

## 유사 하수환경에서 글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트의 효율성 평가

# Evaluation of Effectiveness of Concrete Coated with Bacterial Glycocalix under Simulated Sewage Environments

윤현섭<sup>1</sup> · 양근혁<sup>2\*</sup>

Hyun-Sub Yoon<sup>1</sup> · Keun-Hyeok Yang<sup>2\*</sup>

(Received December 27, 2019 / Revised March 16, 2020 / Accepted March 17, 2020)

The present study conducted mock-up tests under the simulated sewage environments to examine the practical significance and limitation of coating materials that were previously developed on the basis of the bacterial glycocalix as a protection of concrete structures exposed to microbiological and sulphate attacks. The variations of the compressive strength and mass of the concrete due to the sulphate attack were measured using cylinder specimens. The bacteria growth and glycocalix formulation were calculated from the samples extracted from the sewage pipes. The next generation sequencing analysis was also conducted for environmental damage assessment due to the use of *Rhodobacter capsulatus* in the simulated sewage environments. The mock-up tests revealed that the developed coating materials have a good potential in resisting the sulphate attack, indicating no reduction on compressive strength and mass of the coated concrete under the sewage environment. At the age of 91 days, the concentrations of viable bacteria and glycocalix measured from the hardened coating materials were  $1.4 \times 10^4$  cell/mL and  $67.5 \text{ mg/cm}^3$ , respectively. Moreover, harmful strains were not observed in the sewage water including glycocalix-coated concrete pipes. This implies that *Rhodobacter capsulatus* used in the coating materials does not influence negatively the microorganism cluster in the sewage environments.

**키워드** : 박테리아, 글라이코 캘릭스, 코팅재, 하수환경, 내황산성

**Keywords** : Bacteria, Glycocalix, Coating material, Sewage environment, Sulfuric acid resistance

## 1. 서론

황산 및 황산염에 의한 화학적 침식에 노출된 콘크리트는 대부분이 하수관 및 암거 등의 지중 구조물로서 지속적인 유지관리가 어려운 단점을 갖는다(Oh et al. 2006). 더불어 국내의 콘크리트 하수관 및 암거 등의 구조물은 설치 이후의 경과 년수가 대부분 내구연한을 초과한 단계로서, 해당 구조물의 구조적 안전성 확보 및 내구성 향상의 보수·보강 기술의 개발이 요구되어 지고 있다(Lee and Ahn 2018).

Yang et al.(2016)은 하수 환경에서 콘크리트의 화학적 열화 인자인 황화수소 가스 및 황산의 환원억제 및 물리적 차단 효과를 갖는 글라이코 캘릭스 형성 박테리아를 활용한 보수 기술의 활용 가능

성을 제시하였다. 이 기술은 박테리아의 지속적인 성장과 번식을 통하여 황산열화에 대한 콘크리트의 생태학적 유지관리 개념을 갖는다. Yoon et al.(2019)이 수행한 연구에서 글라이코 캘릭스 기반의 코팅재는 5% 농도의 황산 수용액 침지에서 재령 28일 동안 압축 강도의 저하가 발생하지 않았다. JSTM C 7401(1999)에 따른 콘크리트 내황산 실험은 5% 농도의 황산( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 수용액을 이용하는데, 이때 수용액에서의 콘크리트 수화물의 열화유발 인자인 황산염( $\text{SO}_4^{2-}$ )의 농도는 약 50,000ppm 수준이다. 반면 일반적인 하수환경에서 콘크리트의 열화 유발 인자인  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 농도는 100ppm~130ppm 수준으로, 황산 5% 수용액의 약 1/400 수준이기 때문에 해당 환경에서 코팅재의 내화학성 평가를 실시하는 경우 초기 재령에서 콘크리트의 열화에 의한 압축강도 저하와 질량 감소의 결과를 뚜렷하게 확인하는

\* Corresponding author E-mail: yangkh@kgu.ac.kr

<sup>1</sup>경기대학교 건축공학과 박사과정 (Depart. Architectural Engineering, Graduate School, Kyonggi University, Suwon, 16227, Korea)

<sup>2</sup>경기대학교 건축공학과 교수 (Depart. Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, 16227, Korea)

것은 어려움이 있다. 더불어 실제 하수 환경에서 발생하는 황산염에 의한 콘크리트 열화는 하수의 유입·유출 등 환경적 변화에 따라 그 정도가 상이 할 수 있으며(Clifton and Knab 1989), 열화속도 또한 급격히 증가하는 특징을 갖기 때문에 고농도의 황산염화 환경에서 수행된 내황산성 평가의 결과를 실제 하수환경에서 평가결과와 비교할 필요가 있다(Chung and Kang 2012). 특히, 박테리아 기반의 코팅재는 하수환경에서 박테리아의 성장성 그리고 생태 유해성 등에 대해 확인할 필요가 있다.

이 연구에서는 박테리아가 형성하는 글라이코 캘릭스 기반의 코팅재로 코팅된 하수관거의 거동을 실제 하수환경에서 평가하기 위한 목업실험을 수행하였다. 실제 규모의 글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트 흡관을 제작하였으며, 이를 120ppm의 황산염을 포함하는 유사 하수환경에 투입하여 글라이코 캘릭스의 형성이 콘크리트 하수관의 열화저항성은 향상에 미치는 영향을 평가하였다. 유사 하수 침지재령 변화에 따른 코팅 콘크리트의 압축강도 및 질량변화를 평가하였으며, 해당 환경에서 박테리아의 지속성장성 및 글라이코 캘릭스의 생성량을 평가하였다. 더불어 글라이코 캘릭스 형성 박테리아의 적용이 하수 내 미생물 생태 환경에 미치는 영향을 평가하기 위하여 차세대 염기서열 분석 및 수질 분석을 실시하였다.

## 2. 실험계획

### 2.1 박테리아 배양 및 고정화

이 연구에서는 글라이코 캘릭스(glycocalix) 코팅재의 제작을 위한 박테리아로서 Yang et al.(2018)의 선행 연구를 통해 선별된 *Rhodobacter capsulatus* 균주를 이용하였다. *Rhodobacter capsulatus*는 빛이 없고 산소의 공급이 없는 혐기암(anaerobic condition without light source)의 조건에서 붉은색을 띠며 성장하며, 유해 환경에 노출될 경우 세포 스스로를 보호하기 위한 생장 기작을 통해 당 복합체(saccharide complex)의 글라이코 캘릭스 막(membrane)을 형성한다(Yoon et al. 2018). 더불어 산소가 공급되는 호기의 조건에서는 유기물을 분해하고 황화수소 등의 가스 물질을 영양원으로 아미노산, 핵산 등의 에너지원으로 전환·소모 함으로서 유해 물질을 제거하는 효과를 갖는다(Costa et al. 2017). *Rhodobacter capsulatus* 균주의 배양을 위한 배양액 조성은 Yeast extract 및 Disodium succinate hexahydrate 등으로 구성하였으며, 당 복합체인 글라이코 캘릭스 형성의 효율성 향상을 위한 탄소원으로서 succinate를 배양액 질량의 0.3% 첨가하였다(Table 1). 제조된 배양액에 접종된 *Rhodobacter capsulatus*는 20°C 및 혐기 환경의 멸균 인큐베이터에서 10일간 10<sup>9</sup>cell/mL의 농도로 배양되

었다.

배양이 완료된 박테리아는 콘크리트의 극건조 및 강알칼리성 환경에서 성장성 향상을 위하여 Yoon et al.(2018)이 제시한 고정화 기술에 따라 다공성의 재료에 고정화되었다. 박테리아의 성장처 제공을 위한 다공성 재료로서는 밀도 0.25g/cm<sup>3</sup>의 팽창질석이 이용되었다. 팽창질석은 중성수준의 pH 및 높은 소수성을 가지며 120meq/100g~150 meq/100g 수준의 양이온교환용량(cation exchange capacity, CEC)를 가져 *Rhodobacter capsulatus*가 성장에 필요로 하는 양이온(Ca<sup>2+</sup> 및 Si<sup>4+</sup> 등)을 효과 적으로 흡수할 수 있다. 농도 10<sup>9</sup>cell/mL인 *Rhodobacter capsulatus*의 고정화는 Yoon et al.(2018)이 제시한 밀폐형 고정화기기를 이용하였다.

Table 1. Media compositions for *Rhodobacter capsulatus*

27s Medium composition	Quantity
Yeast extract	1.0g
Disodium succinate hexa-hydrate	1.0g
Absolute ethanol	0.5mL
Ferric citrate solution (0.5%)	1.0mL
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.5g
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	0.4g
NaCl	0.4g
NH <sub>4</sub> Cl	0.4g
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	0.05g
NaCl	0.4g/L
Trace-element solution	1mL/L
Distilled water	1L
Carbon source: succinate	Medium wt.×0.3%

### 2.2 글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트 제작

글라이코 캘릭스 코팅재 제작을 위한 배합상세는 Table 2와 같다. 코팅재 제작을 위한 결합재로서는 보통포틀랜드시멘트(ordinary portland cement, OPC)와 함께 플라이애시(fly ash, FA), 고로슬래그(ground granulated blast furnace slag, GGBS) 및 에틸렌 초산비닐(ethylene vinyl acetate, EVA)계 재유화형 분말수지가 이용되었다. FA, GGBS 및 폴리머의 치환율은 각각 전체 결합재 질량의 18%, 40.5% 및 10%로 하였다. 코팅재의 물-결합재비(water to binder ratio, W/B) 및 잔골재-결합재비(sand to binder ratio, S/B)는 각각 35% 및 2로 하였다. 골재로서는 0.05mm~1.17mm, 0.17mm~0.25mm 및 0.25mm~0.7mm의 입경을 갖는 규사를 동일한 질량비로 혼합하여 사용하였으며, *Rhodobacter capsulatus*가 고정화 된 팽창질석을 골재 부피의 35%를 치환하여 투입하였다.

Table 2. Mix proportion of glycolix coating materials

W/B (%)	S/B	Binder composition (wt. %)				Replacement ratio of expanded vermiculite (sand vol. %)
		OPC	FA	GGBS	Polymer	
35	2	31.5	18	40.5	10	35

글라이코 캘릭스 코팅재의 적용을 위한 콘크리트 시험체 제작의 배합상세는 Table 3과 같다. 콘크리트 시험체의 제작을 위한 재료로서는 밀도 3,14g/cm<sup>3</sup>의 보통 포틀랜드시멘트가 이용되었으며, 밀도가 각각 2,62g/cm<sup>3</sup> 및 2,64g/cm<sup>3</sup>인 잔골재와 굵은골재가 이용되었다. 하수관공사 공사 표준시방서(2010)에서 제시하고 있는 바와 같이 물-시멘트비(water to cement ratio, W/C) 및 잔골재율(sand to aggregate ratio, S/a)을 각각 45% 및 47%로 하여, 지름 100mm 및 높이 200mm의 원주형 공시체를 제작하였다. 재령 28일까지 항온·항습(온도 20±2℃, RH 60±5%)의 환경에서 양생을 완료한 원주형 콘크리트 시험체는 Table 2의 배합으로 제작된 글라이코 캘릭스 코팅재를 일정한 두께를 유지하기 위해 제작된 아크릴 몰드를 이용하여 2.5mm 두께로 도포하였다. 글라이코 캘릭스 코팅재의 시공 및 유사 하수환경 적용 평가를 위한 콘크리트 흡관의 경우 Table 3의 배합을 이용하여 제작된 안지름 500mm, 길이 2,500mm의 프리캐스트 관을 이용하였다. 콘크리트 흡관에서 코팅재의 시공은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 분사 노즐과 모노펌프를 이용한 원심력 라이닝공법을 이용하여 2.5mm의 두께로 하였다. 제작이 완료된 글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트 흡관은 유사 하수환경 투입을 위해 500mm 길이로 절단하였다.

Table 3. Mix proportion of concrete for sewage structures

W/B (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )			
		Water	OPC	Sand	Gravel
45	47	180	400	786	903



Fig. 1. Construction image of glycolix coating materials by the lining technique

### 2.3 유사 하수 환경 조성 Mock-up 실험

글라이코 캘릭스 형성 박테리아를 이용한 콘크리트 구조체의 표면 코팅기술의 실현 및 이론적 접근을 검증하기 위한 유사 하수환경 조성 Mock-up 실험은 하수의 유입·유출이 지속적으로 발생하는 혐기성의 하수관 환경 모사에 기반 하였다. 하수의 이동 통로인 하수관 및 암거는 대부분이 지중구조물로서 그 특성상 대부분의 관로가 내부 산소 유입이 어려운 혐기 환경이다. 이에 본 실험에서는 1,200mm×800mm×800mm 크기의 밀폐형 아크릴 반응기를 제작하여 글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트 시험체가 투입 된 후 외부로부터 공기가 유입되지 않도록 하였다(Fig. 2). 이와 함께 하수의 유입을 모사하기 위하여 유기질소 및 유기인 등이 포함된 오염수를 제조하였으며(Table 4), 이를 11L/min의 토출량을 갖는 순환펌프를 이용하여 아크릴 반응기 내부에서 지속적으로 순환되도록 하였다. 더불어 하수에서 발생하는 콘크리트의 황산 열화 환경을 조성하기 위해 황산염의 농도를 서울시 하수의 농도와 유사한 120ppm으로 조성하였다. 유사 하수의 황산염 농도는 실험 과정에서 일정한 농도가 유지되도록 28일 간격으로 농도 측정을 수행하였으며, 농도의 감소가 확인되는 경우 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 수용액을 첨가하여 황산염 농도가 일정하게 유지되도록 하였다.

유사 하수환경에 투입된 글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트의 내화학적 평가는 침지 재령 28일, 56일 및 91일에서 압축강도 및 질량 변화를 측정하였다. 코팅 콘크리트의 압축강도 변화는 유사 하수 침지 재령별 압축강도 측정값을 하수환경 침지 전 콘크리트 시험체의 압축강도로 무차원한 값으로 하였다. 질량 변화 또한 압축강도

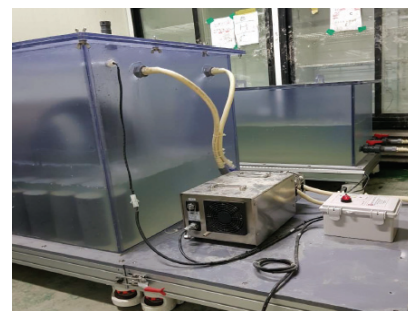


Fig. 2. Simulated mock-up test image

Table 4. Simulated sewage environments

Temperature (°C)	Concentration of contaminant (ppm)			Concentration of SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)
	COD	T-N	T-P	
20±3	100	10	1	120

측정의 경우와 마찬가지로 유사 하수 환경 침지 전 시험체의 질량을 측정 후 유사 하수 침지 재령별 질량 감소의 크기를 비율로서 계산하였다. 이와 함께 유사 하수환경에 적용된 코팅재에서 박테리아 적용 기술 실험을 검증하기 위한 방법으로 박테리아의 성장성 평가와 함께 글라이코 칼릭스 생성량 평가를 실시하였다. 성장성 평가의 경우 재령 28일 및 재령 91일 하수관 표면에서 채취한 시료에서 분리한 박테리아를 Table 1의 조성과 동일한 한천 배지에 접종하였으며, 배양이 완료된 한천 배지의 박테리아 군락 형성을 계수하여 생균수를 도출하였다. 더불어 해당 시료에서 분리된 박테리아는 Hemocytometer를 통해 활동성을 관찰하였다. 콘크리트 흡관 표면 형성된 글라이코 칼릭스는 코팅재 표면에서 채취한 시료를 3,000rpm 속도의 원심분리기를 이용하여 선별하였으며, 이후 에탄올을 첨가하여 동결·건조의 과정을 거쳐 관 표면 단위 면적당 생성량을 측정하였다. 더불어 글라이코 칼릭스 박테리아의 적용이 주변 생태 환경에 미치는 유해성을 평가하기 위하여 차세대 염기서열(next generation sequencing, NGS) 분석을 실시하였다. NGS 분석의 경우 유사 하수환경 침지 재령 91일에서 채취한 1L의 유사 하수 시료와 함께 콘크리트 흡관 표면에서 채취한 500g의 페이스트 시료를 이용하였다. 이와 함께 글라이코 칼릭스 박테리아의 적용이 하수의 오염에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수질오염공정시험방법에 따라 28일에서 COD, T-N, T-P의 농도 변화를 평가하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 압축강도비 및 질량감소율

유사 하수환경에 투입된 콘크리트의 압축강도비 및 질량감소율의 평가 결과는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. 유사 하수환경 침지 이후 콘크리트 열화에 의한 압축강도 저하와 질량 감소의 변화는 미미하였다. 하지만, 그 감소 크기는 글라이코 칼릭스 코팅재 적용 유·무에 따라 차이를 보였다. 무코팅 시험편의 경우에는 재령 28일에서의 압축강도비가 0.97이었으며, 재령 91일에서는 0.95의 값을 보여 황산염에 의한 열화로 강도저하가 지속적으로 발생하였다. 반면 글라이코 칼릭스 코팅재가 도포된 콘크리트 시험편은 재령 28일에서의 압축강도비가 1.02로 초기 압축강도 대비 미세하게 증가하는 결과를 보였으며, 재령 91일에서도 압축강도비는 1.01로 큰 차이를 보이지 않았다. 이러한 결과는 글라이코 칼릭스에 의한 황산염의 침투 차단에 의한 열화 저항의 효과와 함께 수중침지 양생 효과에 기인한 것으로 판단된다. 질량감소의 결과 또한 압축강도의 측정 결과와 마찬가지로 무코팅 시험편의 경우가 글라이코 칼릭스 코팅 시험편

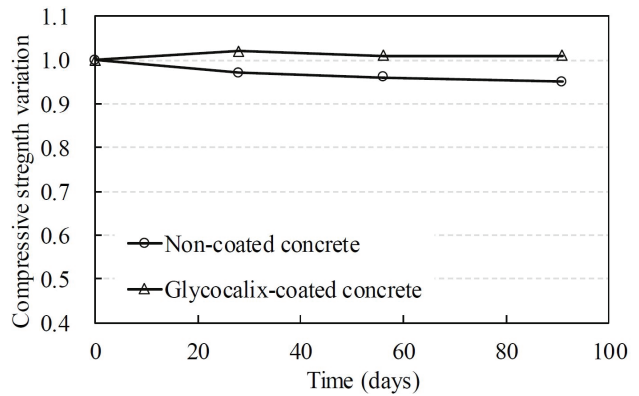


Fig. 3. The variation of compressive strength of concrete specimens in mock-up tests at different ages

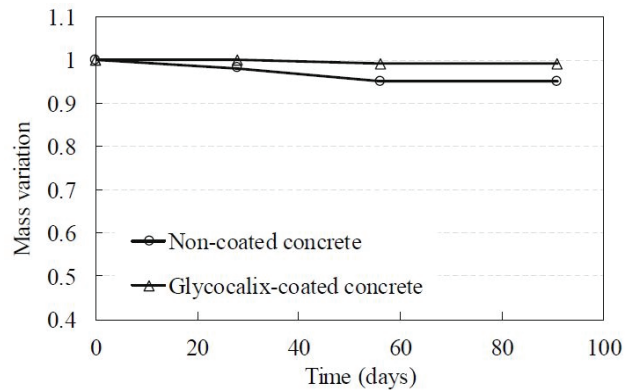


Fig. 4. The mass variation of concrete specimens in mock-up tests at different ages

에 비해 더 크게 나타났다. 무코팅 시험편의 질량 감소는 재령 28일에서 2%이었으며, 재령 91일에서는 5%로 나타났다. 글라이코 칼릭스 코팅 시험편의 경우 재령 28일까지 질량 감소는 발생하지 않았으며, 재령 91일에서도 그 감소율은 1%로서 무시할만한 수준이었다.

#### 3.2 박테리아 활동성 및 성장성

유사 하수환경에 투입된 콘크리트 흡관에서 분리한 박테리아를 한천배지에 접종하여 재배양한 결과는 Fig. 5와 같다. 글라이코 칼릭스 코팅 시험편에서는 재령 28일 및 재령 91일의 모든 재령에서 *Rhodobacter capsulatus*의 군락이 다수 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 반면 무코팅 시험편의 경우 재령 28일에서는 재배양 한천 배지의 박테리아 군락 형성이 관찰되지 않았다. 하지만 하수 환경 투입 재령 91일의 무코팅 시험편 채취한 시료를 재배양한 경우에는 미미한 수의 군락을 확인 할 수 있었는데, 이는 외부 환경으로부터

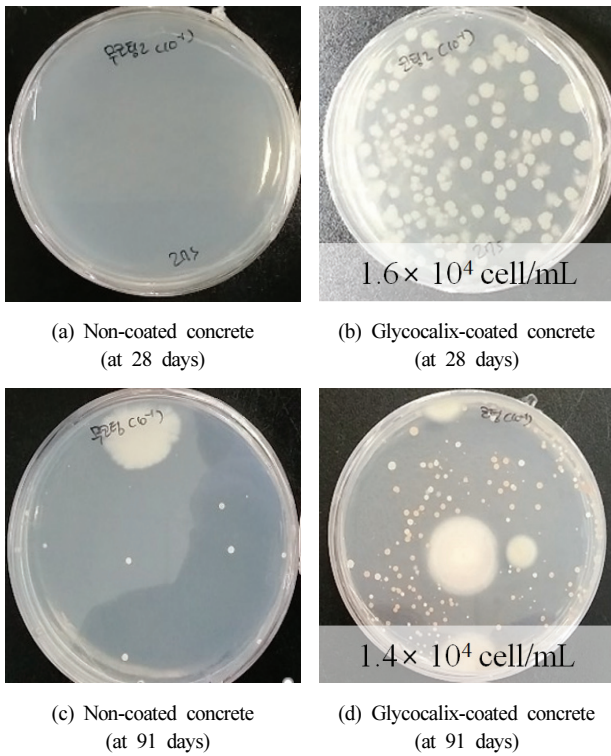


Fig. 5. Typical images for bacteria colonies recultured using pellets extracted from concrete pipe in the mock-up tests

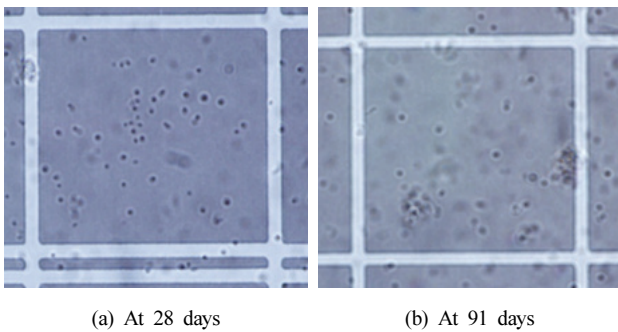


Fig. 6. Evaluation results of bacteria activity

유입된 박테리아에 의한 오염으로 판단된다. 콘크리트 흡관에서 분리한 시료를 한천배지에 재배양한 결과 균락 계수를 통해 도출된 *Rhodobacter capsulatus*의 생균수 평가 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 글라이코 칼릭스 코팅 시험체의 *Rhodobacter capsulatus*의 생균수는 재령 28일에서  $1.6 \times 10^4 \text{ cell/mL}$ 이었으며, 재령 91일에서도  $1.4 \times 10^4 \text{ cell/mL}$ 으로 유사한 결과를 보여 박테리아가 지속적으로 성장함을 확인 할 수 있었다.

Hemocytometer를 이용한 박테리아의 활동성 관찰결과  $1 \sim 3 \mu\text{m}$

의 크기로서 구형의 형상을 갖는 *Rhodobacter capsulatus*를 관찰할 수 있었다(Fig. 6). 더불어 글라이코 칼릭스를 형성하는 *Rhodobacter capsulatus*는 지속적인 움직임을 보여 황산염 열화에 노출된 유사 하수환경에서 우수한 활동성 갖는 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 재배양 생균수 평가의 결과와 마찬가지로 글라이코 칼릭스를 형성하는 *Rhodobacter capsulatus*가 황산염에 의한 열화 환경인 하수환경에서 지속적인 생장이 가능함을 의미한다. 이와 함께 주변 환경에 분포하는 수분과 함께 유기오염원을 영양분으로 하여 자생적 활동이 가능 한 *Rhodobacter capsulatus*의 특성은 유입수 및 유기퇴적물 등의 지속적으로 발생·유입되는 하수 환경에서 성장성 향상에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다.

### 3.3 글라이코 칼릭스 생성량

글라이코 칼릭스는 *Rhodobacter capsulatus*가 형성하는 당 복합체의 물질로서 콘크리트 흡관 표면 형성되는 두께는  $50 \sim 300 \mu\text{m}$  수준으로 실제 육안으로는 확인이 어렵다(Fig. 7). 또한 막(membrane) 형태의 글라이코 칼릭스는 투명한 색을 띠어 콘크리트 표면에서 그 형성 여부를 객관적으로 판단하는 데에는 어려움이 있다. 이에 본 실험에서는 콘크리트 흡관의 단위 면적당 형성되는 글라이코 칼릭스의 양을 정량적으로 평가하였다. 유사 하수환경에 투입된 글라이코 칼릭스 코팅 콘크리트 흡관에서 글라이코 칼릭스 생성량을 평가한 결과는 그림 Fig. 8과 같다. 유사 하수환경 투입 28일에서 글라이코 칼릭스의 생성량은  $25 \text{ mg/cm}^3$  이었으며, 재령 91일에서는  $67.5 \text{ mg/cm}^3$ 으로 재령 28일 대비 약 2.7배 증가하는 결과를 보였다. 이는 앞선 Fig. 6의 박테리아 생균수 평가 결과와 같이 하수 환경에서 지속적으로 생장이 가능한 *Rhodobacter capsulatus*의 기작에 의해 글라이코 칼릭스를 계속적으로 생성한 것으로 판단된다.

### 3.4 생태계 미생물 군집 분석

글라이코 칼릭스 코팅 콘크리트의 투입 재령 91일의 유사 하수에

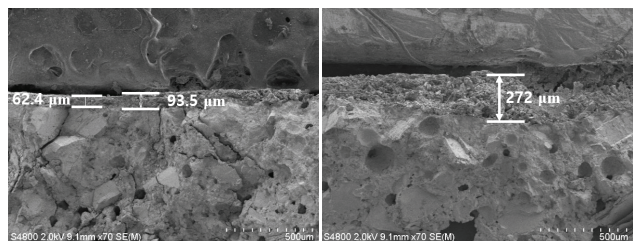


Fig. 7. Typical images of glycocalix formed on coating material surfaces in the mock-up tests ( $\times 70$ )

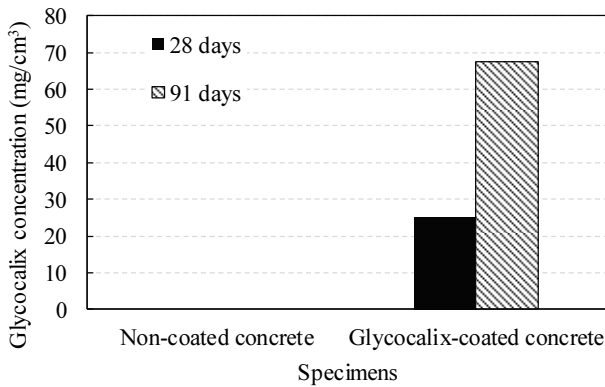


Fig. 8. Glycocalix concentration formed on coating material surfaces in the mock-up tests

서 채취한 시료의 미생물 군집 분석 조사의 결과는 그림 Fig. 9와 같다. 분석결과 글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트가 투입된 하수 시료 및 시험편 채취 시료에서는 α-proteo 박테리아의 군집이 무코팅 하수 및 시험편 채취 시료에 비해 높게 나타났다. 이는 α-proteo

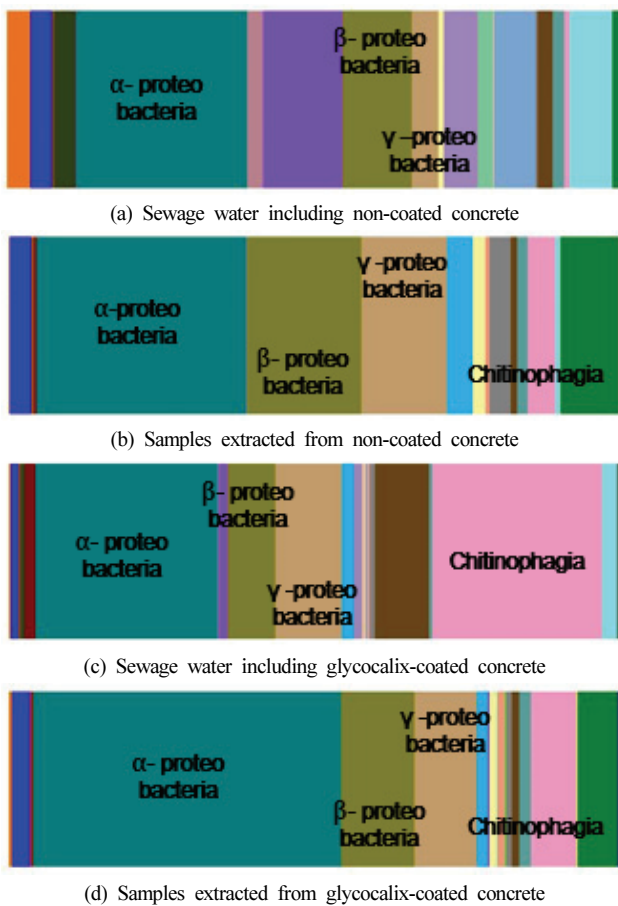


Fig. 9. Results of next generation sequencing analysis

박테리아 군속인 *Rhodobacter capsulatus*에 의한 영향으로 판단 된다. 더불어 *Chitinophaga*의 군속 또한 무코팅 시료에 비해 글라이코 캘릭스 코팅 시료에서 더 높게 나타났는데, 해당 박테리아들은 일반적으로 토양환경에 분포하는 종으로서 박테리아 성장처 제공 및 코팅재 제작을 위해 팽창질석과 골재의 사용에 이 기인한 것으로 판단된다. 이를 제외한 미생물 군집은 코팅 콘크리트 하수관거와 일반 하수관거에서 큰 차이를 보이지 않았으며, 환경유해균주인 장내세균총(Enterobacteriales)은 발견되지 않았다. 결과적으로 글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트는 *Rhodobacter capsulatus* 균주를 포함함에 따라 주변 생태계 미생물 군집분포 변화에 다소 영향을 미치지 않지만, 환경유해균주로서 분리되지 아니함에 따라 실제 적용에 있어 생태유해 문제는 없을 것으로 판단된다.

### 3.5 수질 변화 평가

Fig. 10은 실험에 사용된 유사 하수의 수질 오염원의 초기 농도를 기준으로 하여 재령 28일 이후의 수질 측정 결과 값을 무차원한 결과이다. 유사 하수의 오염원 농도는 초기 원수 시료에 비해 감소하는 결과를 보였지만, 그 크기는 글라이코 캘릭스 코팅재 적용 유·무에 따라 다소 상이한 결과를 보였다. 글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트가 투입된 하수에서 COD의 농도 감소율은 88%로, 70%의 감소율을 보인 무코팅 시험체에 비해 약 25% 개선된 결과를 보였다. T-N의 농도 감소율 또한 글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트 투입된 하수 시료의 경우가 95%로, 91%의 감소율을 보인 무코팅 시험체에 비해 우수하였다. 반면, T-P의 농도 감소율은 글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트가 87%로, 93%의 감소율을 보인 무코팅 시험체에 비해 낮았다. 이러한 결과는 *Rhodobacter capsulatus*의 성장 활동에 의한 인(P) 화합물의 배출(박테리아 성장 배설물)에 의한 영향으로 판단된다(Yoon et al, 2016). 결과적으로 글라이코 캘릭스 코

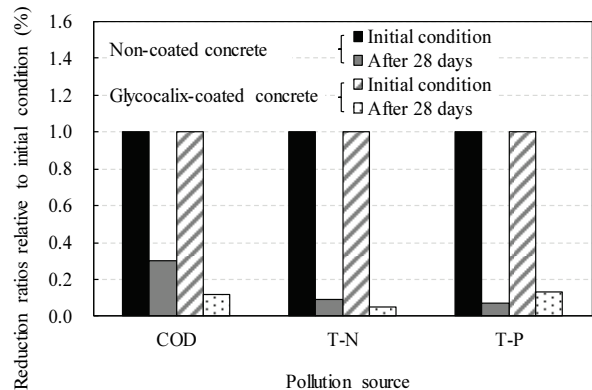


Fig. 10. Variation of water pollution sources

팅 콘크리트가 투입된 하수에서 수질 오염원의 농도 저감율은 무코팅 시험체에 비해 우수한 결과를 보였으며, 이는 적용 박테리아인 *Rhodobacter capsulatus*가 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

글라이코 캘릭스 형성 박테리아를 이용한 콘크리트 구조체의 표면 코팅기술의 실제 환경에서 검증하기 위한 Mock-up 실험의 결과 본 연구의 범위 내에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 황산염 열화에 노출된 유사 하수환경에서 글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트의 재령 91일 압축강도비 및 질량감소율은 각각 1.01 및 1%로 무코팅 콘크리트(각각 0.95와 5%)에 비해 우수한 열화저항 성능을 보였다.
2. 유사 하수 환경 침지 재령 28일 및 91일에서 코팅재에 적용된 *Rhodobacter capsulatus*의 생균수는  $1.4 \times 10^4$  cell/mL 이상 수준으로 황산염에 의한 열화 환경인 하수환경에서 지속적으로 성장하는 결과를 보였다.
3. 유사 하수환경 투입 재령 91일에서 코팅재 표면의 글라이코 캘릭스 생성량은  $67.5 \text{ mg/cm}^3$ 으로, 하수환경에서 지속적인 생장이 가능한 *Rhodobacter capsulatus*에 의해 재령 28일에서의 글라이코 캘릭스 생성량 대비 약 2.7배 증가하는 결과를 보였다.
4. 글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트는 *Rhodobacter capsulatus* 균주를 포함하지만 하수환경 내에서 환경유해균주들은 발견되지 않았다.
5. 글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트가 투입된 유사 하수에서 수질 오염원의 농도 저감율은 COD가 무코팅 시험체에 비해 약 25% 개선된 우수한 결과를 보였다.

#### Conflicts of interest

None.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비 지원(19SCIP-B103706-05)에 의해 수행되었습니다.

#### Reference

- Building Material Testing Center Standards. (1999). JSTM C 7401(Method of Test for Chemical Resistance of Concrete in Aggressive Solution), Japanese Industrial Standard.
- Chung, J.S., Kang, W.D. (2012). An experimental study on evaluation of repair mortars with CAC for sewer pipe, *International Journal of Safety*, **27(4)**, 68–75.
- Clifton, J.R., Knab, L.I. (1989). *Service Life of Concrete*, National Bureau of Standards, Washington DC, USA.
- Costa, S., Ganzerli, S., Rugiero, I., Pellizzari, S., Pedrini, P., Tamburini, E. (2017). Potential of *Rhodobacter capsulatus* grown in anaerobic–light or aerobic–dark conditions as bioremediation agent for wastewater treatments, *Water*, **9(2)**, 108.
- Lee, S.A., Ahn, K.Y. (2018). Evaluation on sulfate resistance of the high–durability culvert using CAC and GGBS, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **30(5)**, 465–472 [in Korean].
- Oh, K.J., Ryu, K.J., Bae, T.H., Kim, D.H., Bae, J.J. (2006). Inspection of chemical attacked sewage concrete structures, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, **18(2)**, 22–26 [in Korean].
- Yoon, H.S., Jung, S.B., Yang, K.H., Lee, S.S., Lee, J.Y. (2016). Compressive strength and ecological characteristics of mortars using expanded vermiculite absorbing bacteria, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **4(2)**, 165–171 [in Korean].
- Yoon, H.S., Yang, K.H., Lee, S.S. (2018). Bacteria mobilizing approach for developing biomimic coating materials for concrete protection, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **30(2)**, 147–155 [in Korean].
- Yoon, H.S., Yang, K.H., Lee, S.S. (2019). Evaluation of sulfuric acid resistance of biomimetic coating mortars for concrete surface protection, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **31(1)**, 61–68 [in Korean].
- Yang, K.H., Yoon, H.S., Lee, S.S. (2016). Sulfate resistance coating technology for concrete drain pipe using bacteria slime, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, **28(3)**, 18–22 [in Korean].
- Yang, K.H., Yoon, H.S., Lee, S.S. (2018). Feasibility tests toward the development of protective biological coating mortars, *Construction and Building Materials*, **181**, 1–11.

### 유사 하수환경에서 글라이코 캡릭스 코팅 콘크리트의 효율성 평가

이 연구에서는 글라이코 캡릭스 형성 박테리아를 이용한 콘크리트 구조체의 표면 코팅기술의 실제 적용의 중요성과 문제점을 파악하기 위하여 유사 하수환경에서 Mock-up 실험을 수행하였다. 황산염 열화의 조건에서 원주형 콘크리트시험체의 압축강도와 질량의 변화를 평가하였다. 박테리아의 성장성 및 글라이코 캡릭스 생성량은 하수관에서 채취한 시료로부터 평가되었다. 이와 함께 유사 하수환경에서 *Rhodobacter capsulatus*의 적용이 주변 생태환경에 미치는 유해성을 평가하기 위해 차세대 염기서열 분석이 수행되었다. Mock-up 실험결과 개발된 코팅재가 적용된 콘크리트 시험체는 황산염 열화에 의한 콘크리트의 압축강도 저하 및 질량감소는 발생하지 않았으며, 하수 환경에서 우수한 열화저항성을 갖는 것으로 평가되었다. 재령 91일에서 경화된 코팅재에서 분리된 박테리아의 생균수 및 글라이코 캡릭스 생성량은 각각  $1.4 \times 10^4 \text{ cell/mL}$  및  $67.5 \text{ mg/cm}^3$ 이었다. 더불어 글라이코 캡릭스 코팅 콘크리트 하수관이 설치된 하수에서는 유해균주가 발견되지 않았다. 이는 코팅 재료로서 활용된 *Rhodobacter capsulatus*가 하수 환경에서 주변 생태환경에 미치는 영향이 없음을 의미한다.