

## 시멘트 복합체의 자기치유 성능평가 방법

# Evaluation Method of Self-healing Performance of Cement Composites

이광명<sup>1\*</sup> · 김형석<sup>2</sup> · 민경성<sup>3</sup> · 최성<sup>4</sup>

Kwang-Myong Lee<sup>1\*</sup> · Hyung-Suk Kim<sup>2</sup> · Kyung-Sung Min<sup>3</sup> · Sung Choi<sup>4</sup>

(Received February 26, 2020 / Revised March 26, 2020 / Accepted March 26, 2020)

In this study, in order to evaluate the self-healing performance of cement composites the self-healing test method and the analysis method were suggested by applying constant water head permeability test, chloride migration test and repeated bending test. The method of making a cracked specimen and controlling crack width are also proposed. Constant head water permeability test can evaluate the healing performance by using the decreasing rate of water flow passing through the crack zone of a specimen. Furthermore, the equivalent crack width can be used to intuitively investigate the healing effect with healing period. The chloride migration test can evaluate the healing rate by the decreasing rate of the diffusion coefficient obtained by ASTM C 1202. Mechanical healing performance can be evaluated using ISR and IDR estimated from load vs. CMOD relationship graph obtained through the repeated bending test. Finally, the applicability of proposed self-healing evaluation methods was examined by testing mortar specimens with or without self-healing agents.

**키워드** : 자기치유 소재, 자기치유 성능 평가 방법, 정수위 투수시험, 염소이온 확산시험, 반복 휨 시험

**Keywords** : Self-healing agent, Evaluation method of self-healing performance, Constant head water permeability test, Chloride migration test, Repeated bending test

## 1. 서론

콘크리트 구조물은 균열, 내구성능 저하 등 여러 요인으로 인하여 열화가 발생할 수 있어 이를 보수하기 위하여 유지관리비용이 증가하게 된다. 이러한 문제점을 보완하고자 콘크리트에 발생한 균열을 스스로 치유할 수 있는 자기치유(Self-healing)관련 기술이 개발되어 다양한 시설물에 적용되고 있다(Schlangen and Sangadji 2013).

자기치유 기술은 구조물에 발생한 균열을 치유하여 누수를 억제하고 유해 이온의 유입을 차단하여 콘크리트의 내구수명을 증진

시키고, 구조물의 수명을 연장할 수 있는 새로운 기술이다(Lee and Park 2019). 자기치유와 관련 연구는 크게 자기치유 소재 개발과 치유성능 평가방법(Ferrara et al. 2018)으로 구분할 수 있는데, 자기치유 소재 개발관련 연구는 활발하게 이루어지고 있는 반면 국내외적으로 치유성능 평가를 위한 시험방법 및 표준이 마련되어 있지 않아 실험결과의 상호비교 및 평가가 어려운 실정이다.

기존에 제시된 자기치유 평가방법은 크게 역학적 평가방법, 내구성 평가방법, 비파괴 시험방법으로 구분할 수 있다. 역학적 평가 시험(Ferrara et al. 2014; Abdul et al. 2019)은 자기치유에 따른 강도 및 강성의 변화를 평가하는 것으로 휨시험, 직접 및 쪼갬 인장

\* Corresponding author E-mail: leekm79@skku.edu

<sup>1</sup>성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수 (Department of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Sunwon, 16419, Korea)

<sup>2</sup>성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 (Department of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Sunwon, 16419, Korea)

<sup>3</sup>성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정 (Department of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Sunwon, 16419, Korea)

<sup>4</sup>성균관대학교 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 선임연구원 (Self-healing Green Concrete Research Center, Sungkyunkwan University, Sunwon, 16419, Korea)

시험, 압축 시험 등이 있다. 내구성 평가방법은 균열면에 생성된 치유물질에 의한 균열폭 감소에 따라 치유율을 평가하는 방법으로 투수시험(Wang et al. 1997; Shin et al. 2017), 염소이온 확산시험(Jang et al. 2011; Fahad et al. 2019), 기체확산시험(Yang et al. 2011) 등이 있다. 내구성 평가방법은 비교적 측정 시간이 오래 걸리는 단점이 있지만, 자기치유 성능을 정량적으로 평가할 수 있다는 장점이 있다. 비파괴 시험방법(Karaiskos et al. 2016)은 간편하지만 정밀도가 낮기 때문에 간이 시험방법으로 사용되고 있으며 시험의 종류로는 초음파시험과 음향방출법 등이 있다.

따라서 본 논문에서는 자기치유 시멘트 복합체의 치유성능 평가방법을 개선하고 평가기준을 정립하기 위해 정수위 투수시험, 염소이온 확산시험, 반복 힘시험에 대한 자기치유 성능평가 방법을 제안하였고, 균열 시험체를 사용하여 제안한 성능평가 방법의 적용성을 검토하였다.

## 2. 자기치유 성능 평가 방법

### 2.1 균열 시험체 제작

시멘트 복합체에 사용되는 자기치유 재료의 성능을 객관적으로 평가하기 위해서는 우선 균열 시험체를 제작하여야 한다. 이에 본 연구에서는 시험체 제작, 균열 유발, 균열폭 제어, 균열측정 기술을 포함하여 자기치유 성능평가용 균열 시험체를 제작하는 방법을 제안하였다.

첫 번째 단계로  $\varnothing 100 \times 200$ mm 원주형 공시체를 치유 시작 재령 일까지 습윤양생한 후 두께가 50mm가 되도록 절단하여 디스크형 시험체를 제작한다. 두 번째 단계로 Fig. 1(a)와 같은 썬기형 균열 지그를 이용하여 KS F 2423에 준하여 시험체에 균열을 유발시킨다. 분할된 시험체의 균열면 양단에 Fig. 1(b)와 같이 실리콘 시트를 부착하여 균열폭을 조절한다. 이 때 실리콘 시트의 두께에 따라 0.1~0.5mm까지 균열폭을 임의로 도입할 수 있다. 이후 분할된 시험체의 균열면에 단차가 생기지 않도록 결합한 뒤 Fig. 1(c)와 같이 2개의 클램프를 이용하여 결속한다.

균열 시험체의 정확한 균열폭을 확인하기 위해 Fig. 1(d)와 같이 광학현미경을 이용하여 균열폭을 측정하고, 목표 균열폭을 만족하도록 클램프를 조절한다. 균열길이는 상·하면의 실리콘시트를 제외한 균열길이를 mm 단위로 소수점 둘째 자리까지 측정하고, 균열폭은 균열의 경계를 명확하게 표현하기 위해 균열폭에 맞게 배율을 확대하여  $\mu\text{m}$  단위로 소수점 첫째 자리까지 측정한다. 균열폭은 시험체 상·하면의 균열길이를 3개의 구간으로 나누어 구간별

로 2점을 측정하여 총 12개의 측정값을 평균한다. 이때 균열폭 측정 위치에 탈락된 부분이나 공극을 제외하고 균열의 최단거리를 측정한다.

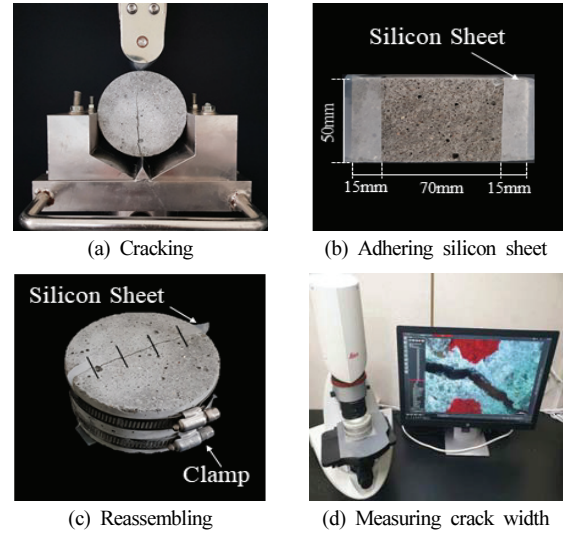


Fig. 1. Preparation of a cracked specimen

### 2.2 정수위 투수시험

#### 2.2.1 시험 개요

자기치유 성능평가 방법 중 투수시험은 시간에 따른 유출수량으로부터 치유성능을 직관적으로 확인할 수 있어 자기치유 성능평가에 광범위하게 사용되고 있다. 본 논문에서는 균열 시험체는 유출수량이 많이 발생하기 때문에 정수위 투수시험(Choi et al. 2017)을 이용한 자기치유 성능평가 방법을 제안하였다.

#### 2.2.2 시험 장치

정수위 투수시험장치는 Fig. 2와 같이 상부수조, 투수시험장치, 수량 측정장치, 하부수조로 구성된다. 상부수조는 투수시험 중 수두유지를 위하여 지속적으로 물을 공급하는 기능을 가지며, 수조의 밑면에 밸브가 있어 투수시험장치로 물을 주입할 수 있다. 투수시험장치는 수두 유지장치, 결속장치, 유출수조로 구성된다. 투명 아크릴 재질로 만들어진 수두유지장치는 원형이며, 내부직경은 70mm이다. 수두 유지장치에는 높이 250mm에 지름 5mm의 월류구가 설치되어 있어서 상부수조에서 공급된 물에 의해 일정한 수압을 유지할 수 있다. 수두 유지장치에서 수두가 일정하게 유지되면 그 이후 유입되는 물을 월류하게 되는데 월류되는 물은 하부수조로 흘러가 방류된다. 결속장치를 이용하여 시험장치와 균열 시

험체에 누수가 발생하지 않도록 조치할 수 있다. 균열면을 통해 유출된 물은 수량측정장치의 비커에 모아 전자저울로 수량을 측정한다. 전자저울의 데이터 저장장치를 이용하여 분당 유출수량을 기록하며, 시험시작 후 초기 3분까지 측정된 유출수량은 안정화 단계로 사용하지 않고 이후 7분 동안의 분당 유출수량 측정값을 평균하여 사용한다.

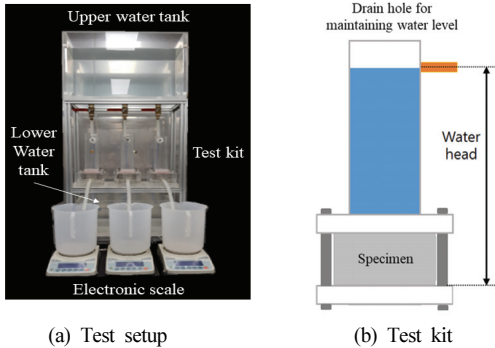


Fig. 2. Constant head water permeability test equipment

### 2.2.3 치유 분석방법

정수위 투수시험을 통해 측정된 분당 유출수량을 균열길이 (mm)로 나누어 구한 단위 유출수량,  $q$ (ml/min\*mm)을 이용하여 식 (1)과 같이 치유율을 산출한다.

$$SH_q = \left[ 1 - \frac{q(t)}{q_0} \right] \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

여기서,  $SH_q$ 는 치유율(%),  $q_0$ 는 치유재령 0일의 단위 유출수량,  $q(t)$ 는 치유재령 t일의 단위 유출수량이다.

Poiseuille 법칙에 따르면 단위 유출수량은 균열폭의 세제곱에 비례하므로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$q = \xi \frac{\Delta P b w^3}{12 \eta d} = \alpha w^3 \quad (2)$$

여기서,  $q$ 는 유출수량( $m^3/s$ ),  $\Delta P$ 는 유입 균열면과 유출 균열면의 수압차( $N/m^2$ ),  $b$ 는 균열길이(m),  $w$ 는 균열폭(m),  $d$ 는 시험체의 두께(m),  $\eta$ 는 물의 점성계수( $N \cdot s/m^2$ ),  $\xi$ 는 균열면 특성에 의한 감소계수이다.

재령이 증가함에 따라 자기치유 소재를 혼입한 모르타르 시험체의 균열면에 치유물질이 생성되어 균열폭이 점차 감소하게 된

다. 따라서 치유재령 t의 증가 균열폭,  $\bar{w}(t)$ 은 식 (2)로부터 치유재령 t일의 단위 유출수량과 상수( $\alpha$ )의 비의 세제곱근으로 나타나는 식 (3)과 같이 산출할 수 있다.

$$\bar{w}(t) = (q(t)/\alpha)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

## 2.3 염소이온 확산시험

### 2.3.1 시험 개요

자기치유 콘크리트는 균열면에 자기치유 물질을 생성하여 균열 부위로 유입되는 물과 유해이온 등을 차단할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 치유성을 염해저항성 평가에 사용되는 염소이온 확산 시험을 통해 구한 염소이온 확산계수를 이용하여 평가하는 방법을 제안하였다.

### 2.3.2 시험 장치

염소이온 확산시험에는 2.1절에서 기술한 투수시험용 균열 시험체를 사용한다. 염소이온 확산시험의 시험장치는 Fig. 3과 같이 이온확산장치와 이온측정장치로 이루어지는데 이온확산장치는 Fig. 4(ASTC C 1202)와 같이 전원공급장치와 시험용 확산셀, 데이터로거로 구성된다.

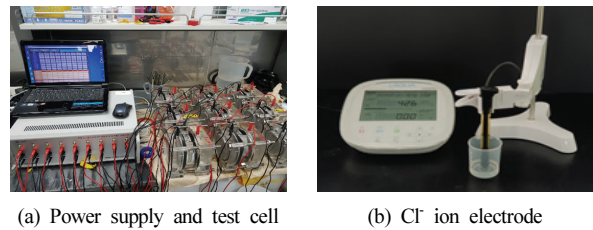


Fig. 3. Test setup for chloride migration test

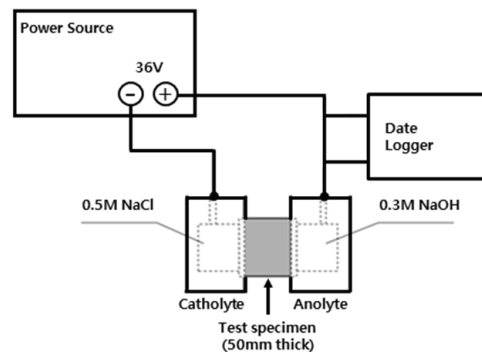


Fig. 4. Schematic for chloride migration test

전원공급장치는 설정된 인가전압을 시험이 종료될 때까지 일정하게 유지할 수 있어야 하며, 전원공급장치에 시험용 확산셀의 음극과 음극에 연결하여 36V의 전압을 36시간 동안 가한다. 시험용 확산셀은 양극과 음극으로 분리되어 있으며, 양극 확산셀에는 0.3M의 NaOH 수용액을 주입하고, 음극 확산셀에는 0.5M의 NaCl 수용액을 주입한다. 염소이온 확산시험을 실시하면 전위차에 의하여 시험용액의 온도가 높아질 수 있으므로 열전대와 데이터로거를 이용하여 시험용액의 온도를 측정하고 저장한다.

이온측정장치는 전극(electrode)으로부터 Cl<sup>-</sup>이온의 농도를 측정하는 장비이다. 전원이 공급되면 확산셀 내부의 Cl<sup>-</sup>이온은 전위차에 의해 음극에서 양극으로 이동하기 때문에 음극의 Cl<sup>-</sup>이온의 농도는 감소하게 된다. Cl<sup>-</sup>이온의 농도변화를 확

인하기 위해 음극확산셀의 시험용액을 초기 8시간까지는 1시간 간격으로 채취하고, 이후 36시간까지는 2시간 간격으로 시험용액을 채취한다. 채취한 용액은 온도가 20℃가 되었을 때 Cl<sup>-</sup>이온의 농도를 측정하여 Cl<sup>-</sup>이온의 감소량을 확인한다.

### 2.3.3 치유 분석방법

자기치유 콘크리트의 치유 성능을 나타내는 지표인 염소이온 확산계수는 Nernst - Planck 방정식(Antrade 1993)을 이용하여 시간과 Cl<sup>-</sup>이온 농도의 관계로부터 식 (4)와 같이 준정상상태의 염소이온 확산계수를 구할 수 있다.

$$D_{ssm} = \frac{RTL}{zFU} \frac{V}{A} \left| \frac{\Delta(\ln c_1)}{\Delta t} \right| \quad (4)$$

여기서,  $D_{ssm}$ 은 염소이온 확산계수(m<sup>2</sup>/sec),  $R$ 은 기체상수(8,3145 J/mol · K),  $T$ 는 절대온도(K),  $L$ 은 시험체의 두께(m),  $z$ 는 이온 전자가(1.0),  $F$ 는 페러데이 상수(96,485 C/mol),  $U$ 는 전위차(V),  $V$ 는 시험셀의 부피(m<sup>3</sup>),  $A$ 는 시험체의 면적(m<sup>2</sup>),  $c_1$ 은 음극의 Cl<sup>-</sup>이온 농도(mmol/l),  $\Delta t$ 는 용액의 온도(℃)이다.

균열 발생 후 시간이 경과됨에 따라 치유성능이 향상되며, 치유재령 경과에 따른 염소이온 확산계수의 변화율을 이용하여 치유성능을 평가할 수 있다. 염소이온 확산계수를 이용한 치유율은 Fig. 5에 도시되어 있는 바와 같이 치유재령 0일 과 t일에서 각각 균열 시험체와 비균열시험체의 염소이온 확산계수의 차이의 비로 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$SH_{DSSM} = 1 - \frac{D_{cr}(t) - D_{ucr}(t)}{D_{cr,i} - D_{ucr,i}} \quad (5)$$

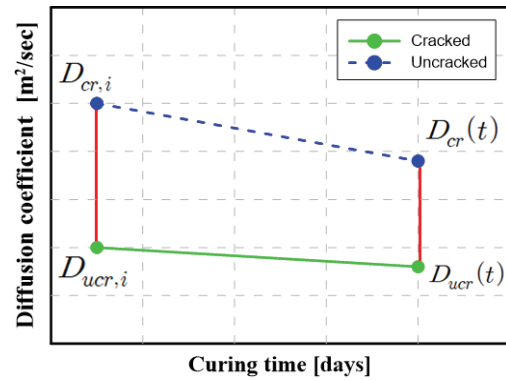


Fig. 5. Relationship between diffusion coefficient of cracked and uncracked specimens

여기서,  $SH_{DSSM}(t)$ 는 치유재령 t일에서의 치유율,  $D_{cr,i}$ 과  $D_{ucr,i}$ 는 각각 치유재령 0일에서 균열시험체와 비균열시험체의 염소이온 확산계수,  $D_{cr}(t)$ 와  $D_{ucr}(t)$ 는 각각 치유재령 t일에서 균열 시험체와 비균열시험체의 염소이온 확산계수이다.

## 2.4 반복 힘 시험

### 2.4.1 실험 개요

자기치유 콘크리트의 역학적 성능평가는 강도 및 강성회복을 주 평가지표로 사용한다. 그러나 이러한 평가방법은 시험 중에 발생하는 균열의 위치와 폭 등에 의해 결과가 크게 달라질 수 있기 때문에 세밀한 균열 제어 기술이 요구된다. 이에 본 연구에서는 안정적으로 균열폭 제어가 가능한 반복 힘 시험을 통한 자기치유 성능평가 방법을 제안하였다.

### 2.4.2 시험체 제작 및 시험방법

반복 힘 시험은 힘인성 시험에 주로 사용되고 있는 100\*100\*400mm 각주형 시험체를 사용한다. 시험체의 중앙부에 균열을 유도하기 위하여 각주형 몰드의 중앙에 길이 120mm, 폭 40mm, 두께 3mm의 노치 도입용 아크릴을 미리 삽입한 후에 모르타르를 채워 시험체를 제작한다.

Fig. 6은 균열유도 과정으로 시험체의 노치에 클립게이지를 부착하여 하중 증가에 따른 CMOD 변화량을 측정하여 균열폭을 제어한다. 하중재하는 중앙부에 목표로 하는 균열이 발생하도록 3점 힘 재하방식을 적용하며, 0.05mm/min의 속도로 하중을 가한다.

시험체 하단부의 CMOD가 목표균열폭을 만족하는 값에 도달할 때 하중을 제거하고, 광학현미경을 이용하여 시험체 측면 균열부의 균열선단변위(CTOD)를 측정한다. 균열이 유도된 시험체는 자

기치유 성능을 평가하기 위해 일정 기간동안 치유양생을 실시한다. 치유양생 전·후의 하중과 CMOD의 결과를 이용하여 치유재령에 따른 역학적 성능을 평가한다.

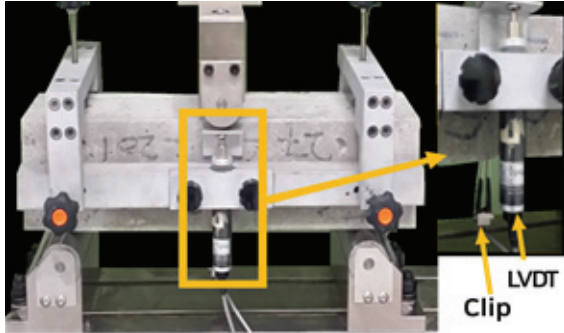


Fig. 6. Cracking process of prism specimens

2.4.3 치유 분석방법

Fig. 7은 치유재령 0일과 치유재령 t일의 대표적인 하중-CMOD 관계 그래프이다. 파란색 점선은 균열유도과정의 결과를 나타내며, 빨간색 실선은 치유양생을 거친 뒤 반복 힘 시험을 통해 측정된 결과를 나타낸다.

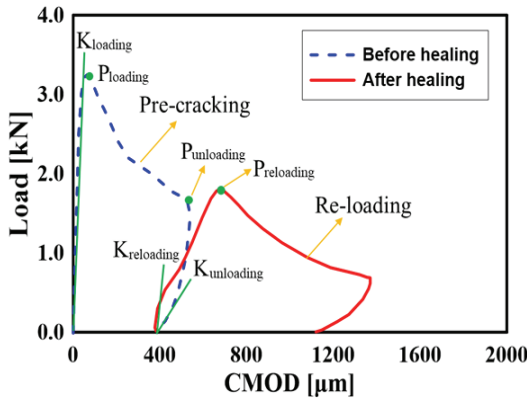


Fig. 7. Relationship between Load vs. CMOD

치유양생 전·후의 실험결과로 하중과 강성을 이용하여 강도회복지수(Index of strength recovery, ISR)와 손상복구지수(Index of damage recovery, IDR)를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$ISR = \frac{P_{reloading} - P_{unloading}}{P_{loading} - P_{unloading}} \quad (6a)$$

$$IDR = \frac{K_{reloading} - K_{unloading}}{K_{loading} - K_{unloading}} \quad (6b)$$

여기서,  $P_{loading}$ 은 초기 균열유도단계 동안 최대하중,  $P_{reloading}$ 은 재재하 단계에서의 최대하중,  $P_{unloading}$ 은 초기 균열유도단계에서 재하를 정지하였을 때 하중,  $K_{loading}$ 은 초기 균열유도단계에서 하중 선 강성,  $K_{reloading}$ 은 재재하 단계에서의 초기 강성,  $K_{unloading}$ 은 초기 균열유도단계에서 재하를 정지하였을 때 강성이다.

3. 치유평가방법 적용성 검토

3.1 실험개요

본 연구에서 제안한 자기치유 성능평가방법의 적용성을 검토하기 위하여 자기치유 소재의 혼입 유·무에 따른 정수위 투수시험, 염소이온 확산시험, 반복힘시험을 실시하였다. 자기치유 성능평가를 위해 사용한 모르타르 배합은 Table 1과 같이 자기치유 소재를 사용하지 않은 Plain과 자기치유 소재를 사용한 SH로 구분하였다. 자기치유 소재(SHm)는 제올라이트, 결정촉진제, 스테아르산칼슘이 4:2:1의 비율로 혼합된 것으로 잔골재를 1.5% 치환하여 사용하였다.

모르타르의 기초물성을 확인하기 위하여 KS L 5105와 KS L ISO 679에 준하여 초기 유동성을 확인하였고 재령 28일의 압축강도를 측정하였다. 실험결과 Plain과 비교하여 SH의 플로우는 동등 수준이며 압축강도는 13% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

Table 2는 자기치유 성능평가에 사용된 균열 시험체의 목표 균열폭과 초기 균열폭 측정결과이다. 정수위 투수시험과 염소이온 확산시험의 목표균열폭은 각각 3가지 수준이며, 반복 힘시험은 0.1mm를 기준으로 균열폭을 설정하였다. 사용된 시험체의 균열폭은 목표 균열폭의 ±5% 범위를 벗어나지 않도록 제어하였다. 정수위 투수시험과 염소이온 확산시험 및 반복 힘 시험에 사용된 균열 시험체는 균열유도 후 20℃의 수중에 침지시켜 치유양생을 실시하였는데, 이 때 균열부위가 양생수에 잠기도록 수위를 조절하였다.

Table 1. Mix proportion and test result

Type	W	C	SHm	S	S.P.	f <sub>ct</sub> (MPa)	Flow(mm)
Plain	0.4	1.0	-	2.00	0.03	54.6	170
SH	0.4	1.0	0.03	1.97	0.05	47.3	165

Table 2. Summary of crack width

Test type	Crack width			
	Target( $\pm 10\%$ )	Plain	SH	
Water permeability test	0.200	0.210	0.209	
	0.250	0.252	0.251	
	0.300	0.299	0.302	
Chloride migration test	0.100	0.103	0.104	
	0.300	0.305	0.303	
	0.500	0.493	0.520	
Repeated bending test	$0.07 < w_0 < 0.10$	28d*	0.079	0.071
		56d*	0.072	0.091
	$0.10 < w_0 < 0.12$	28d*	0.104	0.112
		56d*	0.112	0.107

\* Specimen tested at healing period of 28 and 56days

### 3.2 정수위 투수시험

정수위 투수시험에 의한 자기치유 성능을 평가하기 위해 Table 2와 같이 재령 28일에 목표 균열폭이 0.20mm, 0.25mm, 0.30mm 가 되도록 균열 시험체(C \_ Plain or SH \_ Crack width)를 제작하여 치유재령 28일까지 7일 간격으로 실시하였다.

자기치유 소재 혼입 유·무에 따른 균열 시험체의 치유재령에 따른 단위 유출수량을 Fig. 8에 나타내었다. 치유재령 0일의 단위 유출수량은 균열폭의 세제곱에 비례하여 급격하게 증가하는 경향이 나타났다. 치유재령이 증가함에 따라 단위 유출수량은 감소하였는데, 치유재령 0일 대비 치유재령 t의 유출수량 감소율을 Fig. 9에 나타내었다. 정수위 투수시험에 의한 치유율은 치유재령 7일에 크게 증가한 후 28일까지 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 균열폭과 치유율의 관계를 나타내는 Fig. 10으로부터 치유율뿐만 아니라 시험에 사용한 균열 시험체의 균열폭 범위에 따른 치유율 변화에 대한 전반적인 경향을 파악할 수 있다.

자기치유 모르타르는 치유재령이 경과함에 따라 생성되는 치유 물질로 인해 균열부위가 불균질하게 되기 때문에 실제 균열폭을 측정하기 매우 어렵다. 따라서 식 (2)의 Poiseuille 법칙에 의하여 초기 단위 유출수량과 균열폭의 관계로부터 산출한 상수( $\alpha$ )와 치유재령 t일의 단위 유출수량을 이용하여 치유재령 t일의 등가 균열폭을 산출하여 Table 3에 균열 시험체의 초기 실측 균열폭과 치유재령에 따른 등가 균열폭을 비교·정리하였다. 등가 균열폭 산출에 필요한 Plain과 SH의 상수( $\alpha$ )는 선행연구로부터 62.1과 66.3으로 확인한 바 있다. 초기 실측 균열폭( $w_0$ )과 초기 등가 균열폭( $\bar{w}_0$ )를 비교해 보면 두 값의 오차율은 2% 미만으로 낮았다. 치유재령

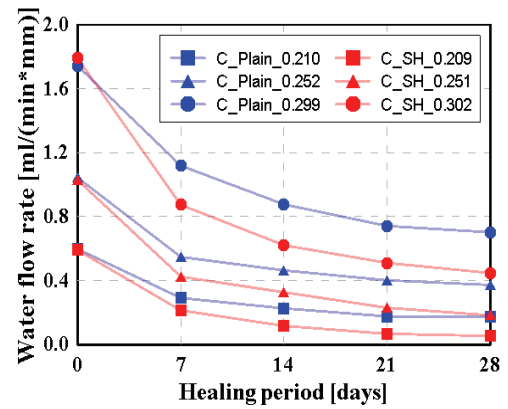


Fig. 8. Water flow rate vs. healing period

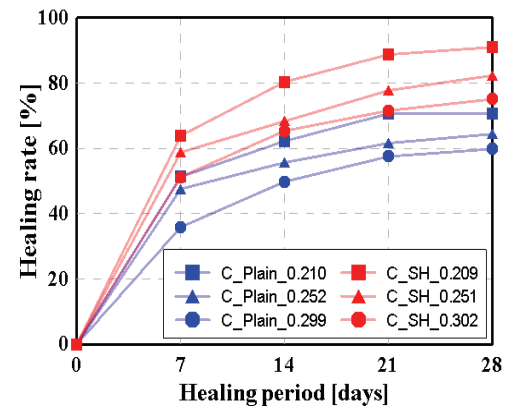


Fig. 9. Healing rate vs. healing period

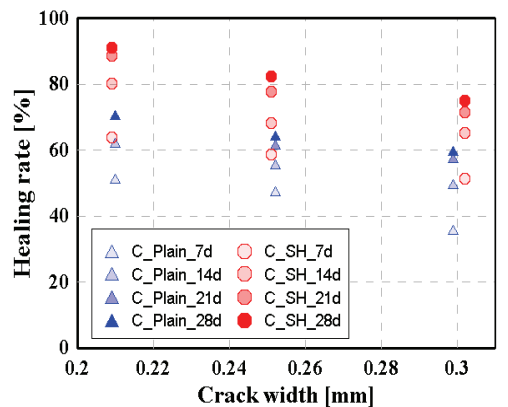


Fig. 10. Healing rate vs. crack width

28일의 등가 균열폭( $\bar{w}_{28}$ )과 초기 균열폭( $\bar{w}_0$ )의 차이는 Plain의 경우 0.072~0.080mm인 반면, SH는 0.109~0.114mm로 자기치유 소재를 사용할 경우 등가 균열폭 감소량이 더 큰 것을 알 수 있다.

Table 3. Summary of equivalent crack width

Mix	Crack width(mm)						Error*
	Initial	Equivalent( $t$ )					
	$w_0$	$\bar{w}_0$	$\bar{w}_7$	$\bar{w}_{14}$	$\bar{w}_{21}$	$\bar{w}_{28}$	
Plain	0.210	0.213	0.167	0.154	0.141	0.141	-1.3%
	0.252	0.256	0.207	0.195	0.186	0.182	-1.7%
	0.299	0.304	0.262	0.242	0.229	0.224	-1.7%
SH	0.209	0.207	0.148	0.121	0.100	0.093	+0.8%
	0.251	0.249	0.186	0.170	0.151	0.140	+0.6%
	0.302	0.300	0.236	0.211	0.197	0.189	+0.6%

\*  $[(w_0 - \bar{w}_0) / w_0] \times 100$  (%)

### 3.3 염소이온 확산시험

염소이온 확산시험에서는 Table 2와 같이 균열폭을 3가지 수준으로 하여 시험체를 제작하였고, 치유재령 28일과 56일에 실험을 실시하였다. Fig. 11은 36시간 동안 SH의 Cl<sup>-</sup>이온 농도변화를 치유재령별로 측정된 결과로 실험 초기에 음극확산셀의 Cl<sup>-</sup>이온은 시간이 경과됨에 따라 급격히 감소하다가 일정 시간이 지난 후부터 감소율이 고정되는 준정상상태를 나타내었다. 균열폭 및 치유재령 등에 따라 차이가 있으나, 10~15시간 이내에 준정상상태에 도달하였다. SH 시험체의 경우 치유재령 56일에서 준정상상태 도달시간은 13시간으로 치유재령 28일의 경우에 비하여 3시간 정도 지연되었다.

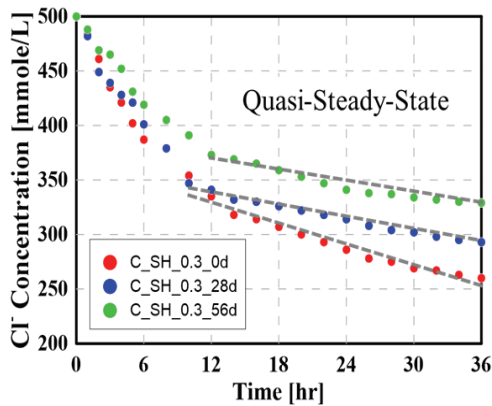


Fig. 11. Chloride concentration drops in the upstream cell

식 (4)와 (5)에 의해 재령경과에 따른 염소이온 확산계수와 치유율을 Table 4에 나타내었다. 실험결과 Plain과 SH의 치유율 모두 균열폭이 작을수록 증가하는 경향을 나타내었으며, 균열폭 0.3 mm일 때 SH의 치유율은 Plain에 비하여 치유재령 28일과 56일에서 각각 18.1%와 46.7% 향상됨을 확인하였다.

Table 4. Summary of diffusion coefficient and healing rate

Mix	Crack width (mm)	Diffusion coefficient ( $\times 10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec)			Healing rate (%)	
		0d	28d	56d	28d	56d
		Plain	0.000	2.63	2.16	1.90
0.103	3.20		2.41	2.08	56.4	68.2
0.305	5.07		3.73	3.18	33.8	47.8
0.493	7.98		7.23	6.46	5.2	14.7
SH	0.000	2.44	2.06	2.02	-	-
	0.104	4.37	2.26	2.09	89.7	94.5
	0.303	5.83	3.69	2.49	51.9	86.1
	0.520	7.02	5.88	5.32	16.5	27.8

### 3.4 반복 휨 시험

자기치유 소재를 사용한 균열 시험체의 치유재령 28일과 56일의 반복 휨 시험 결과를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 점선은 치유재령 0일에서 균열유도과정의 결과이며, 실선은 치유재령 28일과 56일의 결과이다. 또한, 치유재령 전 후의 하중-CMOD의 관계로부터 얻은 하중과 강성, 그리고 식 (6a)와 (6b)로부터 산출한 ISR과 IDR을 Table 5와 Table 6에 정리하였다.

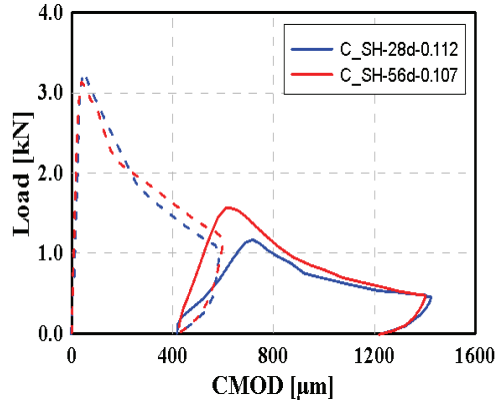


Fig. 12. Relationship between Load vs. CMOD

Table 5와 6에서 보는 바와 같이  $P_{reloading}$ 은  $P_{unloading}$ 에 비하여 10~30% 정도 증가하는 반면에  $K_{reloading}$ 은  $K_{unloading}$ 에 비하여 2배에서 5배까지 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 자기치유 소재가 강도증진 보다는 강성회복에 더 효과가 있음을 의미한다. ISR과 IDR은 균열폭이 감소함에 따라 증가하였고, 치유재령이 28일에서 56일로 길어질수록 더욱 커지는 경향을 나타냈다.

Table 5. Summary of ISR

Mix	Healing period	Crack width	Load, <i>P</i> (kN)			ISR
			loading	unloading	reloading	
Plain	28d	0.079	3.31	1.50	1.68	0.10
		0.104	3.25	1.55	1.70	0.09
	56d	0.072	4.00	1.54	1.88	0.14
		0.112	3.30	1.86	2.01	0.11
SH	28d	0.071	3.83	1.50	1.80	0.13
		0.112	3.25	1.09	1.33	0.11
	56d	0.091	3.41	1.36	1.81	0.22
		0.107	3.13	1.21	1.56	0.18

Table 6. Summary of IDR

Mix	Healing period	Crack width	Stiffness, <i>K</i> (MPa)			IDR
			loading	unloading	reloading	
Plain	28d	0.079	110	12.0	29	0.17
		0.104	108	7.6	23	0.14
	56d	0.072	99	8.2	29	0.23
		0.112	88	10.0	22	0.16
SH	28d	0.071	95	11.0	30	0.23
		0.112	80	6.1	19	0.17
	56d	0.091	136	10.0	54	0.33
		0.107	104	6.9	29	0.22

#### 4. 결론

본 연구에서는 시멘트 복합체의 치유성능 평가를 위한 시험방법과 분석방법을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 균열폭과 균열길이가 제어 가능한 균열 시험체를 사용하여 시험을 실시함으로써 실제 구조물의 다양한 균열조건과 환경조건을 고려한 자기치유 성능평가가 가능할 것으로 판단된다.
2. 정수위 투수시험은 단위 유출수량을 통해 치유성능을 직관적으로 평가하는 방법으로 동일한 시험체를 사용하여 측정된 유출수량으로부터 치유율을 산정하고 결과를 상대적으로 비교할 수 있어 일반적인 자기치유 성능평가에 있어 널리 활용될 수 있을 것이다.
3. 염소이온 확산시험은 치유재령에 따른 염소이온 확산계수로 부터 치유율을 평가할 수 있으며, 자기치유 소재가 내구성 향상을 위하여 많이 사용되는 점을 고려할 때 특히 염해 저항성을 평가하기 위하여 필수적인 방법으로 판단된다.

4. 반복 힘 시험은 콘크리트의 휨인성 시험을 응용하여 자기치유 성능을 평가하는 방법으로 자기치유 소재가 갖는 역학적 성능을 강도회복지수(ISR)와 손상복구지수(IDR)로 평가할 수 있으며, 역학적으로 보강 효과가 있는 자기치유 소재의 성능평가에 적합할 것으로 판단된다.

#### Conflict of interest

None.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(19SCIP-B103737-05)에 의해 수행되었습니다.

#### References

Abdul, S.B., Fahad, U.R.A., Lee, K.M., Jang, S.Y. (2019). Mechanical recovery of cracked fiber-reinforced mortar incorporating crystalline admixture, expansive agent, and geopolymer, *Hindawi*, **2019**, 1–14.

Andrade, C. (1993). Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements, *Cement and Concrete Research*, **23**(3), 724–742.

ASTM. (2010). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM C 1202–10, ASTM international.

Choi, S.W., Bae, W.H., Lee, K.M., Shin, K.J. (2017). Correlation between crack width and water flow of cracked mortar specimens measured by constant water head permeability test, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **29**(3), 267–273 [in Korean].

Fahad, U.R.A., Abdul, S.B., Lee, K.M., Jang, S.Y. (2019). Using the steady-state chloride migration test to evaluate the self-healing capacity of cracked mortars containing crystalline, expansive, and swelling admixture, *Materials*, **12**(11), 1–21.

Ferrara, L., Van Mullem, T., Alonso, M.C., Antonaci, P., Borg, R.P., Cuenca, E., ..., Sanchez, M. (2018). Experimental characterization of the self-healing capacity of cement-based materials and its effects on the material performance: A state of the art report by COST Action SARCOS WG2, *Construction and Building Materials*, **167**, 115–142.

Ferrara, L., Krelani, V., Carsana, M. (2014). A “fracture testing”



- based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures, *Construction and Building Materials*, **68**, 535-551.
- Jang, S.Y., Kim, B.S., Oh, B.H. (2011). Effect of crack width on chloride diffusion coefficients of concrete by steady-state migration tests, *Cement and Concrete Research*, **41**, 9-19.
- Karaiskos, G., Tsangouri, E., Aggelis, D.G., Van Tittelboom, K., De Belie, N., Van Hemelrijck, D. (2016). Performance monitoring of large-scale autonomously healed concrete beams under four-point bending through multiple non-destructive testing methods, *Smart Materials and Structures*, **25(5)**, 1-16.
- Lee, K.M., Park, B.S. (2019). State of the art of self-healing concrete, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, **31(2)**, 10-14 [in Korean].
- Schlagen, E., Sangadji, S. (2013). Addressing Infrastructure Durability and Sustainability by Self Healing Mechanisms—Recent Advances in Self Healing Concrete and Asphalt, *Procedia Engineering*, **54**, 39-57.
- Shin, K.J., Bae, W.H., Choi, S.W., Son, M.W., Lee, K.M. (2017). Parameters influencing water permeability coefficient of cracked concrete specimens, *Construction and Building Materials*, **151**, 907-915.
- Wang, K., Jansen, D.C., Shah, S.P. (1997). Permeability study of cracked concrete, *Cement and Concrete Research*, **27(3)**, 381-393.
- Yang, Z., Hollar, J., He, X., Shi, X. (2011). A self-healing cementitious composite using oilcore/silica gel shell microcapsules, *Cement and Concrete Composites*, **33(4)**, 506-512.

### 시멘트 복합체의 자기치유 성능평가 방법

본 연구에서는 시멘트 복합체의 자기치유 성능평가를 위해 정수위투수시험, 염소이온 확산시험, 반복힘시험을 활용한 시험방법 및 분석방법을 제시하였고, 균열 유발방법과 균열폭 제어방법을 제안하였다. 정수위 투수시험은 시험체의 균열부를 통과하는 단위유출수량의 감소율을 이용하여 치유성능을 평가하는 시험방법으로 등가 균열폭을 활용하여 치유재령에 따른 치유효과를 직관적으로 규명할 수 있다. 염소이온 확산계수시험은 ASTM C 1202의 시험장치를 활용하여 구한 염소이온 확산계수의 감소율로 치유율을 평가하는 방법이다. 또한, 반복 힘 시험을 통하여 얻은 하중과 CMOD의 관계 그래프로부터 강도회복지수(ISR)과 손상복구지수(IDR)을 산정하여 역학적 치유성능을 평가할 수 있다. 마지막으로, 자기치유 소재의 혼입 유무에 따른 균열 시험체의 실험을 통해 본 연구에서 제시한 자기치유 평가방법의 적용성을 검토하였다.