

21세기를 지향하는 지식형 스마트 콘크리트의 새로운 패러다임 - 미생물의 생체광물형성 작용을 이용한 발상의 전환

21C Oriented New Paradigm of Intelligent Smart Concrete
- Turning of Concept Using Microbial Bio-mineralization



김화중*
Wha-Jung Kim



김사열**
Sa-Youl Ghim

1. 서 언

미생물은 지구의 지표에서 발생하는 암석의 풍화, 토양의 형성은 물론 광물의 용해 및 형성 등 여러 가지 지구화학적 과정에 있어서 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 철을 포함한 다양한 금속의 침출 그리고 유기물 순환 등과 같은 다양한 생지구화학적 과정에 참여할 뿐만 아니라, 직접 또는 간접적인 조절작용을 통해 지구화학조절인자와 영향을 주고 받는다¹⁾. 미생물을 이용한 광물로부터 나노소재의 원료 물질 석출과 생광화작용을 이용한 나노물질의 합성은 초기 연구단계에 있으며, 생물학적으로 생성된 나노소재(생물생성 나노소재: bio-logically produced nano material) 생물체가 환경 적응과 종족 보존을 위한 진화과정에서 생체 내에 생성한 1~100 nm 정도의 크기와 규칙성을 가진 입자를 생물체로부터 그대로 석출하거나 물리 화학적인 방법으로 변형하여 생물학적, 물리적, 화학적 기능을 가지는 기능성 나노소재로 이용할 수 있는 가능성을 제안하고 있다²⁾.

이러한 미생물의 생체광물형성작용(bio-mineralization)을 콘크리트 구조물에 적용한다는 발상의 전환에 따른 기대 효과는 환경 문제를 배려한 새로운 차세대 스마트재료 개발로 이어져 향후 더욱 중요한 연구테마의 하나가 될 것으로 생각된다.

본 고에서는 현재 국외 전문 학술지를 통해 제안되고 있는 자기치유·자기수복 콘크리트를 조사해 각각의 특징이나 앞으로의 해결과제에 대해 고찰하였다. 또한 지금까지와는 완전히 다른 방법으로 가능성을 찾는 예로서 미생물의 생화학적 반응을 이용한 새로운 내용으로 생물이 자신의 몸 내외에 광물(bio-mineral)을 만들어 내는 작용 즉, 생체광물형성작용을 이용한 콘크리트의

개질(改質) 및 성능향상을 목적으로 한 새로운 가능성에 대해 소개하고, *Sporosarcina Pasteurii* 등의 미생물이 탄산칼슘을 석출시키는 생체광물형성작용을 이용한 새로운 발상으로부터 콘크리트 역학적 성능 및 내구성의 향상, 균열의 보수 등의 가능성 검토 및 기초적 실험을 통해 향후 행해져야 할 연구의 방향성이나 자기치유·자기수복 콘크리트의 발전 가능성에 대해 고찰하여 보기로 한다.

2. 생체광물형성작용(bio-mineralization)

생물이 자신의 몸 내외에 광물(bio-mineral)을 만들어 내는 작용 즉, 생체광물형성작용은 익숙하지 않은 단어처럼 들리지만 일상 어디에서나 보여지는 현상이며, 이러한 생체광물형성작용은 생물 제어와 생물 유발에 의한 것으로 크게 2종류로 분류된다. 생물 제어는 생물체의 생화학적 반응에 의해 광물체, 경조직이 형성되는 현상이다³⁾.

이것은 인위적인 것이 아니라 미리 계획된 것이다. 한편 생물 유발은 생물체의 활동에 의해 생물체 표면의 내외로 광물을 형성하는 것을 말한다. 미생물에 의한 생체광물형성작용의 대부분은 생물 유발에 의한 것이며, 여기서 보여지는 <사진 1>과 <사진 2>는 경북대학교 기초과학연구센터의 FE-SEM을 이용하여 직접 촬영한 것으로 *Sporosarcina Pasteurii* 라는 미생물에 의한 생물유발 생체광물형성작용이다. 이러한 생체광물형성작용의 특징은 무기성분(mineral)이 생체 고분자(단백질이나 다당류 등의 유기 성분)에 의해 복합화 되고, 정밀한 질서를 가진 구조를 만들어 낼 수 있다는 점이다⁴⁾.

예를 들면, 패각은 1 μ m 이하 정도의 무기물인 탄산칼슘 단결정(결정의 방향이 일정한 형태)과 수십 nm 정도의 유기물의 적층 복합 구조로 되어 있어 적으로부터 자신의 몸을 보호하며, 조개

* 정희원, 경북대학교 건축토목공학부 교수
kimwj@knu.ac.kr

** 경북대학교 미생물학과 교수



사진 1. FE-SEM 촬영: *Sporosarcina Pasteurii*

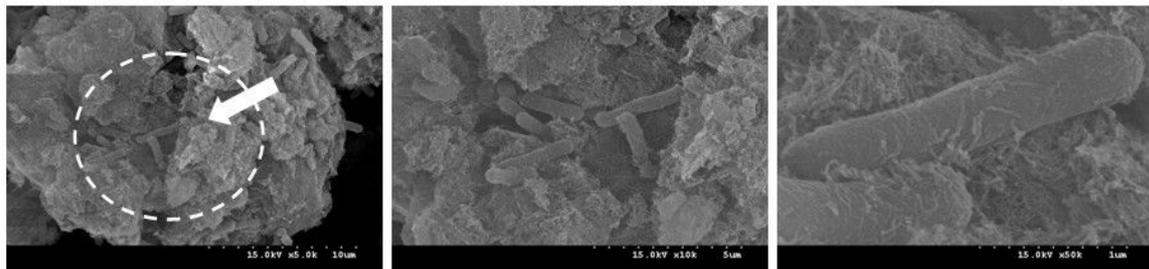


사진 2. FE-SEM 촬영: *Sporosarcina Pasteurii*에 의한 생물유발 Bio-Mineralization

는 자신의 내부에 우연히 침입된 모래와 같은 이물질에 딱딱한 탄산칼슘(무기질)을 분비할 수 있는 멀러스크(mullusc)라고 하는 연체동물의 분비물이 피막 되어 생성된 유기질 보석인 진주를 만들어 낸다. 뿐만 아니라 주로 칼슘과 그외의 무기성분(mineral)이 결합된 히드록시 어퍼타이트를 주성분으로 하는 뼈와 이빨은 체내에 다량의 칼슘을 비축해 뼈와 이빨의 강도나 밀도에 영향을 준다. 이러한 탄산칼슘을 주성분으로 하는 패각이나 진주, 히드록시 어퍼타이트를 주성분으로 하는 뼈와 이빨은 우리 일상생활에서 쉽게 보여 지는 생체광물형성작용(bio-mineralization)의 대표적인 사례이다. 따라서 자연계가 만들어 내는 정밀한 유기무기 복합구조의 형성 프로세스를 모방해 콘크리트에 적용하여 자기 조직적으로 만들 수 있다면, 새로운 환경 저부하성을 가지는 기능 재료가 될 것으로 생각된다.

3. 미생물에 의한 탄산칼슘 석출의 유래

미생물을 이용해서 모래의 표면에 탄산칼슘을 석출하는 기술은 지중에 매장되어 있는 석유를 효율이 높게 획득하기 위해 이용되고 있는 기술에서 유래 되었다. 현재 미생물에 의한 모래 표면에서의 탄산칼슘 석출에 관한 기술은 해외에서 여러 국의 전문 학술지를 통해 소개되고 있다.

이 기술을 이용하여 화강암에 인공적으로 생성시킨 균열을 충전하는 것이 가능했던 것도 확인되고 있다⁵⁾. 여기서 보여지는 <사진 3>과 <사진 4>는 일반적인 자연환경에서 탄산칼슘 석출과정 중 생물학적 반응이 동반되는 것을 응용한 것으로 모래에 *Sporosarcina Pasteurii*를 배양하여 염화칼슘수용액에 침지시켜 모래의 주위에 탄산칼슘 석출을 유도한 것으로써 FE-SEM을

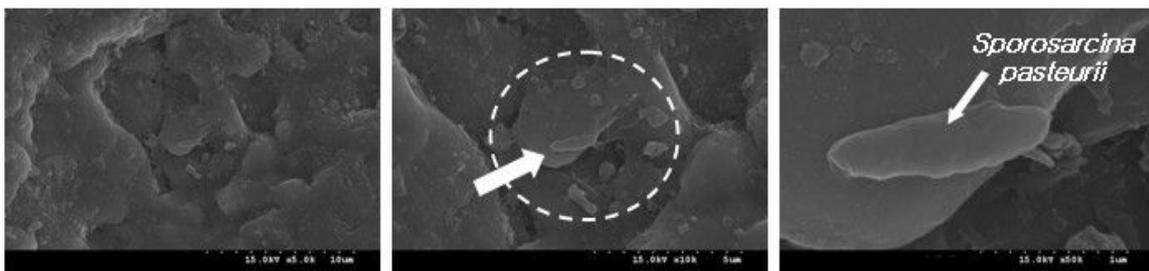


사진 3. FE-SEM 촬영: 모래 환경하에서의 *Sporosarcina Pasteurii*

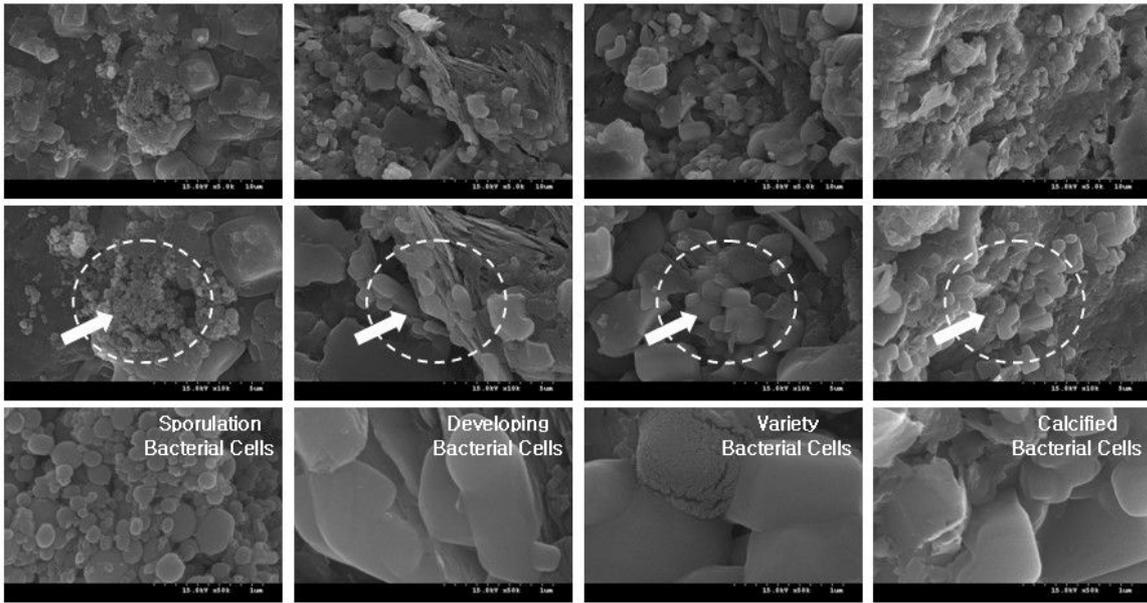


사진 4. FE-SEM 촬영: *Sporosarcina Pasteurii*에 의한 모래의 표면변화

이용하여 모래의 표면 변화를 직접 관찰한 사진이다.

4. 미생물을 이용한 생화학적 탄산칼슘 석출 메커니즘

자연환경하에서의 생화학적인 탄산칼슘의 석출은 앞에서 언급한 생체광물형성작용과 병행해서 생기는 경우가 많다. 토양 중에 생식하고, 아포를 형성하는 *Sporosarcina Pasteurii*는 우레아제 효소의 환경하에서 탄산칼슘 석출 반응에 기여한다⁶⁾. 이러한 생화학적 탄산칼슘 석출의 메커니즘은 매우 복잡하므로 미생물의 농도, 이온강도(수용액 중에 포함된 이온량의 총합), 용액의 pH에 영향을 받을 수 있다고 한다. *Sporosarcina Pasteurii*의 표면은 (-)전하를 띠며, 주위에서 Ca^{2+} 를 포함한 카치온(나트

륨, 칼륨, 칼슘 등의 원소)을 유인해서, 자신의 표면에 탄산칼슘을 석출시킨다. 여기서 보여지는 <사진 5>에서처럼 *Sporosarcina pasteurii* 표면의 내외에 탄산칼슘을 생성 시키는 과정의 생화학적인 개요는 $Ca^{2+} + Cell \rightarrow Cell \cdot Ca^{2+} \rightarrow Cell \cdot CaCO_3 \downarrow$ ⁷⁾이다.

5. 미생물을 이용한 균열의 보수 메커니즘

<사진 6>은 콘크리트 구조체의 미세균열을 FE-SEM으로 촬영한 것으로 콘크리트 균열부의 미수화 시멘트 입자를 확인할 수 있으며, 콘크리트 균열부의 미수화 시멘트에 의한 균열의 보수는 어느정도 가능한 것으로 일반적으로 알려져 있는 내용이지만 영

원히 지속 가능한 것은 아니다.

따라서 <사진 7>과 같이 콘크리트 구조물에 앞에서 언급한 미생물의 신진대사 작용에 의한 생체광물형성작용을 이용하여 미생물과 같이 완성된 자기치유·자기수복 시스템을 구축한다면 진정한 의미의 자기치유·자기수복 콘크리트가 될 것으로 사료되며,

이러한 미생물을 이용한 균열 보수의 단계별 메커니즘은 <그림 1>과 같다.

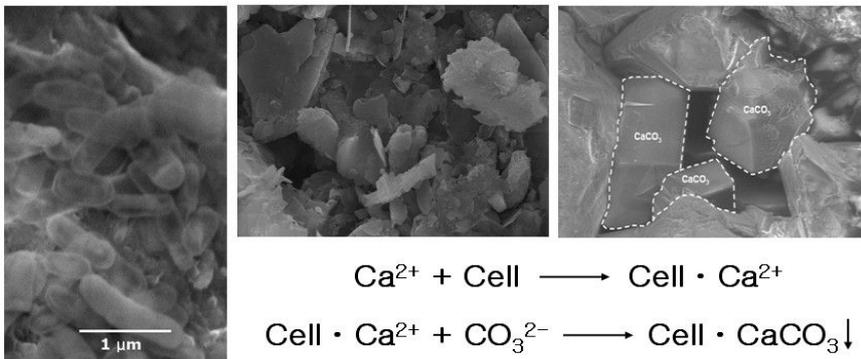


사진 5. *Sporosarcina Pasteurii*에 의한 탄산칼슘 석출 메커니즘

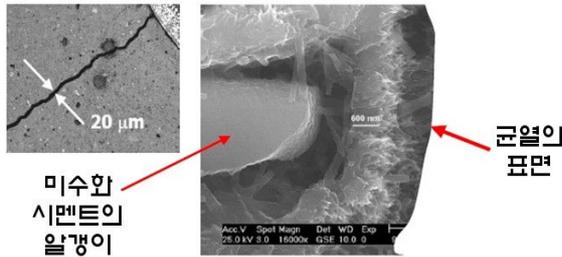


사진 6. FE-SEM 촬영 : 콘크리트 구조체의 미세 균열⁸⁾

6. 미생물을 이용한 CaCO₃ 석출 정성분석

<사진 8>은 현미경으로 10시간 동안 촬영한 영상을 캡처한 사진으로 *Sporosarcina Pasteurii*에 의한 CaCO₃ 결정의 성장과정을 나타내며, <사진 9>는 *Sporosarcina Pasteurii*에 의한 광물 형성 과정을 촬영한 것이다.

또한 <사진 10>은 *Sporosarcina Pasteurii*에 의해 생성된 광물 결정의 형태를 현미경으로 관찰한 사진으로서 여러 가지 형태로 관찰되는 것을 확인할 수 있으며, <사진 11>은 *Sporosarcina Pasteurii*에 의해 생성된 광물의 형상을 FE-SEM으로 직접 관찰한 사진이다.

이러한 *Sporosarcina Pasteurii*에 의해 생성된 광물의 성분을 알아보기로 경복대학교 기초과학연구센터에 MP-XRD 분석

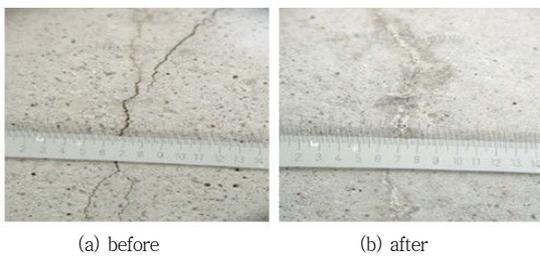
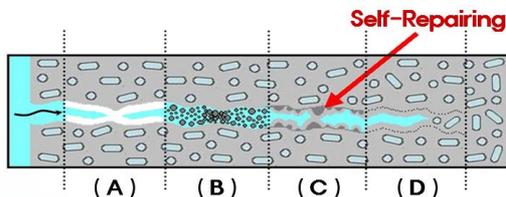


사진 7. *Sporosarcina pasteurii*를 이용한 미세균열의 보수⁸⁾



- (A) 균열의 발생에 따른 생체 광물 형성 작용 단계
- (B) 미생물의 신진대사 작용에 따른 탄산칼슘 석출 단계
- (C) 석출된 탄산칼슘의 석회화 발전에 따른 균열의 보수 단계
- (D) 자기치유(自己治癒)·자기수복(自己修復) 단계

그림 1. *Sporosarcina Pasteurii*를 이용한 균열의 보수 메커니즘

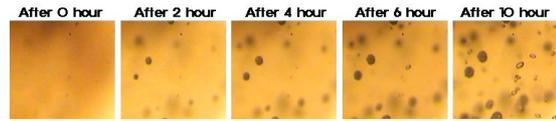


사진 8. *Sporosarcina Pasteurii*에 의한 CaCO₃ 결정의 성장

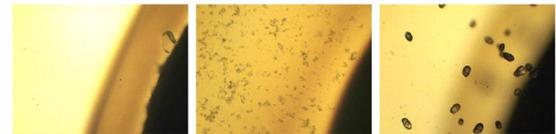


사진 9. *Sporosarcina Pasteurii*에 의한 광물 형성 과정

을 의뢰한 결과 <그림 2>와 같이 전체 시료 대비 Calcite 65% 정도 생성된 것으로 나타났다. 이러한 생성광물은 유기 + 무기질의 단단한 경조직을 형성하고 있으며, 콘크리트에 미생물 작용에 의한 CaCO₃(calcite)가 지속적으로 생성되어 미세공극을 메운다면 콘크리트의 장기수명화와 역학적 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

7. 모래에 배양한 미생물의 CaCO₃ 석출 실험

본 실험에서는 일반적인 자연환경에서 탄산칼슘 석출과정 중 생물학적 반응이 동반되는 것을 응용한 것으로 모래에 *Sporosarcina Pasteurii*를 배양하여 염화칼슘수용액에 침지시켜 모래의 주위에 탄산칼슘 석출을 유도한 것으로서 실험의 분석은 XRD를 이용 X선 회절각도 5 ~ 65°2θ로 설정하여 각각의 시료를 측정된 결과 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, CaO₂, TiO₂ 등의 여러 가지 화학성분들이 검출되었으나 본 실험에서는 *Sporosarcina Pasteurii*에 의한 모래의 카치온(나트륨, 칼륨, 칼슘등의 원소)을 유인하여 탄산칼슘의 석출에 따른 광물 형성이 목적이므로 모래의 주성분 SiO₂를 포함한 Na, K, Ca을 중심으로 분석을 실시하였다.



사진 10. *Sporosarcina pasteurii*에 의해 생성된 광물 결정의 형태

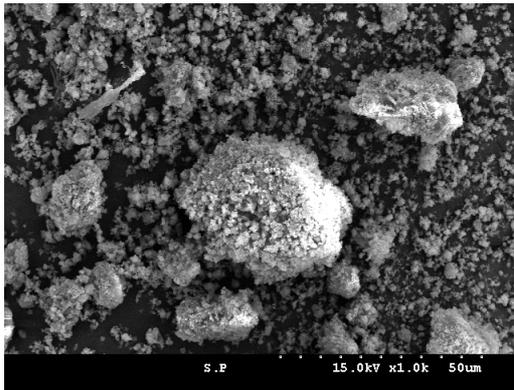


사진 11. FE-SEM 촬영: CaCO₃(calcite)결정

A군 시료의 *Sporosarcina Pasteurii*를 혼입하지 않은 시료의 경우 석영(SiO₂): 53 ~ 71%(60%), 정장석(KAlSi₃O₈): 26 ~ 38%(29%), 조장석(NaAlSi₃O₈): 7 ~ 16%(11%)를 차지하는 것으로 나타났다. *Sporosarcina Pasteurii*를 혼입한 모래의 경우 A군 시료는 <그림 3>의 표에 나타난 평균함량 100% 중 대략 석영(SiO₂) 21%, 정장석(KAlSi₃O₈) 56%, 조장석(NaAlSi₃O₈) 15%, Vaterite(CaCO₃) 4%, Aragonite(CaCO₃) 4% 정도로 나타났다. B군 시료의 *Sporosarcina Pasteurii*를 혼입하지 않은 시료의 경우 석영(SiO₂) 64 ~ 89%(74%), 정장석(KAlSi₃O₈) 11 ~ 23%(17%), 조장석(NaAlSi₃O₈) 6 ~ 15%(9%)를 차지하는 것으로 나타났다. *Sporosarcina Pasteurii*를 혼입한 B군 시료는 <그림 4>의 평균함량 100% 중 대략 석영(SiO₂) 14%, 조장석(NaAlSi₃O₈)

44%, 정장석(KAlSi₃O₈) 30%, 바테라이트(CaCO₃) 4%, 아라고나이트(CaCO₃) 5%, 칼사이트(CaCO₃) 2%로 나타났다. *Sporosarcina Pasteurii* 혼입 유무에 따른 시료들을 비교 분석한 결과 *Sporosarcina Pasteurii*에 의한 모래의 카치온(나트륨, 칼륨, 칼슘등의 원소)을 유인하여 탄산염 광물인 바테라이트(vaterite), 아라고나이트(aragonite), 칼사이트(calcite) 등이 추가적으로 검출된 것이 확인된다. 또한 A군 시료에 검출되지 않은 칼사이트가 B군 시료에서는 2%정도 검출된 것도 확인되었으며, *Sporosarcina Pasteurii*의 혼입 농도를 변화시켜 이러한 탄산염 광물의 석출량의 조절이 가능할 것으로 생각된다.

9. 결 언

본 고에서는 *Sporosarcina Pasteurii*가 탄산칼슘을 석출시키는 생체광물형성작용을 이용하여 미생물이 신진대사를 할 때의 탄산칼슘 석출 반응에 의한 세포 외에 다른 화합물의 생성, 탄산염광물의 석출 및 모래표면을 고화(固化)시켜 모래의 입자를 접착하는 결합재(binder)로서의 이용을 검토한 결과 새로운 광물 형성 및 모래표면의 고화(固化)가 확인되었다.

이 *Sporosarcina Pasteurii*는 일반 토양 중에 생식하고, 현재 사용되고 있는 합성수지 등을 이용한 보수재와 비교하더라도 아주 환경부하가 작은 재료라고 할 수 있다. 그러나 pH 9.0 정도의 알칼리 환경을 좋아하는 *Sporosarcina Pasteurii*는 콘크리트처럼 강알칼리 pH 12.0의 환경에서 탄산칼슘의 생성을 방해하는 원인이 되므로 앞으로의 향후 과제는 이러한 미생물들이 지속적으로 탄산칼슘을 생성시킬 수 있는 쾌적한 환경을 어떻게 콘크리트에 만들어 줄 것인가 하는 것이 연구대상이다.

또한 미생물을 직접 콘크리트 구조물에 적용한 사례로서 표면에 발생한 이끼 등에 의한 더러움을 *Thiobacillus*를 이용해 제거하는 방법⁹⁾, 다공질의 석조 문화재에 *Myxococcus xanthus*를 이용해 탄산칼슘을 석출시켜 밀실하게 보수를 실시하는 방법¹⁰⁾, 또한 일본에서는 유용 미생물군(effective micro-organisms)을 혼화제로써 이용해 콘크리트의 압축강도나 내구성의 개선을 검토¹¹⁾하고 있는 연구가 현재 활발히 진행 중에 있다.

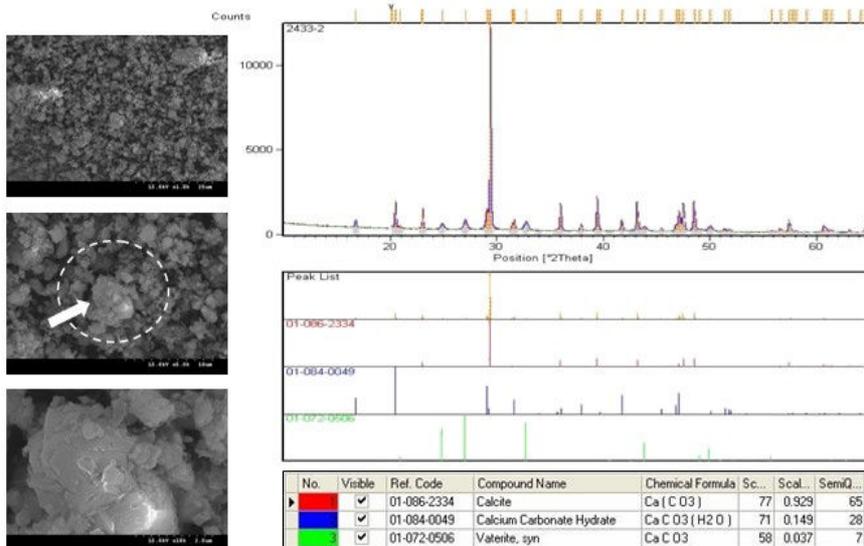
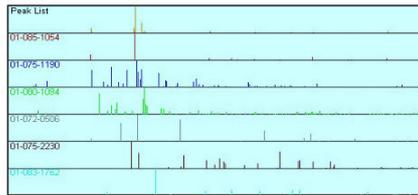
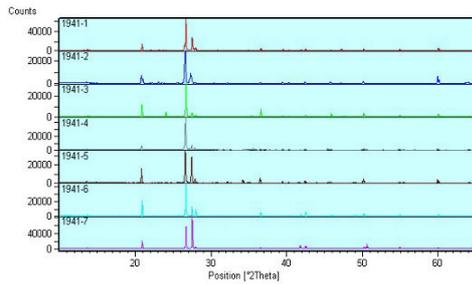
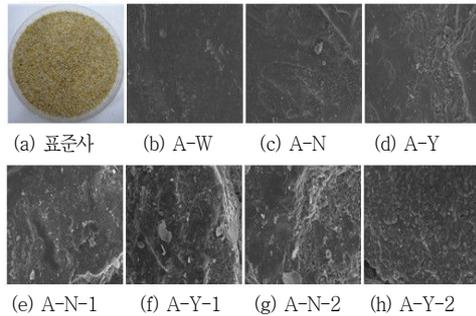


그림 2. MP-XRD 분석 : *Sporosarcina pasteurii*에 의해 생성된 CaCO₃ 성분 분석

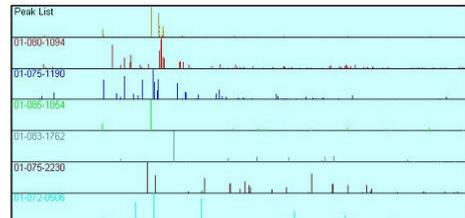
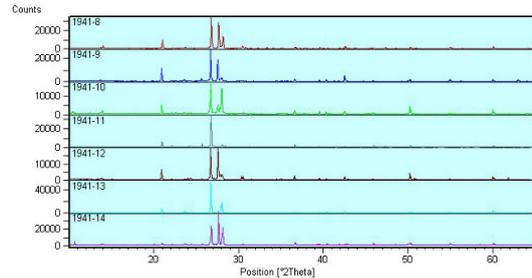
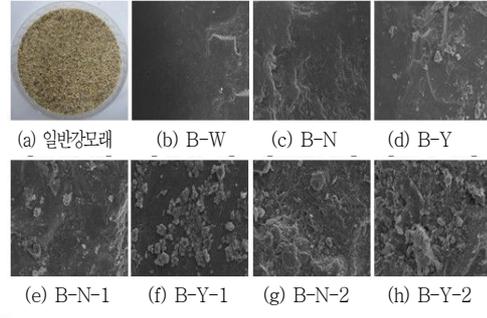
[1941-1 : A-W] [1941-2 : A-N] [1941-3 : A-Y] [1941-4 : A-N-1]
[1941-5 : A-Y-1] [1941-6 : A-N-2] [1941-7 : A-Y-2]



No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale Factor	SemiQuant [%]
1	✓	01-085-1054	Quartz	Si O ₂	40	0.107	21
2	✓	01-075-1190	Orthoclase	K [Al Si ₃ O ₈]	15	0.062	56
3	✓	01-080-1034	Albite low	Na [Al Si ₃ O ₈]	21	0.016	15
4	✓	01-072-0506	Valente, sym	Ca C O ₃	7	0.007	4
5	✓	01-075-2230	Aragonite	Ca [C O ₃]	10	0.008	4
6	✓	01-083-1762	Calcite	Ca [C O ₃]	4	0.000	

그림 3. XRD 분석 : A군 시료의 성분 분석

[1941-8 : B-W] [1941-9 : B-N] [1941-10 : B-Y] [1941-11 : B-N-1]
[1941-12 : B-Y-1] [1941-13 : B-N-2] [1941-14 : B-Y-2]



No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale Factor	SemiQuant [%]
1	✓	01-080-1094	Albite low	Na [Al Si ₃ O ₈]	30	0.073	44
2	✓	01-075-1190	Orthoclase	K [Al Si ₃ O ₈]	26	0.053	30
3	✓	01-085-1054	Quartz	Si O ₂	28	0.114	14
4	✓	01-083-1762	Calcite	Ca [C O ₃]	4	0.015	2
5	✓	01-075-2230	Aragonite	Ca [C O ₃]	16	0.016	5
6	✓	01-072-0506	Valente, sym	Ca C O ₃	12	0.012	4

그림 4. XRD 분석 : B군 시료의 성분 분석

여기서 소개한 *Sporosarcina Pasteurii* 외에도 <사진 12>와 같이 탄산칼슘을 석출시켜 콘크리트의 역학적 성능 및 내구성 향상에 기여가 가능한 *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus sphaericus*, *Bacillus subtilis*, *Myxococcus xanthus*, 철환원균으로 널리 알려져 있으며 금속광물을 생산하는 *Shewanella algae* BrY, 콘크리트 혼화제로서의 이용으로 역학적 성능 및 내구성 향상에 기여가 가능한 *Mycobacterium smegmatis*, 콘크리트 구조물 표면의 오염을 정화하는 능력을 가진 *Thiobacillus*, 습기 및 온도를 조절하는 능력 및 환경정화 작용을 하는 *Cyanobacteria* 등의 많은 미생물 작용에 의한 효과 또한 검토 중에 있다.

여기서 소개한 미생물을 이용한 연구개발은 곧바로 실용화가 가능한 것은 아니며, 향후의 더 많은 검토가 필요하다. 그러나 기존의 개념을 토대로 발상의 전환을 한다면 한층 더 발전된 연구

의 기반을 마련할 것이다. 이러한 미생물의 적용에 따른 효과는 보수 기능뿐만 아니라 환경 문제를 배려한 새로운 재료로서의 개발로 이어져 향후 더욱 더 중요한 연구주제의 하나가 될 것이라고 생각된다.

감사의 글

본고는 2008년도 한국학술진흥재단 상반기 이공분야 기초연구과제지원사업(과제번호: KRF-2008-314-D00463)인 ‘친환경 콘크리트를 위한 가시광선 반응형 나노 광촉매와 박테리아를 이용한 고정화 기술 개발(산학연구지원02)의 일부이다.’

참고문헌

1. Roh, Y., Gao, H., Vali, H., Gao, W., Kennedy, D.W.,

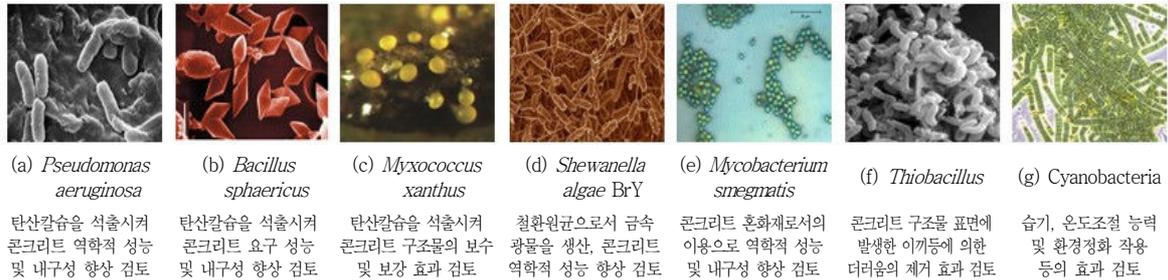


사진 12. 여러 가지 미생물 에 의한 기대효과

- 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. PV-4. *Appl. Environ. Microbiol.*, 72, 2006, pp. 3236 ~ 3244.
- Han, C.-S., Lee, H.Y. and Roh, Y. On Biologically Produced Nanomaterials. *Int. Journal Nanotechnol.*, 3(2/3), 2006, pp. 236 ~ 252.
 - 渡部哲光 : バイオミネ랄ライゼーション - 生物が鉱物を作ることの不思議 - pp.1~8, 東海大学出版会, 1997.
 - V. Ramakrishnan, R.K. Panchalan, and S.S. Bang : Improvement of concrete durability by bacterial mineral precipitation, *Proceedings of ICF*, 11, Torino, Italy, 2005.
 - U.K. Gollapudi, C.L. Knutson, S.S. Bang and M.R. Islam : A New Method for Controlling Leaching through Permeable Channels, *Chemosphere*, Vol.30, No.4, 1995, pp.695 ~ 705.
 - S.S. Bang, J. K. Galinat and V. Ramakrishnan, "Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*", *Enzyme and Microbial Technology*, Vol.28, 2001, pp. 404 ~ 409,
 - S.K. Ramachandran, V. Ramakrishnan, and S.S. Bang : Remediation of Concrete Using Micro-Organisms, *ACI Material Journal*, Vol.98, No.1,2001, pp. 3 ~ 9.
 - Klaas van Breugel, Ye Guang, "Multi-scale Modelling - The Vehicle for Progress in Fundamental and Practice-Oriented Research", 2nd International Symposium Nanotechnology in Construction, Bilbao, 2005.
 - B. De Graef, W. De Windt, J. Dick, W. Verstraete, and N. De Belie, "Cleaning of concrete fouled by lichens with the aid of *Thiobacillus*", *Material and Structure*, 38, RILEM, pp.875~882, 2005.
 - C. Rodriguez-Navarro, M. Rodriguez-Gallego, K.B. Chekroun, and M.T. Gonzalez-Munoz : Conservation of Ornamental Stone by *Myxococcus xanthus*-induced Carbonate Biomineralization, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol.69, No.4, 2003, pp. 2182 ~ 2193.
 - 藤巻一志・杉田修一・庄谷征美 : EM(有用微生物群) を用いたコンクリートの一実験, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要(平成16年度), 2005, pp. 708 ~ 709.

담당 편집위원 :
권기주(한국전력공사 전력연구원) kyeunkjoo@kepco.co.kr

<http://www.kci.or.kr>

KOREA CONCRETE INSTITUTE