

# Crack-healing and durability performance of self-healing concrete with microbial admixture

## 미생물 혼입 자기치유 콘크리트의 균열 치유성능 및 내구성능

Inyeop Chu, Sang-Kyun Woo, Byung-Jae Lee, Yun Lee, Hyo-Sub Lee  
추인엽, 이상균, 이병재, 이윤, 이효섭

### Abstract

Recently, interest in maintenance has been increasing due to the enlargement and aging of infra structures. Therefore, a new paradigm is required to secure and improve the durability of structures differentiated from the past. Accordingly, research on smart concrete incorporating the concept of self-healing into concrete is being actively conducted. In this study, the crack healing performance and durability performance of self-healing concrete applied with a hydrogel containing biomineral-forming microorganisms were evaluated. As a result of evaluating the dispersion of the hydrogel in concrete, it was confirmed that the hydrogel was well distributed in concrete matrix with a dispersion coefficient of 0.35 to 0.46. The crack healing performance evaluation was verified by a water permeability test, and showed a recovery rate of 95% or more at the age of 28 days, confirming the applicability of self-healing concrete. The durability performance of self-healing concrete was evaluated in terms of resistance to penetration of chloride ion and freezing and thawing. Regardless of the mixing of the hydrogel, the same level of durability performance was shown for various compressive strength level. Therefore, it was confirmed that the microbial admixture did not affect concrete durability. In the future, long-term crack healing performance and durability verification studies should be supplemented.

*Keywords: Crack-Healing, Self-Healing Concrete, Durability, Dispersion*

### 1. Introduction

철근콘크리트(Reinforced Concrete) 구조는 내구성에 매우 우수한 구조로서 사회적 중요도가 높은 주요 시설물(원자력발전소, 터널, 지하시설물, 전력구조물 등)에 널리 사용되고 있는 경제성이 우수한 건설재료이다.

최근 들어 과거 건설된 콘크리트 구조물이 노후화됨에 따라 유지관리 비용이 급격히 증가하고 있는 추세이며, 미국, 영국, 일본 등 주요 선진국에서 전체 건설분야 비용의 30~50%에 이르는 막

대한 비용이 구조물의 유지관리 및 보수·보강을 위해 소요될 것으로 예측하고 있다. 국내의 경우에도 교량, 터널 등의 사회기반시설물과 대형 고층 빌딩 등 주요 구조물의 유지관리를 위해 막대한 비용과 시간이 소요되고 있다. 이를 해결하기 위해 과거와는 차별화된 구조물의 내구성을 확보하기 위한 개술 개발이 요구되고 있다.

따라서 Fig. 1과 같은 자기치유 개념을 콘크리트에 접목시킨 스마트 콘크리트 관련 연구가 국내외 일부 연구자들에 의해 진행되고 있는 상태이다. 본 연구는 생체광물형성 미생물을 이용하여

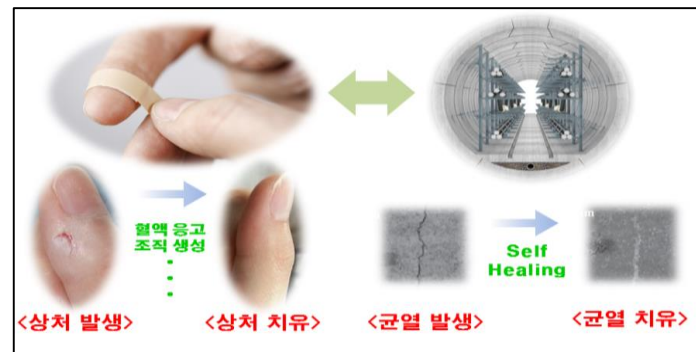


Fig. 1. 자기치유 콘크리트 개념도

콘크리트에 발생하는 균열이 스스로 치유되는 기능성 콘크리트를 개발함으로써, 철근콘크리트를 주재료로 하는 구조물의 균열로 인

### Article Information

Manuscript Received Nov 17, 2020, Accepted September 27, 2021, Published online December 30, 2021

The Authors are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

Correspondence Author: Inyeop Chu (chu.inyeop@kepco.co.kr)

ORCID: 0000-0002-2135-7522(Inyeop Chu); ORCID: 0000-0001-8128-1147(Sang-Kyun Woo); ORCID: 000-0003-3083-4359 (Byung-Jae Lee); ORCID: 0000-0002-9855-679X (Yun Lee);



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepco.co.kr>.

TABLE 1  
시험조건 및 배합변수

설계기준강도 (MPa)	27, 42	
슬럼프 (mm)	150±10	
공기량 (%)	4.0±1.5	
자기치유 혼화제 혼입율 (%)	0, 1.0, 1.5	
시험조건	균열치유 성능	- 분산도 평가 - 투수계수 시험
	내구성능	- 염소이온침투저항성 - 동결융해저항성



Fig. 2. 하이드로젤 지지체

TABLE 2  
시멘트의 물리화학적 특성

밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	화학적분비 (%)						
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	LOI
3.15	3,350	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2	1.30

TABLE 3  
골재의 물리적 특성

항목	최대입자 직경 (mm)	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	흡수율(%)	조립률
굵은골재	25	2.69	0.9	6.88
잔골재	5	2.58	1.1	2.61

한 철근 부식을 최소화하고 구조물의 내구수명을 증진시키며 유지보수를 최소화하기 위한 것이다.

본 연구는 콘크리트의 기본적인 물성(강도, 내구성 등) 저하 없이 우수한 균열치유 성능을 갖는 자기치유 콘크리트를 개발하는 것으로서, 생체광물형성 미생물을 혼입한 하이드로젤 지지체를 적용한 자기치유 콘크리트의 균열치유 성능 및 내구성능을 평가하여, 철근콘크리트 구조물에의 향후 적용성을 검증하였다.

## II. 사용재료 및 실험방법

본 연구에서는 광물형성 미생물과 이를 보호하는 하이드로젤에 지지체로 구성된 자기치유 혼화제를 적용한 콘크리트의 균열치유 성능과 내구성능 평가를 TABLE 1에 나타난 콘크리트 배합 및 시험조건으로 수행하였다.

### A. 사용재료

#### 1) 시멘트

본 연구에서는 밀도 3.15 g/cm<sup>3</sup>, 분말도 3,350 cm<sup>2</sup>/g인 1종 포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였다.

#### 2) 골재

본 연구에서는 국내 J사에서 생산된 부순 굵은 골재 및 잔골재를 사용하였다. TABLE 3은 사용된 골재의 물리적 성질을 나타내었다.

TABLE 4  
하이드로젤 지지체의 물리적 특성

입자 크기 (mm)	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	색상	입자 크기 (mm)
1.0~1.3	0.85	암갈색	1.0~1.3

TABLE 5  
혼화제의 물리적 특성

종류	형태	밀도(g/cm <sup>3</sup> )	pH
고성능 AE감수제	갈색 액체	1.06	6.5

### 3) 자기치유 혼화제

자기치유 콘크리트에 적용된 혼화제는 광물형성 미생물과 이를 보호하는 하이드로젤 지지체로 구성된다. 균열 치유에 핵심적인 역할을 하는 미생물은 한국생명공학연구원 미생물자원센터에서 보유하고 있는 *Bacillus sphaericus* 14 균주를 분양 받아 배양하고 콘크리트와 유사한 환경 조건에서 미생물의 광물 형성을 확인하였다. 알지네이트 기반의 하이드로젤 지지체는 Fig. 2에 나타내었고, 하이드로젤 지지체의 입경은 1.0~1.3mm를 유지하도록 하였다(TABLE 4).

## B. 실험방법

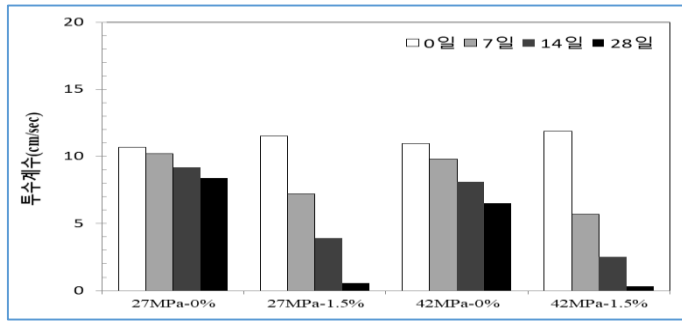
### 1) 콘크리트 배합

자기치유 콘크리트의 역학적 특성을 분석하기 위하여 전력구조물에서 주로 적용되는 27MPa 및 42MPa의 설계기준강도를 갖는 콘크리트를 대상으로, 자기치유 혼화제의 혼입율에(0, 1.5%) 따른 배합을 실시하였다. 또한 콘크리트 배합은 자기치유 혼화제의 분산성을 확보하기 위해, 먼저 시멘트와 골재를 투입하고 35rpm으로 60초 동안 혼합한 후, 자기치유 혼화제를 투입하여 30초간 추가 혼합 하였다. 마지막으로 물과 혼화제를 투입하고 120초 동안 혼합하였다.

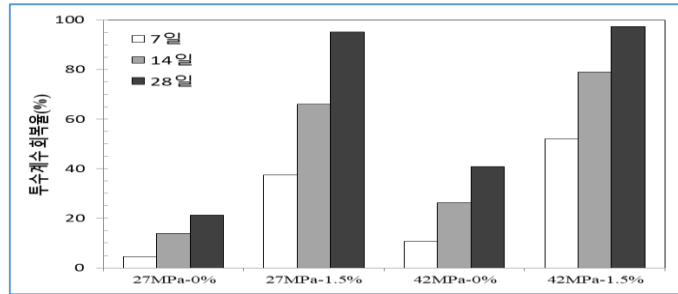
### 2) 공시체 제작

공시체의 제작은 배합을 끝낸 자기치유 콘크리트를 각 공시체 몰드(φ150×300mm 및 φ100×200mm)에 채운 후 진동 다집기





(a) 투수계수



(b) 투수계수 회복율

Fig. 5. 투수시험 결과

TABLE 8  
콘크리트 내 자기치유 혼화재 분산도 분석 결과

$\alpha_f=0.38$ (n=64)	$\alpha_f=0.46$ (n=42)	$\alpha_f=0.36$ (n=49)

### III. 실험결과 및 고찰

#### A. 자기치유 혼화재 혼입에 따른 콘크리트 균열치유 성능

##### 1) 분산도 평가

형광물질을 도포한 자기치유 혼화재를 혼합하여 제작한 콘크리트 시편을 절단한 단면을 형광현미경으로 촬영하여 분산도를 평가하였으며, 분산도 평가결과는 TABLE 8에 나타난 바와 같다.

콘크리트 배합 내부 자기치유재의 분산도 계수는 0.36~0.46으로 나타났으며 평균 분산도는 0.40으로 TABLE 7의 평가기준에

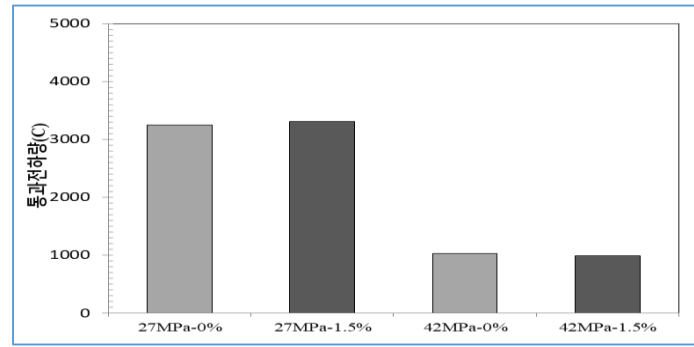


Fig. 6. 염소이온침투저항성 시험결과

서 매우 좋음에 해당하는 것으로 평가되어 콘크리트 내부에서의 분산이 잘 이루어지는 것으로 확인되었다.

#### 2) 투수시험

자기치유 콘크리트의 균열치유능력 평가를 위해 특수 제작된 투수시험장치를 이용하여 투수계수를 측정하여 균열치유효과를 검증하였다. 시험결과는 Fig 5에 나타난 바와 같다.

자기치유 혼화재를 혼입하지 않은 시험체의 투수계수는 균열 유발 직후 10.68~10.98cm/sec 에서 28일후 8.4~6.5 cm/sec로 감소가 나타나 27MPa 시험체는 21%, 42MPa 시험체는 41%의 투수계수 회복율을 나타내었다. 이는 콘크리트 내부에 미반응 시멘트 중 일부가 투수시험으로 추가 공급된 수분에 의해 추가 반응을 하였기 때문으로 판단되며 고강도 시험체의 경우 단위시멘트량이 높기 때문에 투수계수 회복율도 높은 것으로 사료된다.

자기치유 혼화재의 혼입율에 따라서는 재령 증가에 따른 투수계수의 감소가 급격한 것으로 나타났다. 자기치유 혼화재 1.5% 혼입시 균열발생 직후 11.52~11.9cm/sec의 투수계수가 28일 후 0.55~0.31cm/sec로 감소되어, 27MPa 시험체는 95%, 42MPa 시험체는 97%의 우수한 투수계수 회복율을 나타내었다. 따라서 미생물을 활용한 자기치유 혼화재의 균열치유 효과가 매우 높은 것으로 판단된다.

#### 1) 염소이온침투저항성

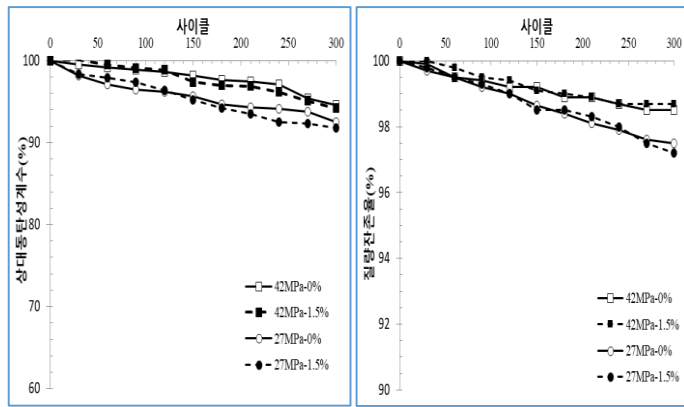
자기치유 콘크리트의 내구성능 평가를 위해 자기치유 혼화재 혼입 조건에 따른 콘크리트 시험체의 염소이온침투저항성 시험으로 측정된 통과전하량을 Fig. 6에 나타내었다.

일반 콘크리트 구조물에 적용 되는 설계기준강도 27MPa 시험체에서는 자기치유 혼화재의 혼입유무에 따라서 통과전하량이 3250C(혼입량 0%), 3305C(혼입량 1.5%)으로 나타났다. KS 에 규정된 성능기준으로는 보통으로 판정되며, 자기치유 혼화재 혼입시 통과전하량이 미소하지만 증가되어 염소이온침투저항성이 다소 저하되는 것으로 나타났다.

또한 고강도 배합인 설계기준강도 42MPa 시험체에서는 자기치유 혼화재의 혼입에 따라 통과전하량이 1028C, 995C으로 나타났다. KS에 규정된 성능기준으로 자기치유 혼화재를 혼입하지 않은 경우 낮음, 자기치유 혼화재를 1.5% 혼입시 매우 낮음으로 판정되거나 통과전하량 차이는 33C으로 그 차이는 미비한 것으로 판단된다.

이는 콘크리트 배합시 혼합된 자기치유 혼화재가 콘크리트 시험체의 염소이온침투저항성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있다.





(a) 상대동탄성계수

(b) 질량잔존율

Fig. 7. 동결융해저항성 시험결과

## 2) 동결융해저항성

자기치유 혼화재의 혼입이 동결융해저항성에 미치는 영향을 분석하기 위해, 동결융해 사이클에 따른 상대동탄성계수와 질량감소를 측정결과를 Fig. 7에 나타내었다.

상대동탄성계수 측정결과, 설계기준강도 27MPa 시험체는 91%이상, 42MPa 시험체는 94%이상의 높은 동결융해저항성을 나타내었다. 자기치유 혼화재 1.5% 혼입시 상대동탄성계수는 27MPa에서 0.76%p, 42MPa 시험체에서 0.40%p 감소되는 것으로 나타나 자기치유 혼화재의 혼입으로 인한 동결융해저항성의 변화는 크지 않은 것으로 확인되었다.

시험체의 동결융해에 따른 탈락을 평가 역시 상대동탄성계수 결과와 동일 한 경향을 나타내었으며, 사이클 증가에 따라 질량잔존율이 감소하였지만, 300Cycle에서 설계기준강도에 따라 97.2~98.7%의 질량잔존율을 나타내었다. 설계기준강도 42MPa의 경우, 300Cycle에서 자기치유 혼화재의 혼입 시험체가 질량잔존율이 더 높은 것으로 나타났으나 그 차이는 0.2%로 미미하였다. 동결융해저항성은 콘크리트의 강도 영향이 더 큰 것으로 나타났으며, 입경이 1mm정도이며, 소량 혼입된 자기치유 혼화재는 동결융해저항성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

## IV. CONCLUSION

본 연구에서는 광물형성 미생물과 이를 보호하는 하이드로젤 지지체로 구성된 자기치유혼화재를 적용한 자기치유 콘크리트의 균열치유 성능 및 내구성을 평가하여 적용 가능성 연구를 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 자기치유 혼화재의 분산도 평가결과, 분산도 계수 0.35~0.46으로 나타나 평가기준에서 “매우 우수”로 평가되어 분산도가 우수한 것으로 확인되었다.
- 2) 균열치유 성능검증을 위해 임의로 제작한 균열시험체의 투수계수 측정결과, 자기치유혼화재를 혼입한 시험체에서는 설계기준강도와 상관없이 균열발생 후 28일 재령에서 95%이상의 우수한 투수계수 회복율을 나타내 자기치유 콘크리트의 균열치유성능이 매우 높은 것으로 나타났다.

3) 자기치유 혼화재의 혼입에 따른 내구성능 평가결과, 염소이온침투저항성 및 동결융해저항성 시험에서 모두 자기치유 혼화재 혼입유무와 상관없이 설계기준 강도조건별로 유사한 내구성능을 나타내어 자기치유 혼화재의 혼입 유무는 내구성능에 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

4) 자기치유 혼화재를 적용한 콘크리트의 성능 평가결과, 전력구조물 콘크리트에 적용 가능한 것으로 판단되지만, 실제 구조물에 적용하기 위해서는 장기간의 균열 치유성능 및 내구성능 검증에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 한국전력공사의 주력연구개발과제로 수행한 “전력구조물의 장수명화를 위한 Self Healing Concrete 개발”(R16SA04) 과제의 연구비에 의해 지원되었음

This research was supported by Korea Electric Power Corporation under Grant R16SA04.

## REFERENCES

- [1] 추인엽, 우진호, 이상균, 이병재, “미생물 혼입 하이드로젤 지지체 첨가에 따른 자기치유 콘크리트의 물성변화”, 한국구조물진단유지관리공학회, 22, 6, pp.24-29, 2018
- [2] 추인엽 외, “전력구조물의 장수명화를 위한 Self-Healing Concrete 개발”, 한국전력공사 전력연구원, 최종보고서, TR.95XS13S1998.88, 2019.8
- [3] Dong Gyu Lee, Hyung Sub Lee and Yong Wook Jeong, “Current Research Topics in Development of Self-healing Concrete Using Microorganisms”, Magazine of the Korea Concrete Institute, 28, 6, pp.31-36, 2016
- [4] Al-Salloum, Y., Hadi, S., Abbas, H., Almusallam, T., and Moslem, M. A., “Bio-induction and bioremediation of cementitious composites using microbial mineral precipitation – A review”, Construction and Building Materials, 154, 15, pp.857-876, 2017 Available: <https://doi.org/10.1013/j.conbuildmat.2017.07.203>
- [5] Grengg, C., Mittermayr, F., Ukrainczyk, N., Koraimann, G., Kienesberger, S., and Dietzel, M., “Advances in concrete materials for sewer systems affected by microbial induced concrete corrosion: A review”, Water research, 134, 1, pp.341-352, 2018 Available: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.043>
- [6] Lors, C., Ducasse-Lapeyrusse, J., Gagné, R., & Damidot, D., “Microbiologically induced calcium carbonate precipitation to repair microcracks remaining after autogenous healing of mortars”, Construction and Building Materials, 141, pp.461-469, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.026>
- [7] Wang, J. Y., Soens, H., Verstraete, W., & De Belie, N., “Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores”, Cement and Concrete Research, 56, pp.139-152, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.009>
- [8] Jonkers, H. M., “Bacteria-based self-healing concrete”, Heron, 56 (1/2), 2011
- [9] Li, V.C., and Yang, E., “Self healing in concrete materials”, In Self healing materials, Springer, 2007, pp. 161-194, [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6250-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6250-6_8)
- [10] De Muynck, W., Debrouwer, D., De Belie, N, and Verstraete, W., “Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials”, Cement and Concrete Research, 38, 7, pp.1005-1014, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.005>