



액상 수밀성 항균제를 사용한 항균 콘크리트의 성능 평가에 관한 연구

김규용¹⁾ · 김무한¹⁾ · 이의배^{1)*} · 조봉석¹⁾ · 길배수²⁾

¹⁾충남대학교 건축공학과 ²⁾(주) 트라이포드

A Study on the Performace Evaluation of Antimicrobial Concrete Using Liquid Reinforcing Antibiotics

Gyu-Yong Kim¹⁾, Moo-Han Kim¹⁾, Eui-Bae Lee^{1)*}, Bong-Suk Cho¹⁾, and Bae-Su Khil²⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-742, Korea

²⁾Tripod Co. Inc. Daejeon 305-308, Korea

ABSTRACT In this study, researches for the development of antibiotics and antimicrobial concrete were conducted to reduce biochemical corrosion of sewage concrete. First of all, desired performance, such as watertightness, antibiosis, homogeneity, workability and harmless, was proposed and performance of antibiotics and antimicrobial concrete were evaluated by them. As results of this study, dispersibility and antibiosis of liquid antibiotics superior to powdery antibiotics. Antibiosis of antimicrobial concrete was verified, and amount of elution of harmful and effective ingredients was little. In workability, setting time of antimicrobial concrete was delayed. Compressive strength and resistance to carbonation of antimicrobial concrete were more increased than ordinary concrete. Also, as little pore volume and closed structure of antimicrobial concrete were observed, watertightness of it was verified. Finally artificial accelerating test for biochemical corrosion was proposed, and its suitability was experimentally proved.

Keywords sulfur-oxidizing bacteria, biochemical corrosion, antibiosis, antimicrobial concrete, artificial accelerating test

1. 서 론

도심지의 침수방지를 위한 우수배제, 오수의 수송처리, 수세화 보급에 의한 생활환경 개선 이외에도 하천, 호수, 해역 등의 수질보존, 보건환경 및 위생 등 국민의 환경권 보장에 있어서 필수불가결한 사회기반시설인 하수시설은 주로 콘크리트로 이루어져 있으며, 이러한 콘크리트 하수시설은 높은 습도, 다종의 가스 및 침식성 물질이 다량 포함된 하수가 상재하고 있을 뿐만 아니라 토압, 활하중 등이 항상 가해지고 있기 때문에 지상의 타 콘크리트 구조물에 비해 열화의 진행도가 빠르다.

특히 황산화세균(Thiobacillus속 균주) 등과 같은 미생물의 신진대사 작용으로 생성된 황산 등의 부식인자에 의한 생화학적 부식은 최근 콘크리트 하수시설의 열화를 가속화시키는 주요 원인으로서, 생화학적 부식 메커니즘은 기존의 연구에 의해 규명되어 있다.^{1,2)}

일본의 경우 생화학적 부식을 저감시키기 위한 방안으로서 주요성분으로 은(Ag), 동(Cu), 니켈(Ni), 텅스텐(W) 등의 금속이온성분계로 구성된 분말형 콘크리트용 항균

제에 대한 연구를 진행하였으며, 이를 활용한 항균 콘크리트가 제품으로서 실용화되고 있다.²⁾

국내에서도 하수시설 콘크리트의 생화학적 부식에 대한 열화 사례가 보고된 바 있으며, 이에 대한 대책으로서 2004년도 KS F 4403 「원심력 철근콘크리트 관」³⁾에 항균제 및 항균 콘크리트관에 대한 규격 및 시험 방법을 추가하였으나, 이에 관한 연구는 매우 미비한 실정이다.

이에 본 연구에서는 하수시설용 항균 콘크리트에 대한 성능 설계를 실시하여 목표 요구 성능에 만족될 수 있는 항균제 및 항균 콘크리트의 개발과 성능 평가에 관한 연구를 진행하였다. 또한 콘크리트의 생화학적 부식을 평가할 수 있는 실내 인공축진시험 방법을 제안하고 그 적용성을 평가함으로써, 하수시설 콘크리트의 생화학적 부식 저감을 위한 기초 연구 자료로서 제시하고자 한다.

2. 하수시설 콘크리트의 생화학적 부식 메커니즘

하수시설 콘크리트의 황산화세균에 의한 생화학적 부식 메커니즘은 Fig. 1의 모식도에 나타난 바와 같이 황화수소의 생성, 황화수소의 발산, 황산의 생성 및 콘크리트의 황산화부식 단계로 진행된다.

하수시설 내부의 하수가 혐기상태인 경우, 저층부의 퇴

*Corresponding author E-mail : mir2468@cnu.ac.kr

Received November 6, 2006, Accepted December 30, 2006

©2007 by Korea Concrete Institute

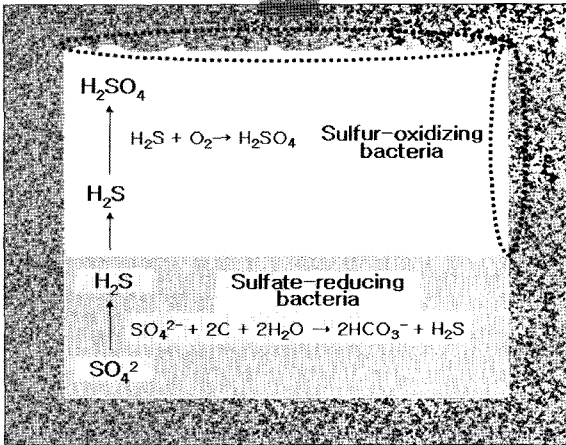
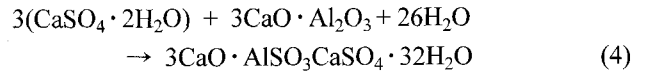
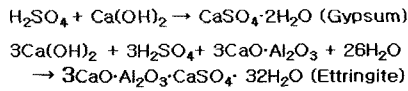


Fig. 1 Mechanism of biochemical corrosion

적물이나 내벽에 부착된 생물막 중에 서식하는 황산염환원세균(SRB, sulfate reducing bacteria)이 활성화되고, 유기물을 분해하여 유기산을 섭취하는 과정 중 황화수소(H₂S)를 생성하게 된다.



하수 중에 존재하는 황화수소(H₂S)는 휘발성이 높고, 흐름에 난류가 있는 경우 쉽게 대기 중으로 발산된다. 이 때문에 맨홀부의 단차나 압송관의 도출구 등에서는 대량의 황화수소가 하수 중에서 대기 중으로 발산된다.

대기중으로 발산된 황화수소는 Fig. 2와 같이 콘크리트 면에 서식하는 호기성 미생물인 황산화세균(SOB, sulfuroxidizing bacteria)에 의해 황산(H₂SO₄)으로 전환된다.



생성된 황산은 콘크리트의 시멘트 수화물과 화학반응을 일으켜 이수석고(CaSO₄·2H₂O) 및 에트링자이트(Ettringate, C₃A·3CaSO₄·32H₂O)를 생성시켜 시멘트수화물의 조직 와해, 콘크리트의 박리·박락, 철근의 노출 및 부식을 유발시켜 최종적으로 하수시설 콘크리트의 내하력 저하를 야기한다.

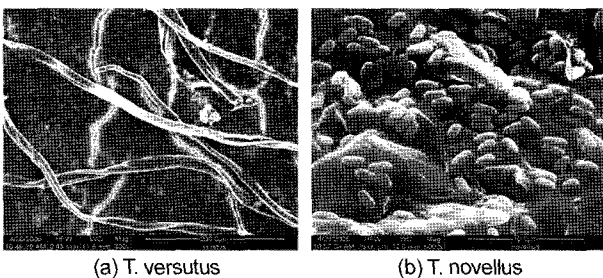
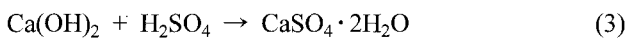


Fig. 2 Sulfur-oxidizing bacteria (E-SEM)

3. 항균 콘크리트의 요구 성능 설정

신설된 하수시설의 경우 초기 콘크리트의 높은 pH에 의해 황산화세균의 생장이 억제된다. 그러나 경과년수가 증가함에 따라 CO₂를 비롯한 각종 열화 요인에 의한 콘크리트의 탄산화가 진전되고 콘크리트의 pH가 저하되어 황산화세균의 서식이 증가하게 된다. 이후 각종 열화 요인에 의한 영향과 생화학적 부식이 복합적으로 작용하면서 하수시설 콘크리트의 열화진행이 가속화된다.

이와 같은 생화학적 부식에 대응하기 위한 하수시설용 항균 콘크리트의 요구 성능을 제시하기 위해 본 연구에서는 관련기술자 및 연구자들의 설문조사를 실시한 후, 요구 성능과 각종 기능 및 제반 조건과의 상관 중요도에 대한 분석을 통해 주요성능 및 기능을 도출하고자 하였다.

항균 콘크리트에 요구되는 사항을 성능 항목별로 개략적으로 분류하면 Fig. 3과 같이 기본적인 압축강도 이외에 각종 열화 요인의 침투에 저항할 수 있는 수밀성, 황산화세균의 생장을 억제시킬 수 있는 항균성, 항균 성분 등이 고르게 분포되는 균질성, 유해물질의 용출과 관련된 무해성 및 건설 현장에 적용될 수 있는 기본적 시공성 등으로 분류할 수 있다.

본 연구에서의 항균 콘크리트에 대한 목표 요구 성능은 앞서 분류된 요구 성능 항목과 건설생산성 및 재료 성능 설계의 개념을 고려하여 Table 1과 같이 설정하였으며, 요구 성능의 목표치는 항균제를 사용하지 않은 Plain과 동등 이상으로 설정하였다.

Details of Performance Design																			
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
No.	Desired Performance of Product	Antibiosis			Watertightness			Physical Properties			Safety		Simple-ness		Total				
		Volume of SOB	Discoloration	Using Amount	Dispersibility / Homogeneity	Testing Term	Antibiosis of Antibiotics	Antibiosis of Concrete	Control of Carbonation	Strength	Shrinkage and Crack	Setting Time	Compressive Strength	Harmful Object		Application to heavy Mixed Concrete	Easy Obtainment		
1	Antibiosis of Concrete	10	9	9	3	9	3	9	9										
2	Watertightness of concrete	8			3	1				9	9	9	9						
3	Construction of Concrete	6	3	3		1		3	9	3	3	3	9	9	9	9	9	3	3
	Importance	108	108	54	104	30	108	144	82	90	90	90	84	84	84	84	48	48	
	Rank of Importance	2	2	15	5	18	2	1	13	6	6	6	9	9	9	9	16	16	

Note) Performance Importance = ∑(Weight x Number of survey)

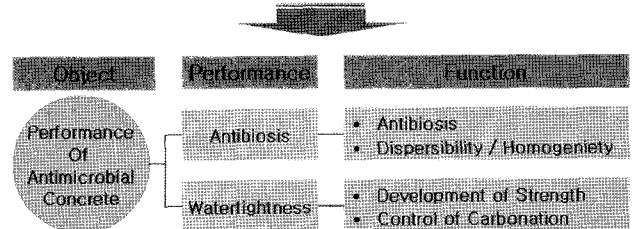


Fig. 3 Performance analysis of antimicrobial concrete

Table 1 Desired performance of antimicrobial concrete

Items	Outline
Watertightness	Improvement of micro-structure and resistance to deteriorative factors
Antibiosis	Control of SOB ¹⁾
Homogeneity	Disperbility of effective ingredients of antibiotics in concrete
Harmlessness	Eruption of harmful ingredients in antimicrobial concrete
Workability	Slump, air content, setting time, etc.

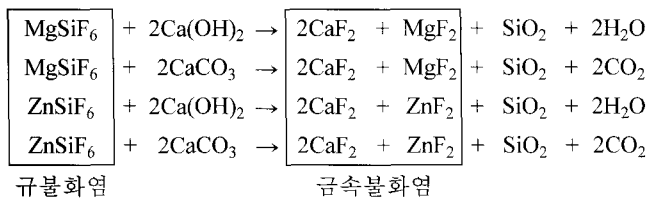
Note 1) SOB: Sulfur-oxidizing bacteria

2) Desired performance of antimicrobial concrete
 ≥ performance of plain concrete

4. 항균제의 구성

4.1 항균제의 액상형과 복합기능화

본 연구에서 사용된 액상 수밀성 항균제는 주요 성분이 규불화염, 가용성 실리카, 니켈 및 텅스텐 화합물로 구성된다. 이 중 규불화염(ZnSiF₆, MgSiF₆)은 시멘트 수화물과 반응하여 불용성의 안정하고 치밀한 결정 구조의 플루오르화칼슘(CaF₂)과 플루오르화마그네슘(MgF₂) 등을 생성시켜 콘크리트의 강도, 수밀성 및 내약품성을 향상시킬 뿐만 아니라 수화속도를 저감시켜 수축에 의한 균열 발생을 억제시키는 효과를 갖는다. 이러한 규불화염과 시멘트 수화물과의 반응식을 요약하면 다음과 같다.



또한 가용성실리카는 수산화칼슘(Ca(OH)₂)과 포졸란반응을 하여 C-S-H 겔을 촉진시킴으로써 콘크리트의 수밀성을 증대시키며, 니켈(Ni) 및 텅스텐(W) 화합물은 황산

화세균의 생육을 억제시킴으로써 항균성능을 발휘한다.

이와 같은 항균제는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 생화학적 부식에 의한 하수시설 콘크리트의 열화 과정 중 수밀성의 향상에 의한 탄산화 저항성의 향상을 도모하여 콘크리트의 내구성 뿐만 아니라 초기 황산화세균의 번식을 억제한다. 또한 경과년수가 증가하면서 콘크리트의 표면 탄산화가 시작되면 황산화세균의 생장이 개시되는데, 이 때에도 항균제의 항균 성분에 의해 황산화세균의 생장이 억제 되어 하수시설 콘크리트의 생화학적 부식을 저감시킨다. 더욱이 액상으로 제조되기 때문에 콘크리트 내에서의 분산성능이 우수하며 레미콘 생산에 적용이 유리한 이점을 갖고 있다.

4.2 화학적 성분 및 물리적 성질

항균제의 화학적 성분은 Table 2에 나타낸 바와 같이 수밀성분으로서 규불화염과 가용성 실리카가 사용되었으며, 항균성분으로 니켈 및 텅스텐 화합물이 사용되었다.

또한, 항균제의 물리적 성질은 Table 3에 나타낸 바와 같다. 단, 규불화염 내에 포함된 마그네슘(Mg)과 아연(Zn)은 표준전극전위가 낮기 때문에 철(Fe)보다 이온화되는 경향이 높다. 즉, 이와 같은 마그네슘과 아연의 희생양극효과(sacrificial anode effect)와 철근표면에 생성되

Table 2 Ingredients of antibiotics

Ingredients of antibiotics	Composition rate (%)
• Flousilicate salt (ZnSiF ₆ , MgSiF ₆)	5~30
• Soluble silica	20~30
• Nickel compound	0.5~10
• Tungsten compound	0.1~5
• Diluted solution	25~74.4

Table 3 Physical properties of antibiotics

Items	Value of measurement
• Solid concentration	13±2%
• Specific gravity	1.20±0.05
• External appearance	Liquid type with green
• pH	3.0±0.5

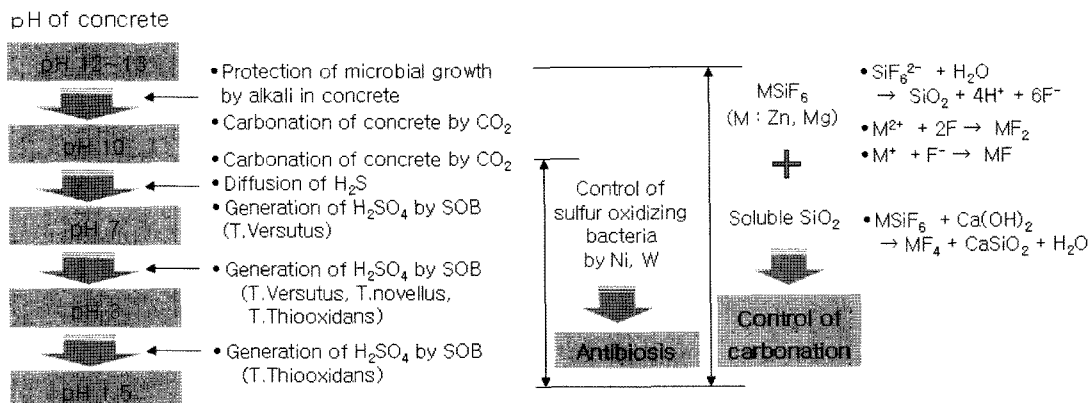


Fig. 4 Deterioration flow of sewage concrete by biochemical corrosion and function of antibiotics

는 보호층($\text{FeF}_2\text{-SiO}_2$ 복합조성)에 의해 pH 3~4의 높은 산성 영역에서도 철근 부식을 방지할 수 있다.

5. 항균제 및 항균 콘크리트의 성능 평가

5.1 실험 계획

Table 4는 항균제 및 항균콘크리트의 성능을 평가하기 위한 실험계획을 나타낸 것으로, 액상 수밀성 항균제의 분산성능 및 항균성능을 평가하기 위해 기존의 분말형 항균제 1종과 비교평가를 실시하였으며, 평가방법으로는 전자미크로분석(EPMA)과 미량 회석법에 의한 최소생육 억제농도 측정시험(Broth microdilution minimal inhibitory concentration)을 실시하였다.

액상 수밀성 항균제를 사용한 항균콘크리트의 항균성능을 평가하기 위해서는 비색시험법을 사용하였으며, 중금속 용출여부를 평가하기 위해 한국폐기물공정시험방법에 준한 시험을 실시하였다. 또한 항균콘크리트의 시공성을 평가하기 위해 공기량, 슬럼프 및 응결시간을 측정하였으며, 수밀성을 평가하기 위해 압축강도 및 탄산화를 측정하였고, 이에 대한 정밀한 분석을 위해 수은압입법을 통한 내부공극량과 SEM에 의한 내부조직 촬영을 실시하였다.

5.2 사용 재료 및 배합

Table 5는 항균콘크리트의 구성재료에 대한 물리적 성질을 나타낸 것으로서 시멘트는 국내 A사의 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 굵은골재는 밀도 2.62 g/cm^3 , 최대치수 20 mm의 부순골재, 잔골재는 밀도 2.58 g/cm^3 의 해사를 사용하였다. 혼화재료로는 나프탈렌계 고성능 감수제를 사용하였으며, 항균제는 액상형으로서 pH 3~4, 밀도 $1.10 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ 의 물리적 특성을 갖고 있다.

Table 4 Experimental plan

Sort	Evaluating items	Evaluating method
Antibiotics ¹⁾	• Dispersibility	• EPMA
	• Antibiosis	• Broth Microdilution MIC test
Antimicrobial concrete	• Antibiosis	• Discoloration test
	• Elution of harmful ingredients	• ICP analysis
	• Workability	• Air content • Slump • Setting time
	• Watertightness	• Compressive strength • Carbonation depth • Pore volume • Micro structure

Note 1) To compare dispersibility and antibiosis of liquid antibiotics, powdery antibiotics was added in test

Table 5 Physical properties of materials

Materials	Physical properties
Cement	Ordinary portland cement Specific gravity : 3.15 g/cm^3
Coarse aggregate	Crushed stone Specific gravity : 2.62 g/cm^3 , Max. size : 20 mm
Fine aggregate	Sea sand Specific gravity : 2.58 g/cm^3 , Fineness modulus : 2.84
Superplasticizer	Napthalene

Table 6 Mix proportion

Specimen	W/C (%)	s/a (%)	Air content (%)	Slump (cm)	Ab ¹⁾ (%)	W (kg)	Unit weight (kg/m^3)		
							C	S	G
Plain	50	45	4.5 ± 1.5	18 ± 1	0.0	178	356	788	978
Ab-P ²⁾					1.0	178	352	790	980
Ab-L ³⁾					1.0	178	356	788	978

Note 1) Antibiotics content, C×wt%

2) Powdery antibiotics, 3) Liquid antibiotics

본 연구를 위한 실험 배합은 Table 6에 나타난 바와 같이 물시멘트비 50%, 잔골재율 45%, 공기량 $4.5 \pm 1.5\%$, 슬럼프를 $18 \pm 1 \text{ cm}$ 로 설정하였으며, 액상 항균제의 분산성능을 평가하기 위해 기존의 분말형 항균제를 사용한 비교용 시험체를 위한 배합을 1개 수준 추가하였다.

5.3 시험 방법

5.3.1 Broth Microdilution MIC 시험

항균제의 항균성능을 측정하기 위해 먼저 황산화세균의 일종인 *Thiobacillus novellus*를 농도가 $3.75 \times 10^8/\text{ml}$ 이 되도록 0.85% 염수(saline)에 현탁한 후에 *T. novellus*의 적정배지(nutrient agar)에 도말하였다. 이후 배지 위에 시험물질을 적하하고, 30°C 에서 2일간 배양한 후 투명환(透明丸, clear zone)의 지름을 측정하였다.

5.3.2 비색(比色)에 의한 항균성능 평가시험

항균 콘크리트의 항균성능에 대한 평가는 KS F 4403 「원심력 철근콘크리트 관」³⁾의 부속서에 수록된 무기항균제가 첨가된 공시체의 항균효과 시험방법에 준하여 $40 \times 40 \times 10 \text{ mm}$ 의 항균 콘크리트 시험체를 지시약이 첨가된 시험균주 배양액에 4주간 침지한 후 배양액의 색상 변화를 통해 항균 성능을 평가하는 비색시험법을 실시하였다. 또한 본 시험에 사용된 지시약은 Table 7에 나타난 바와 같다.

5.3.3 유해성 평가시험

항균 콘크리트의 유해물질 용출성 평가는 한국폐기물공정시험법(KSLT)에 준하여 시험체중 중금속 및 유효성

Table 7 Types and properties of indicator

Indicator	SOB	pH	Color
Phenolred	Thiobacillus versutus	Over 7.6	Pink
		Under 7.6	Yellow
Bromo creso purple	Thiobacillus novellus	Over 6.6	Purple
		Purple	Yellow

분의 용출성을 평가하였다. 먼저 시험체를 파쇄한 후 고형분/물=1/10의 조건의 혼합물에 염산을 사용하여 pH=5.8~6.3으로 조정된 상태에서 진탕기(shaker)로 15~25°C에서 6시간 진탕한 후 여액을 채취하여 시험 대상액으로 하였다. 중금속 및 유효 성분의 용출 특성은 ICP-MASS (Thermo elemental IRIS DUO)를 사용하여 측정하였으며, 중금속으로는 Cu, Pb, Sn, Cr을 대상으로 하였고, 항균제가 첨가되었을 때를 고려하여 유효성분으로는 Ni, W, Mg, Zn을 대상으로 하였다.

5.3.4 분산 성능 평가 시험

항균제의 분산 성능은 EPMA(Electron probe micro-analyzer) 면분석을 실시하여 항균 성분의 분포 상태를 통해 고찰하였다.

5.3.5 항균 콘크리트의 시공성 및 수밀성 평가 시험

항균 콘크리트의 공기량, 슬럼프, 응결시간 및 압축강도는 각각 KS에 준해 측정하였으며, 탄산화 저항성은 5% CO₂, 습도 60%의 탄산화 촉진시험을 통해 고찰하였다. 또한 세공측정기(Porosimeter) 및 주사전자현미경(SEM)을 활용하여 항균콘크리트의 세공구조 및 미세조직의 형상을 관찰하였다.

5.4 실험 결과 및 고찰

5.4.1 액상 수밀성 항균제의 성능 평가

1) EPMA에 의한 분산성상

Fig. 6은 동일 혼합조건하에서 액상 수밀성 항균제와 기존 분말형 항균제를 사용한 콘크리트의 EPMA 면분석 결과를 나타낸 것이다.

분말형 항균제를 첨가한 경우 콘크리트 내에 항균성분의 분말상이 관찰되었으나, 액상 항균제를 첨가한 경우 액상의 특성상 미세한 항균성분의 입자가 밀집된 형상은 관찰되지 않았다.

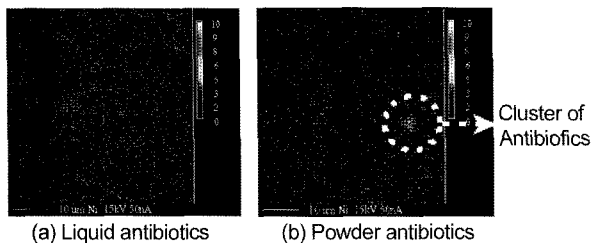


Fig. 6 Result of EPMA

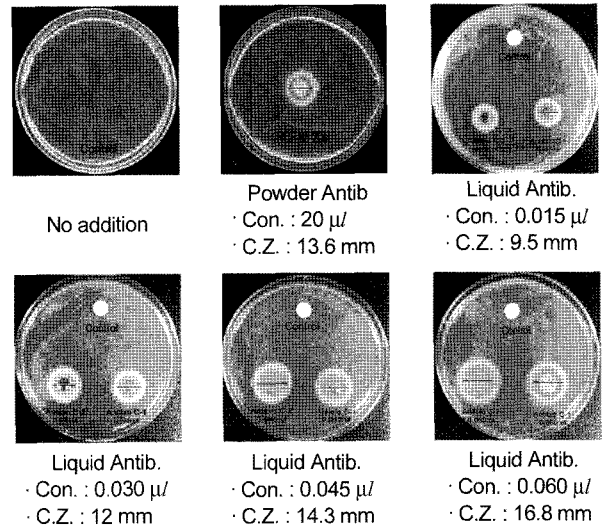


Fig. 7 Antibiosis result of antibiotics

2) Broth Microdilution MIC 시험에 의한 항균성능

Broth Microdilution MIC 시험 결과, Fig. 7에 나타낸 바와 같이 슬래그계 분말의 증량제와 혼합된 분말형 항균성분의 경우 20 μl의 농도에서 직경 13.6 mm의 투명환이 형성되었다. 액상 수밀성 항균성분의 경우 0.015~0.060 μl의 농도에서 투명환 직경이 9.5~16.8 mm로 측정되었으며, 각각의 적하농도가 증가됨에 따라 투명환의 직경이 증가되는 것으로 관찰되어 분말형 및 액상형 항균성분의 항균성능을 검증할 수 있었다.

5.4.2 항균 콘크리트의 성능 평가

1) 비색에 의한 항균 성능

Table 8은 황산화세균인 T. versutus 및 T. novellus 균주에 대한 액상 수밀성 항균제를 사용한 항균 콘크리트의 항균 성능 평가 결과를 나타낸 것이다.

· T. versutus에 대한 항균시험

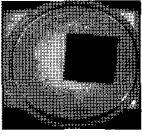


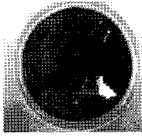

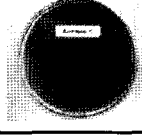
T. versutus에 대한 항균시험에서 시험균주 접종전 상태의 페놀레드(phenol red) 지시약의 색상은 핑크색이나, pH가 저하되어 중성영역으로 변화되면 노란색으로 변색되는 특성이 있다. 이러한 지시약의 변색 특성을 이용하여 항균 콘크리트에 의한 황산화세균의 번식억제 성능을 간접적으로 평가할 수 있다.

이와 같은 시험에 의해 항균제를 첨가하지 않은 plain의 경우 T. versutus 접종 후 1주일이 지난 시점에서 황산화세균에 의해 황산이 생성되어 지시약의 색상이 노란색(pH 저하)으로 변색되었다. 반면 항균 성분이 함유된 시험체(Ab-L)의 경우 초기 상태와 동일한 핑크색상이 유지되었으며, 이는 T. versutus의 생장이 억제되어 황산이 생성되지 않아 pH 변화가 없었기 때문에 항균 성분이 함유된 시험체의 항균 성능을 확인할 수 있다.

· T. novellus에 대한 항균 시험

T. novellus에 대한 항균시험에서 시험균주 접종전 상태의 브로모 크레졸 퍼플(bromo-cresol-purple) 지시약의 색상은 적자색이나, pH가 저하되어 산성영역으로 변화

Table 8 Antibiosis result of antimicrobial concrete

(a) <i>Thiobacillus versutus</i>				
 Initial Color: Pink pH _{init.} : 7.6	after 1 week	plain	 • pH _{1w} < pH _{init.} • Yellow	
		Ab-L	 • pH _{1w} ≈ pH _{init.} • Pink	
(b) <i>Thiobacillus novellus</i>				
 Initial Color: Purple pH _{init.} : 6.6	after 4 weeks	plain	 • pH _{4w} < pH _{init.} • Yellow	
		Ab-L	 • pH _{4w} ≈ pH _{init.} • Purple	

Note) pH_{init.}: Initial pH, pH_{1,4w}: pH after 1 and 4 weeks

되면 노란색으로 변색되는 특성이 있다.

이와 같은 시험에 의해 항균제를 첨가하지 않은 plain의 경우 *T. novellus* 접종 후 4주일이 지난 시점에서 황산화세균에 의해 황산이 생성되어 지시약의 색상이 노란색(pH 저하)으로 변색되었다. 반면 항균성분이 함유된 시험체(Ab-L)의 경우 초기상태와 동일한 적자색이 유지되었으며, 이는 *T. novellus*의 생장이 억제되어 황산이 생성되지 않아 pH 변화가 없었기 때문에 항균 성분이 함유된 시험체의 항균 성능을 확인할 수 있다.

2) 항균 콘크리트의 유해성

중금속 및 유해 성분의 용출 특성을 측정한 결과, Fig. 8과 같이 Cr, Pb, Sn 등의 중금속의 용출농도는 모두 환경기준치에 비해 낮은 수준인 100 ppb 미만으로 나타나 중금속 용출에 의한 환경 위해성은 없는 것으로 판단되었다.

한편, 항균 시험체(Ab-L)의 유효성분인 항균성분 니켈(Ni)과 규불화염 성분 아연(Zn), 및 마그네슘(Mg)의 용출량에서도 모두 30 ppb(0.03 ppm) 이하의 미소량이 검출되어, 유효 성분의 대부분이 콘크리트에 안정하게 고착된 것으로 판단된다. 즉, 유효 성분의 과다 용출에 의한 항균성능 및 수밀 성능의 저하는 없는 것으로 평가되었다.

3) 항균 콘크리트의 굳지않은 성상

액상 수밀성 항균제를 첨가한 항균 콘크리트와 일반 콘크리트의 슬럼프 및 공기량은 유사한 경향을 나타내었다.

한편 Fig. 9는 시험체 종류에 따른 초결 및 종결시간을 나타낸 것으로 액상 수밀성 항균제를 사용한 항균 콘크리트의 경우 일반 콘크리트에 비해 초결 및 종결 모두 약 6.5~7시간 지연되는 것으로 나타났다. 이는 기존 연구⁴⁾에서 보고된 바와 같이 항균제의 주요 성분인 불소계 화합물이 시멘트의 수화반응시 용출되는 칼슘이온(Ca²⁺)

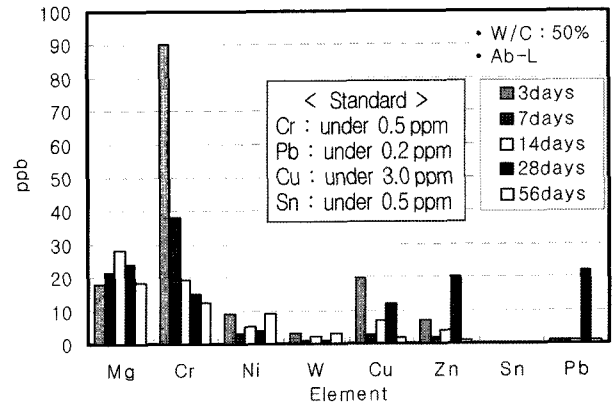


Fig. 8 Result of elution test of antimicrobial concrete

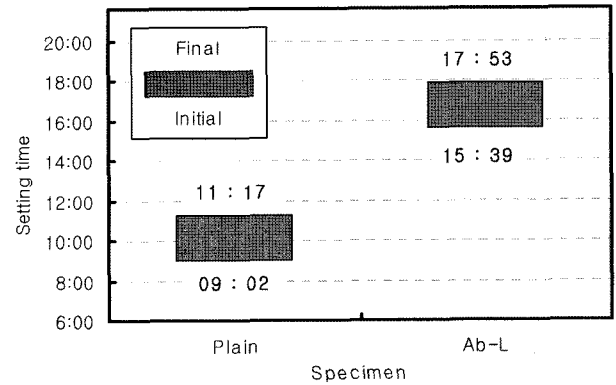


Fig. 9 Setting time

및 칼륨(K⁺)이온과 반응하여 시트 입자의 표면이 미립자인 규산철칼슘(CaF₂·SiO₂) 등을 생성하고, 이에 표면이 피복된 시멘트 입자는 물과의 접촉이 방해되어 시멘트의 수화가 일정 기간 지연되기 때문인 것으로 사료된다.

4) 항균 콘크리트의 경화성상 및 내부 조직 구조

Fig. 10은 시험체 종류별 재령에 따른 압축강도를 나타낸 것으로 항균 콘크리트(Ab-L)의 경우 plain에 비해 약 10~15% 높은 압축강도를 보이고 있으며, 이는 항균제 주요성분인 규불화염과 가용성 실리카에 의해 수밀성이 증대되었기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 11은 탄산화 촉진시험 결과에 의해 환산된 탄산화 속도계수와 경과년수에 따른 탄산화깊이 예측을 나타낸

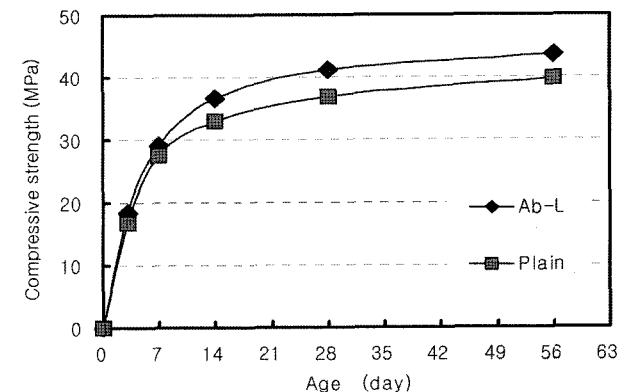


Fig. 10 Compressive strength

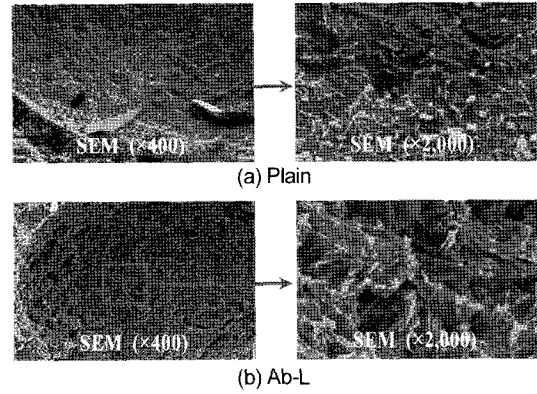
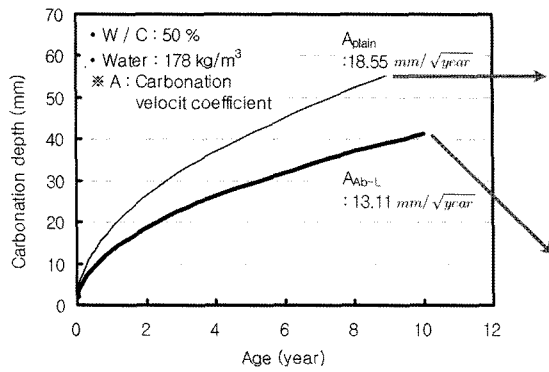


Fig. 11 Carbonation depth and micro structure

것이다. 항균 콘크리트(Ab-L)의 경우 탄산화 속도계수가 13.11인 반면 plain은 18.55를 보이고 있어 plain에 비해 약 30% 향상된 탄산화 저항성을 보이고 있으며, 이 또한 액상 수밀성 항균제에 의한 콘크리트의 수밀성 증대로 판단된다.

또한 SEM분석을 실시한 결과에 있어서도 항균 콘크리트(Ab-L)의 경우 plain에 비해 공극벽면에 결정립 수화물의 추가적인 생성이 관찰되었으며, 이는 앞서 항균제의 개요에서 서술한 항균제의 수밀성분인 규불화염 및 수용성 실리카에 의한 결과로 사료된다.

Fig. 12는 재령 28일의 세공 측정 결과를 나타낸 것으로 항균 콘크리트(Ab-L)는 plain에 비해 세공용적이 전반적으로 낮게 분포되어 있다. 특히 0.1 μm의 세공용적에 있어서는 plain에 비해 약 5~15% 낮게 나타나고 있으며, 이는 앞서 서술한 바와 같이 항균제의 수밀성분에 의한 추가적인 조직 생성이 콘크리트의 미세한 공극들을 충전하였기 때문인 것으로 사료된다.

6. 생화학적 부식 인공 촉진 시험

6.1 인공 촉진 시험의 개요

생화학적 부식 인공 촉진 시험은 시험체에 황산화세균을 접종한 후 황산화세균이 성장할 수 있는 최적 조건

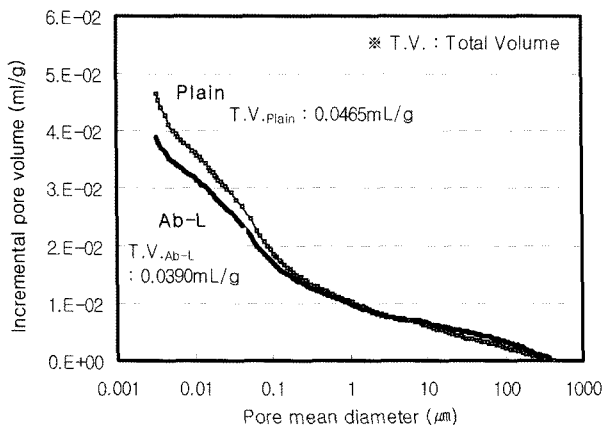


Fig. 12 Pore volume

을 유지시켜 인공적으로 생화학적 부식을 유도하는 시험으로서, 시험체의 조건에 따라 황산화세균의 성장 정도의 차이가 발생되고 또 이에 따라 발생하는 황산의 차이에 의해 시험체의 열화정도가 상이함을 전제로 하였다.

이를 위한 시험 장치의 개략적인 구성은 Fig. 13에 나타낸 바와 같다.

6.2 인공 촉진 시험 평가 결과

Fig. 14는 물시멘트비 55%의 일반 모르타르 시험체를 2개월간 인공 촉진 시험한 결과를 나타낸 것으로 외관상 시험체 표면에 다수의 흰 얼룩이 관찰되었으며 이를 전자현미경으로 관찰한 결과 황산화세균의 군집 형태가 뚜렷이 관찰되었다. EDS 원소 분석 결과에서도 황(S)원소가 다량 검출되어 황산화세균의 성장을 확인할 수 있었으며, 이로써 인공 촉진 시험에 의한 생화학적 부식 평가의 가능성을 확인할 수 있었다.

7. 결 론

본 연구에서는 하수시설용 항균 콘크리트에 대한 목표 요구성능을 제시한 후, 항균제 및 항균 콘크리트에 대한 성능 평가를 실시하였다. 또한 생화학적 부식 인공촉진 시험을 개발하고 그 적용성을 검토하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 하수시설용 항균 콘크리트의 목표 요구 성능을 설

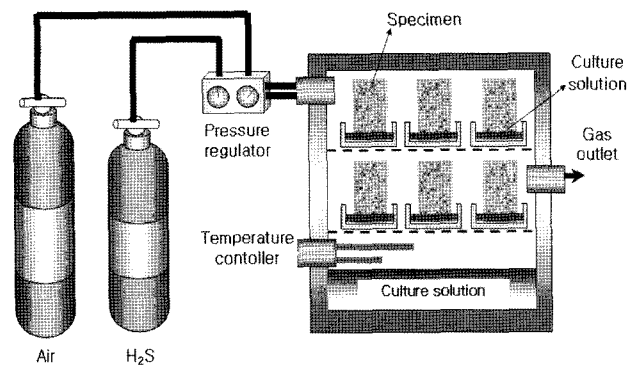


Fig. 13 Artificial accelerating test

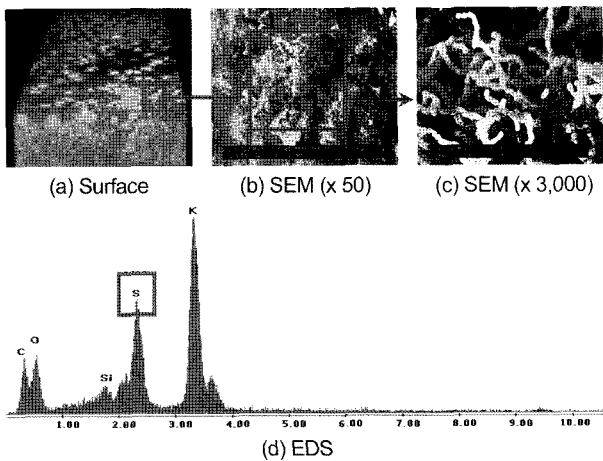


Fig. 14 Result of an artificial accelerating test

정하였으며, 이에 부합될 수 있도록 항균성분과 수밀성분이 복합구성된 액상형의 항균제와 이를 사용한 항균 콘크리트의 제조가 가능하였다.

- 2) 액상 수밀성 항균제 및 이를 사용한 항균 콘크리트의 황산화세균에 대한 항균 성능과 항균 성분의 균질한 분산성을 실증적으로 검증하였다.
- 3) 항균 콘크리트의 용출시험 결과 유해 성분 및 유효 성분의 용출은 극히 적은 것으로 나타나 환경유해성에 대한 안전성과 항균 성분 및 수밀 성분의 유지성능을 확인하였다.
- 4) 항균 콘크리트의 슬럼프 및 공기량은 시공성에 있어 유의할 만한 경향은 나타나지 않았으나, 응결시간이 일반 콘크리트에 비해 다소 지연되는 것으로 나타나 현장에 적용할 시에는 이점을 고려해야 할 것으로 사료된다.
- 5) 압축강도 및 탄산화 저항성은 일반 콘크리트에 비해 다소 향상되는 것으로 나타났으며, 세공 용적 및 미세구조 분석에 있어서도 항균제에 의한 수밀성의 증대를 확인할 수 있었다.

요약 본 연구에서는 황산화세균에 의한 하수시설 콘크리트의 생화학적 부식을 저감시키기 위해 항균제 및 항균 콘크리트의 개발과 성능 평가에 관한 연구를 수행하였다. 먼저 수밀성, 항균성, 균질성, 시공성 및 무해성 등 하수시설용 항균 콘크리트의 요구 성능을 제시하였으며, 개발된 항균제 및 항균 콘크리트를 요구 성능을 기준으로 평가하였다. 그 결과 액상 항균제의 분산 성능 및 항균 성능은 유효하였으며, 항균 콘크리트의 경우 비색 시험에 의해 항균 성능을 검증할 수 있었고, 유해 성분 및 유효 성분의 용출도 극히 적은 것으로 나타났다. 시공성에 있어서는 응결시간이 다소 지연되는 현상이 나타났으며, 압축강도 및 탄산화저항성은 일반 콘크리트에 비해 다소 향상되는 것으로 나타났다. 또한 세공 측정에 의한 내부공극률도 일반 콘크리트에 비해 낮게 측정되었으며, 내부 조직도 치밀하게 관찰되는 등 항균제에 의한 콘크리트의 수밀성 향상을 검증할 수 있었다. 또한 황산화 세균에 의한 생화학적 부식을 실증적으로 평가할 수 있는 인공축진시험을 개발한 후 시험을 실시하여 평가한 결과 황산화세균의 생장이 뚜렷하게 확인되었고 그 적용성을 검증할 수 있었다.

핵심용어 황산화세균, 생화학적 부식, 항균제, 항균 콘크리트, 인공축진시험

- 6) 생화학적 부식을 인공적으로 유도하는 실내 인공 축진 시험을 개발하여 평가 실험을 실시한 결과, 황산화세균의 성장 및 번식이 확인되었고, 이로써 인공 축진 시험에 의한 생화학적 부식 평가의 가능성을 확인할 수 있었으며, 향후 인공 축진 시험을 활용하여 항균 콘크리트의 생화학적 부식특성을 평가하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산(주) 건설부문 및 (주)트라이포드의 연구지원하에 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

논문에 참여한 연구자(의 일부)는 2단계 BK21 사업의 지원비를 받았으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. C. D. Parker, "Mechanics of corrosion of concrete sewers by hydrogen sulfide", *Sewage and Industrial Wastes*, Vol.23, 1951, pp.1477~1485.
2. 前田照信, 콘크리트腐食に對する防菌劑の開発に關する研究. 博士學位論文, 日本岡山大學, 1999, pp.1~3.
3. KS F 4403, 원심력 철근콘크리트 관, 한국산업규격(안), 2004, pp.26~30.
4. 김승문, 문정호, 이병기, 이범재, 김철규, 노재성, "규불화수소산 처리 시멘트 슬러지의 특성과 시멘트 페이스트 및 몰탈의 물성에 미치는 영향", 한국폐기물학회지, 15권, 4호, 1998, pp.386~392.
5. 한국건설기술연구원, 하수관거의 부식에 관한 연구, 한국건설기술연구원, 1994, pp.37~86.
6. 日本下水道事業團, 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, 日本下水道事業團, 2002, pp.7~16.
7. 송호면, 콘크리트 하수관의 생·화학적 부식특성에 관한 연구, 박사학위논문, 전북대학교, 2002, pp.1~64.