



02

# 바이오 콘크리트를 활용한 유지관리 기술의 현재와 미래

Current and Future Issues on Concrete Maintenance with  
Bio Concrete

**최영철** Young-Cheol Choi  
한국건설생활환경연구소  
첨단건설재료센터 선임연구원

**권성준** Seung-Jun Kwon  
한남대학교  
건설시스템공학과 교수

**이광명** Kwang-Myong Lee  
성균관대학교  
건축토목공학부 교수

## 1. 머리말

콘크리트는 경제적이고 내구성이 뛰어난 건설재료이지만 시공이후 초기재령에서 재료적 거동변화로, 또한 사용중에 구조적인 문제로 균열이 발생하게 된다. 이러한 균열은 미관의 저하뿐만 아니라 열화인자의 유입을 가속화시킴으로 내부철근부식을 촉진시키고, 이로 인해 구조적인 안전성에 영향을 주게 된다. 최근 들어 많은 융합연구가 시도되고 있지만 Bio-Nano-Physico-Chemo Technique이 콘크리트 재료개발 연구에 시도되고 있다. 독자들에게 매우 생소하지만 이러한 연구는 박테리아 미생물을 이용한 것으로 콘크리트 내부에 잔존하는 수산화칼슘을 탄산칼슘으로 치환하여 콘크리트 구체를 더욱 조밀하게 만들며, 이러한 효과를 극대화시켜 균열을 수복할 수 있는 콘크리트를 제조하는 것이다.

인체에서 뼈와 같이 강한 석회물질을 생산하는 경우가 좋은 예가 될 것이다. 본 고에서는 현재 국내외에서 연구되고 있는 박테리아를 이용한 건전성 회복 및 균열수복 등에 대한 연구를 정리하였으며, 이러한 연구의 제한성을 극복하고 지향할 수준을 다루었다.

## 2. 박테리아를 통한 콘크리트의 건전성 개선 및 균열수복

### 2.1 현재 유지관리의 한계성

콘크리트 구조물은 균열을 필수적으로 가지고 있으며, 재료, 구조, 시공상에서 이를 저감시키려는 시도가 꾸준히 진행되고 있다. 현재의 유지관리기법의 비용을 최소화하고 친환경적인 기법을 이용하여 콘크

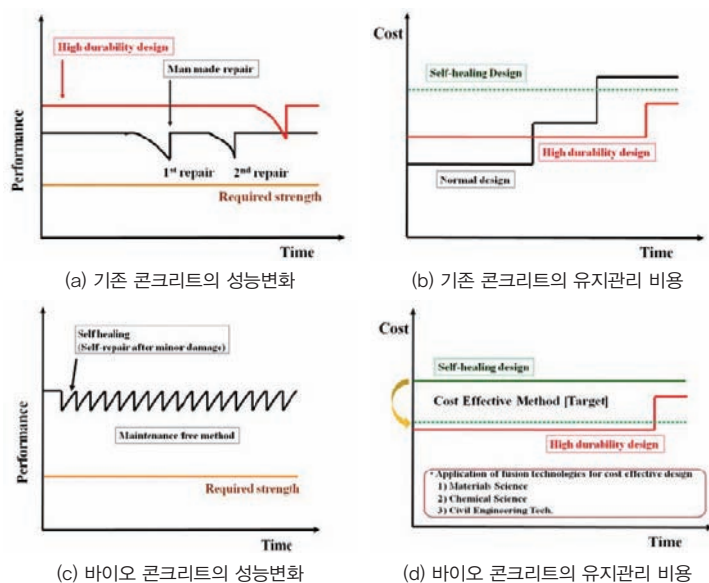


그림 1. 바이오 콘크리트를 통한 유지관리 특성

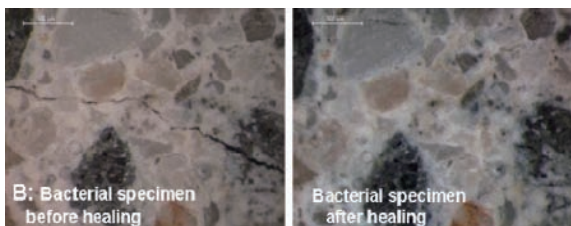
리트의 사용과 동시에 유지관리가 시작된다면 그 효과는 기존의 어떤 기법이나 재료의 개발보다 큰 파급효과를 가지게 될 것이다. 박테리아를 활용한 바이오 콘크리트의 개발은 그 시작점이 될 수 있는데, <그림 1>에서는 주어진 소요성능을 회복하기 위해 필요한 비용과 유지관리를 설명한 것으로<sup>1)</sup> 이러한 장점 이외에 유지관리를 할 수 없는 부분에 대한 성능회복에도 큰 기여를 할 것이다.

2.2 박테리아를 활용한 바이오 콘크리트

1990년대에서 2000년대 초반까지 Delft 공대에서는 Ghent 대학 연구팀과 박테리아를 활용한 바이오 콘크리트에 대한 연구를 주도적으로 수행하고 있으며, 현재까지 다양한 박테리아를 통하여 균열수복과 이를 이용한 콘크리트의 성능평가에 대한 연구가 집중되고 있다<sup>2~6)</sup>. 기본적인 개념은 강알칼리에서 생존할 수 있는 박테리아를 배양하고 콘크리트 타설시 혼입하여 경화중에 발생하는 균열을 박테리아 활동에 따라 형성되는 방해석(탄산칼슘)으로 수복하는 개념을 가진다. 식(1)은 일반적인 수산화칼슘이 탄산칼슘으로 치환되는 과정을 나타내고 있는데, 박테리아를 활용한 탄산칼슘 석출은 생체활동작용으로 더욱 효과적인 석출반응을 나타낸다고 알려져 있다<sup>7)</sup>. 또한 <그림 2>는 균



(a) 배양액만을 사용했을 경우



(b) 박테리아와 배양액을 동시에 사용했을 경우

그림 2. 박테리아를 활용한 균열수복

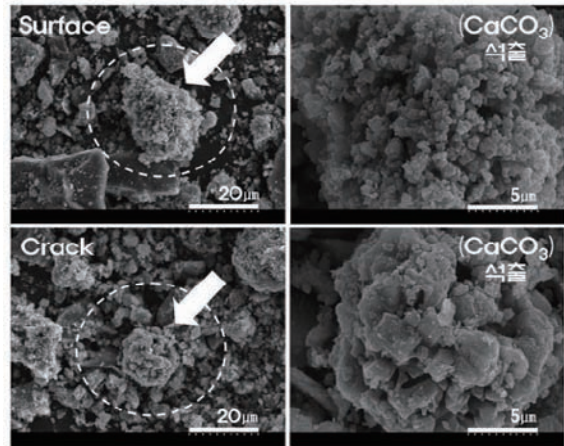


그림 3. 박테리아를 통하여 발생된 탄산칼슘석출

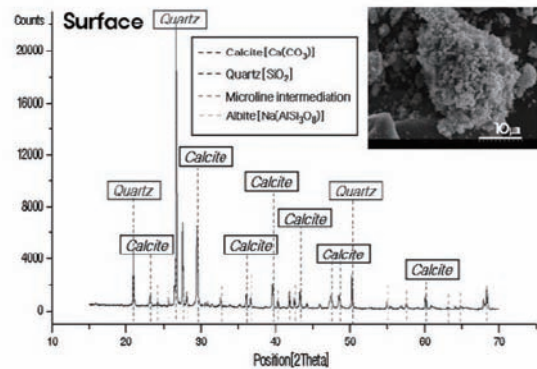
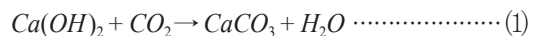


그림 4. XRD 분석을 화학조성의 변화

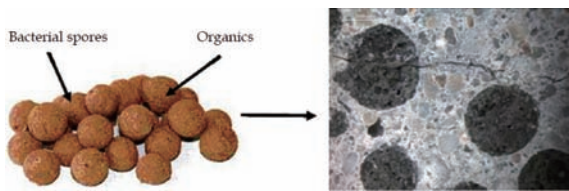
열 발생이후 박테리아 활용을 통하여 균열이 수복되는 결과를 나타내고 있다<sup>1)</sup>. <그림 3, 4>는 Sporosarcina pasteurii를 혼입한 시편의 SEM 분석을 통해 수화물 변이를 나타내고 있으며, XRD 분석을 통하여 생성물의 변화를 관측한 것이다<sup>8)</sup>.



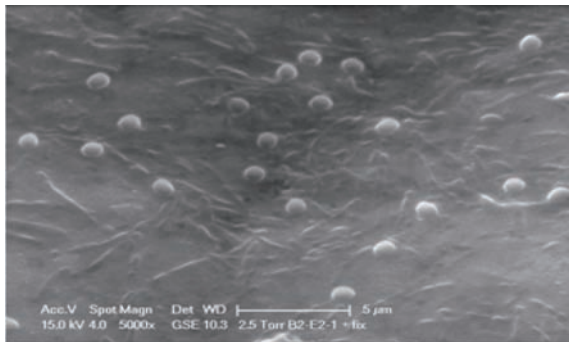
국내에서도 경북대학교 연구팀에 의하여 새로운 박테리아의 수집(Sporosarcina soli, Bacillus Massiliensis, Arthrobacter Crystallopoietes, Lysinibacillus Fusiformis) 및 배양을 통하여 콘크리트에 적용하려는 연구가 꾸준히 수행되고 있으며, 지반개량에 대한 적용(고결화), 콘크리트 균열부속에 대한 적용으로 발전하고 있다<sup>8)</sup>.

### 3. 생존율 및 활성화 개선을 위한 포자

이러한 박테리아는 강알칼리에서는 생존율이 감소하고 활성화 또한 감소하게 된다. 콘크리트 내부에 잔존하는 수산화칼슘은 강알칼리로서 수화반응을 통한 강도발현에 가장 큰 영향을 준다. 이러한 제한을 극복하기 위해 코팅 및 캡슐화를 통하여 포자를 만들고 이를 이용하여 박테리아의 효과를 극대화시키려는 연구가 진행되고 있다. <그림 5>는 황토와 유기물을 혼합한 박테리아 포자를 적용한 기술을 나타내고 있는데, 이를 통하여 잔존기간이 최대 6개월까지 증가하는 것으로 평가되었다<sup>3)</sup>. 또한 균열수복성을 정량적으로 평가하기 위한 다양한 기법들이 개발되고 있는데, <사진 1>과 같이 주로 NDT(Non-destructive Technique) 중 하나인 초음파법을 투수성 평가를 하는데 이용하고 있다<sup>3)</sup>. 또한 최근 들어 COWI에서는 터널에 대규모 현



(a) 박테리아 포자적용 기술



(b) 포자적용을 통한 박테리아 활성화(ESEM analysis, 5,000 magnification, Bacillus strain B2-E2-1)

그림 5. 코팅을 이용한 포자개발 및 콘크리트에 적용

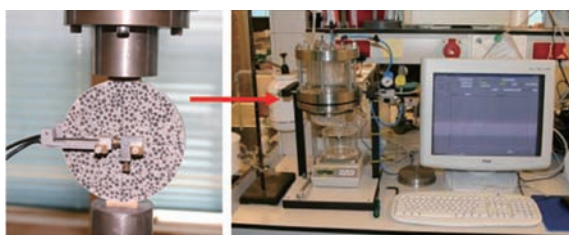


사진 1. Bio 콘크리트의 건전성 평가를 위한 투수시험



사진 2. COWI에서 적용한 바이오콘크리트의 현장적용 실험

장시험에 적용하였는데, 연간 100억€의 유지관리 비용감소를 예상하고 있으며, 이는 <사진 2>에 나타내었다. 이는 곧 실용화단계까지 오고 있는 Bio Concrete 기법을 제시하고 있으며, 잦은 유지관리 및 유지관리가 불가능한 구조물에 적극적으로 활용될 것으로 예상되고 있다<sup>9)</sup>.

### 4. 맺음말

본 고에서는 최근 들어 집중적으로 연구되고 있는 박테리아를 활용한 Bio Concrete의 건전성 및 균열수복에 대해 다루었다. 이러한 기법의 적용이 반드시 콘크리트의 자연적인 균열수복으로 이어지지는 않는다. 장기간 생존하면서 활성도를 유지할 수 있는 포자 개발 및 코팅기술이 선행되어야 하며, 염해, 탄산화 등 노출환경에 따른 최적의 박테리아 선정과 배양법 등이 추가되어야 한다. 또한 건전성 및 균열수복이 어느 정도 회복되었는지에 대한 정량적인 평가방법도 강구되어야 할 것이다. 외국에서도 대부분 일반강도에 국한하여 실험되고 있지만 고강도 및 혼화재료를 사용한 콘크리트 적용성 평가도 이루어져야 한다.

외국에서는 거의 실용화 단계로 들어서고 있는 박테리아 활용 바이오 콘크리트의 개발은 국내에서도 놓칠 수 없는 연구이며, 충분히 적용 가능한 실용화 분야이다. 이 분야의 개발은 최근 들어 시도되고 있는 무시멘트 콘크리트의 균열수복, 나노기반 Hybrid 코팅 기법, ECC 등의 섬유재 콘크리트의 균열수복기술과 함께 병용되어 적용될 수 있으므로 유지관리기술의 새 장을 열어줄 것으로 예상된다. 이러한 기법은 유지관리를 정해진 시기에 따라 하는 것이 아니라 콘크리트 구



조물의 사용과 함께 시작되는 친환경 유지관리 기법이  
며, 지하구조물의 배면이나 높은 교량의 저면 등 균열  
이 발생한 이후 수복이 불가능한 지역에 적용 가능한  
기술이기 때문이다.

다양한 연구 분야와의 협업(collaboration work)을  
통하여 콘크리트 구조물이 더욱 신뢰를 가지고 친환경  
성을 가질 수 있는 지속성(sustainability)의 대표 아  
이콘이 되기를 희망한다. 📧

담당 편집위원 : 이한승(한양대학교) ercleehs@hanyang.ac.kr

**참고문헌**

- Ahn, T. H. and Kishi, T., "Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 8, No. 2, 2010, pp. 171 ~ 186.
- Jonkers, H. and Schlangen, E., "Crack Repair by Concrete-immobilized Bacteria", *Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials*, Noordwijk aan Ze, The Netherlands, 2007, pp. 18 ~ 20.
- Jonkers, H. and Schlangen, E., "Bacteria-based Self-healing Concrete", *International Journal of Restoration of Buildings and Monuments*, Vol. 15, No. 4, 2009, pp. 255 ~ 265.
- Jonkers, H., Thijssen, A., Muijzer, G., Copuroglu, O. and Schlangen, E., "Application of Bacteria as Self-healing Agent for the Development of Sustainable Concrete", *Ecological Engineering*, Vol. 36, No. 2, 2010, pp. 230 ~ 235.
- Van Tittelboom, K. and De Belie, N., "Self-healing Concrete: Suitability of Different Healing Agents", *International Journal of 3R's*, 2010, pp. 12 ~ 21.
- Van Tittelboom, K., De Belie, N., Van Loo, D. and Jacobs, P., "Self-healing Efficiency of Cementitious Materials Containing Tubular Capsules Filled with Healing Agent", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33, No. 4, 2011, pp. 497 ~ 505.
- Jonkers, H. and Schlangen, E., "Bacteria-based Self-healing Concrete", *International Journal of Restoration of Buildings and Monuments*, Vol. 15, No. 4, 2009, pp. 255 ~ 265.
- 김화중, 김성태, 박성진, 김사열, 천우영, '미생물의 생체 광물형성 작용을 이용한 자기치유 스마트 콘크리트 개발에 관한 기초연구', *한국콘크리트학회 논문집*, Vol. 21, No. 4, 2009, pp. 501 ~ 511.
- <http://www.cowi.com/menu/NewsandMedia/News/BridgeTunnelandMarineStructures/Pages/smart-bacteria-will-heal-your-walls.aspx>



**최영철 선임연구원**은 2005년 서울대학교 토목공학과에서 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 균열 거동에 관한 연구로 박사학위를 취득하였고, 2007년부터 현재까지 한국건설생활환경시험연구원에서 친환경 건설재료 개발에 관한 연구를 주로 수행하였으며, 관심 연구 분야는 다양한 재료에 대한 수화모델, 미세구조 분석 및 수치모델 등이다.  
zerofo@kcl.re.kr



**권성준 교수**는 연세대학교 토목공학과에서 박사학위를 받은 후 미국 University of California, Irvine에서 연구원 과정을 마치고, 2011년부터 한남대학교 건설시스템 공학과 조교수로 재직하고 있다. 주된 연구분야는 공극 구조 모델을 기반으로 한 염해 및 탄산화해석, 투수성 해석, 확률론기반 내구수명 설계 등이며, 현재 우리 학회 학회지편집간사로 활동하고 있다.  
seungun.chae@kict.re.kr



**이광명 교수**는 미국 MIT 토목환경공학과에서 고강도 콘크리트의 파괴거동에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 1994년부터 성균관대학교 건축토목공학부 교수로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 고성능 콘크리트, 내구성, 디지털 가상설계이며, 우리 학회 부회장을 맡고 있다.  
leekm79@skku.edu