

액상 도포형 항균제에 의한 하수시설 콘크리트의 항균특성 및 내구성능 향상기술

김 무 한 (충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사)

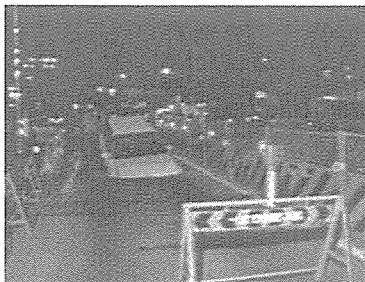
1. 서 론

현대사회에 있어 하수시설은 국민의 환경권 보장에 있어서 필수불가결한 사회기반 시설로서, 대부분 지하매립형 구조물이기 때문에 외압에 대하여 충분히 견딜 수 있도록 설계되며 강도, 내구성, 경제성 등 전반적인 성능에서 가장 우수한 구조재료인 콘크리트로 구성된다.

그러나 최근 하수시설의 경과연수가 증가함에 따라 각종 열화사례가 보고되고 있으며, 일본의 경우 <사진-1>과 같이 하수시설 콘크리트의 열화로 인해 도로의 함몰과 같은 안전사고의 발생 등에 관한 사례가 보도된 바 있다. 국내의 경우 하수시설 콘크리트의 열화로 인한 안전사고 사례는 보고되고 있지는

않지만, <사진-1>과 같이 서울시의 청계천 복원사업으로 인해 복개구조물의 열악한 상황이 보고된 바 있으며, 환경연합에서 실시한 서울시 중학천 복개구조물 실태조사에서는 1km 당 약 1,000여곳의 열화 부가 발견된 것으로 보고되었다.

상기한 바와 같이 콘크리트 하수시설은 지상구조물에 비해 열화현상이 심각하게 발생하고 있다. 이는 하수시설내의 높은 습도 및 가스 농도, 각종 오염물질 및 침식성 물질이 다량 포함된 하수의 상재 뿐만 아니라 토압, 수압, 활하중 등이 항시 가해지고 있는 하수시설내의 열악한 환경조건에서 그 원인을 분석할 수 있으며, 이러한 열화요인들의 복합적인 작용에 의해 <그림-1>에 나타낸 바와 같이 지상의 타콘크리트 구조물에 비해 열화의 진행도가 빠르고



(a) 도로함몰 사고(일본)



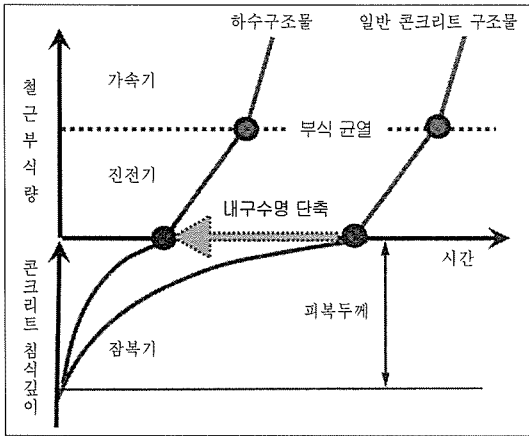
원포 24년간 복개구조물에 같은 '지하 청계천'
철근 녹슬고 콘크리트 부식 '아찔'

(b) 청계천 복개구조물(국내)



(c) 중학천 복개구조물(국내)

<사진-1> 하수시설의 열화현황 보도 일례



〈그림-1〉 일반 구조물과 하수구조물의 내구수명 비교

내구수명이 현격히 저하한다.

특히 최근에는 황산화세균(Thiobacillus속 균주) 등과 같은 미생물에 의해 생성된 황산 등의 부식인자에 의한 생화학적 부식이 하수시설 콘크리트의 열화를 가속화시키는 주요 원인으로 보고되고 있으며, 이에 대한 대책마련이 시급히 요구되고 있다.

한편, 정부에서는 하수시설의 최적 유지관리를 위해 2002년에 개최된 「하수관거 효율향상을 위한 국제세미나」에서 하수관거의 정비를 하수도정책의 최우선으로 추진할 수 있도록 2002년을 「하수관거 특별정비원년」으로 선포하고 「하수관거정비 7대 중점과제」를 발표하였으며, 〈그림-2〉와 같이 이후 전국적으로 하수관거의 정비 및 개선을 위한 시범사업을 실시하고 있다. 그러나 하수시설 정비에 있어 매우 중요한 기술요소 중의 하나라 할 수 있는 콘크리트 하수시설의 부식방지, 특히 생화학적 부식에 대한 대책이 전혀 고려되지 않고 수행되고 있어, 이에 관련한 조속한 기술개발이 절실히 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 황산화세균의 생장을 억제시켜 하수시설 콘크리트의 생화학적 부식을 근본적으로 제어할 뿐만 아니라 하수시설 콘크리트의 기초물성 및 내구성능을 향상시켜 열악한 하수환경하에서 내구수명을 연장시킬 수 있도록 개발된 액상도포형 항균제와 이를 도포한 콘크리트의 각종 성능을 평가



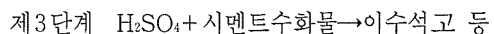
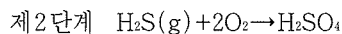
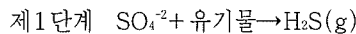
〈그림-2〉 정부의 대규모 하수시설 정비사업 보도일례

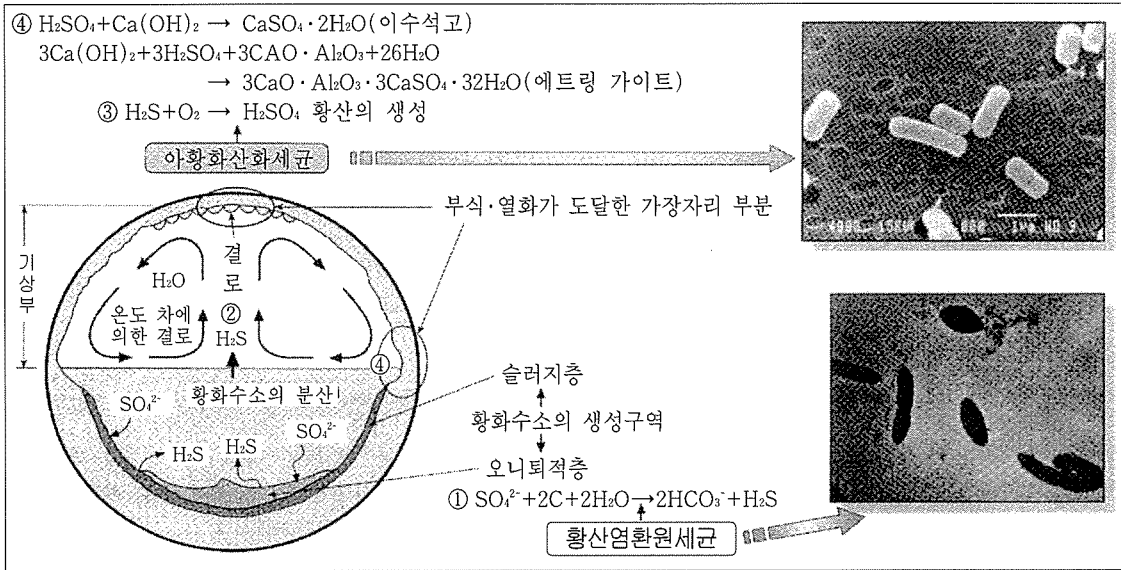
및 검증함으로써, 하수시설 콘크리트의 생화학적 부식저감을 위한 기초자료로 제시하고자 한다.

2. 생화학적 부식 메커니즘

〈그림-3〉은 하수시설 콘크리트의 황산화세균에 의한 생화학적 부식 메커니즘의 모식도를 나타낸 것으로서, 1차적으로 하수시설의 하수층 하부에 퇴적되어 있는 슬러지층에 생존하는 혐기성 미생물이 유기물을 분해하여 유기산을 섭취하는 과정에서 황화수소(H_2S)를 생성하게 된다. 생성된 황화수소는 기층부로 상승·이동하게 되고, 콘크리트면에 서식하는 호기성 미생물인 황산화세균에 의해 황산(H_2SO_4)으로 전환된다.

생성된 황산은 콘크리트의 시멘트수화물과 화학반응을 일으켜 이수석고($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) 및 에트링가이트(Ettringate, $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)를 생성시켜 시멘트수화물의 조직와해, 콘크리트의 박리·박락, 철근의 노출 및 부식을 유발시켜 최종적으로 하수시설 콘크리트의 내하력 저하 및 붕괴에까지 이르게 되며, 이러한 생화학적 부식의 진행단계를 개략적으로 나타내면 다음과 같다.





〈그림-3〉 하수시설 콘크리트의 생화학적 부식 메커니즘

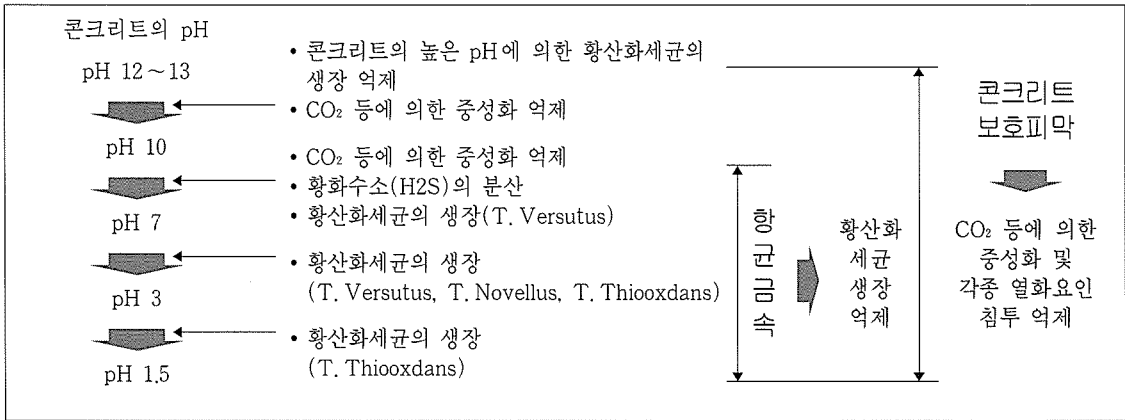
3. 생화학적 부식억제 기법현황 분석 및 개선방향 도출

대한 주요 대책기술을 나타낸 것으로, 크게 콘크리트 부식반응의 직접적 인자인 황산의 생성을 억제하는 기술과 황산에 대한 콘크리트의 저항성을 향상시키는 기술로 대별될 수 있다. 황산의 생성억제기법의 경우 화학적 약품처리 방법이 대부분을 차지하고

〈표-1〉은 하수시설 콘크리트의 생화학적 부식에

〈표-1〉 하수시설 콘크리트의 생화학적 부식에 대한 주요 대책기술

대책기술의 정의	기술의 분류	대상시설	원 리 와 대 책
콘크리트 부식의 억제기술 (황산생성의 억제)	하수중의 황산이온농도 저하	주로 관로시설	• 황화수소의 생성 잠재력의 저하 : 공장배수, 온천배수 등의 규제, 해수침입의 방지
	하수 또는 오니중의 황산생성물 억제	관로시설	• 혐기화 방지 : 입송관에 공기, 산소, 초산염 주입 등
		펌프장·처리장	• 혐기화 방지 : 양수펌프, 처리장의 적정운전
	용존황화물의 고정과 황화수소의 기증으로 방산방지	관로시설 펌프장·처리장	• 액상중의 황화물의 산화·고정화 : 염화제2철 주입, 폴리황산제2철 주입 • 황화수소의 방산을 억제하는 구조 : 합류부의 교란방지 및 단차·낙차의 해소
황산을 생성하는 황산화세균의 활동억제	관로시설 펌프장·처리장	• 기상중 H_2S 가스농도의 회석·제법 : 환기, 탈취 • 콘크리트 표면의 건조 : 환기 • 황산화세균의 대사억제 : 콘크리트 항균제	
콘크리트 방식기술	콘크리트의 내황산성 향상	관로시설 펌프장·처리장	• 콘크리트 표면의 피복 : 도포형 및 시트 라이닝 공법 • 콘크리트의 내황산성 향상 : 내황산성 콘크리트



〈그림-4〉 생화학적 부식에 의한 하수시설 콘크리트의 열화진행 및 액상도포형 항균제의 성능 모식도

있으며 기계적인 방법과 수리설계적인 방법도 있다. 그러나 화학적 약품처리나 기계적인 방법은 효과의 일시성으로 인해 주기적으로 실시해야 하는 단점이 있으며 유익세균까지 멸한다는 문제점도 지적되고 있다.

한편 최근 일본에서는 황산화세균의 성장을 억제시키는 혼화용 항균제 및 이를 사용한 항균콘크리트가 개발되어 상용화되고 있으며 생화학적 부식에 대한 가장 적극적인 방법으로 제시되고 있다. 그러나 기존 분말형 항균제의 경우 항균금속의 비중차로 인한 분산능력의 저하가 문제점으로 지적되고 있으며, 이를 개선하기 위해 다공질의 제올라이트를 활용하고 있으나 제조원료 및 공정의 추가로 인한 경제성의 저하와 항균제의 사용이 신설되는 하수시설에 제한되는 문제점이 제기되고 있다.

또한 황산에 대한 콘크리트의 저항성 향상기술, 즉 콘크리트 방식기술의 경우 하수시설 콘크리트의 내구성을 향상시킬 수 있는 방법이라는 하지만 생화학적 부식에 대한 소극적인 방법이라 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 콘크리트 방식기술과 항균콘크리트 기술의 복합기술인 액상도포형 항균제를 적용함으로써, 콘크리트 표면에 항균성 피막을 형성하여 황산화세균에 대한 항균성능을 발휘하고, 기존 하수시설의 보수 및 신설에 모두 사용 가능하여 국

내 하수시설 정비사업의 실정에 적합하도록 하였다. 뿐만 아니라 콘크리트 표면에 보호피막을 형성함으로써 열화인자의 침투저항성, 황산저항성 등 하수시설 콘크리트의 기초물성 및 내구성을 향상시켜 하수시설의 장수명화를 도모할 수 있도록 하였다.

4. 액상도포형 항균제의 개요

〈그림-4〉는 생화학적 부식에 의한 하수시설 콘크리트의 열화진행과 본 연구에서 적용한 액상도포형 항균제의 성능 모식도를 나타낸 것이다. 일반적으로 신설된 하수시설의 경우 콘크리트의 높은 알칼리성에 의해 황산화세균의 생장이 억제되지만, 이후 CO₂ 등과 같은 열화인자에 의해 알칼리성이 저하되면서 황산화세균의 생장이 촉진되고 결국 생화학적 부식이 야기된다.

이에 본 연구에서 적용한 액상도포형 항균제는 콘크리트 표면에 보호피막을 형성하여 콘크리트의 중성화를 극히 지연시켜 장기간 황산화 세균의 성장을 억제할 뿐만 아니라 중성화가 개시된 이후에도 항균금속의 항균성능에 의해 황산화 세균의 생장이 억제되어 하수시설 콘크리트의 생화학적 부식을 저감시킬 수 있도록 하였다.

한편 본 연구에서 사용한 액상도포형 항균제의 특

〈표-2〉 액상도포형 항균제의 종류 및 특성

항균제 종류	항균제의 특성		
	주요 성분	형태	기초물성
항균제 A	• 변성아크릴실리콘계 피복제 • 항균금속	1액형	• pH : 6.5~7.5 • 비중 : 1.2±0.1
항균제 B	• 유기우레탄계 피복제 • 항균금속	2액형 (주제, 경화제)	• 비중 : 주제 1.6, 경화제 1.24 • 가사시간 : 60분
항균제 C	• 유무기우레탄계 피복제 • 항균금속	3성분계 (주제, 경화제, 분말)	• 비중 : 주제 1.0, 경화제 1.1, 분말 3.0 • 가사시간 : 50분

성은 〈표-2〉에 나타난 바와 같다.

였다. 평가항목에 있어서는 항균성능, 기초물성 및 내구성능을 평가하였다.

5. 항균제를 도포한 하수시설 콘크리트의 성능평가

가. 실험계획 및 방법

(1) 실험계획

〈표-3〉은 항균제를 도포한 하수시설 콘크리트의 성능평가를 위한 실험계획을 나타낸 것으로 모체 콘크리트의 물시멘트비를 55% 1수준 설정하였으며, 항균제에 있어서는 종류를 A, B, C 3수준을 설정하

(2) 사용재료 및 배합

모체 콘크리트에 사용된 사용재료 및 기초물성은 〈표-4〉에 나타난 바와 같으며, 본 연구에서 적용한 항균제의 물성은 〈표-2〉에 나타난 바와 같다. 또한 모체 콘크리트의 배합은 〈표-5〉에 제시한 바와 같다.

(3) 시험방법

항균제 및 항균제를 도포한 시험체의 항균성능, 기초물성 및 내구성능을 평가하기 위한 시험항목 및 방법은 〈표-6〉에 나타난 바와 같다.

〈표-3〉 실험 계획

실험 요인 및 수준				평가항목		
모체 콘크리트 W/C (%)	항균제			항균성능	기초물성	내구성능
	종류	도포횟수(회)	도포두께(mm)			
55	항균제 A 항균제 B 항균제 C	1	1 이하	• 클리어존(Clear zone) 시험 • 비색시험	• 부착강도 • 마모감소량 • 흡수계수 • 투기계수	• 중성화깊이 • 염화물이온 침투깊이 • 중량변화율

〈표-4〉 모체 콘크리트용 사용재료의 기초물성

사용재료	기초물성		
시멘트	1종 보통포틀랜드시멘트,	밀도 : 3.15g/cm ³ ,	분말도 : 3,230cm ² /g
굵은골재	퇴촌산 부순자갈,	밀도 : 2.65g/cm ³ ,	최대치수 : 20mm
잔골재	인천산 제염사,	밀도 : 2.56g/cm ³ ,	조립율 : 2.9

〈표-5〉 모체 콘크리트의 배합

W/C (%)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	S/a (%)	단 위 중 량(kg/m ³)			
				물	시멘트	잔골재	굵은골재
55	15 ± 2	4.5 ± 1.5	47	180	317	814	935

〈표-6〉 시험 항목 및 방법

구 분	시 험 항 목	시 험 방 법	시험체 크기 (mm)
항균성능	<ul style="list-style-type: none"> 항균제의 항균성능 항균제를 도포한 콘크리트의 항균성능 	클리어존(Clear zone)시험 비색시험	- 40 × 40 × 10
기초물성	<ul style="list-style-type: none"> 부착강도(MPa) 마모감소량(mg) 흡수계수(kg/m²h^{0.5}) 투기계수(cm/sec) 	KS F 4716 KS F 2812 KS F 2609 -	70 × 70 × 10 50 × 50 × 10 40 × 40 × 160 φ 100 × 30
내구성능	<ul style="list-style-type: none"> 중성화깊이(mm) 염화물이온 침투깊이(mm) 중량변화율(%) 	5% CO ₂ 촉진 중성화 10% NaCl 수용액 침지 5% H ₂ SO ₄ 수용액 침지	100 × 100 × 400 100 × 100 × 400 φ 100 × 200

나. 실험결과 및 고찰

(1) 항균제 및 항균제를 도포한 콘크리트의 항균성능 평가

(가) 항균제의 항균성능

〈표-7〉은 본 연구에서 적용한 액상도포형 항균제의 항균성능 평가결과를 나타낸 것으로, 항균제를 투입하지 않은 Plain의 경우 황산화세균의 생장이 뚜렷한 반면, 항균제를 투입한 경우 투여부위에 클리어존(Clear Zone)이 뚜렷이 생성되었다.

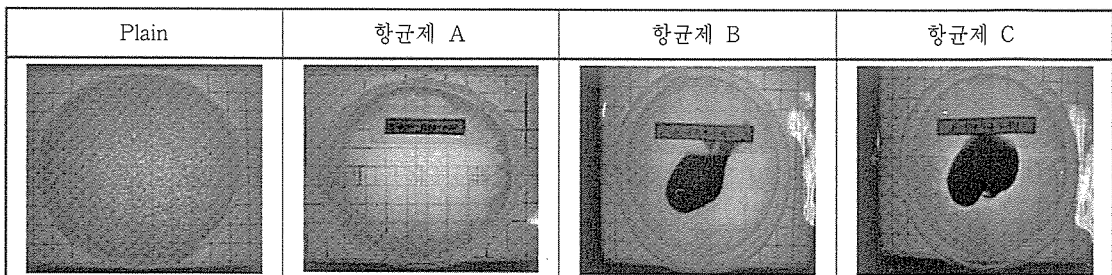
특히 항균제 A는 투여부위 뿐만 아니라 주변까지 클리어존이 넓게 형성되어 가장 우수한 항균성능을

보이고 있다.

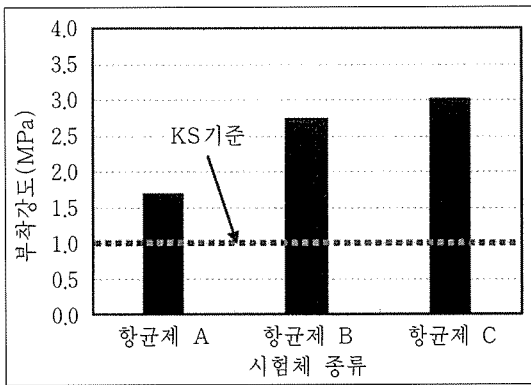
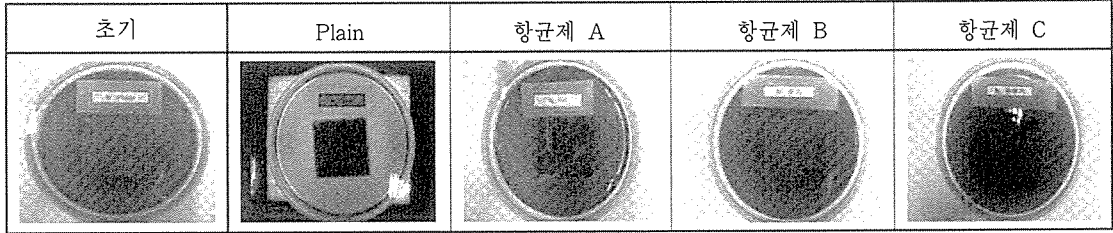
(나) 항균제를 도포한 콘크리트의 항균성능

〈표-8〉은 항균제를 도포한 콘크리트의 항균성능 평가결과를 나타낸 것으로, 초기 황산화세균 배양액의 경우 적색을 띄고 있으나 4주 경과후 Plain은 얼은 황색으로 변색하였으며, 이는 세균의 생장이 활발하여 황산의 배출이 활성화되고 이로 인해 배양액 내 지시약의 색이 변화된 결과이다. 반면 항균제를 도포한 시험체의 경우 4주 경과후에도 배양액의 색이 적색계열의 색을 띄고 있어 항균성능을 검증할 수 있었으며, 특히 항균제 A를 도포한 시험체의 경우 우수한 항균성능을 보이고 있다.

〈표-7〉 항균제의 항균성능 평가



〈표-8〉 항균제를 도포한 콘크리트의 항균성능 평가(4주 경과후)



〈그림-5〉 부착강도

B, C의 경우 각각 1.70, 2.74, 3.02MPa를 보이고 있어 KS F 4936의 기준인 1.0MPa를 모두 만족하는 것으로 나타났으며, 우레탄 계열인 항균제 B 및 C가 높은 부착강도를 보이고 있다.

(나) 마모감소량

〈그림-6〉은 항균제를 도포한 시험체의 마모감소량을 나타낸 것으로, 항균제를 도포하지 않은 Plain의 경우 80mg의 마모감소량을 보인 반면 항균제를 도포한 경우 각각 27, 9, 22mg으로 나타나 항균제 도포에 의해 마모저항성이 크게 향상되는 것으로 나타났다.

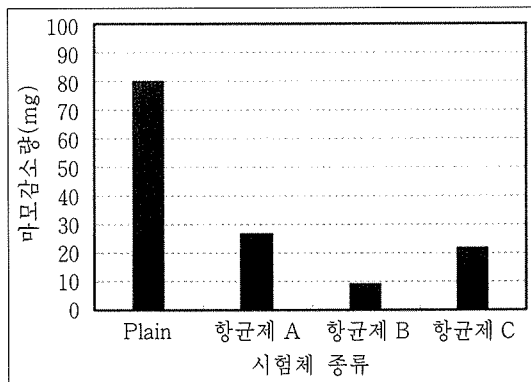
(다) 흡수계수

〈그림-7〉은 항균제를 도포한 콘크리트의 흡수계수 측정결과를 나타낸 것으로, Plain의 경우 0.185 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$ 의 높은 흡수계수를 보이고 있다. 반면 항균제 A, B, C를 도포한 경우 각각 0.058, 0.087,

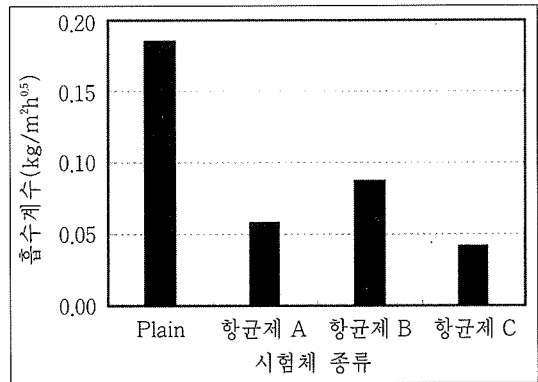
(2) 항균제를 도포한 콘크리트의 기초물성 평가

(가) 부착강도

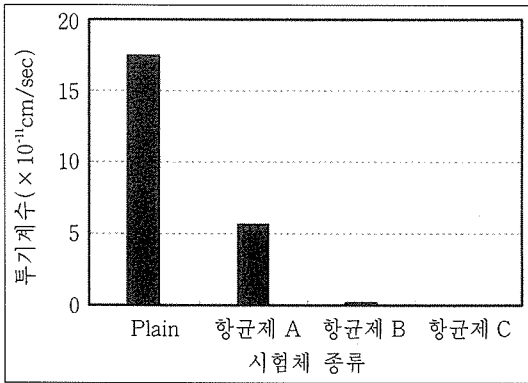
〈그림-5〉는 하수시설 콘크리트에 도포한 항균제의 부착강도 측정결과를 나타낸 것으로, 항균제 A,



〈그림-6〉 마모감소량



〈그림-7〉 흡수계수



<그림-8> 투기계수

0.042kg/m²·h^{0.5}로 나타나 Plain의 1/2 수준 이하를 보이고 있다.

(라) 투기계수

<그림-8>은 항균제를 도포한 콘크리트의 투기계수 측정결과를 나타낸 것으로, Plain의 경우 17.464 × 10⁻¹¹cm/sec의 투기계수를 보이고 있다. 반면에 항균제 A를 도포한 시험체의 경우 5.634 × 10⁻¹¹cm/sec를 보이고 있어 Plain의 약 1/3 수준을 보이고 있으며 항균제 B는 0.142 × 10⁻¹¹cm/sec, 항균제 C는 0cm/sec를 보이고 있어 우레탄계 항균제 B, C의 경우 매우 높은 투기저항성을 나타내었다.

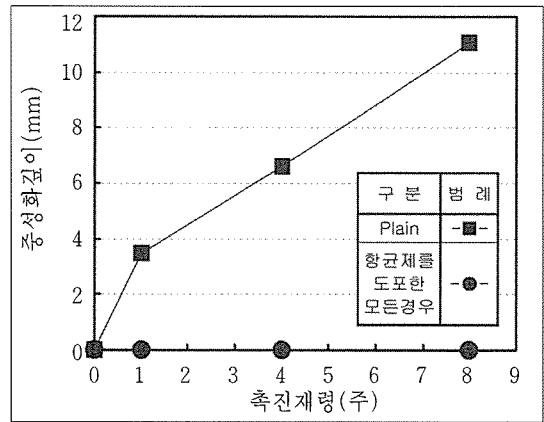
(3) 항균제를 도포한 콘크리트의 내구성능 평가

(가) 중성화깊이

<그림-9>는 항균제를 도포한 시험체의 축진재령 1, 4, 8에 대한 중성화깊이를 나타낸 것으로 Plain의 경우 축진재령 8중에 11mm의 중성화깊이를 보이고 있다. 반면 항균제를 도포한 시험체의 경우 모두 축진재령 8주까지 중성화가 진행되지 않은 것으로 나타나 항균제 도포에 의해 중성화저항성이 대폭 향상되는 것으로 나타났다.

(나) 염화물이온 침투깊이

<그림-10>은 항균제를 도포한 시험체의 염화물이온 침투깊이를 나타낸 것으로, Plain의 경우 축진재령 8주에 20.17mm의 침투깊이를 보이고 있다. 항

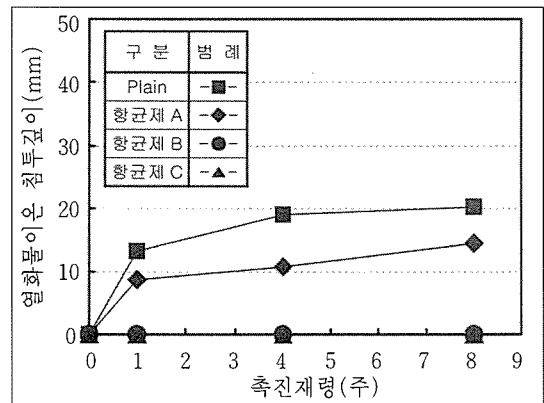


<그림-9> 중성화 깊이

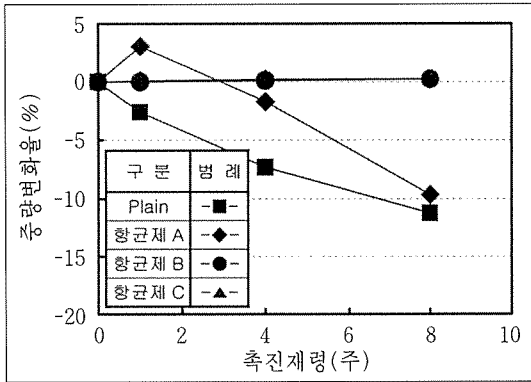
균제 A를 도포한 시험체의 경우 축진재령 8주에 14.40mm로 나타나 Plain에 비해 약 3/4 수준을 보이고 있으며, 항균제 B, C를 도포한 경우 축진재령 8주까지 염화물이온 침투깊이가 나타나지 않아 매우 높은 염해 저항성을 보이고 있다.

(다) 중량변화율

<그림-11>은 황산수용액 침지에 따른 항균제를 도포한 콘크리트의 중량변화율을 나타낸 것이다. Plain의 경우 축진재령 8주에 11.28%의 중량감소율을 보이고 있으며 항균제 B를 도포한 시험체의 경우 Plain에 비해 낮은 중량감소율을 보이고 있으나 축진재령이 증가할수록 Plain과 유사한 수준을



<그림-10> 염화물이온 침투깊이



〈그림-11〉 중량변화율

보이고 있다. 반면 항균제 B, C의 경우 축진제령 8 주까지 0.24%의 중량증가율을 보이고 있어, 우레탄계 항균제의 우수한 내황산성을 검증할 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 하수시설 콘크리트의 생화학적인 부식을 저감시키기 위해 액상도포형 항균제를 적용하

고자 하였으며, 항균제를 도포한 콘크리트의 기초물성 및 내구성능을 실험·실증적으로 평가함으로써 항균제의 적용성을 검증하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서는 하수시설 콘크리트의 생화학적인 부식을 저감시키기 위한 기술로서 방식기술과 항균제 기술을 접목하고 보완한 액상도포형 항균제를 적용하였다.

(2) 항균제 및 항균제를 도포한 콘크리트의 항균성능을 평가한 결과 모두 황산화세균의 생장을 억제시키는 것으로 나타나 하수시설 콘크리트의 생화학적인 부식을 억제하는데 있어 항균제의 적용이 유효할 것으로 판단된다.

(3) 항균제를 도포한 콘크리트의 기초물성 및 내구성능을 평가한 결과 항균제 종류에 따라 각 성능별 향상 정도는 다소 차이가 있으나 전반적으로 항균제 도포에 의해 모든 성능이 향상되는 것으로 나타나 하수시설 콘크리트의 생화학적인 부식 저감 뿐만 아니라 내구수명을 연장하는데 있어 유리할 것으로 사료된다. ▲

시사 용어 해설

▶ 컨트래리언

주식시장에서는 대체적으로 투자자들이 크게 트렌드 팔로잉 인베스터(Trend Following Investor)와 트렌드 리버스 인베스터(Trend Reverse Investor)의 두가지 성향을 보인다고 말한다. 트렌드 팔로잉 인베스터, 즉 추세 추종적 투자자는 주가가 이미 상승하고 있고, 향후에도 상승세가 지속될 것으로 예상하고 공격적으로 기업에 투자하는 것을 말한다. 반면 트렌드 리버스 인베스터는 그 상대적인 경우로 주가가 조정을 받거나 주가가 바닥이라고 판단할 때만 투자하는 투자자들을 일컫는 말로 추세 역행적 투자자라고 불린다. 또다른 말로 컨트래리언(Contrarian)이라고 하기도 한다. 일반적으로 추세 추종적 투자자들은 업종이 전고점을 돌파하고 주가가 강세를 보이는 종목만 선호해서 투자한다. '뛰는 말을 잡아라'라는 격언이 딱 들어맞는 공격적 성향의 투자자다. 상대적으로 추세 역행적 투자자는 업황은 불황이면서 종목가치는 저평가된 종목을 서서히 편입하는 방식을 선호한다. '밀집모자는 겨울에 사라'는 증시 격언에 어울리는 보수적 성향의 투자자다.