

# 슬라임 생성 박테리아를 혼입한 코팅재의 염해 저항성 및 초음파 특성

## Chloride Penetration Resistance and UV Properties in Coating Materials Containing Various Slime-Forming Bacteria

권성준<sup>1</sup> · 윤현섭<sup>2</sup> · 양근혁<sup>3\*</sup>Seung-Jun Kwon<sup>1</sup> · Hyun-Sub Yoon<sup>2</sup> · Keun-Hyeok Yang<sup>3\*</sup>

(Received September 6, 2017 / Revised November 13, 2017 / Accepted December 14, 2017)

Recently, many researches on crack healing and repairing technique using bacteria which can produce vital-reacted calcite have been proposed. This study is for a basic research on repair material with slime formation through bacteria and deals with durability evaluation for coating materials containing bacteria-forming slime. For the work, 4 types of bacteria (*Rhodobacter capsulatus*, *Rhodopseudomonas palustris*, *Bacillus thuringiensis*, and *Bacillus subtilis*) and 2 types of nutrient conditions are considered, and several tests covering strength evaluation under sulfate condition, accelerated chloride diffusion, and UV (Ultrasonic Velocity) measurement are performed. Strength improvement in coating materials containing bacteria is evaluated in spite of even exposure to sulfate attack to 7 days. Chloride diffusion coefficient and UV properties are also improved except for the case of *Rhodopseudomonas palustris*. With resistance of slime to long term exposure and aerobic conditions for bacteria longevity, the proposed bacteria shows an engineering feasibility for repair material of RC structure exposed harsh environment.

**키워드 :** 박테리아, 슬라임, 표면 보수재, 내구성, 염화물 확산계수

**Keywords :** Bacteria, Slime, Coating material, Durability, Chloride diffusion coefficient

### 1. 서론

콘크리트는 경제적이고 내구적인 건설재료이므로 100여년이 넘게 사용되어온 건설재료이다. 1990년대의 고강도 콘크리트, 2000년대의 고성능 콘크리트 등 각 시대적 니즈를 반영하여 콘크리트의 성능개발 목표는 변화되었으며, 최근 들어 초고강도 콘크리트, UHPCC 등 시대상에 따라 성능수준이 진보하고 있다(Russel, Graybeal 2013; Choi et al, 2016). 콘크리트의 고강도화에 따라 강도 및 탄성계수 등 공학적 설계상수의 개선은 큰 의미를 가지지만, 콘크리트의 취성화, 초기재령에서의 균열발생은 또 다른 문제점을 야기하고 있다(Song et al, 2001; Ranade et al, 2013).

콘크리트의 큰 공학적 장점은 매립된 철근이 부식으로부터 안전하다는 가정을 들 수 있는데, 최근 들어 철근부식으로 인한 내구

성 문제점이 보고되고 있다. 해안가 및 염해가 지배적인 환경에 노출된 콘크리트는 염화물이 외부로부터 유입되고 공극수내에 해리된 자유염화물은 철근에 공식(pitting)을 야기하며 부식을 야기한다(Andrade 1993; Yokozeki et al, 1998). 특히 균열이 발생한 콘크리트에서는 건전부의 모세관 공극을 통한 염화물의 유입 이외에 추가적인 염화물 유입경로가 발생하므로 국소부식을 야기하게 된다(Kwon et al, 2009; Park et al, 2012). 또한 지하구조물에서 주로 발생하는 탄산화에서도 균열이 발생한 콘크리트에서는 탄산화 깊이가 국소적으로 증가하며, 이로 인한 철근부식 문제를 야기하게 된다(Abe 1999; Song et al, 2006) 수화열 또는 건조수축과 같은 재료적 거동에 따른 콘크리트의 균열 발생을 제어하기 위해 많은 연구가 수행되어 왔으며, 광물성 혼화재료 또는 화학적 혼화제의 캡슐화 등의 연구를 통한 타분야와의 융합연구도 진행되고

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

<sup>1</sup>한남대학교 건설시스템공학과 (Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

<sup>2</sup>경기대학교 일반대학원 건축공학과 (Depart. Architectural Engineering, Graduate School, Kyonggi University, Seoul, 03746, Korea)

<sup>3</sup>경기대학교 플랜트-건축공학과 (Depart. Plant-Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, 16227, Korea)

있다(Choi et al. 2016).

최근 들어 박테리아를 활용하여 초기재령 균열을 제어하려는 연구가 시도되고 있다. 이러한 연구는 석회광물(Calcite)을 생성하는 박테리아 기반의 자기치유(self-healing) 기술(Tziviloglou et al. 2016; Hamid, Raheb 2017) 및 콘크리트 표면 슬라임(glycocalix membrane, slime) 막을 형성하는 박테리아 기반의 자기보호(self-protecting) 기술이 주를 이룬다(Jung et al. 2015; Yang et al. 2016). 자기치유 콘크리트는 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)을 석출하는 박테리아의(*Sporosarcina pasteurii* 및 *Bacillus sphaericus* 등) 대사 작용에 기인하는데, 이 박테리아는 요소분해 반응(Urease)을 통해 세포막 외부에 CaCO<sub>3</sub> 결정을 형성한다. 자기치유 콘크리트는 위와 같은 CaCO<sub>3</sub> 형성 작용을 통해 콘크리트 균열부의 채움 효과(crack remediation)를 유도 한다(Rafat, Navneet 2011). 슬라임 막 형성 박테리아(*Rhodobacter capsulatus* 및 *Rhodopseudomonas palustris* 등)에 기반한 보수재료는 화학적 부식 환경에 노출된 콘크리트 구조체 표면을 보호하는 역할을 한다. 박테리아의 성장·증식을 통해 콘크리트 표면 형성된 슬라임 막은 하수관거 환경에서 발생하는 H<sub>2</sub>S 가스 및 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 등의 열화 영향인자를 차단하여 생태학적 보호의 효과를 부여한다(Yang et al. 2016). 더불어 이러한 박테리아는 배양액의 구성성분에 따라 슬라임 막 형성뿐만 아니라 CaCO<sub>3</sub>를 침전시켜 콘크리트 표면의 균열 채움이 가능한 특징을 갖는다.

본 연구에서는 슬라임을 형성하는 박테리아 배양균 특성을 고려한 시멘트 코팅재를 개발하였으며, 이에 대한 염해 저항성, 황산 저항성 그리고 초음파 속도(ultrasonic velocity, UV) 측정을 통한 비파괴 검사를 수행하였다. 3가지 박테리아균, 2가지 배지조건, 그리고 침지조건을 고려하여 총 6가지의 실험조건을 구성하였으며, 촉진염화물 확산시험(rapid chloride penetration test, RCPT)를 통하여 염화물 확산계수를 평가하였다. 또한 초음파 평가를 통하여 내부의 건전성과 강도와의 상관성을 분석하였다. 결과적으로 본 연구는 슬라임 형성 박테리아를 활용한 코팅재의 활용가능성에 대한 기초 연구이다.

## 2. 박테리아 코팅재 제조를 위한 시험계획

### 2.1 박테리아의 선정 및 배지구성

선행연구를 통하여(Jung et al. 2015), 적응가능성이 있는 성장 활동을 통해 세포 표면에 슬라임 막을 형성하는 박테리아 균을 조사하였으며, 이중 광합성 박테리아 및 호기성 간균(*Bacillus*) 중 두 가지를 선정하였다. 광합성 박테리아의 일종인 *Rhodobacter*

*capsulatus*와 *Rhodopseudomonas palustris*, 간균의 일종인 *Bacillus thuringiensis* 및 *Bacillus subtilis*는 신진대사 활동을 통하여 슬라임 막을 형성하고 이러한 막의 형성을 통하여 박테리아 세포벽 외부의 영향으로부터 박테리아 자신을 보호하는 역할을 한다(Yang et al. 2016). 슬라임 막은 느슨한 점질층(slime layer) 및 조밀하게 세포를 둘러싸고 있는 중외피 캡슐(capsule) 중합체로 이루어져 있다.

광합성 박테리아의 일종인 *Rhodobacter capsulatus* 및 *Rhodopseudomonas palustris*의 접종 및 배양을 위한 배지의 조성은 Table 1에 나타난 바와 같이 Yeast extract 1.0g/L, Disodium succinate hexahydrate 1.0g/L 및 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.5g/L 등을 주요 구성요소로서 하였다. 간균의 일종인 *Bacillus thuringiensis* 및 *Bacillus subtilis*를 배양하기 위한 배양의 조성은 Table 2와 같으며, Peptic digest of animal tissue 5.0g 및 Sodium chloride 5.0g을 주요성분으로 하였다. 박테리아의 배양액 접종 후 배양을 실시한 결과는 Fig. 1과 같다. *Rhodobacter capsulatus* 및 *Rhodopseudomonas palustris*의 경우에는 접종 후 20°C, *acillus thuringiensis* 및 *Bacillus subtilis*의 경우 접종 후 28°C의 멸균 인큐베이터에서 10일간 배양을 실시하였다.

Table 1. Media components for *Rhodobacter capsulatus*(ATCC 11166) and *Rhodopseudomonas palustris*(ATCC 17001)

27s Medium composition	
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
Trace element solution SL-6	1mL
Distilled water	1L

Table 2. Media components for *Bacillus subtilis*(DSM 10) and *Bacillus thuringiensis*(IAM 12077)

Nutrient broth medium composition	
Peptic digest of animal tissue	5.0g
Yeast extract	1.5g
Beef extract	1.5g
Sodium chloride	5.0g
Distilled water	1L

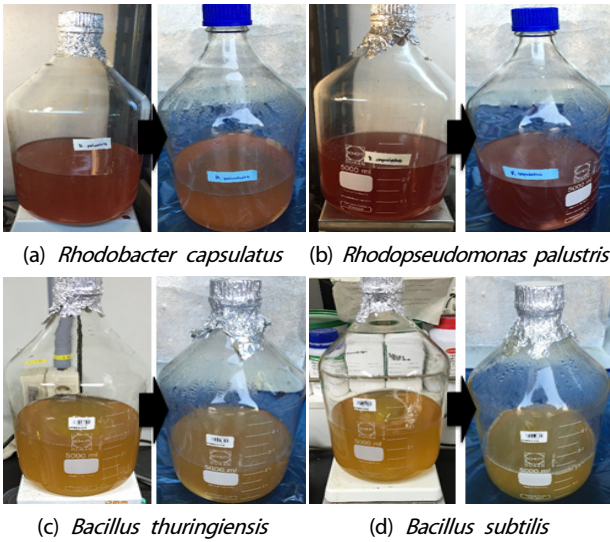


Fig. 1. for culture media

## 2.2 박테리아 슬라임 생성량 평가

박테리아의 슬라임 생성량을 정량적으로 평가하기 위하여 멸균 인큐베이터에서 10일 동안 배양된 박테리아 배양액을 채취한 후, 3,000rpm의 원심 분리기를 이용하여 세포와 슬라임을 정제·선별하였다. 12분 동안 원심 분리를 실시한 후 채취된 시료는 에탄올을 첨가하여 동결·건조의 과정을 거쳐 질량을 측정하였다.

## 2.3 박테리아를 혼입한 코팅재의 실험

### 2.3.1 코팅재 배합상세

Table 3에서는 각 실험군을 나타내고 있으며, 구조체에 적용을 위한 박테리아 혼입 코팅재의 배합은 Table 4에 나타내었다. 일반적으로 중성수준의 환경(pH 6~9)에서 최적 성장 효율을 갖는 박테리아는 시멘트의 강알칼리성(pH 12 이상) 환경에 노출될 경우 장기간 생존이 어려우며, 생체작용을 통한 슬라임 또는 Calcite 형성에 저해를 받는다(Ramachandran et al. 2001). 시멘트 사용량을 감소하고 pH를 개선하기 위해 슬래그를 50% 치환한 코팅재 배합을 사용하였다(Choi 2005). 더불어, 본 연구에서는 박테리아의 성장처(Living pore) 제공을 위한 재료로서 다공성의 팽창질석을 이용하였다. 팽창질석은 높은 수분 흡수성과 보수성 및 중성수준의 pH(5~7)를 가져, 박테리아 성장환경 조성에 적합하다. 박테리아 고정화를 위해 팽창질석을 배양액에 3일간 침지하였으며, 이후 팽창질석이 침지된 박테리아 배양액과 결합재를 혼합하여 코팅재를 제조하였다.

Table 3. Mixing proportion of coating materials(mass ratio)

Adsorbent	Binder	Bacteria Medium : EV***	Bacteria Medium+ EV : Binder
Expanded vermiculite	OPC* 50% + GGBFS** 50%	10:1	1:1.8

\*Ordinary Portland Cement

\*\*Ground Granulated Blast Furnace Slag

\*\*\*Expanded vermiculite

Table 4. Bacteria and the related culture medium in the test

Group	Bacteria	Mixing water (culture medium)
Control	x	Water
RBC	x	27s Media
RB-1	<i>Rhodobacter capsulatus</i> (ATCC 11166)	27s Media
RB-2	<i>Rhodopseudomonas palustris</i> (ATCC 17001)	27s Media
BBC	x	Nutrient Broth Media(NB)
BB-1	<i>Bacillus subtilis</i> (DSM 10)	Nutrient Broth Media(NB)
BB-2	<i>Bacillus thuringiensis</i> (IAM 12077)	Nutrient Broth Media(NB)

### 2.3.2 황산 수용액 침지에 따른 압축강도 감소율 평가

황산 수용액 침지에 따른 코팅재의 압축강도 감소율 평가는 JSTM C 7401(1999)에 따라 실시하였다.  $\phi 100 \times 200$ mm 몰드를 사용하여 제작된 코팅재의 압축강도를 재령 28일에서 측정한 후 황산 5.0% 수용액에 침지하였으며, 재령에 따라 외관 변화 및 압축강도 변화를 평가하였다(KS F 2405, 2015). 박테리아가 장기간동안 생존여부가 현재 명확하지 않으므로, 내황산 평가 결과는 황산 5.0% 수용액 침지 후 재령 7일까지만 진행하였다.

### 2.3.3 촉진염화물 확산실험(RCPT)

전위차에 의한 촉진 염소이온 확산계수를 평가하기 위하여 확산셀을 구성하였는데, 음극셀(Cell I) 용액은 0.5M의 염화나트륨(NaCl)용액을 사용하였으며, 양극셀(Cell II) 용액은 포화 수산화칼슘(Sat. Ca(OH)<sub>2</sub>) 용액을 사용하였다. 콘크리트에 8시간 전위차를 가한 후 시험편을 쪼개어 표면에 0.1N의 AgNO<sub>3</sub> 용액을 분무하여 음극측 표면에서부터 은색으로 변하는 지점까지의 깊이를 염소이온의 침투깊이로 측정하였다. 전위차 촉진시험법에 의한 비정상상태의 염소이온 확산계수는 Tang's method을 이용하여 촉진확

산계수( $D_{rcpt}$ )를 도출하였다. 식 (1) 및 (2)는 촉진확산계수 도출식을 나타낸다(Tang 1996b; Kwon and Song 2010).

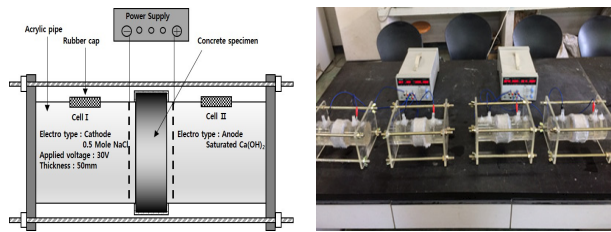
$$D_{rcpt} = \frac{RTL}{zFU} \frac{x_d - a\sqrt{d}}{t} \quad (1)$$

$$a = 2\sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \operatorname{erf}^{-1}\left[1 - \frac{2C_d}{C_0}\right] \quad (2)$$

여기서,  $D_{rcpt}$ 는 비정상상태에서 구한 전위차 촉진 염소이온 확산 계수( $m^2/sec$ ),  $R$ 는 기체상수( $8,314J/mol \cdot K$ ),  $T$ 는 절대온도( $K$ ),  $L$ 은 시편두께( $m$ ),  $z$ 는 이온전자가( $=1.0$ ),  $F$ 는 패러데이상수 ( $96,500C/mol$ ),  $U$ 는 전위차( $V$ ),  $x_d$ 는 비색법에 의한 침투깊이 ( $m$ ),  $t$ 는 전위차의 적용시간( $sec$ ),  $C_d$ 는 비색법에 의한 반응농도 ( $mol/L$ ),  $C_0$ 는 음극셀의 염소이온농도( $mol/L$ )를 나타낸다. 촉진염화물 확산계수는 각 재령 및 배합에 대하여 3개의 시편을 제조하였으며 그 평균값을 결과로 사용하였다. Fig. 2에서는 촉진염화물 시험 사진을 나타내고 있다.

2.3.4 초음파 속도 측정

수중양생 후 실험실 조건(온도 20°C, 습도 65%)에 코팅재를 24 시간 존치 후 초음파 속도 측정을 수행하였다. 초음파 속도의 측정



(a) Illustration of setup for test (b) Accelerated diffusion test

Fig. 2. Photos for Tang's method test



(a) Samples for measurement (b) UV measurement

Fig. 3. Photos for ultrasonic velocity measurement

은 콘크리트와 같은 다공성 건설재료의 건전성 및 강도의 상대적 인 평가에 널리 적용되고 있다(ASTM C 597-83, 1990; Kang et al. 2015). Fig. 3에서는 코팅재의 초음파 속도 측정 사진을 나타내고 있다.

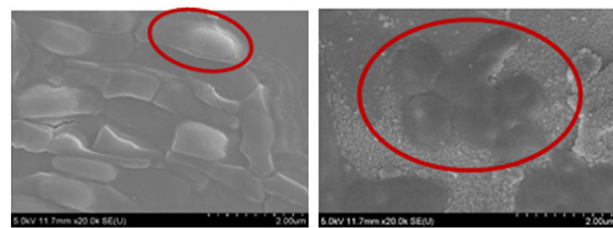
3. 박테리아 코팅재에 대한 내구적 성능평가

3.1 박테리아 배양 평가

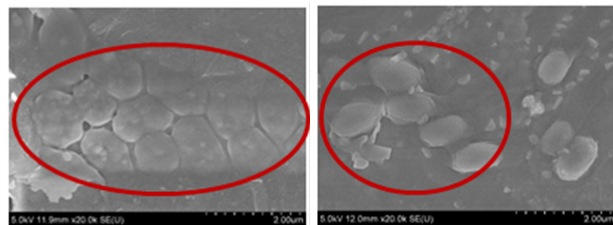
배양이 완료된 박테리아의 슬라임 막 생성량 평가 결과는 Table 5에 나타낸다. 평가 결과 총 4개의 배양군에서 Rc의 슬라임 생성 비율은 2.10으로서 가장 높게 나타났으며, Bs의 경우의 슬라임 생성 비율은 0.95로 가장 낮게 평가되었다. 흡착제로 팽창질석을 사용한 후 배양이 완료된 박테리아 배양액에 팽창질석을 10:1의 비율로 72시간 동안 침지한 후 표면 분석(Scanning electron microscopy, SEM)을 평가하였다. 평가 결과 박테리아 배양액에 침지한 팽창질

Table 5. Results of slime production

	<i>Rhodobacter capsulatus</i> (Rc)	<i>Rhodopseudo monas palustris</i> (Rp)	<i>Bacillus thuringiensis</i> (Bt)	<i>Bacillus subtilis</i> (Bs)
Slime (mg)	51.0	38.0	29.0	9.0
Bacteria (mg)	24.3	23.3	25.4	9.5
Slime/Bacteria	2.10	1.63	1.14	0.95



(a) Rc (b) Rp



(c) Bt (d) Bs

Fig. 4. Formation of various bacteria group in vermiculite spore

석의 표면에 박테리아 군집 형성이 관찰되었으며, 이를 Fig. 4에 나타내었다.

### 3.2 황산 5% 수용액 침지에 따른 강도 평가

코팅재 제작 후 재령 28일의 압축강도 측정결과는 Fig. 5에 나타내었으며, 황산 5% 수용액 침지 후 재령에 따른 압축강도 변화

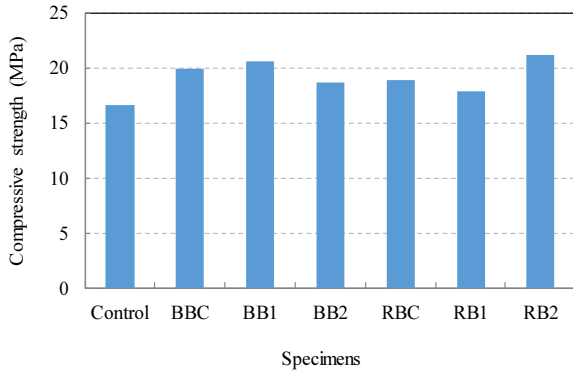
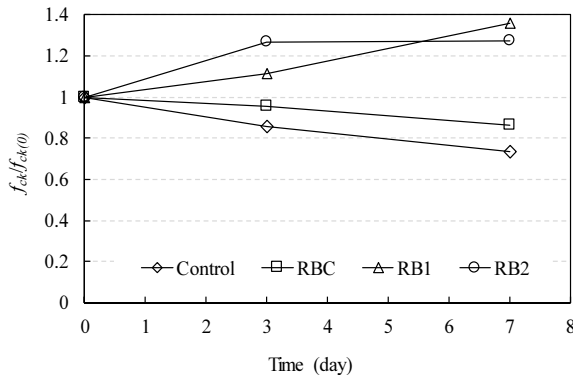
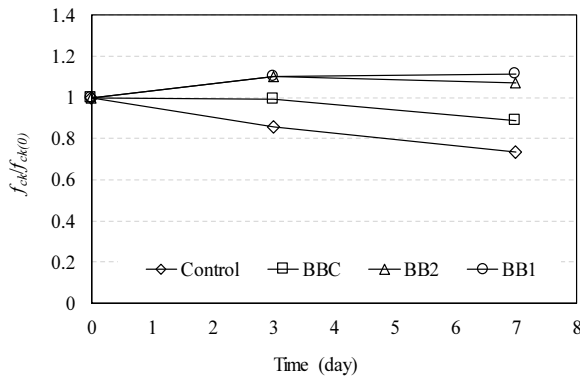


Fig. 5. Compressive strength in coating materials containing bacteria



(a) Rc and Rp case

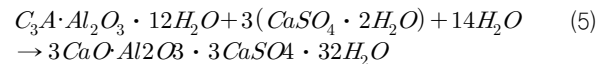
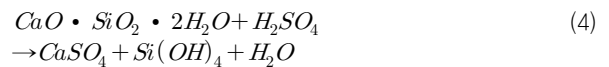
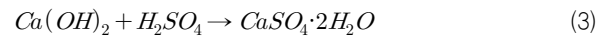


(b) Bt and Bs case

Fig. 6. Variation of compressive strength after sulfate exposure

는 Fig. 6에 도시하였다. 침지 재령이 증가함에 따라 박테리아가 혼입된 모든 시험체의 압축강도 저하는 나타나지 않았다. 광합성계 박테리아(RB1 및 RB2)를 혼입한 시험체의 경우 침지 재령 7일 이후 27~36%의 압축강도 증진되었으며, 간균박테리아(BB1 및 BB2)를 혼입한 시험체의 경우에는 침지 재령 7일 이후 6~11%의 압축강도가 증진되었다. 박테리아를 혼입하지 않은 Control, RBC 및 BBC 시험체의 경우에는 재령이 증가함에 따라 압축강도가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 재령 28일 압축강도 결과에서 최대 값은 RB2에서 21.2MPa를 최소 값은 일반 배합수 조건에서 16.7MPa로 평가되었다. BB1 및 BB2에서도 20.5MPa, 18.6MPa의 양호한 압축강도 값이 평가되었다.

일반적으로 황산 및 황산염 침식에 의한 콘크리트의 내구성 저하는 석고 생성에 의한 팽창 및 에트린자이트(ettringite) 형성에 의한 2차 팽창으로 설명할 수 있다(Baek et al., 2015). 식 (3) 및 식 (4)에서는 황산이 콘크리트 내의 수화생성물인 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>) 및 균산칼슘수화물(C-S-H)과 반응하여 석고가 생성됨을, 식 (5)에서는 C<sub>3</sub>A와 반응하여 에트린자이트를 생성시킴으로서 2차 체적팽창 발생을 나타내고 있다.



박테리아를 혼입한 코팅 시험체의 경우, 코팅재 내부 공극에 존재하는 박테리아 형성하는 슬라임 막에 의해 공극이 감소하여

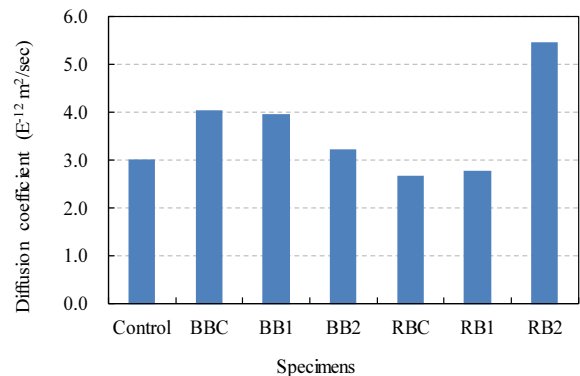


Fig. 7. Results for RCPT in coating materials containing bacteria

밀실한 구조가 된다. 이로 인해 황산이온의 침투가 감소되어 에트리나이트의 형성이 감소되므로 강도가 유지됨을 알 수 있다. 장기 황산수용액 노출시험이 수행될 경우 에트리나이트의 팽창과 사멸한 이후의 박테리아 공극이 어느정도 상충할 것으로 예상된다.

### 3.3 염해 저항성 평가

재령 28일후의 촉진 염화물 확산계수의 변화를 Fig. 7에 도시하였다. 본 절에서의 확산계수 측정은 Table 2의 배합과 실험군의 표기를 따른다. RBC 및 RB1에서  $2.68 \sim 2.78 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 낮은 수준의 확산계수가 평가되었으며, RB2에 가장 높은 확산계수인  $5.46 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 가 평가되었다.

### 3.4 초음파 속도 및 외관 평가

초음파 속도 평가는 150×150×600mm의 각주형 공시체의 길이방향으로 3회를 측정하였으며, 그 평균값을 고려하였다. 모든

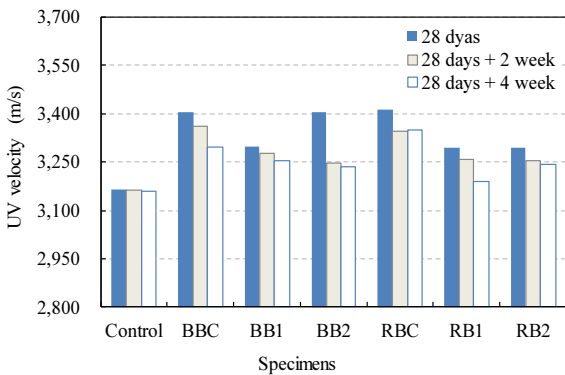


Fig. 8. UV measurement for coating materials with various bacteria



Fig. 9. Photos for UV test samples-RB2

배합은 박테리아를 혼입하지 않은 배합보다 UV속도가 증가하였다. BB1, RB1, RB2에서는 비교적 낮은 초음파속도가 측정되었다. 또한 재령이 증가할수록 전반적으로 초음파 속도가 감소하였는데, 내부의 박테리아의 호흡 및 흡착에 따라 미세 기포가 발생하고 이로 인해 코팅재의 조직이 다공성으로 변하게 된 것으로 사료된다. Fig. 8에서는 초음파 속도 실험결과를재령의 증가에 따라 평가한 결과를 나타내었으며, 균열이 발생한 코팅재(RB2)의 대표사진을 Fig. 9에 나타내었다.

## 4. 결론

본 연구는 슬라임 형성 박테리아를 사용한 표면 보수재 개발의 가능성을 평가하기 위한 기초연구로 4가지 박테리아와 4가지 배양 및 흡착조건을 고려하여 코팅재의 내구성 실험을 수행하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 4가지의 박테리아(*Rhodobacter capsulatus*, *Rhodospseudomonas palustris*, *Bacillus thuringiensis*, *Bacillus subtilis*)을 기본으로 하여 슬라임을 형성할 수 있는 배지조건을 구성하였으며, 슬라임 생성량을 평가하였다. 팽창질속에 흡착된 모든 균에서 박테리아의 균집을 확인할 수 있었으며, *Rhodobacter capsulatus*의 슬라임 생성 비율은 2.10로, *Bacillus subtilis*의 경우의 슬라임 생성 비율은 0.95로 평가되었다.
2. 5.0%의 황산수용액에 7일간 침지후 압축강도 변화를 평가하였는데, 광합성계 박테리아(*Rhodobacter capsulatus*, *Rhodospseudomonas palustris*)를 혼입한 시험체의 경우 침지 재령 7일 이후 27~36%의 압축강도 증진되었으며, 간균박테리아(*Bacillus thuringiensis*, *Bacillus subtilis*)를 혼입한 시험체의 경우에는 6~11%의 압축강도가 개선되었다.
3. 촉진염화물 시험에서는 RBC(박테리아가 없으며 27s 배지) 및 RB1(*Rhodobacter capsulatus* 및 27s 배지)의 경우에서  $2.68 \sim 2.78 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 낮은 수준의 확산계수가 평가되었으며, RB2(*Rhodospseudomonas palustris* 및 27s 배지)에서 가장 높은 확산계수인  $5.46 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 가 평가되었다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비 지원(17SCIP-B103706-03)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Abe, T. (1999). "Result of reference review on crack width effect to carbonation of concrete," Proceedings of Symposium on Rehabilitation of Concrete Structures, Jan., **1(1)**, 7–14.
- Andrade, C. (1993). Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurement, *Cement and Concrete Research*, **23(3)**, 724–742.
- ASTM C 597–83. (1990). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, American Society for Testing and Materials, 1–24.
- Baek, C.W., Kim, H.S., Choi, S.W., Jo, H.T., Ryu, D.H. (2015). Durability assessment of high strength concrete with high volume mineral admixture, *Journal of the Korean Concrete Institute*, **27(6)**, 641–649.
- Choi, G.Y. (2005). Experiment for Environment Favorable Consolidation of Rivers and Channels, Ph.D Thesis, Konkuk University, Korea.
- Choi, J.I., Song, K.I., Song, J.K., Lee, B.Y. (2016). Composite properties of high-strength polyethylene fiber-reinforced cement and cementless composites, *Composite Structures*, **138**, 116–121.
- Choi, Y.C., Cho, Y.K., Shin, K.J., Kwon, S.J. (2016). Development and application of microcapsule for cement hydration control, *KSCE Journal of Civil Engineering*, **20(1)**, 282–292.
- Hamid, K., Raheb, B. (2017). Application of carbonate precipitating bacteria for improving properties and repairing cracks of shotcrete, *Construction and Building Materials*, **148**, 249–260.
- JSTM C 7401. (1999). Method of test for chemical resistance of concrete in aggressive solution, *Cement and Concrete Research Japanese Industrial Standard*, 1–10 [in Japanese].
- Jung, J.E., Yang, K.H., Yoon, H.S. (2015). Adsorption technology for bacteria-based concrete coating, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **3(2)**, 140–145.
- Kang, S.T., Lee, B.Y., Kwon, S.J. (2015). Suggestion for concrete strength grade using ultrasonic velocity for tunnel lining concrete, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **3(4)**, 320–327 [in Korean].
- KS F 2405. (2015). Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete, KSSN, 1–3 [in Korean].
- Kwon, S.J., Na, U.J., Park, S.S., Jung, S.H. (2009). Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion, *Structural Safety*, **31(1)**, 75–83.
- Kwon, S.J., Song, H.W. (2010). Analysis of carbonation behavior in concrete using neural network algorithm and carbonation modeling, *Cement and Concrete Research*, **40(1)**, 119–127.
- Park, S.S., Kwon, S.J., Jung, S.H. (2012). Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation, *Construction and Building Materials*, **29(2)**, 183–192.
- Russell, H.G., Graybeal, B.A. (2013). Ultra-high Performance Concrete: A State-of-the-art Report for the Bridge Community, No. FHWA-HRT-13-060, 22–86.
- Rafat, S., Navneet, K.C. (2011). Effect of ureolytic bacteria on concrete properties, *Construction and Building Materials*, **25**, 3791–3801.
- Ranade, R., Li, V.C., Stults, M.D., Heard, W.F., Rushing, T.S. (2013). Composite properties of high-strength, high ductility concrete, *ACI Materials Journal*, **110(4)**, 413–422.
- Ramachandran, S.K., Ramakrishnan, V., Bang, S.S. (2001). Remediation of concrete using micro-organisms, *ACI Materials Journal*, **98**, 3–9.
- Song, H.W., Cho, H.J., Park, S.S., Byun, K.J., Maekawa, K. (2001). Early-age cracking resistance evaluation of concrete structure, *Concrete Science Engineering*, **3(1)**, 62–72.
- Song, H.W., Kwon, S.J., Byun, K.J., Park, C.K. (2006). Predicting carbonation in early-aged cracked concrete, *Cement and Concrete Research*, **36(5)**, 979–989.
- Tang, L. (1996b). Electrically accelerated methods for determining chloride diffusivity in concrete—current development, *Magazine of Concrete Research*, **48(176)**, 173–179.
- Tziviloglou, E., Wiktor, V., Jonkers, V.H., Schlangen, E. (2016). Bacteria-based self-healing concrete to increase liquid tightness of cracks, *Construction and Building Materials*, **122**, 118–125.
- 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].

Yokozeki, K., Okada, K., Tsutsumi, T., Watanabe, K. (1998). Prediction of the service life of RC with crack exposed to chloride attack, Japan Symposium of Rehabilitation of Concrete Structure, **10(1)**, 1-6 [in Japanese].

#### 슬라임 형성 박테리아를 혼입한 코팅재의 염해 저항성 및 초음파 특성

최근 들어 박테리아를 이용하여 콘크리트의 수복하거나 박테리아 대사를 이용한 보수재료에 대한 연구가 수행되고 있다. 본 연구는 박테리아 대사를 이용하여 슬라임을 형성하며 이를 이용한 보수재료의 개발에 대한 기초적 연구로서 박테리아 슬라임을 포함한 시멘트 코팅재의 내구성 평가를 다루고 있다. 기초연구를 위해 4가지 박테리아(*Rhodobacter capsulatus*, *Rhodopseudomonas palustris*, *Bacillus thuringiensis*, *Bacillus subtilis*)과 2가지 배양조건이 고려되었으며, 제조된 코팅재를 사용하여 황산 5% 수용액에 노출에 따른 강도 변화, 염화물 확산계수, 초음파속도 평가가 수행되었다. 박테리아가 혼입된 코팅재의 경우 강도가 개선되었으며, 황산 5% 수용액 침지 이후에도 7일까지는 강도가 개선되었다. 염화물 확산계수도 *Rhodopseudomonas palustris*를 제외한 경우 충분한 염해저항성을 나타내었으며, 초음파 속도 역시 우수하게 평가되었다. 장기열화에 대한 슬라임의 저항과 박테리아의 수명을 연장할 수 있는 호기성 환경이 유지된다면 대상 박테리아는 열화환경에 노출된 콘크리트 구조의 보수재 적용에 사용될 수 있는 공학적 가능성을 보여준다.