생화학적 부식 인공촉진시험에 의한 항균모르타르의 항균성능 평가

Antibiosis Evaluation of Antimicrobial Mortar by Artificial Accelerating Test for Biochemical Corrosion

구 경 모* 신 관 수* 노 경 민* 이 의 배** 김 규 용*** 김 무 한****

Koo, Kyung-Mo Shin, Kwan-Soo Roh, Kyung-Min Lee, Eui-Bae Kim, Gyu-Yong Kim, Moo-Han

Abstract

In this study, an antibiosis of antimicrobial mortar developed to reduce biochemical corrosion of sewage facilities concrete was evaluated. First, artificial acceleration test reflecting similarly biochemical corrosion of mortar was developed. Antimicrobial mortar specimen were experimented in this test and antibiosis of it was evaluated by SEM and EDX.

As a results of the study, sulfur-oxidizing bacteria on the plain specimen were survived for 20 weeks in this test. But sulfur-oxidizing bacteria on antimicrobial specimen were survived less than the plain, and sulfur-oxidizing bacteria were externally distorted and destroyed. So the antibiosis of an antimicrobial mortar was verified by it.

키워드 : 항균모르타르, 생화학적 부식, 황산화세균, 생장억제

Keywords : Antimicrobial mortar, Biochemical corrosion, Sulfur-oxidizing bacteria, Growth control

1. 서 론

하수관로, 정화시설 등의 하수구조물은 대부분 지하매립형 및 폐쇄형 구조로 이루어져 있을 뿐만 아니라 내부에는 높은 습도, 유해가스, 각종 오염물질 및 침식성 물질이 다량 포함된 하수 등이 상재하고 있어, 지상의 다른 콘크리트 구조물에 비해 열화의 진행도가 빠르고 내구수명이 현격히 저하한다.

이러한 하수구조물 콘크리트의 열화를 발생시키는 물리·화학적 요인 이외에 콘크리트 하수구조물의 열화를 가속화시키는 주요 원인으로서, 황산화세균(Thiobacillus속 균주) 등과 같은 미생물의 신진대사 작용으로 생성된 황산 등의 부식인자에 의해 생화학적 부식이 보고된 바 있다. 이후 하수시설 콘크리트의 생화학적 부식에 관련한 다방면의 연구가 수행되어 왔으며 황산화세균을 배양하여 인공적인 열화환경을 조성한 후 시험체를 적용시켜 콘크리트의 생화학적 부식특성을 평가하는 연구도 진행된 바 있다.[2,3]

한편 이러한 생화학적 부식의 현상규명에 관한 연구와 더불어 최근에는 하수구조물 콘크리트의 생화학적 부식을 저감시킬 수 있는 방안에 관한 연구도 진행되었다. 특히 Maeda 등은 특정 금속성분을 콘크리트에 혼입하여 황산화세균의 생장을 억제시키는 연구를 진행하였다. 이를 위해 실제 하수환경 하에서 장기간의 폭로실험을 실시하였으며, 시험체의 외관, 질량변화율 및 부식깊이 등의 물리적 특성 평가를 통해 타당성을 검증하였다.

이에 본 연구에서는 실제 생화학적 부식을 재현할 수 있을 뿐만 아니라 항균성분이 혼입된 항균모르타르의 항균성능을 보다 조기에 평가할 수 있도록 인공촉진시험을 개발한 후, 이를 사용한 평가실험을 실시함으로써 본 시험의 타당성 및 항균모르타르의 황산화세균에 대한 생장억제 성능을 평가하고자 한다.

* 충남대학교 대학원 건축공학과, 석사과정

** 충남대학교 대학원 건축공학과, 박사과정

*** 충남대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

**** 충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사

2. 생화학적 부식 및 인공촉진시험의 개요

2.1 생화학적 부식

하수구조물 콘크리트의 황산화세균에 의한 생화학적 부식메커니즘을 살펴보면, 그림 1에 나타낸 바와 같이 하수층 하부에 퇴적되어 있는 슬러지 층에 생존하는 혐기성 미생물이 유기물을 분해하여 유기산을 섭취하는 과정 중 황화수소(H_2S)를 생성하게 된다.

황화수소는 화학적 산화반응에 의해 황산 또는 황원소로 전환이 가능하다. 그러나 하수구조물 내의 자연환경에서의 화학적 산화는 무시할 수 있을 정도로 매우 느리게 진행되며, 주로 생물학적인 산화가 주를 이룬다. 즉, 황화수소는 콘크리트 면에서 서식하는 호기성 미생물인 황산화세균에 의해 황산(H_2SO_4)으로 전환되며, 황산은 하수시설 콘크리트를 부식시킨다.

초기 콘크리트의 용출수의 pH는 12~13.5 정도이며, 이러한

조건에서는 미생물의 성장이 곤란하다. 그러나 공기 중의 CO_2 뿐만 아니라, $S_2O_3^{2-}$, $S_4O_6^{2-}$, H_2S 등에 의해 콘크리트 표면의 pH는 감소하게 된다. 그 후 pH가 9 정도에 도달하면 황산화세균의 성장이 시작되며, 계속적인 황산화세균의 천이 및 생장, 그리고 H_2S의 산화작용 및 황산의 생성으로 인해 콘크리트의 pH는 저하하고 콘크리트의 생화학적 부식을 야기하게 된다.

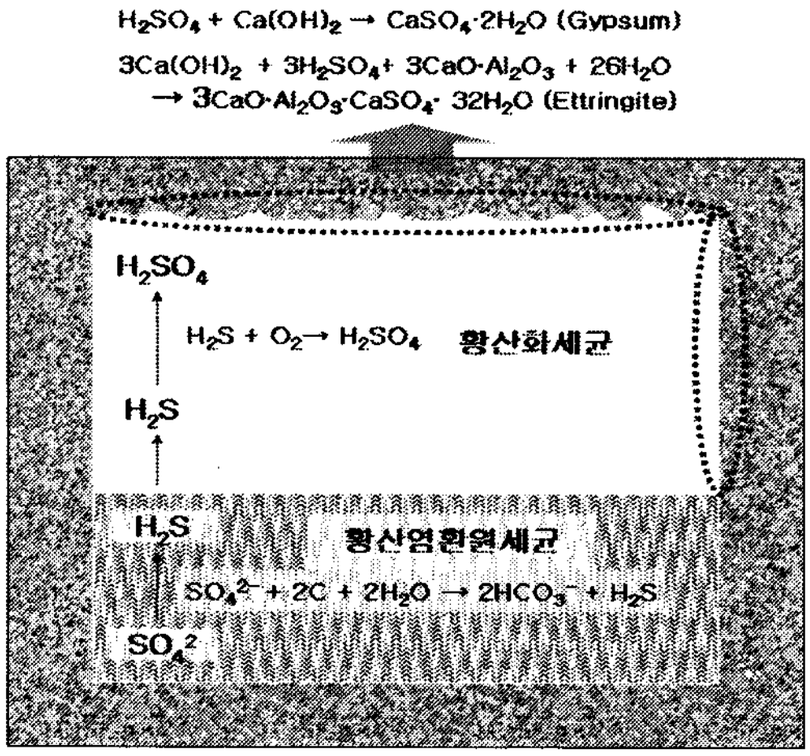


그림 1. 생화학적 부식 메커니즘 모식도

본 연구에서는 한국 생명공학연구소 유전자은행 (Korean Collection for Type Culture, KCTC)과 한국 미생물 보존센터 (Korean Culture Center of Microorganisms, KCCM)에서 보유하고 있는 황산화세균을 파악한 후 황산화세균 증식 및 생화학적 부식의 가속화 시점인 pH 7에서 가장 우점종을 점하고 있는 Starkeya novella (Starkey) Kelly et al. deposited as Thiobacillus novellus Starkey (KTCC number 40157, ATCC number 3093, 이하 통칭 Thiobacillus novellus)를 본 연구의 대상 황산화세균으로 선정하였다.

2.2 생화학적 부식 인공촉진시험

실제 하수구조물 콘크리트의 생화학적 부식 메커니즘을 살펴보면, 크게 혐기성 미생물에 의한 황화수소의 생성단계, 황산화세균에 의한 황산의 생성단계, 그리고 시멘트수화물과 황산의 반응단계로 요약할 수 있다. 실제 하수환경 내에서 발생되는 콘크리트의 생화학적 부식은 상기된 3단계의 전과정이 인과적으로 발생하고 있다.

본 연구에서는 항균성분이 혼입된 시험체의 생화학적 부식 재현가능성 및 항균성능을 평가하기 위해 인공촉진시험을 실시하였으며, 인공촉진시험은 생화학적 부식의 전 단계 중 실제 콘크리트의 부식과 직접적으로 관련이 있는 황산화세균의 생장에 의한 황산의 발생단계와 발생된 황산과 시멘트수화물의 반응단계의 2단계를 고려하였다.

즉, 본 연구의 생화학적 부식 인공촉진시험에서는 황산화세균이 생장할 수 있는 최적의 조건을 갖춘 시험기를 구성하고 그 안에 황산화세균을 이식한 시험체를 투입하게 된다. 이식된 황산화 세균은 시험체의 항균성능에 따라 생장의 정도에 영향을 받으며, 이에 따라 발생되는 황산의 양 또는 다르게 되어 결국 시험체의 부식정도가 다르게 되는 원리를 기본으로 하고 있다.

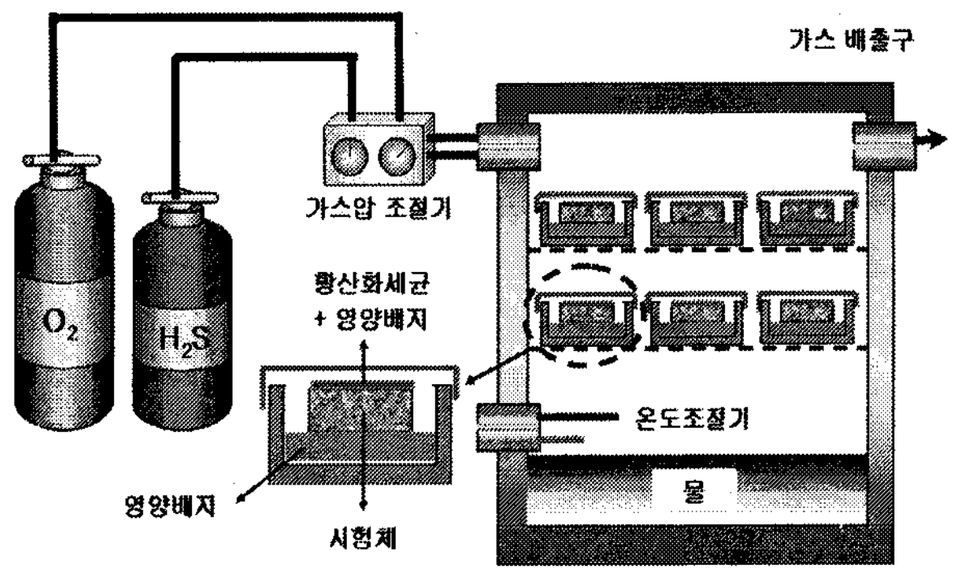


그림 2. 생화학적 부식 인공시험 장치의 모식도

표 1. 실험 계획

기 호	W/C (%)	항균제 (%)	C : S	측정항목
60-0	60	0	1 : 2	• SEM • EDX
60-1		1		
60-3		3		
60-5		5		

표 2. 사용재료의 종류 및 기초물성

종 류	사 용 재 료 의 기 초 물 성
시멘트	제1종 보통포틀랜드시멘트, 밀도 : 3.15g/cm^3, 분말도 : 3,230cm^2/g
잔골재	인천산 제염사, 밀도 : 2.56g/cm^3, 조립율 : 2.9
항균제	구성성분 : 규불화염, 가용성실리카, 항균금속(Ni, W) 액상형, pH : 3~4, 밀도 : 1.10 ± 0.05g/cm^3

시험기의 조건은 Thiobacillus novellus의 최적생장을 위해 온도 30±1℃와 습도 90±5%를 유지하였으며, 또한 Thiobacillus novellus의 신진대사에 필요한 기질인 H_2S농도를 50ppm으로 설정하였다. 생화학적 부식 촉진시험장치의 모식도는 그림 2에 나타낸 바와 같다.

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

표 1은 항균제 첨가율에 따른 항균콘크리트의 생화학적 부식 인공촉진시험 평가를 위한 실험계획을 나타낸 것으로 항균제 첨가율은 0, 1, 3, 5%의 4수준을 설정하였으며, 물시멘트비는 60%로 고정하였다. 측정항목으로는 황산화세균 외관관찰을 위한 SEM분석과 시험체 표면의 원소분석을 위한 EDX 분석을 설정하였다.

3.2 사용재료 및 시험체 제작

생화학적 부식 인공촉진시험에 사용될 시험체 제작을 위해 사용된 재료의 종류 및 기초물성은 표 2에 나타낸 바와 같다. 항균제는 규불화염 및 가용성실리카의 수밀성 성분과 니켈(Ni) 및 텅스텐(W)의 항균성분이 혼합된 국내 T사의 액상의 혼화제를 사용하였다.

인공촉진시험에 사용될 시험체는 20×20×5mm 모르타르 시험체로, 거푸집에 타설하여 기중양생 1일 후 탈형하였다. 탈형이 완료된 시험체는 양생 및 탄산화를 동시에 진행시키기 위해 CO_2

5%, 습도 60%의 촉진탄산화시험기를 사용하여 양생을 실시하였으며, 이는 시험체 표면의 높은 pH로 인해 도말된 Thiobacillus novellus가 초기에 사멸하는 것을 방지하기 위함이다. 촉진탄산화 양생은 시험체 크기를 고려하여 7일간 실시하였다.

또한 촉진탄산화 양생이 완료된 시험체를 알루미늄 호일로 포장하여 100℃의 고온가열로에서 1일간 멸균처리를 실시하였다. 멸균된 시험체로 황산화 세균을 이식시키기 위해 미리 준비된 황산화세균 배양 배지와 위생면봉을 활용하였으며, 황산화세균 도말이 완료된 시험체는 배지가 담긴 페트리디쉬에 넣었다. 페트리디쉬는 뚜껑을 덮어 시험기 내 천정에서 낙하하는 낙수의 영향을 배제시키고자 하였으며, 황화수소 및 공기의 이동이 원활하도록 일부를 천공하였다.

4. 실험결과 및 고찰

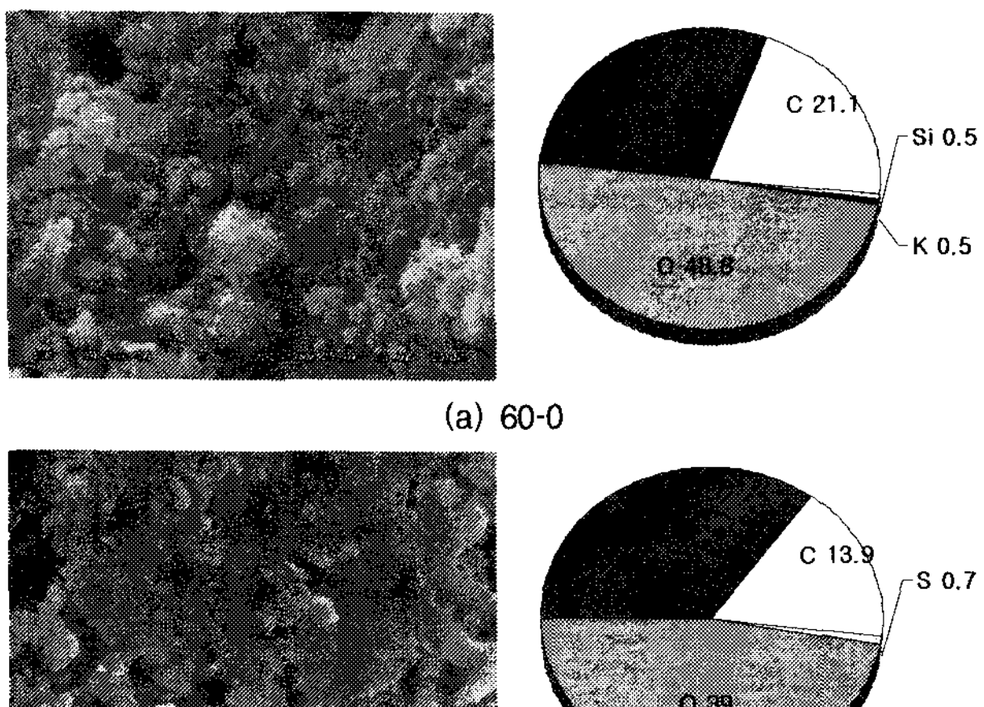


그림 3. SEM 및 EDX에 의한 측정결과 (5,000배, 재령 4주)

그림 3는 인공촉진시험 4주 경과된 시험체의 SEM 및 EDX 측정결과를 나타낸 것으로 항균제가 첨가되지 않은 60-0의 경우 황산화세균인 Thiobacillus novellus가 다량 분포되어 생장하고 있는 것을 관찰할 수 있었다. 그러나 항균제가 첨가된 60-1, 60-3 및 60-5 시험체의 경우 60-0에 비해 관찰되는 Thiobacillus novellus의 수가 감소하는 것으로 나타났다.

EDX에 의한 시험체 표면 원소 분석결과, 황산화세균의 생화학적 부식의 결과로 예상했던 황원소(S)는 60-1 시험체에서만 극히 미미하게 검출되었으며, 나머지 시험체에서는 관찰되지 않았다. 한편 유기물을 추정할 수 있는 원소인 탄소(C)는 항균제의 첨가량이 0, 1, 3, 5 % 증가할수록 21.1, 13.9, 9.5, 10.5 %의 순으로 나타나 항균제 첨가량 증가에 따른 황산화세균의 생장저하를 간접적으로 검증할 수 있었다.

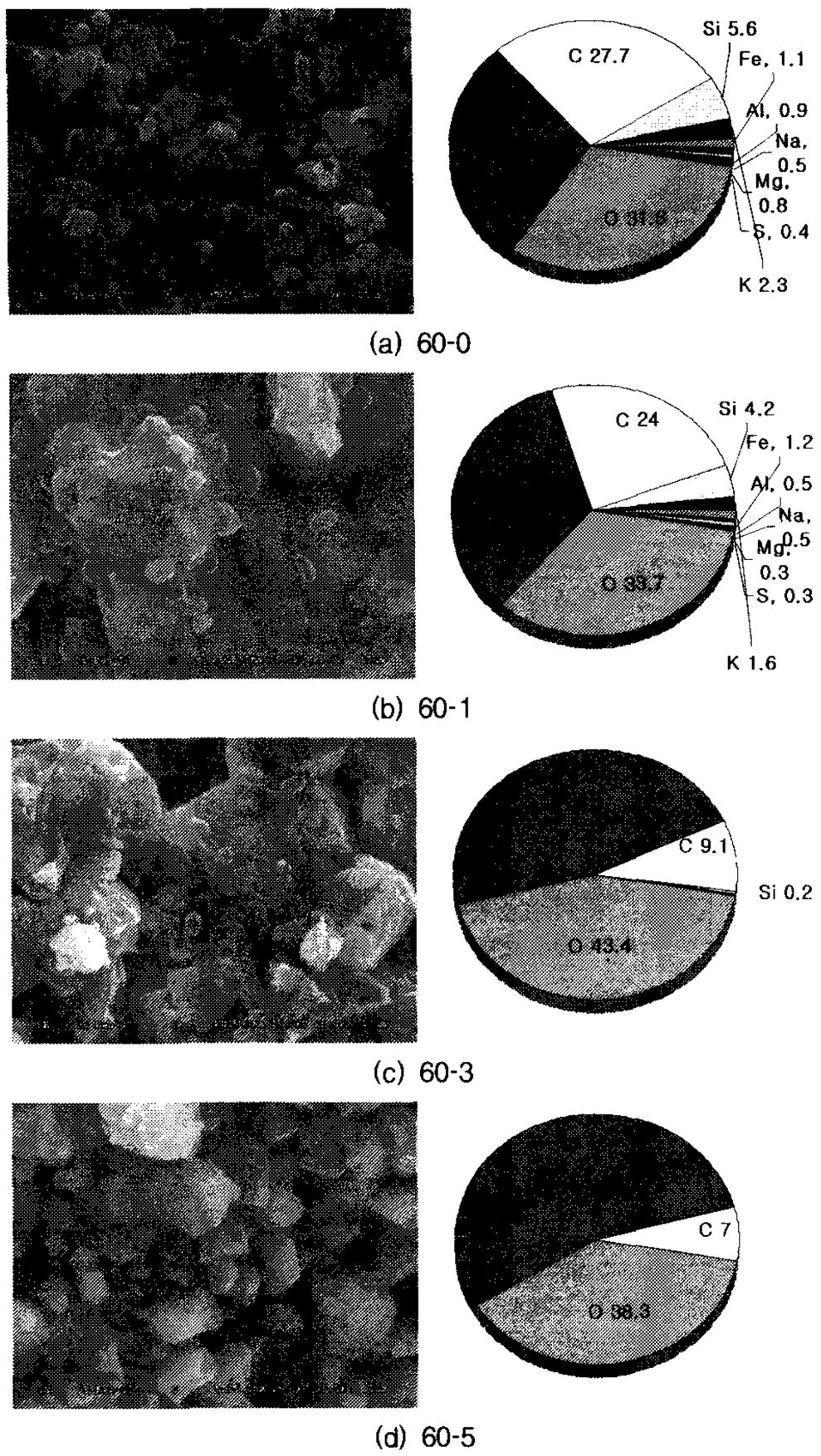
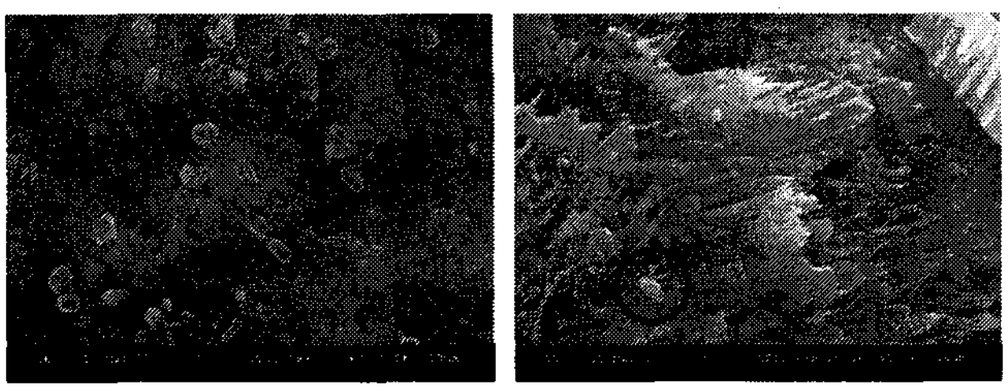


그림 4. SEM 및 EDX에 의한 측정결과 (5,000배, 재령 12주)

그림 4는 인공촉진시험 8주 경과된 시험체의 SEM 및 EDX 측정결과를 나타낸 것으로, 4주째의 측정결과와 유사하게 항균제가 첨가되지 않은 60-0 시험체에서는 다량의 Thiobacillus novellus가 생존하고 있는 것이 관찰된 반면, 항균제의 첨가량이 증가할수록 관찰되는 Thiobacillus novellus의 수는 감소하는 것으로 나타났다. EDX 분석결과에 있어서도 60-0 및 60-1 시험체의 경우 황원소가 각각 0.4, 0.3%의 미미한 수준으로 관찰

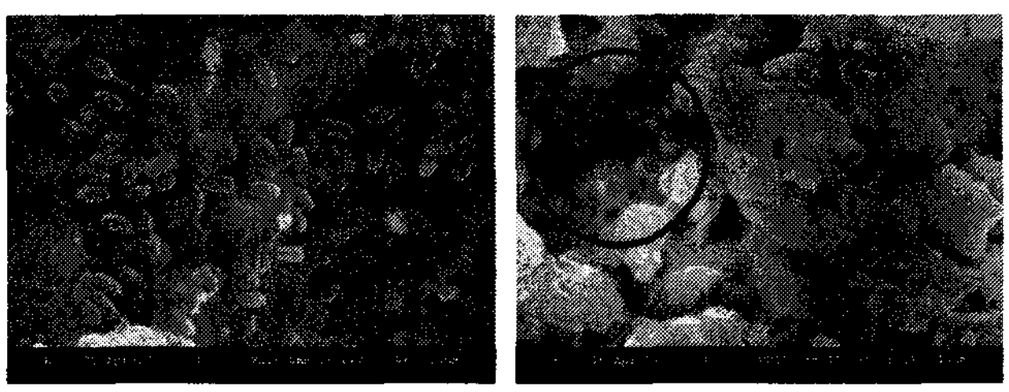
되었으며, 탄소원소는 항균제의 첨가량이 증가할수록 감소하는 것으로 관찰되었다.



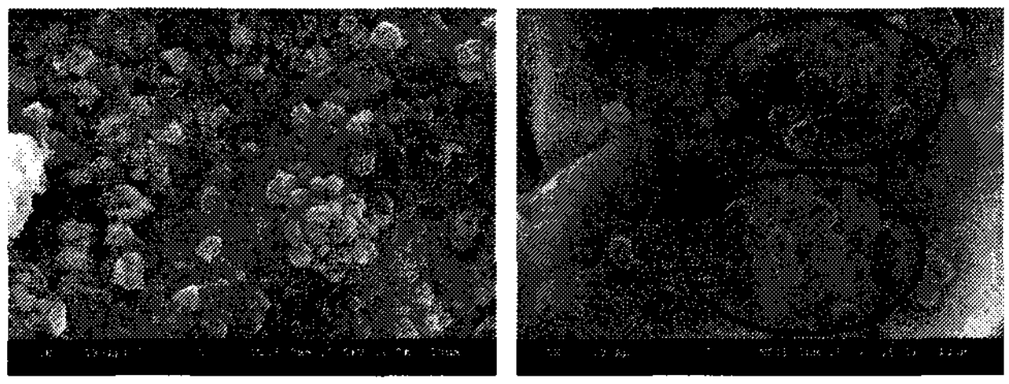
(a) 60-0 (b) 60-1

(c) 60-3 (d) 60-5

그림 5. SEM에 의한 측정결과 (×5,000, 재령 17주)



(a) 60-0 (b) 60-1



(c) 60-3 (d) 60-5

그림 6. SEM에 의한 측정결과 (5,000배, 재령 20주)

그림 5 및 그림 6은 인공촉진시험이 각각 17주 및 20주 진행된 시험체의 SEM 부석결과를 나타낸 것으로 전반적으로 황산화세균의 개체수가 시험초기에 비해 감소되었으며, 부분적으로 집중되어 관찰되는 경향을 나타내었다.

항균제가 첨가되지 않은 60-0 시험체의 경우 장기에 걸쳐서도 Thiobacillus novellus가 지속적으로 생장하는 것을 관찰할 수 있었으며, 개체형태 또한 건전한 상태를 나타내었다.

반면, 항균제가 첨가된 시험체의 경우 Thiobacillus novellus의 개체수가 60-0에 비해 적게 관찰되었다. 또한 일부 황산화세균의 개체형태가 파괴되거나 변형된 것을 확인할 수 있었으며, 항균제의 혼입량이 증가할수록 그 형태변형이 뚜렷이 관찰되었다. 이는 항균금속에 의한 항균효과의 결과로, 항균금속의 영향으로 인해 황산화세균의 표피 및 내부조직이 파괴된 것으로 사료된다.

5. 결 언

본 연구에서는 실제 생화학적 부식을 재현할 수 있을 뿐만 아니라 항균성분이 혼입된 항균모르타르의 황산화세균 생장억제 성능을 평가할 수 있도록 인공촉진시험을 개발한 후, 이에 대한 평가실험을 실시하였다.

그 결과 시험시간이 경과하여도 황산화세균이 지속적으로 생장하고 있는 것으로 나타나 본 인공촉진시험의 생화학적 부식에 대한 재현 가능성을 확인할 수 있었다. 또한, 항균제가 첨가된 시험체의 경우 일반 시험체에 비해 관찰되는 황산화세균의 수가 감소할 뿐만 아니라, 항균성분에 의해 황산화세균의 형태가 변형되는 것으로 나타나 항균모르타르의 황산화세균 생장억제 성능 또한 실험적으로 검증할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산(주) 건설부문 및 (주)트라이포드의 연구지원하에 수행되었으며, 논문에 참여한 연구자(의 일부)는 2단계 BK21 사업의 지원비를 받았습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 이의배, 김도수, 길배수, 이승훈, 김규용, 김무한(2006), 하수시설 콘크리트의 생화학적 부식특성 평가를 위한 실내 인공촉진 시험방법, 한국콘크리트학회 봄 학술발표대회논문집, 18(1)
2. 이의배, 노경민, 김도수, 이승훈, 김규용, 김무한(2007), 항균금속성분이 함유된 모르타르의 생화학적 부식특성 평가에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 봄 학술발표대회논문집, 19(1)
3. 충남대학교(2004), 도포형 액상 무기질 항균제에 의한 하수시설 콘크리트의 부식방지 시스템 및 실용화 기술개발
4. 한국건설기술연구원(1994), 하수관거의 부식에 관한 연구
5. 日本下水道事業團(2002), 下水道コンクリート構造物の腐食制御技術及び防蝕技術指針·同マニュアル
6. 前田照信(1999), コンクリート腐食に対する防菌剤の開発に関する研究