

# 균열 자기치유를 위한 캡슐용 무기계 코어재료의 시멘트 복합체 성능에 미치는 영향에 관한 기초적 연구

최연왕<sup>1\*</sup>, 오성록<sup>2</sup>, 최병걸<sup>3</sup>, 김철규<sup>4</sup>

## A Fundamental Study on the Influence of Performance of Cementitious Composites of Inorganic Core Material for Self-Healing Capsule of Cracks

Yun-Wang Choi<sup>1\*</sup>, Sung-Rok Oh<sup>2</sup>, Byung-Keol Choi<sup>3</sup>, Cheol-Gyu Kim<sup>3</sup>

**Abstract:** In this study, we prepared a core material based on the inorganic materials in liquid form for applying an inorganic-based core material to a core material for the self-healing capsules as a part of the basic study to manufacture of self-healing capsule that can heal cracks of cementitious composite. Manufactured core material based on the inorganic materials were applied directly to the cement composite before its encapsulation, were evaluated the effect on performance of cementitious composite as well as repair performance of the cracks in the cracks. The test results showed that core material based on the inorganic materials was effective to improve the compressive and adhesion strength, had an absorption, permeation water, penetration of chloride ions and freeze-thaw resistance performance. Through the results of this paper, we want to utilize the results as a basis data of the performance of the cement composite that can be obtained when applied to inorganic core materials based on self-healing capsules and future advances localized self-healing capsule technology.

**Keywords:** Cracks, Cementitious composites, Inorganic, Core material, Performance

### 1. 서 론

최근 콘크리트의 균열 저감을 위한 건설기술 동향을 살펴 보면 스마트 구조물, 인텔리전트 재료의 개념이 대두되면서 콘크리트 균열을 스스로 치유할 수 있는 자기치유 기술(Self-Healing Technology)에 관한 연구 및 검토가 수행되고 있다. 자기치유 성능을 부여한 구조물은 균열이 발생할 경우 균열을 스스로 탐지하여 균열 발생 초기에 치유할 수 있으므로 일반적인 구조물의 유지보수에 따른 시간, 노력 및 비용을 크게 절감할 수 있으며, 특히, 사람이 쉽게 접근하기 어려운 구조물의 경우에도 효과적으로 보수를 수행할 수 있는 장점이 있다(Erik, 2013; An, 2014).

반면, 자기치유를 적용한 구조물은 일반적인 구조물과 비

교하여 초기 투자비용이 발생하게 되는 단점은 있으나 균열이 스스로 치유되기 때문에 추후 유지관리 비용 절감에 따른 경제적 효과가 더욱 큰 것으로 나타나고 있다(Erik, 2013; An, 2014).

이러한 자기치유 기술은 자기치유 성능을 구조물에 부여하기 위한 기술로써 국내외적으로 연구가 활발히 진행되고 있으며, 연구자에 따라 다소 차이는 있지만 크게 3가지 개념으로 구분되고 있다(An, 2014). 첫째, 미수화된 시멘트의 재수화 등을 통한 자연적 치유(Natural healing), 둘째, 유·무기 재료, 시멘트계 광물질 및 박테리아를 활용한 자율적 치유(Autonomic healing), 마지막으로 캡슐, 기억 형상 합금 및 유리 중공 섬유 등을 활용한 활성화된 치유(Activated Healing)로 구분된다. 여러 가지 자기치유 개념 중에서도 특히, 캡슐을 활용한 자기치유 기술은 직접적인 자기치유 소재를 다량 포함할 수 있기 때문에(Tatyana, 2012; Hunger, 2009) 손상부위 즉, 균열이 발생한 부위에 선택적으로 반응시킬 수 있는 장점이 있다. 이와 관련된 국외 기술의 경우 자기치유 소재와 촉매제를 마이크로 사이즈로 캡슐화하여 적용한바 있으며(Shazim, 2014; Kim, 2003), 국내의 경우에는 별도의 촉매제 없이 태양광 또는 수분으로 반응할 수 있는 친환경 자기치유 마이크로캡슐을 적

<sup>1</sup>정회원, 세명대학교 토목공학과 교수, 교신저자

<sup>2</sup>정회원, 세명대학교 건설공학과 박사수료

<sup>3</sup>정회원, 세명대학교 건설공학과 박사수료

<sup>4</sup>정회원, 세명대학교 건설공학과 석사과정

\*Corresponding author: crete77@semyung.ac.kr

Dept. of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

용한 사례가 있다(Song, 2013). 알려진 연구 사례를 검토할 경우 자기치유를 위한 캡슐소재나 코어재료의 경우에는 유기계 재료인 경우(Wang, 2003; Blaiszika, 2007)가 대부분이며, 균열부의 수복성능에 국한하여 검토되어지고 있는 실정이다.

그러나 보다 효과적인 자기치유 성능을 기대하기 위해서는 무기재료인 시멘트 복합체와 동일한 특성을 가져야 하며, 모르타르나 콘크리트와 같은 시멘트계 무기재료 기반 복합체로 구성되어야 한다. 시멘트계 무기재료 기반 복합체의 자기치유 연구는 팽창 및 팽윤, 결정축진 화학제 등을 통한 무기계 혼합재료를 통하여 균열의 자기치유 및 지수특성에 관련된 연구가 활발하게 수행되어지고 있으나(AHN et al., 2010; Kishi T et al., 2011) 캡슐화 되어 적용된 사례는 찾아보기 어려운 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 시멘트 복합체의 균열을 자기치유할 수 있는 자기치유 캡슐을 제조하기 위한 일환의 기초 연구 중 하나로써 자기치유 캡슐용 코어재료에 무기계기반 코어재료를 적용하기 위하여 액상형태의 무기소재를 혼합한 코어재료를 제조하였으며, 캡슐화를 수행함에 앞서 시멘트 복합체에 무기 코어재료를 적용하여 무기 코어재료의 균열부 수복 성능 뿐만 아니라 시멘트 복합체 성능에 미치는 영향을 기초 수준에서 검토하고자 하였다. 본 논문의 결과를 통하여 자기치유 캡슐용 무기계 기반 코어재료를 적용할 경우에 얻을 수 있는 시멘트 복합체의 성능 및 차후 진보화된 자기치유 캡슐 기술의 기반 자료로써 활용하고자 한다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 시멘트

시멘트는 밀도  $3.15 \text{ g/cm}^3$  및 분말도  $3,540 \text{ cm}^2/\text{g}$ 의 보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement, OPC)를 사용하였다. Table 1은 시멘트의 화학 및 물리적 특성을 나타낸 것이다.

#### 2.1.2 골재

잔골재는 낙동강산 강모래(River Sand, RS)를 사용하였으며, 굵은 골재는 최대치수 25 mm의 석회암질 부순 굵은 골재(Crushed Coarse aggregate, CC)를 사용하였다. Table 2는 실험에 사용된 골재의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

#### 2.1.3 무기 코어재료

무기 코어재료는 pH 11-12인 알칼리 규산염계 재료와 기타 첨가물을 1차 증류수와 혼합방법에 따라 혼합물을 제조하였으며, 각 알칼리 규산염계 재료의 성분비를 Table 3에 나타내었다. 또한 Table 3의 각 알칼리 규산염계 재료와 기타 첨가물의 혼합비를 달리한 4수준의 무기 코어재료(Inorganic Core Material, ICM, ICM-1, ICM-2, ICM-3 and ICM-4)를 제조하였다. 제조된 ICM은 각 시험방법에 따라 미리 제조된 시편에 시험 목적에 맞도록 도포하였으며, 소정의 기건 양생을 실시하였다.

**Table 1** Chemical components and physical properties of cement

Items	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	L.O.I (%)	Surface area (cm <sup>2</sup> /g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
OPC	61.40	21.60	3.40	2.50	3.10	2.50	0.03	3,540	3.15

**Table 2** Physical properties of aggregates

Items	G-max (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)	F.M.	Unit Mass (kg/m <sup>3</sup> )
RS	-	2.58	2.32	2.78	1,619
CC	25	2.68	0.68	6.98	1,602

**Table 3** Component ratio of the alkali silicate-based materials

Items	Specific gravity (20°C)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	Li <sub>2</sub> O (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Mole fraction	Viscosity (cps, 20°C)	Solids content (%)
Potassium silicate	1.27-1.29	10.0-11.0	-	-	21.5-22.5	0.05	3.2-3.5	≤20	20-52
Sodium silicate	≥1.38	-	9.0-10.0	-	28.0-30.0	0.03	3.10-3.30	-	30-56
Lithium silicate	1.15-1.20	-	-	1.0-1.5	18.0-22.0	-	7.5-8.5	-	20-25

## 2.2 시험 및 평가방법

### 2.2.1 시험용 시편 제작

본 연구에서 시험에 사용된 시편은 “KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법”에 준하여 모르타르를 제조하여 각 실험에 적합한 형태로 시편을 제작하였다. 그러나 동결융해 저항성 시험에 사용된 표준시편은 모르타르로 동결융해 시험용 시편을 제작하는 것이 시험 목적에 부적합하다고 판단되어, 동결융해 시험용 시편에 국한하여 보통강도 수준(24 MPa)의 일반적인 콘크리트 배합을 적용하였으며, 동결융해를 보다 촉진시키기 위하여 공기량을 1% 미만으로 하여 제조하였다.

### 2.2.2 압축 및 부착강도

무기 코어재료 적용에 따른 시멘트 복합체의 압축강도는 “KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법”에 준하였으며, 부착강도는 “KS F 2761 콘크리트용 접착제의 접착강도 시험방법”에 준하여 평가하였다.

### 2.2.3 투수 및 흡수 저항성

무기 코어재료 적용에 따른 시멘트 복합체의 투수 및 흡수 저항성능은 “KS F 4930 콘크리트 도포용 액상형 흡수방지제”에 준하여 평가하였다.

### 2.2.4 염소이온 침투저항성

무기 코어재료 적용에 따른 시멘트 복합체의 염소이온 침투저항성은 “KS F 2711 전기전도도에 의한 콘크리트의 염소이온 침투저항성 시험방법”에 준하여 평가하였다.

### 2.2.5 동결융해 저항성

무기 코어재료 적용에 따른 시멘트 복합체의 동결융해저항성은 “KS F 2456 급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항시험방법”에 준하여 방법 A법인 수중 급속 동결융해 시험방법에 따라 평가하였다.

### 2.2.6 균열 수복성

무기 코어재료 적용에 따른 시멘트 복합체의 균열 수복 성능은 2.2.1-2.2.4의 실험을 통하여 무기 코어재료 샘플 중 자체 평가 기준에 따라 성능이 적합한 한가지 균열 선정하여 이를 대상으로 균열수복성능을 평가하였다. 표준시편의 배합은 “KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법”에 준하여 제조하였으며, 40×40×100 mm 사이즈의 모르타르 시편을 제작하였다. 임의적으로 균열을 발생시키기 위하여 몰드에 모르타르를 성형한 다음 균열 발생용 필름을 삽입하여 균열폭 0.3 - 1.0 mm 범위, 균열 깊이 20 mm의 균열이

발생한 시편을 제작하였다. 임의 균열 시편은 재령 3일 시편을 표준으로 하여 무기 코어재료를 균열부에 충분히 채워지도록 도포한 다음 72시간 기건 양생 후 할렬하여 균열부의 수복정도를 평가하였다.

### 2.2.7 내부 및 미세구조

무기 코어재료 적용에 따른 시멘트 복합체의 미세구조는 선정된 무기 코어재료를 대상으로 소정의 양생기간을 거친 후 할렬하여 내부구조를 산업용 화상 비디오 현미경을 사용하여 확대 관찰하였다. 또한, 국내 K연구원내 컴퓨터 단층촬영기(Computed Tomography, CT)를 통하여 무기 코어재료 적용에 따른 시멘트 복합체 미세영역의 공극 변화량을 평가하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 압축 및 부착강도

Fig. 1은 ICM 적용에 따른 시험편의 압축강도 증가율을 나타낸 것이다. Fig. 1의 결과 ICM 적용에 따라 압축강도가 모두 증가하는 경향이 나타났으며, ICM-1, ICM-2, ICM-3 및 ICM-4의 압축강도 증가율은 기준 강도와 비교하여, 약 9%, 2%, 9% 및 14% 증가하는 결과가 나타나 ICM-4가 압축강도 증가효율 측면에서 가장 성능이 큰 것으로 판단된다.

Fig. 2는 ICM 적용에 따른 시험편의 부착강도를 나타낸 것이다. Fig. 2의 결과 모든 ICM은 부착성능이 있는 것으로 확인되었으며, ICM-1, ICM-2, ICM-3 및 ICM-4의 부착강도는 1.74, 1.56, 0.2 및 0.3 MPa로 측정됨에 따라 부착강도 성능 측면에서는 ICM-1이 가장 큰 것으로 나타났다.

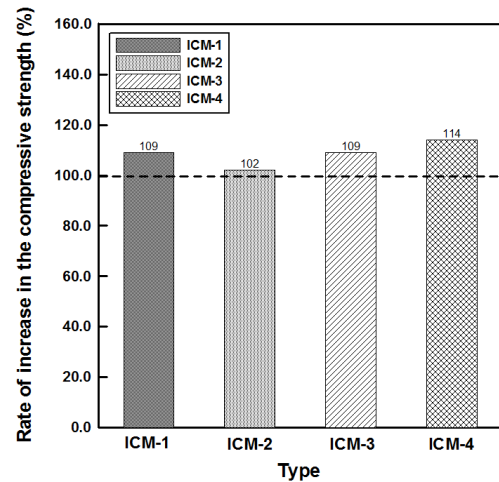


Fig. 1 Compressive strength according to ICM

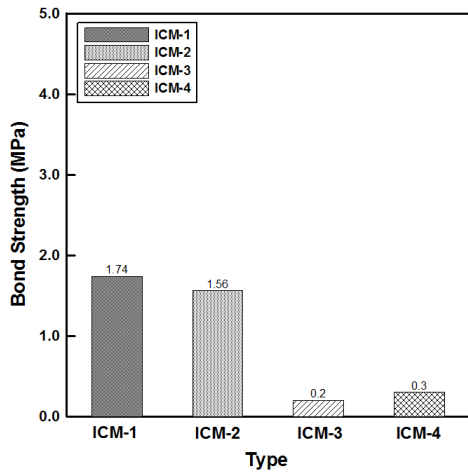


Fig. 2 Bonding strength according to ICM

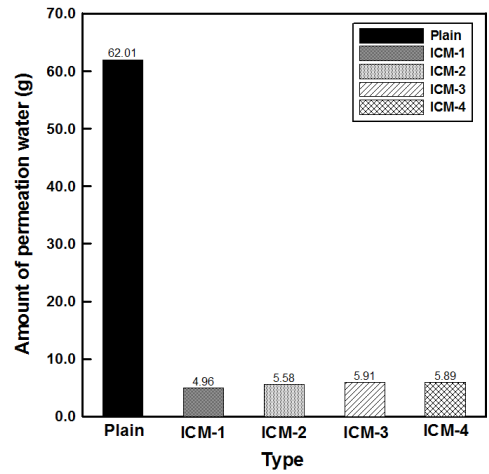


Fig. 4 Amount of permeation water according to ICM

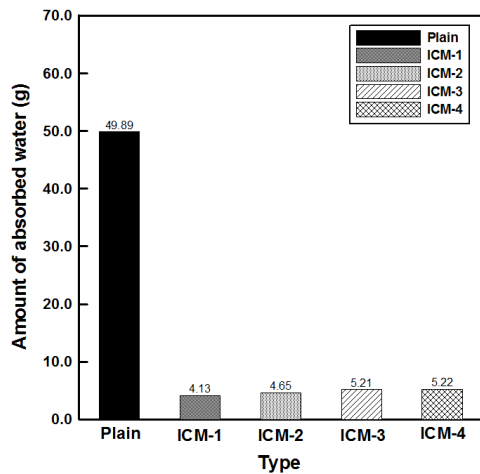


Fig. 3 Amount of absorbed water according to ICM

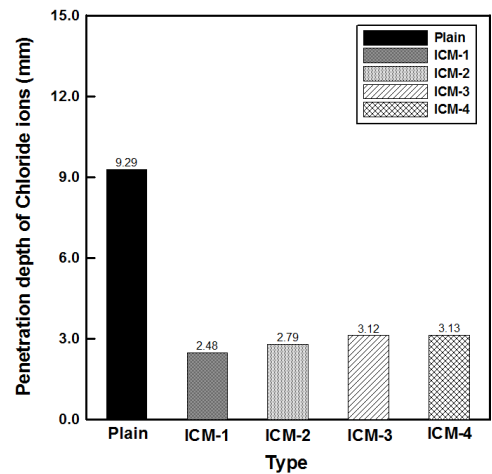


Fig. 5 Penetration depth of chloride ions according to ICM

이러한 결과를 통하여 ICM-4의 경우 상대적으로 압축강도 증가효율이 가장 큰 경향이 나타났으나 부착강도의 경우 상대적으로 낮은 수준으로 측정되어, 압축 및 부착강도를 모두 고려할 경우 ICM-1 및 ICM-2를 적용할 경우에 성능을 기대할 수 있을 것으로 판단되며, 종합성능을 고려할 경우 ICM-1을 적용할 경우에 가장 효율이 클 것으로 판단된다.

### 3.2 투수 및 흡수 저항성

Fig. 3은 ICM 적용에 따른 시험편의 흡수량을 나타낸 것이다. Fig. 3의 결과 모든 ICM은 흡수 저항성을 가진 것으로 나타났다으며, ICM 적용에 따라 Plain 대비 흡수량은 약 90~92% 수준으로 감소하는 경향이 나타났다. 또한, ICM의 종류에 따라 흡수량의 차이가 미비한 수준이기 때문에 흡수 저항성은 동등 수준으로 판단된다.

Fig. 4는 ICM 적용에 따른 시험편의 투수량을 나타낸 것이

다. Fig. 4의 결과 모든 ICM은 투수 저항성을 가진 것으로 나타났다으며, ICM 적용에 따라 Plain 대비 투수량은 약 89~91% 수준으로 감소하는 경향이 나타났다. 또한, 흡수 저항성과 동일하게 ICM의 종류에 따라 투수량의 차이가 미비한 수준이기 때문에 투수 저항성은 동등 수준으로 판단된다.

이러한 결과를 통하여 ICM 적용에 따른 투수 및 흡수 저항성의 경우 ICM 종류에 따라 성능이 큰 수준으로 차이가 나는 것이 아니므로 동등 성능을 가진 것으로 판단되지만, 정량적인 비교를 할 경우에는 ICM-1이 가장 적은 흡수량과 투수량으로 나타났으므로 흡수 및 투수저항 측면에서 고려할 경우에는 ICM-1을 적용시 투수 및 흡수저항 효율이 클 것으로 판단된다.

### 3.3 염소이온 침투저항성

Fig. 5는 ICM 적용에 따른 시험편의 염소이온 침투깊이를

나타낸 것이다. Fig. 5의 결과 ICM 적용에 따라 Plain 대비 염소이온 침투깊이는 약 55~73% 수준으로 감소하는 경향이 나타나며 따라 모든 ICM은 염소이온 침투저항성을 가진 것으로 나타났다. ICM 종류에 따른 염소이온 침투깊이는 투수 및 흡수저항성 분석결과와 동일하게 결과 값의 차이가 크지 않은 것으로 나타나 동등 수준인 것으로 판단되지만 정량적인 분석을 통한 경우 ICM-1이 2.48 mm로 가장 작은 침투깊이를 나타내기 때문에 ICM-1 적용시 염소이온 침투저항성능 효율이 클 것으로 판단된다.

### 3.4 동결융해 저항성

Fig. 6 및 Table 4는 ICM 적용에 따른 시험편의 상대동탄성계수 및 표면 상태를 관찰한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 6의

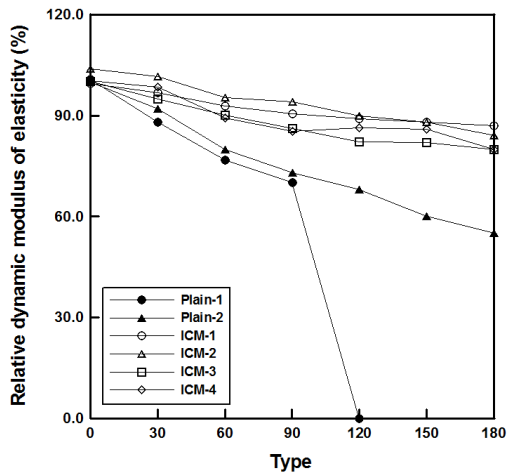


Fig. 6 Relative dynamic modulus of elasticity according to ICM

결과 ICM이 적용되지 않은 공기량 1% 미만인 Plain의 경우 ICM을 적용한 시험편과 비교하여 동결융해 사이클이 진행됨에 따라 상대동탄성계수가 상대적으로 빠르게 감소하는 경향이 나타났으며, Plain-1의 경우 90사이클 도달함에 따라 완전히 파괴되어 Table 4와 같이 측정 불가능한 것으로 나타났다.

또한, Plain-2의 경우 Plain-1과 같이 파괴되는 현상은 없었으나 급속하게 상대동탄성계수가 감소하고 표면탈락이 심하게 발생되어 콘크리트의 동결융해 이론 중 하나인 공기량이 확보되지 않을 경우 동결융해 열화현상이 촉진되는 것을 확인할 수 있었다(Korea Concrete Institute, 2009).

그러나 ICM을 적용한 시험편의 경우에는 ICM 종류에 따라 다소 차이가 있는 것으로 나타났지만 180 사이클이 경과된 이후에도 상대동탄성계수는 약 85% 이상으로 동결융해 저항성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4의 결과 동결융해 종료 후 시험편의 표면 상태는 Plain의 경우 열화가 심하게 진행되어 파괴되거나 박리박락 현상이 발생하였다. ICM의 경우 ICM-1 및 ICM-2의 경우에는 표면이 깨끗한 것을 관찰할 수 있었으며, ICM-3 및 ICM-4는 다소 표면 박리현상이 발생하는 것으로 나타났다.

동결융해 저항성은 ICM-1과 ICM-2가 ICM-3 및 ICM-4와 비교하여 저항성능 효율이 상대적으로 큰 경향이 있으므로 ICM을 선정하는데 있어 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

Table 5는 각 시험방법에 따라 성능을 지표화하여 자체 평가한 결과를 나타낸 것이다. 지표수준은 성능에 따라서는 3단계로 구분하고 상대적으로 조금 더 성능이 있는 것을 1단계로 하여 총 4단계로 구분하였으며, 각 실험결과 값을 기준으로 각각 판단하여 나열하였다. Table 5의 결과 모든 항목을 “Good” 판정을 받은 ICM-1을 본 논문에서는 우선 선정하여 ICM-1의

Table 4 Evaluation of the specimen surface condition according to freezing and thawing test

Plain		ICM-1	ICM-2	ICM-3	ICM-4
Results of the experiment and determination					
Breakage and exfoliation		Clear	Clear	Some delamination	Some delamination

**Table 5** Selection of the ICM according to each experiment

Type	P	ICM			
		1	2	3	4
Rate of increase in compressive strength	-	○	△	○	●
Rate of increase in bonding strength	-	○	○	△	△
Resistance of permeability	-	○	○	○	○
Resistance of absorption	-	○	○	○	○
Resistance of Penetration of chloride ions	-	○	○	○	○
Resistance of freezing and thawing	×	●	●	○	○

where, P : Plain

● Good (little better) / ○ Good / △ Normal / × poor

균열 보상성을 평가하였으며, 화상 비디오 카메라와 CT촬영을 통한 내부 및 미세구조 관찰을 통하여 공극의 양상을 평가하였다.

### 3.5 균열 수복성

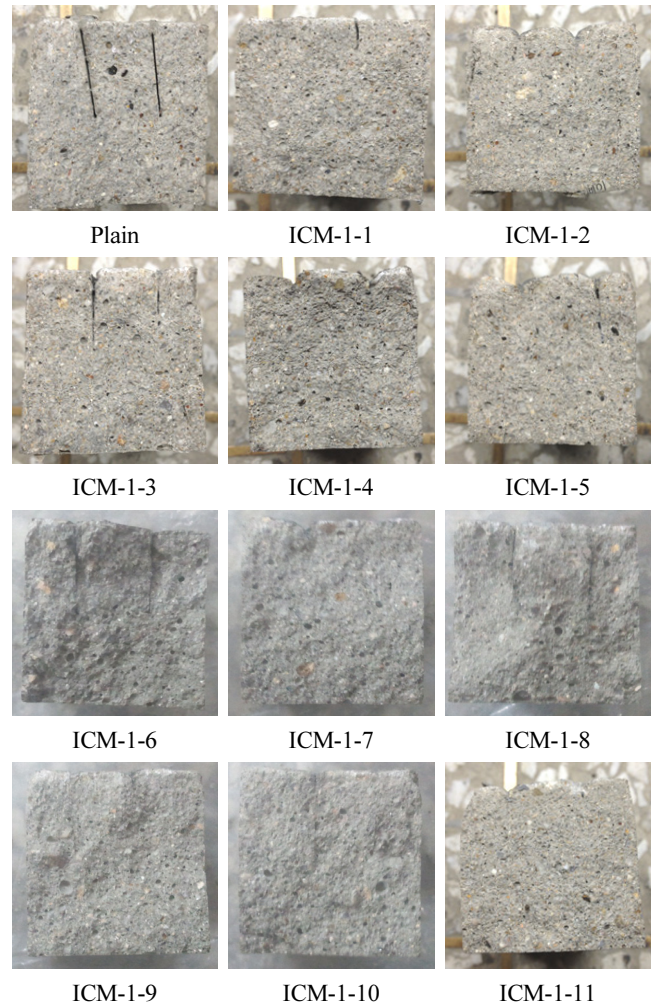
Fig. 7 및 Fig. 8은 ICM-1 적용에 따른 균열 수복성 평가결과를 나타낸 것이다. Fig. 7의 결과 Fig. 8의 평가방법 및 모식도에 따라 분석한 결과 Plain의 경우 임의 균열 발생 후 시간이 경과되어도 균열형상이 변하지 않았음을 확인할 수 있었지만 ICM-1을 도포한 시험편의 경우에는 임의 균열이 수복되어 있는 결과를 얻을 수 있었다.

본 논문에서는 ICM의 균열 보상성을 평가하기 위하여 우선적으로 ICM-1에 대해서만 다수의 시험체에 적용하여 양생기간 후 중앙면을 할렬한 결과를 나타낸 것으로 모든 시험편의 임의 균열이 완전히 수복되지 않는 결과도 나타나고 있기 때문에 다소 신뢰성이 떨어지지만 균열 수복이 가능한 현상을 얻음에 따라 이를 기초로 하여 보다 세분하고 다양하게 검토가 이루어 질 경우 보완 및 진보된 연구를 통하여 신뢰성이 높은 최적의 ICM을 선정할 수 있을 것으로 판단된다.

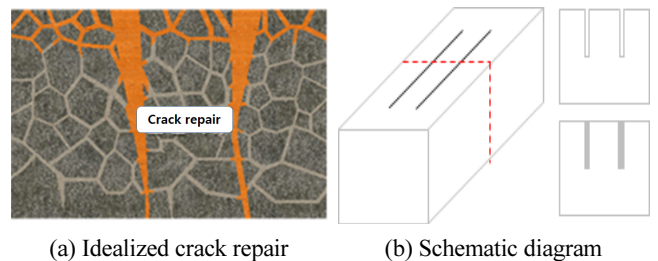
### 3.6 내부 및 미세구조

Fig. 9는 ICM-1 적용에 따른 시험편의 내부구조를 관찰한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 9의 결과 ICM-1이 적용되지 않은 Plain의 경우 표면 내부 층에 크고 작은 공극이 다수 발견되는 것으로 나타났다. 그러나 ICM-1이 적용된 시험편의 경우에는 내부 공극이 상당히 줄어든 것을 개략적으로 확인할 수 있었으며, 반응을 통하여 결정화된 곳이 부분적으로 관찰되었다.

이러한 결과는 ICM-1의 자체물성에 따라 액상형태를 띠고 있으며, 시험편의 공극 또는 모세관을 통하여 침투한 것으로 판단되며, 침투한 ICM-1의 자체 성분 중 규산염과 Plain 내부



**Fig. 7** Crack repair performance according to application of ICM-1



**Fig. 8** Evaluation of crack repair performance

의 수산화칼슘과 반응하여 시험편의 내부를 치밀하게 채운 것으로 판단된다. 본 실험의 경우 ICM-1의 적용에 따른 영향과 함께 발생하는 효과에 대하여 광범위하고 개략적인 평가를 하고자 하였으나 실험결과와 명확한 결과 및 원인분석을 위해서는 ICM-1의 침투여부와 균질성, 반응생성물의 성분 분석과 함께 보다 명확한 매커니즘 정립이 뒷받침되어야 할 것으로 판단된다.

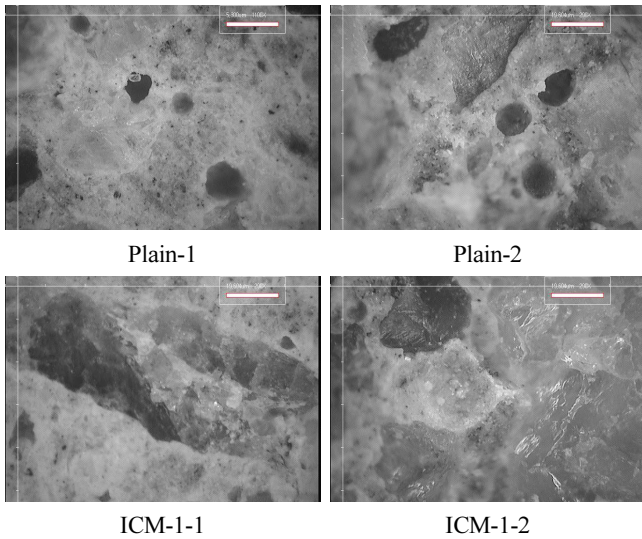


Fig. 9 Internal observation result of the specimen according to application of ICM-1 (X300)

Fig. 10은 ICM-1 적용에 따른 시험편의 미세 공극 구조를 관찰한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 10(a)는 실험에 사용된 시험편의 형태를 나타낸 것이며, Fig. 10(b)는 Fig. 10(a)의 시험편을 단층 촬영하여 이미지화 과정을 통한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 10(c)는 Fig. 10(b)의 이미징 처리된 시험편에서 내부 미세공극을 추출한 결과를 나타낸 것이며, Fig. 10(c)의 동일한 시험편에 대하여 ICM-1을 적용한 다음 단층촬영을 다시 실시하고 Fig. 10(b)~(c)를 반복수행하여 얻은 내부 공극의 결과를 Fig. 10(d)에 대조하여 나타내었다. Fig. 10(d)의 결과 ICM-1을 적용한 이후의 시험편의 내부 미세 공극량은 초기에 ICM-1을 적용하지 않은 시험편의 내부 미세 공극량과 비교하여 상당량 감소한 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 Fig. 10의 결과를 이미지 면적의 수치화를 통하여 실제 내부 공극량의 감소결과를 전단면에 대하여 평균화하여 단일화 된 결과로 나타낸 것이다. Fig. 11의 결과 중심부의 경우에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났으나 표면층에 가까울수록 점차 감소하기 시작하여 최대 약 48% 감소한 것을 알 수 있었다. 이러한 결과를 통하여 ICM-1의 내부 미세공극에 미치는 영향을 확인할 수 있었으나 본 실험 및 결과의 경우 1회에 한하여 샘플로써 수행한 것으로 신뢰성이 확보되지 않은 결과이기 때문에 본 논문에서는 컴퓨터 단층촬영기법을 통한 내부 공극분포 및 평가에 대한 새로운 방법론을 제시하고자 한다. 향후 본 평가기법을 통하여 다양한 분석 및 고찰이 가능할 것으로 판단되며, 본 평가기법을 통하여 ICM-1의 개략적인 성능을 확인할 수 있었다.

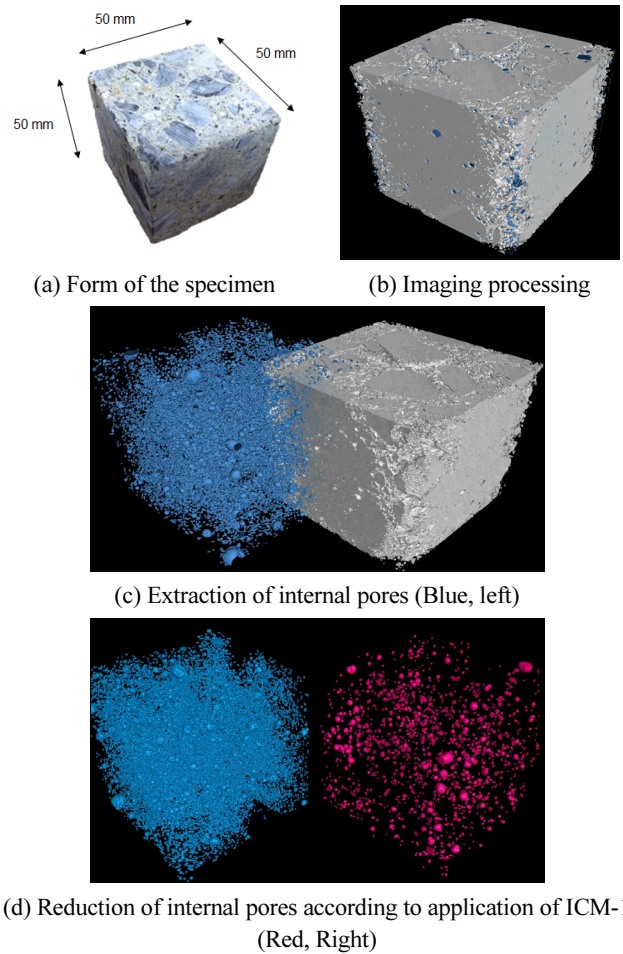


Fig. 10 Microstructure of the test specimen and image processing inside the pores

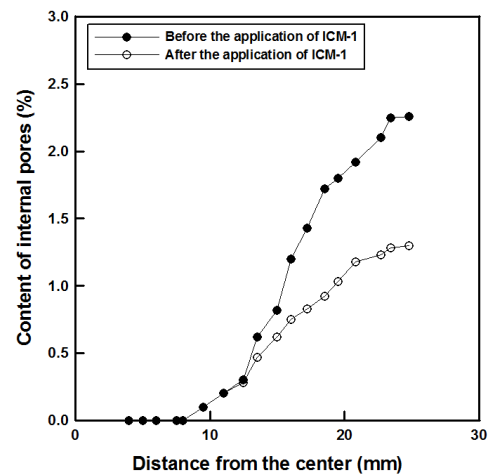


Fig. 11 Decrement analysis of pore volume of the extracted internal pores

## 4. 결 론

본 논문은 시멘트 복합체의 균열 자기치유용 캡슐을 제조하기 위한 일환의 기초 연구 중 하나로써 자기치유 캡슐용 코어재료에 무기계 기반 코어재료를 적용하기 위하여 액상형태의 무기 소재를 혼합한 코어재료를 제조하여 시멘트 복합체 적용시 얻을 수 있는 성능과 미치는 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 무기계 기반 코어소재는 시멘트 복합체에 적용시 압축강도 향상효과가 있는 것을 확인하였으며, 부착성능까지 부여할 수 있으므로 균질한 균열 수복 성능에 대한 신뢰성 확보가 가능할 경우 균열부의 치유뿐만 아니라 균열부 주위의 강도 증진 효과 및 부착력 확보가 가능할 것으로 판단된다.
- 2) 무기계 기반 코어소재는 내흡수 성능, 내투수 성능 및 동결융해 저항성에 효과가 있는 것으로 나타남에 따라 시멘트 복합체의 균열부 치유와 동시에 균열부 및 주위단면에 방수성을 부여할 수 있어 시멘트 복합체의 주요 열화 원인인 수분에 대하여 효과적으로 차단할 수 있는 성능이 있는 것으로 판단된다.
- 3) 무기계 기반 코어소재는 시멘트 복합체 내부로 침투하여 내부에 존재하고 있는 물질과 반응을 일으켜 내부 미세공극을 감소시키고 치밀해지는 경향이 관찰됨에 따라 여러 조건에서 다양한 접근을 통한 실험 검증 및 신뢰성 확보가 필요할 것으로 판단되며, 성분 분석 및 매커니즘 정립이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(16SCIP-B103706-02)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## References

- AHN, T. H. and Kishi, T. (2010), Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 8(2), 171-186.
- An, E. J. and Shin, M. S. (2014), Healing Mechanisms and Assessment Techniques of Self-healing Concrete, *Proceeding of Korea Concrete Institute*, 26(2), 477-479 (in Korean).
- Blaiszika, B. J., Sottos, N. R., and White, S. R. (2007), Nanocapsules for Self-healing Materials, *Journal of Composites Science and Technology*, 68(3), 978-986.
- Erik, S. and Senot, S. (2013), Addressing Infrastructure Durability and Sustainability by Self Healing Mechanisms - Recent Advances in Self Healing Concrete and Asphalt, *Journal of Procedia Engineering*, The 2nd International Conference, 54, 39-57.
- Hunger, M., Entrop, A. G., Mandilaras, I., Brouwers, H. J. H., and Founti, M. (2009), The Behavior of Self-Compacting Concrete Containing Micro-Encapsulated Phase Change Materials, *Journal of Cement & Concrete Composites*, 31(10), 731-743.
- Kim, P. S., Jo, C. K., Ju, T. H., Choi, Y. C., and Lee, J. K. (2003), Preparation and Thermal Characteristics of Microencapsulated PCM for None Supercooling Phenomenon, *proceeding of The Korean Society for Energy*, 225-228 (in Korean).
- Kishi, T., AHN, T. H., Morita, M., and Koide, T. (2011), Field Test of Self-Healing Concrete on the Recovery of Water Tightness to Leakage through Cracks, *3rd International Conference on Self-Healing Materials 2011*, Bath-United Kingdom, June 27-29, 297-298.
- Korea Concrete Institute (2009), Concrete Standard Specification, Korea Concrete Institute Korea (in Korean).
- Shazim Ali Memon, H. Z. Cui, H. Z., and Feng, X. (2014), Utilization of Macro Encapsulated Phase Change Materials for the Development of Thermal Energy Storage and Structural Lightweight Aggregate Concrete, *Journal of Applied Energy*, 139, 43-55.
- Song, Y. K., Jo, Y. H., Lim, Y. J., Cho, S. Y., Yu, H. C., Ryu, B. C., Lee, S. I., and Chung C. M. (2013), Sunlight-induced Self-Healing of a Microcapsule-type Protective Coating, *Journal of A C S Applied Materials and Interfaces*, 5(4), 1378-1384.
- Tatyana, N., Kim, D.-J., Lars Thorslund Pedersen and Søren Kiil, (2012), Microcapsule-based Self-Healing Anticorrosive Coatings: Capsule Size, Coating Formulation, and Exposure Testing, *Journal of Organic Coatings*, 75(4), 309-318.
- Wang, X., Xing, F., Zhang, M., Han, N., and Qian, Z. (2003), Experimental Study on Cementitious Composites Embedded with Organic Micro-capsules, *Journal of Materials*, 6(9), 4064-4081.

Received : 09/22/2016

Revised : 10/10/2016

Accepted : 10/25/2016



---

**요 지 :** 본 연구에서는 시멘트 복합체의 균열을 자기치유 할 수 있는 자기치유 캡슐을 제조하기 위한 일환의 기초 연구로써 자기치유 캡슐용 코어재료에 무기계 기반 코어재료를 적용하기 위하여 액상형태의 무기 소재를 기반으로한 코어재료를 제조하였다. 제조된 무기계 기반 코어재료는 캡슐화를 진행하기 전에 무기계 기반 코어재료를 직접 시멘트 복합체에 적용하여 균열부의 균열수복 성능뿐만 아니라 시멘트 복합체의 성능에 미치는 영향을 검토하였다. 평가결과, 무기계 기반 코어재료는 압축 및 부착강도 향상효과가 있는 것을 확인하였으며, 부착, 내흡수, 내투수 및 동결융해 저항 성능을 가진 것으로 판단된다. 본 논문의 결과를 통하여 자기치유 캡슐용 무기계 기반 코어재료를 적용할 경우에 얻을 수 있는 시멘트 복합체의 성능 및 차후 진보화된 자기치유 캡슐기술의 기반 자료로써 활용하고자 한다.

**핵심용어 :** 균열, 시멘트 복합체, 무기계, 코어소재, 성능

---