

# 친환경 도로포장을 위한 시멘트 모르타르 내 미생물학적 침전반응에 관한 초기 연구

## A Preliminary Study on Microbial Precipitation Reaction In Cement Mortar for Eco-friendly Road Pavements

이강훈\* · 한상현\*\* · 홍동성\*\*\* · 소재성\*\*\*\* · 정진훈\*\*\*\*\*

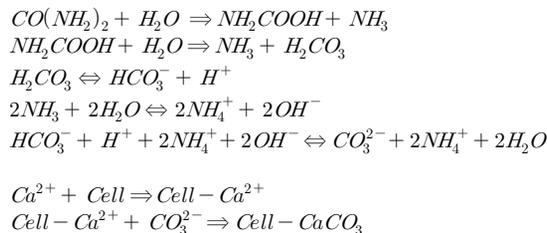
Lee, Kang Hun · Han, Sang Hyun · Hong, Dong Seong · So, Jae Seong · Jeong, Jin Hoon

### 1. 서 론

콘크리트는 건설 분야에서 사용되는 가장 대표적인 건설재료로써 높은 강도와 내구성 그리고 상대적으로 저렴하기 때문에 전 세계적으로 널리 사용되고 있다 그러나 환경적으로 유해한 부산물을 대량 발생시키고 특유의 균열특성으로 인해 친환경적이고 지속가능한 재료로는 적합하지 않다는 것이 중요한 단점 중 하나이다. 이를 극복하기 위해 많은 연구자들이 콘크리트 제조 시 환경부하량 저감기술, 콘크리트를 이용한 환경개선 기술, 생태계와의 조화를 꾀하는 에코 콘크리트의 개발 등 다양한 관점에서의 연구를 수행 중이며 콘크리트의 친환경적 특성을 부각시키기 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

이에 대한 일환으로 최근 선진국에서는 박테리아의 미생물학적 탄산 침전물을 이용한 콘크리트의 균열보수[1,11] 및 자가 회복제[6,7]로써의 가능성에 대한 연구가 진행되었다. 콘크리트에 발생된 균열을 생물학적 침전물을 이용하여 보수하는 방법은 1995년 Gollappudi[5]에 의해 처음으로 소개되었으며 기존 에폭시나 시멘트 페이스트를 이용한 보수방법보다 친환경적으로 처리할 수 있고 투수성 감소효과도 있어 물 및 콘크리트에 유해한 화학물질 침투를 예방할 수 있다[1,11]. 또한 자가 회복제로써 박테리아의 적용은 콘크리트 혼합 시 직접 혼합하여 콘크리트 경화 시 발생하는 초기 미세균열을 채우는 기술로 고알칼리성의 콘크리트 내부에서의 박테리아 생존 가능성을 보였다.

이러한 미생물이 탄산칼슘을 침전 시키는 메커니즘은 요소의 탄산염 및 암모늄으로의 가수분해에 기초를 둔다. 선행 연구에서 사용된 미생물은 대부분 *Bacillus* 종으로 이 미생물은 요소분해효소(urease)를 생산한다. 이 효소는 요소( $CO(NH_2)_2$ )가 암모늄( $NH_4^+$ )이온과 탄산이온( $CO_3^{2-}$ )으로 가수분해되는데 촉매로써 작용하게 되며 그 반응 과정은 다음과 같다(그림 1).



\* 학생회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정(E-mail:smileo16@hanmail.net)  
\*\* 비회원 · 인하대학교 생물공학과 석사과정(E-mail:1528222@hanmail.net)  
\*\*\* 학생회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정(E-mail:astroe@nate.com)  
\*\*\*\* 비회원 · 인하대학교 생물공학과 교수 · 공학박사(E-mail:sjaeseon@inha.ac.kr)  
\*\*\*\*\* 정회원 · 인하대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사(E-mail:jhj@inha.ac.kr)

이러한 반응을 일으키는 박테리아는 흙과 모래 그리고 자연상태의 무기물에서 발견되는 미생물로 선행연구에서는 Jonker et al[6,7]은 *Bacillus cohnii*를 사용하였으며, Santhosh et al[9], Day et al[2], Bang et al[1], Ramkrishnan et al[8]은 *Bacillus pasteurii* 를 사용하였고 Dick et al[3]은 *Bacillus lentus*, *Bacillus sphaericus*를 사용하였다. 본 연구에서는 선행연구자들이 사용한 미생물중 하나인 *Bacillus pasteurii* 를 사용하였으며 모르타르에 직접 첨가하여 압축강도 및 Scanning Electron Microscope(SEM) / Energy Dispersive Spectroscopy(EDS) 분석을 통해 박테리아의 적용 효과를 재검증하고 그 미세구조를 관찰하였다.

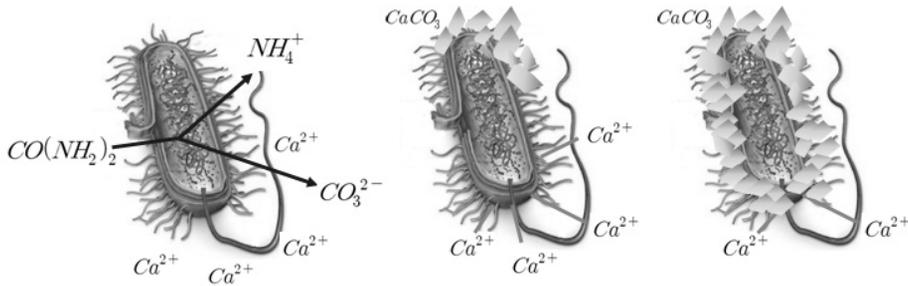


그림 1. 요소 가수분해를 통한 미생물 탄산칼슘의 침전 [12]

## 2. 실내실험

### 2.1 박테리아의 선택 및 배양

신설 콘크리트는 수화반응으로 생성되는 수산화칼슘의 영향으로 높은 알칼리성을 나타내며 일반적인 pH는 11~13의 범위를 가진다. 따라서 콘크리트 내에 사용할 박테리아는 외부의 힘에 대한 저항성도 강해야 하지만 알칼리에 대한 저항성도 커야한다. 이러한 박테리아는 *Bacillus* 종에 많이 분포하고 있으며 이러한 *Bacillus* 종의 박테리아 중 한 가지를 선정하였다. 본 연구에서 사용한 박테리아는 *Bacillus pasteurii* KCTC 3558로 30℃에서 170rpm의 진탕 배양기를 사용하여 배양하였다. 박테리아 균주의 성장은 현미경으로 확인할 수 있었으며 그 배지의 조성은 beef extract 3g/L, peptone 5g/L, urea 20g/L로 구성하였다.

### 2.2 시료제작

박테리아가 적용된 모르타르의 압축강도 측정을 위하여 KS F2426 주입 모르타르의 압축강도 실험방법에 따라 5cm×5cm×5cm 의 크기로 제작하였다. 측정된 모르타르의 배합 및 실험군은 다음 표 1과 같다.

표 1. 실험한 모르타르의 배합 및 실험군

모르타르에 첨가된 물질	첨가된 미생물	첨가된 배지	물-시멘트비 (W/C)	시멘트/잔골재비 (C : S)
대조군(Control)	-	-	0.5	1 : 3
박테리아 + 배지 첨가	<i>Bacillus pasteurii</i>	젓산 칼슘		
박테리아 첨가	<i>Bacillus pasteurii</i>	-		
대장균 첨가	대장균( <i>E.coli</i> )	-		
배지 첨가	-	젓산 칼슘		

사용된 모래는 체분석을 실시하여 0.075mm(200번체)~4.5mm(4번체)의 자연사를 사용하였으며, 박테리아 및 대장균은 모르타르 혼합 전에 물에 미리 혼합한 뒤 배합 시 직접 첨가하였다. 사용된 박테리아 및 대장균의 개수는  $1 \times 10^8/cm^3$  의 농도로 첨가하였다. 실험군은 아무 처리도 하지 않은 대조군과 박테리아와 배지를

섞은 것, 박테리아만의 영향을 알아보기 위해 박테리아만 첨가한 것, 미생물의 영향을 분석하기 위해 인체에 무해한 대장균을 첨가한 것 그리고 박테리아의 영양분으로 제공되는 배지만의 영향을 알아보기 위하여 배지만 첨가한 것으로 총 5가지의 실험군을 준비하였으며 제작된 시료는 24시간 후 탈형하여 20±1.5℃에서 수중양생을 하였다.

### 2.3 압축강도 실험

압축강도 실험은 KS F 2426 주입 모르타르 압축강도 실험방법에 준하여 실시하였으며 사용된 장비는 유압식 압축강도 실험기를 이용하였다. 모르타르의 강도는 재령 7, 14, 28일의 값을 측정하였으며, 이때 박테리아만 첨가된 시료의 경우는 배양된 박테리아 수가 한정되어 재령 7, 14일의 강도만 측정하여 박테리아만의 영향을 분석하였다. 각 실험군당 3개의 시료에 대하여 압축강도 실험한 후 평균값을 해당 재령에 대한 압축강도 값으로 결정하였다.

### 2.4 SEM / EDS 분석

상기 기술한 바와 같이 *Bacillus pasteurii*는 요소의 가수분해를 통해 탄산칼슘 침전물을 생성한다. 이러한 반응을 확인하기 위해 SEM을 이용하여 미세구조 및 성분분석을 실시하였다. 사용한 장비는 일본 HITACHI사의 S-4300SE를 사용하였다. 사용된 장비의 사양은 표 2와 같다.

이 모델은 Thermal Type의 Gun Electron Source로부터 발생하는 전자 빔이 시료에 조사되면서 발생하는 다양한 전자를 이용하여 여러 분야의 시료표면의 미세한 구조를 관찰할 수 있는 장비로 정량, 정성적으로 성분분석 또한 가능하다. 그 기능으로는 미생물, 건설재료, 금속, 반도체, 섬유 및 고분자 물질 등 광범위한 시료의 미세구조를 관찰할 수 있으며 미세구조 및 미세입자(powder) 분석의 대표적 장비이다. 분석에 사용된 시료는 압축강도 실험 후 잔여 조각을 건조시켜 수분을 완전히 제거한 후, 진공상태에서 전자에 대한 반응성이 좋은 백금으로 시료를 코팅하고 5,000배~10,000배의 배율로 각 케이스별로 그 미세구조를 관찰하였다.

표 2. 미세구조 분석에 사용된 SEM 장비 사양

Electron Gun	ZrO / W Schottky Emission
Resolution	15kV, Working distance 5mm -> 1.6mm
Magnification	X 20 ~ X 500,000
Acc. Voltage	0.5 ~ 30kV
EDS	Be <sup>4</sup> ~ U <sup>92</sup> 133 eV

## 3. 실험 결과

### 3.1 압축강도 실험결과

콘크리트에 박테리아를 적용한 효과를 알아보기 위하여 가장 기본적인 실험으로 제작된 모르타르에 대하여 압축강도 실험을 수행하였다. 실험결과 그림 2와 같이 박테리아만 첨가한 시료와 아무것도 처리하지 않은 대조군과의 압축 강도 비교에서 재령 14일의 강도가 박테리아만 첨가한 시료의 경우 약 18% 강도 증진효과를 보였으며, 이것으로 박테리아가 모르타르 내부 미시 구조에 변화를 주었다는 것을 알 수 있었다. 게다가 박테리아와 배지를 첨가한 시료 그리고 배지만을 첨가한 시료의 압축강도가 아무처리 하지 않은 시료 및 대장균(*E.coli*)만은 첨가한 시료와 대비하여 재령 28일 강도가 약 17%정도의 강도향상 효과를 보였다. 여기에서 주목할 점은 배지만 첨가하였을 때의 압축강도가 박테리아와 배지를 함께 첨가한 시료와 유사한 값을 보였다는 것이다. 첨가한 젓산칼슘은 미생물학적 침전물의 성분중 하나인 Ca<sup>2+</sup>를 풍부하게 공급하기 위한 공급원으로 사용되기도 하지만 박테리아가 생존하기 위한 영양분으로 사용된 것이기도 하다. 즉 박테리아가 젓산을 소비하면서 생존하게 되고 Ca<sup>2+</sup>이온과 반응하여 침전물을 발생시키는 것이다. 박테리아와 젓산칼슘을 함께 첨가한 시료에서는 젓산은 소비되었을 것이라

고 판단되며, 대조군(Control)보다 압축강도가 향상되었다는 것은 미생물학적 침전물의 영향이라고 판단된다. 그리고 배지 즉, 젓산칼슘만을 첨가한 시료에서는 젓산이 모르타르 경화과정에서 영향을 미친 것으로 판단된다. 실제로 젓산은 시멘트의 수화반응을 촉진시킨다는 연구가 진행된 점도 있으며[10], 최근에는 배지의 종류에 따른 콘크리트의 강도 향상에 대한 연구가 진행되었는데 선행연구에서 사용된 배지는 효모, 펩톤, 아세트산 칼슘, 젓산칼슘, 염화철 등이 사용되었다. 실험결과 젓산칼슘만을 함유한 콘크리트 및 모르타르의 강도는 향상되었지만 다른 배지만을 첨가한 경우에 대하여는 오히려 강도가 감소한 것으로 보고하고 있다[4,6].

물론 이번 연구에서 실시된 실험은 가장 기초적인 실험으로 여기에 대한 정확한 분석과 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

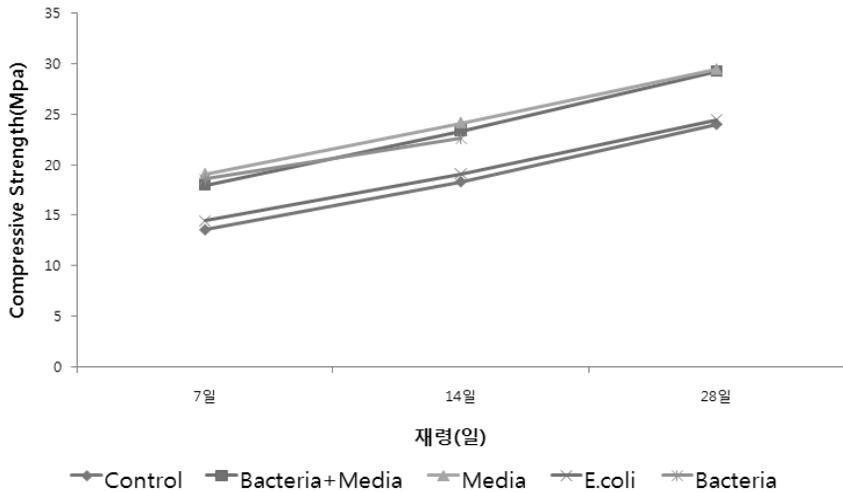
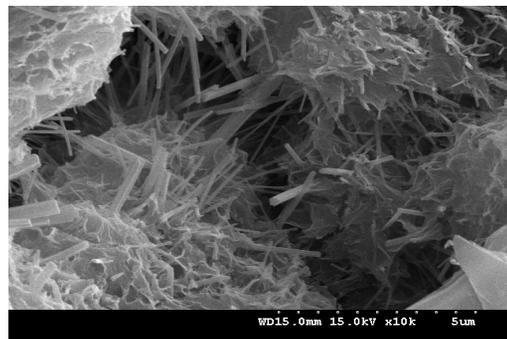
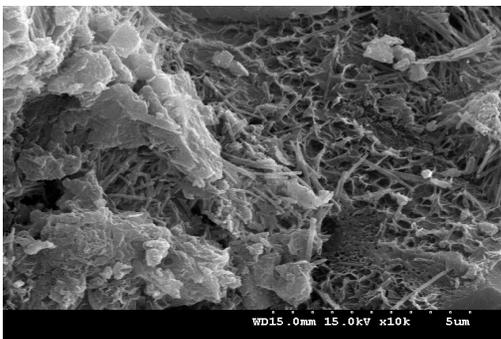


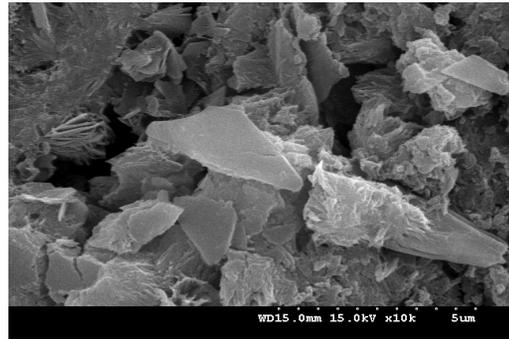
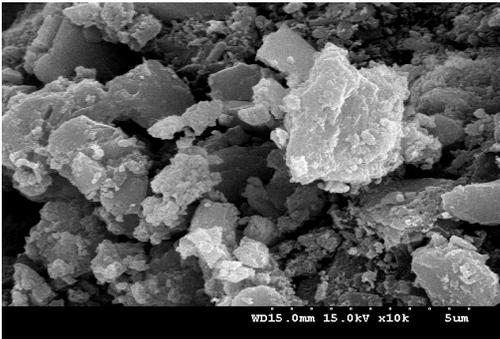
그림 2. 실험군에 대한 압축강도 실험 결과

### 3.2 SEM / EDS 분석 결과

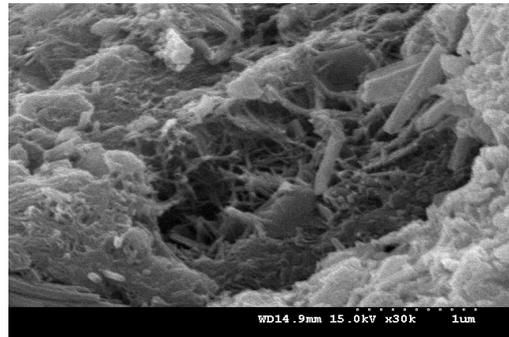
콘크리트의 거시적 구조는 각기 다른 형태와 크기의 골재와 불규칙적으로 분포하는 시멘트 풀로 이루어진 2상 재료라고 할 수 있다. 하지만 그 미시적 구조를 고배율로 살펴보게 되면 콘크리트의 구조는 상당히 복잡한 형태로 구성되어 있다. 특히 시멘트 풀은 어느 부분에서는 대단히 밀도가 높지만 어느 부분은 밀도가 낮다. 이러한 시멘트 풀의 미시적 구조를 확인하고 박테리아가 이러한 콘크리트의 미시적 구조에 어떠한 영향을 끼치는지 알아보기 위해 모르타르의 재령 7일, 28일에서의 SEM 및 EDS 분석을 실시하였다. 그림 3A~3D는 각 실험군에 대한 시료의 재령 7일, 28일에서의 SEM 분석 사진이며 3E는 박테리아만 첨가한 시료의 재령 7일에서의 SEM 분석 사진이다.



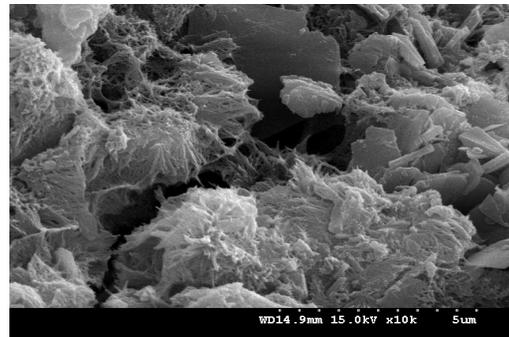
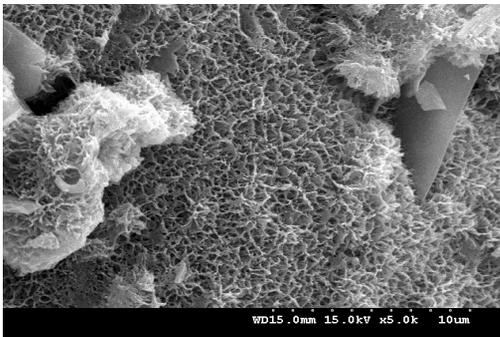
(A) 대조군(Control)의 SEM 사진(X10,000)



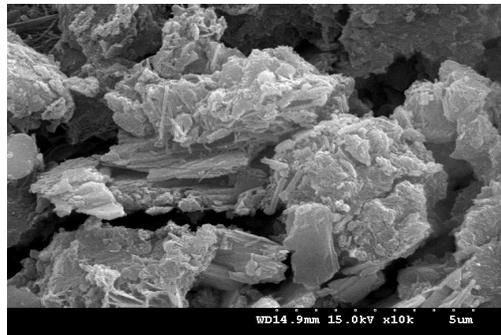
(B) 박테리아와 젯산칼슘이 첨가된 시료의 SEM 사진(X10,000)



(C) 대장균만이 첨가된 시료의 SEM 사진(X30,000)



(D) 배지만이 첨가된 시료의 SEM 사진(X5,000~10,000)



(E) 박테리아만 첨가된 시료의 SEM 사진(X10,000)

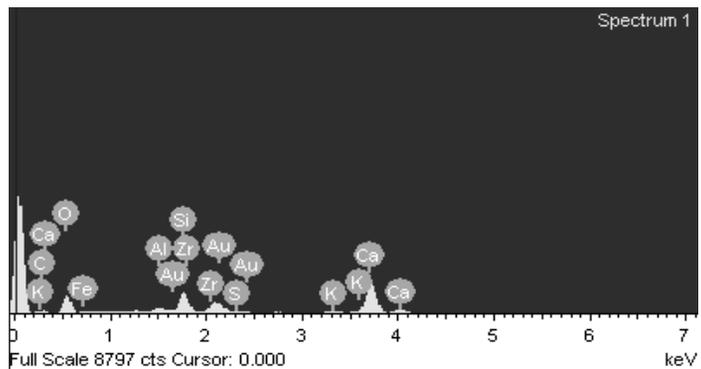
그림 3. 재령 7일(좌), 28일(우)후 실험군의 SEM 사진

아무처리를 하지 않은 대조군 모르타르의 SEM 사진(그림 3A)에서는 제령 7일, 28일에서 모두 대표적인 시멘트 수화물인 큰 결정형의 수산화칼슘, 침상결정의 에트링가이트 및 섬유질의 칼슘실리케이트(C-S-H)를 관찰할 수 있다. 이는 대장균만 첨가한 모르타르에서의 결과(그림 3C)와 동일한 것으로 일반적인 균주는 모르타르에서는 아무런 반응도 하지 않았다는 것을 확인할 수 있었다.

박테리아만 첨가한 실험군(그림 3E) 및 박테리아와 배지를 첨가한 실험군(그림 3B)에서는 덩어리 형상의 결정이 많이 관찰된 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 박테리아가 시멘트풀 내부에서 발생하는 내부 및 미세균열을 채울 수 있는 물질을 생산해 낸다는 것을 확인하였으며, 이는 박테리아의 콘크리트에의 적용 가능성을 보여준 것이라고 할 수 있다. 또한 이 생성물의 분석을 위해 EDS 분석을 실시하였다. 물론 EDS 분석을 통해 해당 물질의 정확한 물질명을 판단하기는 어려우나 대조군(Control)의 경우 탄소가 검출되지 않은 것에 반해 박테리아와 배지가 첨가된 시료의 분석결과에서는 질량비로 9.39%의 탄소가 검출되었다는 것은 상당히 고무적이라고 할 수 있다(그림 4). 물론 정확한 분석을 위해서는 미세적 구조의 결정형 분석이 가능한 XRD 분석을 실시하여야 하지만 통상 시멘트 풀에서 관찰될 수 있는 고체물질이 칼슘 실리케이트 수화물, 수산화 칼슘, 칼슘 술포 알루미늄에이트, 미수화 클링커 입자 등으로 이들 고체는 탄소를 포함하지 않는 물질이므로 검출된 탄소는 박테리아가 시멘트 환경내에서 미생물학적  $CaCO_3$  침전물을 형성했을 것이라 조심스럽게 추정할 수 있다.

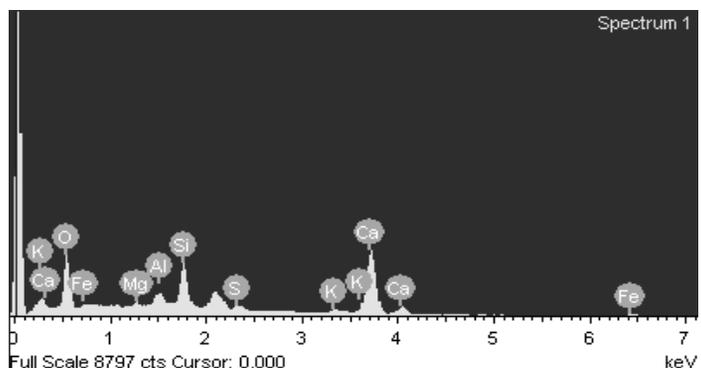
배지의 영향을 분석하기 위해 모르타르에 배지만 첨가한 시료의 SEM 분석결과(그림 3D)에서는 대조군의 구조(그림 3A, 3B)와는 약간 다른 구조를 보였다. 보다 많고 복잡한 형태의 섬유질의 결정상을 보이고 있는데 이는 첨가한 배지인 젖산칼슘의 영향으로 판단된다. 상기에서 언급했듯이 선행연구에서는 첨가한 젖산의 성분이 시멘트의 수화 반응을 촉진시키는 것으로 보고하고 있다[10].

Element	Weight%
C	9.39
O	38.76
Al	1.18
Si	7.47
S	1.47
K	1.11
Ca	23.25
Fe	1.69
Zr	10.91
Au	4.77
Totals	100.00



(A) 박테리아와 젖산칼슘이 첨가된 시료의 EDS 분석결과

Element	Weight%
O	54.11
Mg	0.96
Al	2.54
Si	9.73
S	1.61
K	1.09
Ca	28.65
Fe	1.30
Totals	100.00



(B) 아무 처리도 되지 않은 대조군의 EDS 분석결과

그림 4. EDS 분석결과

#### 4. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구는 콘크리트를 친환경적이고 지속가능한 재료로 개발하기 위한 연구들 중 하나로 몇몇 선진국에서 진행되고 있는 박테리아를 이용한 초기 미세균열 및 공극을 미생물학적 침전물로 채우는 연구의 기초단계이다. 그 결론은 다음과 같다.

- (1) 박테리아를 콘크리트에 적용하는 기술은 현재 세계적으로도 소수의 연구만 진행되었다. 선행 연구에서는 대부분이 경화된 콘크리트에 박테리아를 표면처리하는 균열 보수방안에 대한 연구가 진행되었는데 연구결과 가장 보편적으로 사용되는 에폭시계열의 보수재를 이용한 보수결과와 유사한 투수성 및 균열 채움 효과를 보인 것으로 나타났다[11].
- (2) 본 연구에서는 박테리아를 직접 모르타르에 혼합하여 그 강도를 측정하고 SEM 및 EDS 성분분석을 통해 박테리아가 콘크리트에 어떠한 영향을 주는가에 대한 연구를 진행하였다. 사용된 박테리아는 알칼리 저항성이 강한 *Bacillus pasteurii* 를 사용하였다. 그 결과 박테리아 및 배지를 첨가한 모르타르의 압축강도가 아무처리도 하지 않은 모르타르보다 재령 28일 기준 17%의 압축강도 향상을 나타내었으며 SEM 분석결과에서도 박테리아의 미생물학적 침전물을 생산했다는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 EDS분석결과에서는 박테리아와 배지를 첨가한 시료에서 중량비 9.39%의 탄소의 검출은 탄소가 검출되지 않은 박테리아를 첨가하지 않은 시료와 비교하여 볼 때 고무적이라 할 수 있다. 물론 EDS 분석결과로는 그 구성 물질을 정확히 파악할 수는 없지만 추후 결정의 종류를 분석할 수 있는 XRD 등 분석을 통해 그 구성 물질을 정확히 파악하는 연구가 필요하다고 하겠다.
- (3) 또한 추가적으로 배지만을 첨가한 모르타르의 압축강도 향상은 박테리아의 영양분으로 젓산칼슘이 가장 적합하다는 사실도 알 수 있었다. 젓산은 시멘트의 수화반응을 촉진시키기 때문에 초기 강도 향상에 기여할 수 있다고 판단된다.
- (4) 현재 콘크리트 환경에서 박테리아의 생존율에 대한 분석을 진행하고 있으며, 선행연구에서는 박테리아를 직접 콘크리트에 혼합하였을 때 9일 기준 1%의 생존율을 보인다고 발표하고 있다[6]. 이는 콘크리트의 강한 알칼리성의 영향인 것으로 발표하고 있는데 이에 대한 대안으로 첨가하는 균주를 외부 환경으로부터 생존력이 강한 포자(spore)의 형태로 변환하여 적용하는 방법이나 실리카 Sol에 균주를 포집하여 보호하는 방법 등이 언급되고 있다.
- (5) 박테리아를 콘크리트에 적용하여 콘크리트의 미세균열을 억제하고 각종 내구성 검증을 통한다면 콘크리트의 공용성을 증대시킬수 있을 뿐 아니라 친환경적이고 지속가능한 콘크리트 개발의 초석이 될 것으로 판단되는바 앞으로 국내에서도 이에 대한 활발한 연구가 필요하다고 판단된다.

#### 참고 문헌

1. Bang, S. S., Galinat, J. K. and Ramakrishnan, V. (2001) "Calcite precipitation induced by polyurethane - immobilized *Bacillus pasteurii*", *Enzyme and Microbial Technology*, VOL. 28, pp. 404-409.
2. Day, J. L., Ramakrishnan, V. and Bang, S. S. (2003) "Microbiologically induced sealant for concrete crack remediation", *16th Engineering Mechanics Conference*, Seattle, Washington, pp. 16-18.
3. Dick, J., Windt, W., Graef, B., Saveyn, H., Meeren, P., Belie, N. D. and Verstraete, W. (2006) "Biodeposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by *Bacillus* species", *Biodegradation*, VOL. 17, pp. 357-367.
4. Ghosh, P. and Mandal, S. (2006) "Development of bioconcrete material using an enrichment culture of novel thermophilic anaerobic bacteria", *Indian Journal of Experimental Biology*, VOL. 44, pp. 336-339.
5. Gollapudi, U. K., Knutson, C. L., Bang, S. S. and Islam, M. R. (1995) "A new method for controlling leaching through permeable channels", *Chemosphere*, VOL. 30, pp. 695-705.
6. Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., and Schlangen, E. (2010) "Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete", *Ecological Engineering*, VOL. 36, pp. 230-235.

7. Jonkers, H. M. and Schlangen, E.(2008) "Development of a bacteria-based self healing concrete", *Proc. int. FIB symposium 1*, pp. 425-430.
8. Ramakrishnan, V., Panchalan, R. K. and Bang, S.S. (2005) "Improvement of concrete durability by bacterial mineral precipitation", *Proceedings of 11th International Conference on Fracture*, Turin, Italy, pp. 20-25.
9. Santhosh, K., Ramachandran, S. K., Ramakrishnan, V. and Bang, S. S. (2001) "Remediation of concrete using microorganisms", *American Concrete Insititute Materials Journal*, VOL. 98, pp. 3-9.
10. Singh, N. B., Singh, S.P. and Singh, A. k. (1986) "Effect of lactic acid on the hydration of portlandcement", *Cenment and Concrete Research*, VOL. 16, pp. 545-553.
11. Tittelboom, K. V., Belie, N. D., Muynck, W. D. and Verstraete W. (2010) "Use of bacteria to repair cracks in concrete", *Cement and Concrete Research*, VOL. 40, pp. 157-166.
12. Willem, D. M., Nele, D. B. and Willy, V. (2010) "Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review", *Ecological Engineering*, VOL. 36, pp. 118-136.