective micro-organisms injection from Urea- CaCl_2 medium

하나당 동일한 위치에서 $\times 40$ 배의 배율로 20일간 관찰되었다.

5.2 실험 결과 및 분석

실험 결과 Fig. 12와 같이 Urea- CaCl_2 medium에 배양하여 미생물을 주입한 모르타르 균열은 미생물의 방해석 석출 작용에 따라 균열의 충전이 어느 정도 효과적이었다. 이러한 미생물을 이용한 균열의 충전은 미생물이 수분과 산소가 있는 곳에서 더 활동적으로 잘 자리기 때문에 상대적으로 균열 폭이 크고 깊은 곳보다는 균열 폭이 작고 얇은 곳에서 더 효과적인 것으로 확인되었다.

6. 결론 및 향후과제

이 연구에서는 미생물의 생체광물형성작용 중 미생물

의 방해석 석출 작용(MICP)을 이용하여 환경적인 문제를 배려한 차세대 스마트 콘크리트의 개발을 목적으로 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 미생물의 방해석 석출 작용이 시멘트 결정상에 미치는 영향성을 평가한 실험에서는 우레아의 환경에서 우레아제를 생산하고, 탄산칼슘 광상인 방해석을 석출 하는 *Sporosarcina pasteurii*와 콘크리트 구조물에서 분리한 4종의 신규 미생물자원들은 모두 우레아의 환경에서 시멘트 결정학적 구조의 상(phase)을 방해석(calcite)으로 만드는 특성이 확인되었고, 결정 구조는 모두 격자상수 $a = 4.99\text{\AA}$, $c = 17.06\text{\AA}$ 의 능면정 구조로서 Ca원자와 CO_3 가 서로 번갈아 가면서 생성된 층을 이루고 있으며, 한 층 안의 CO_3 로부터 6개의 산소원자와 결합된 구조의 약간 왜곡된 형태로 확인되었다.
- 2) 미생물의 방해석 석출 작용에 따른 양생 조건별 모르타르 압축강도를 평가한 실험에서는 기중양생의 경우 *Bacillus massiliensis*(KNUC402)를 적용한 모르타르 시험체가 일반 모르타르 시험체의 압축강도에 비해 재령 7일 24.7%, 재령 28일 8.9%의 압축강도 증진을 확인하였다. 또한 Urea- CaCl_2 medium 양생과 수중 양생을 실시한 모르타르 시험체의 경우 기중양생에 비해 전반적으로 미생물을 적용한 대부분의 모르타르 시험체의 압축강도가 향상되는 결과로 확인되었으며, 그 중 *Arthrobacter crystallopoietes* (KNUC403)를 적용한 모르타르 시험체의 압축강도는 일반 모르타르 시험체의 압축강도와 비교하여 Urea- CaCl_2 medium 양생시 재령 7일 33.3%, 재령 28일 40.3%의 압축강도 증진을 보였으며, 수중 양생시 재령 7일 38.9%, 재령 28일 27.0%의 압축강도 증진을 확인하였다. 여기서 주목할 점은 Urea- CaCl_2 medium에서 양생한 모르타르 시험체의 압축강도가 미생물을 적용하지 않은 대조군에 비해 상당히 증가하는 것을 확인 할 수 있으며, 이는 Urea- CaCl_2 medium의 이온강도가 모르타르의 강도에 어느 정도 영향을 미치고, 모르타르의 전체적인 강도의 증가는 미생물에 의한 유기물질의 적절한 양의 존재로 인한 증가로 판단된다. 반면 미생물을 적용하지 않은 대조군의 경우 Urea- CaCl_2 medium에서 양생한 것은 수중양생을 실시한 대조군의 재령 28일의 모르타르와 비교하면 압축강도가 다소 떨어지는 양상으로 확인되는 것으로 보아 일반 모르타르의 경우 염화물 이온이 압축강도에 부정적인 영향을 초래할 가능성이 있는 것으로 판단된다. 또한 미생물을 높은 pH환경의 모르타르에 적용함에 있어서 물 대신 인산완충액의 이용은 강알칼리성인 시멘트 환경에서 미생물의 성장환경 조성에 있어 물보다 효과적이었으며, 미생물의 방해석 석출 작용에 따른 압축강도의 증진은 모르타르에 적용한 각각의 미생물들 상호간에 정확한 역할을 이해하기 위해서 좀

더 많은 조사가 필요할 것으로 판단된다.

- 3) 미생물의 방해석 석출 작용에 따른 모르타르 균열의 충전 가능성 검토 실험에서는 인위적인 모르타르 균열에 Urea-CaCl₂ medium에 배양한 미생물의 주입을 통한 균열의 충전은 어느 정도 효과적이었다. 이러한 미생물에 의한 균열의 충전은 미생물이 수분과 산소가 있는 곳에서 더 활동적으로 잘 자라기 때문에 상대적으로 균열 폭이 크고 깊은 곳보다는 균열 폭이 작고 얇은 곳에서 더 효과적인 것으로 확인되었으며, 미생물이 성장하는 동안 균열에 석출된 방해석은 압축강도의 증가를 위한 주요 물질인 것으로 판단된다.

이러한 미생물의 적용에 따른 효과는 보수 기능뿐만 아니라 환경 문제를 배려한 새로운 재료로서의 개발로 이어져 향후 더욱 더 중요한 연구주제의 하나가 될 것으로 기대된다. 또한 이 연구의 큰 의미는 실제 콘크리트 구조물에 상생하고, 자연환경에서 방해석을 석출하는 미생물을 이용한다는 것이며, 긴 시간동안 자연환경에서 살아남은 이 미생물들은 환경적으로 안전할 뿐만 아니라 새로운 환경 저부하성 기능재료로서의 이용이 가능할 것으로 판단된다. 여기서 소개한 유용미생물들을 이용한 연구의 개발은 곧바로 실용화가 가능한 것은 아니고, 품질이나 성능 면에서 구체적인 기반을 확립하기 위하여 향후 한층 더 세밀한 검토가 필요하다. 그러나 기존의 개념을 토대로 새로운 발상의 전환을 한다면 한층 더 발전된 연구의 기반을 마련할 것으로 판단된다. 또한 여기서 소개한 미생물들 이외에도 현재 서해안과 제주도를 중심으로 탐색한 다양한 미생물자원들을 확보하여 콘크리트의 적용에 있어 기초적인 검토를 수행하고 있으며, 향후 보고할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 한국학술진흥재단 상반기 이공분야 기초연구과제지원사업(KRF-2008-314-D00463)인 “친환경 콘크리트를 위한 가시광선 반응형 나노 광촉매와 박테리아를 이용한 고정화 기술 개발” 2차년도 연구비 지원의 일부로서 실시되었다. 또한 일부 재정적 지원을 해주신 한국과학재단의 우수연구집단육성사업(R11-2002-101-01002-0)인 한국과학기술원 스마트사회기반시설 연구센터에도 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Lyon, E. V., “The Literature of Cement, Lime, Plaster, and Gypsum,” *Jmerican Chemical Society*, Vol. 78, 1968, pp. 122~141.
2. Stocks-Fischer, S., Galinat, J. K., and Bang, S. S., “Microbiological Precipitation of CaCO₃,” *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 31, 1999, pp. 1563~1571.
3. Choi, Y. W., Chung, J. S., Moon, D. J., and Shin, H. C., “A Study on Proportion of Normal-Strength Self-Compacting Concrete Using Ground Calcium Carbonate,” *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 23, No. 4A, 2003, pp. 627~637.
4. Moon, H. Y. and Jung, H. S., “Fundamental Study on the Utilization of the Ground Calcium Carbonate for a Concrete Admixture,” *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 21, No. 6A, 2001, pp. 987~996.
5. Ahn, J. W., Lee, J. S., Joo, S. M., Kim, H. S., Kim, J. K., Han, C., Kim, H., “Synthesis of Precipitated Calcium Carbonate in Ca(OH)₂-CO₂-H₂O System by the Continuous Drop Method of Ca(OH)₂ Slurry,” *Magazine of the Korea Ceramic Society*, Vol. 39 No. 4, 2002, pp. 327~335.
6. Han, C. S., Lee, H. Y., and Roh, Y., “On Biologically Produced Nanomaterials,” *Int. J. Nanotechnol*, Vol. 3, Nos. 2-3, 2006, pp. 236~252.
7. Bang, S. S., Galinat, J. K., and Ramakrishnan, V., “Calcite Precipitation Induced by Polyurethane-Immobilized *Bacillus pasteurii*,” *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 28, 2001, pp. 404~409.
8. Bachmeier, K., Williams, A. E., Warmington, J., and Bang, S. S., “Urease Activity in Microbiologically-Induced Calcite Precipitation,” *Journal of Biotechnology*, Vol. 93, 2002, pp. 171~181.
9. Ramakrishnan, V., Ramesh, K. P., and Bang, S. S., “Bacterial Concrete,” *Proceedings of SPIE's 2000 Symposium on Smart Materials*, Vol. 4234, Melbourne, Australia, 2000, pp. 168~176.
10. Ramakrishnan, V., Panchalan, R. K., and Bang, S. S., “Bacterial Concrete-A Concrete for the Future in Serviceability of Concrete,” *American Concrete Institute*, SP-225, 2005, pp. 37~54.
11. Rapolu, R., Panchalan, R. K., Ramakrishnam, V., and Bang, S. S., “Durability Characterization of Bacterial Concrete-A Smart Biomaterial,” *Proceedings of the ICFRC International Conference on Fibre Composites, High Performance Concretes and Smart Materials*, Chennai, India, 2004, pp. 1047~1056.
12. Vemuri, S. L., Panchalan, R. K., Rapolu, R., Ramakrishnan, V., and Bang, S. S., “Experimental Investigation of the Plastic Shrinkage Crack Reduction Potential of Bacteria in Concrete,” *Proceedings of the International Conference on Advances in Concrete and Construction(ICACC)*, Hyderabad, India, 2004, pp. 125~139.
13. Achal V., Mukherjee A., Basu P. C. and Reddy M. S., “Lactose Mother Liquor as an Alternative Nutrient Source for Microbial Concrete Production by *Sporosarcina Pasteurii*,” *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, Vol. 36, 2009, pp. 433~438.
14. Bang, S. S., “The Present and Future of Biosealant in Crack Remediation,” *Proceedings of the ICFRC International Conference on Fibre Composites, High Performance Concretes and Smart Materials*, Chennai, India, 2004, pp. 991~1001.
15. Park, S. J., Park, Y. M., Chun, W. Y., Kim, W. J., and Ghim, S. Y., “Characterization of Calcium Carbonate-Forming Bacteria,” *Proceeding of 2009 KMB-Youngnam Branch Conference*, Kyung-Joo, Korea, Feb. 20, 2009, 48 pp.

16. Roh, Y., Gao, H., Vali, H., Gao, W., Kennedy, D. W., Yang, Z., Gao, W., Dohnalkova, A. C., Stapleton, R. D., Moon, J. W., Phelps, T. J., Fredrickson, J. K., and Zhoe, J., "Metal Reduction and Iron Biomineralization by a Psychrotolerant Fe(III)-Reducing Bacterium, *Shewanella* sp. Strain PV-4," *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 72, No. 5, 2006, pp. 3236~3244.
17. Benjamin, S. W., *Microbes and Society*, World Science Publishing, 2009, pp. 120~128.
18. Kim, W. J., Kim S. T., Park., S. J., Ghim, S. Y., and Chun, W. Y., "A Study on the Development of Self-Healing Smart Concrete Using Microbial Biomineralization," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 4, 2009, pp. 501~511.

요 약 이 연구는 미생물의 생체광물형성작용 중 미생물의 방해석 석출 작용(micro-biologically induced calcite precipitation, MICP)을 이용하여 환경적인 문제를 배려한 차세대 스마트 콘크리트의 개발이 목적이다. 현재 콘크리트의 개질(改質) 및 성능향상을 목적으로 미생물의 방해석 석출 작용을 이용한 기술은 대표적 미생물인 *Sporosarcina pasteurii*에 의해 그 가능성이 제안되어 왔다. 이 연구에서는 이러한 미생물의 방해석 석출작용을 이용하는 것으로서 선행 연구의 *Sporosarcina pasteurii* 외에 콘크리트 구조물에서 탐색하여 16S rDNA 염기서열 분석법에 의해 동정된 4종의 신규 유용미생물자원들을 추가적으로 이용하였으며, 이렇게 확보된 방해석을 석출하는 유용미생물자원들에 대한 소개와 미생물의 방해석 석출 작용에 따른 시멘트 결정성을 평가하였다. 또한 콘크리트의 개질 및 성능 향상을 목적으로 이러한 유용미생물자원들을 우선적으로 모르타르 환경에 적용하여 양생조건별 압축강도의 특성을 평가하고, 모르타르에 인위적 균열을 만들어 미생물의 방해석 석출 작용에 따른 균열의 충전 가능성을 검토하였다. 이러한 유용미생물들의 적용에 따른 효과는 보수 기능뿐만 아니라 환경 문제를 배려한 새로운 재료로서의 개발로 이어져 향후 더욱 더 중요한 연구주제의 하나가 될 것으로 기대된다. 또한 이 연구의 큰 의미는 실제 콘크리트 구조물에 상생하고, 자연환경에서 방해석을 석출하는 미생물을 이용한다는 것이며, 긴 시간동안 자연환경에서 살아남은 이 미생물들은 환경적으로 안전할 뿐만 아니라 새로운 환경 저부하성 기능재료로서의 이용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 콘크리트 균열, 미생물, 생체광물형성작용, 방해석(탄산칼슘), 자기보수