

노출환경 조건이 자기치유형 보수 모르타르 시험체의 균열 치유성능에 미치는 영향

Influence of Exposure Environmental Conditions on the Crack Healing Performance of Self-healing Repair Mortar Specimens

이웅종^{1*} · 이현호² · 안상욱³ · 이광명⁴

Woong-Jong Lee^{1*} · Hyun-Ho Lee² · Sang-Wook Ahn³ · Kwang-Myong Lee⁴

(Received October 8, 2018 / Revised October 29, 2018 / Accepted October 29, 2018)

Since the crack self-healing materials are activated according to the exposure environmental conditions from the time of crack occurrence, it is very important to clarify the relationship between the healing performance and the exposure environmental conditions of the crack surface. In this paper, the influence of the exposure environmental conditions on the crack healing performance of self-healing repair mortar was investigated through the water permeability test. The influence of temperature and humidity on the crack width of cracked specimens was evaluated. As a result of measuring the change of the crack width, the effect of curing temperature was negligible but it was confirmed that crack-closing occurred due to the change of dry-wet condition. The healing materials produced on the crack surface of the specimens was identified as calcite minerals. Since the minerals with high density are precipitated under the influence of gravity, the healing performance is somewhat different according to the direction of the crack surface, and the healing performance was significantly improved in the wet exposure condition than the air exposure condition.

키워드 : 자기치유, 균열, 투수시험, 모르타르, 탄산칼슘

Keywords : Self-healing, Crack, Water permeability test, Mortar, Calcium carbonate

1. 서론

철근 콘크리트 구조물에서 균열이 발생하면 염화물 등의 유해 물질이 균열을 통하여 철근에 쉽게 도달하여 부식을 가속화시키기 때문에 이를 제어할 수 있는 균열 자기치유 재료의 개발은 내구성 측면에서 매우 중요하다.

최근, 일반 콘크리트 혹은 보수 모르타르에 다양한 자기치유 소재를 첨가함으로써 균열 자기치유 성능을 부여하는 연구가 진행되고 있다(Ahn et al, 2010; Koide et al, 2011; Sisomphon et al,

2012; Lee et al, 2016). 균열자기치유 소재는 균열발생 시점부터 건습환경 등 균열면의 노출환경 조건에 영향을 받아 치유메커니즘이 작동됨으로, 치유소재의 성능평가는 반드시 노출환경 조건을 고려하여 이루어져야 한다.

균열면의 노출환경 조건이 자기치유 거동에 미치는 영향에 대한 기존 연구를 살펴보면, Sisomphon et al.(2013)은 팽창재와 결정질 혼화재를 혼합한 SHCC (Strain hardening cementitious composite)를 대상으로 자기치유 거동을 평가한 결과, 건습반복 조건에서 역학적 성능 회복을 확인하였지만, 대기양생 조건에서는 육안상의 치유현상조차도 확인할 수 없다고 보고

* Corresponding author E-mail: woojon94@naver.com

¹성균관대학교 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 실장 (Self-healing Green Concrete Research Center, Sungkyunkwan University, Suwon, 16419, Korea)

²성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정 (Department of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Sunwon, 16419, Korea)

³(주)인트켄 대표이사 (Intchem Co., Ltd., Yongin, 17088, Korea)

⁴성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수 (Department of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Sunwon, 16419, Korea)

한 바 있다. Roig-flores et al.(2015)은 결정질 혼화재를 첨가한 콘크리트를 다양한 노출 환경조건에서 양생하면서 투수시험을 실시한 결과, 수분이 공급되지 않은 조건에서는 더 이상 균열 자기치유 현상이 발생하지 않았다고 보고하였다. 또한, Roig-flores et al.(2016)은 결정질 혼화재를 첨가한 섬유보강 콘크리트를 대상으로, 수온 15℃와 수온 30℃에서의 수중침지 조건과 건습반복 조건에서 투수시험에 의해 치유성능을 평가한 결과, 건습반복 조건에서는 치유성능이 저조한 반면에, 수온 15℃ 보다 수온 30℃의 수중 침지에서 치유성능이 향상되었다고 보고하였다.

이상과 같이 균열면의 다양한 노출환경 조건하에 자기치유 성능을 평가한 연구는 수행되었지만, 균열면의 방향까지 고려한 균열면 노출환경 조건이 치유성능에 미치는 영향에 대해 보고된 바 없는 실정이다.

본 연구에서는 일반 보수 모르타르에 균열면에서 치유물질의 생성 및 촉진기능이 있는 유무기 하이브리드 소재를 첨가한 자기치유형 보수 모르타르를 대상으로, 두 가지의 균열면 방향과 건습 환경 조건이 치유성능에 미치는 영향을 광학현미경을 이용한 균열 폭 변화 조사와 정수위 투수시험을 통하여 규명하였다.

2. 실험 연구

2.1 사용재료 및 시험체 제작

본 연구에서 사용한 보수 모르타르는 콘크리트의 단면복구 및 표면 보수용인 C사 제품이며, 규사와 분체의 비(S/B)는 1.2이다. 균열면에서 치유물질의 생성을 촉진시키기 위해 팽윤재 및 결정촉진제, 이온흡착용 다공성 물질 등의 유·무기소재로 구성되어 있는 하이브리드 치유소재를 사용하였다.

보수 모르타르에 자기치유 소재를 첨가한 자기치유형 보수 모르타르의 배합비는 Table 1과 같다. 물-premixed dry 모르타르비(W/M)는 18%로, 실제 물/결합재비는 약 39.6%이며, 자기치유소재를 premixed dry 모르타르 질량 대비 2.75%를 첨가하였다.

자기치유형 보수 모르타르의 유동성과 강도는 KS F 2476에 의거하여 모르타르 플로우 시험과 압축강도 시험을 통하여 평가하였다.

2.2 투수시험 방법

Table 1. Mix proportion of self-healing repair mortar

Mix	Water	Pre-mixed dry repair mortar(M)	SH(M×%)
SHRM	0.18	1.0	2.75

2.2.1 균열시험체 제작 및 투수량 측정방법

모르타르를 혼합한 직후에 원주형 시험체(Φ100×50mm)를 제작하였으며, 재령 1일에 탈형한 후에 수중양생을 실시하였다. 그리고, 균열유도 시기(재령 28일)에 원주형 시험체를 쪼갬인장강도 시험방법을 적용하여 둘로 분할한 다음 합체 시, 균열폭을 조절하기 위해서 균열면 양끝단에 실리콘 시트를 삽입하였고, 치유기간 동안 초기 균열폭이 유지되도록 횡방향에서 호스밴드로 강하게 죄어 균열시험체를 제작하였다.

균열시험체의 균열폭과 균열길이는 광학현미경을 이용하여 측정하였다. 균열길이는 균열시험체의 상하면에서 각각 측정하여 평균값으로 취하였고, 균열폭은 균열시험체 상하면에서 총 12 point에서 측정하여 평균값을 사용하였다.

투수량 측정은 250mm 수두를 갖는 정수위 투수시험 방법(Choi et al. 2017)에 의해 측정하였으며, 초기 투수량을 측정한 후, 수중양생을 실시하면서 7일 간격으로 투수량을 측정하였다.

2.2.2 균열시험체의 균열면 노출조건

노출환경 조건이 치유성능에 미치는 영향을 평가하기 위한 균열시험체의 균열유도 시기와 균열면 노출방법을 Table 2에 나타내었다. 재령 28일에 자기치유형 보수 모르타르인 SHRM 시험체에 균열을 유도하여 투수시험을 실시하였다. 치유기간 중의 다양한 균열면의 노출조건은 Fig. 1에 나타난 바와 같이, 균열시험체를 수중에서 균열면이 수직으로 되어 있어 중력방향과 평행하도록 정지한 경우(V-Water), 수중에서 균열면이 수평으로 놓여 있어,

Table 2. Cracking time and exposure conditions of the crack surface for water permeability test specimens

Mix	Cracking time	Exposure condition of the crack surface		
SHRM	28 days	V-Water*	H-Water**	H-Air***

*) V-Water: The crack surface is vertical under water.
 **) H-Water: The crack surface is horizontal under water.
 ***) H-Air: The crack surface is horizontal on air.

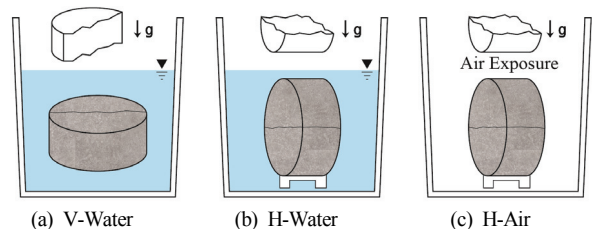


Fig. 1. Direction of the crack surface of cracked specimens

중력방향에 직교하는 경우(H-Water), 시험체의 정치는 H-Water와 같으나 대기 중에 양생한 경우(H-Air) 등 3가지 조건을 고려하였다. 투수시험에 사용한 균열시험체는 3가지 노출조건별로 5개씩 총 15개를 제작하여 초기 투수량을 측정하였다. 노출조건별 5개의 시험체 중에서 초기투수량과 표면균열폭이 목표값에서 크게 벗어나는 시험체 2개를 제외한 3개의 균열시험체를 선정하여 치유기간 증가에 따른 투수량을 측정하여 균열 치유성능을 평가하였다.

2.3 온도 및 건습변화에 따른 균열폭 변화량 측정방법

시험체 주변의 대기온도가 변화할 경우, 모르타르와 호스밴드의 열팽창계수의 차이로 인해 균열폭이 변동될 수 있으므로, 본 연구에서는 온도변화가 균열시험체의 균열폭에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Fig. 2와 같은 과정으로 총 3개의 균열시험체에 대해 표면균열폭을 측정하였다(측정방법은 2.2.1과 동일). 온도변화에 따른 균열폭의 변동 조사는 광학현미경으로 촬영한 사진을 상호 비교하면서 동일 시험체 및 동일 위치에서 측정된 균열폭들의 평균값을 대상으로 하였다.

균열시험체의 건습상태 변화가 균열폭의 변화에 미치는 영향을 조사하기 위한 시험과정은 Fig. 3과 같다. 균열시험체 1개에 대해 2.2.1의 방법과 같이 초기 표면균열폭을 측정된 이후 수중에서 재령 4hr 및 24hr에 시험체를 꺼내어 표면균열폭을 측정하였으며, 그 다음 항온함습기 내에 정치 후 재령 28hr 및 48hr에 시험체를

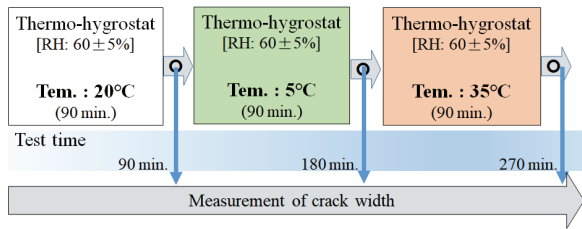


Fig. 2. Procedure for measurement of crack widths according to temperature change

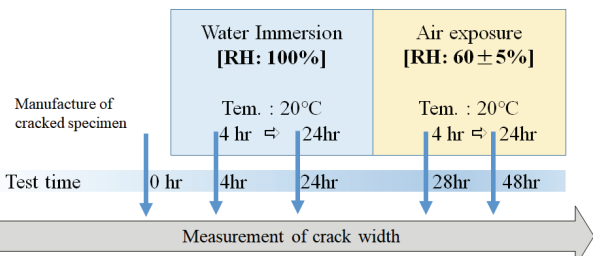


Fig. 3. Procedure for measurement of crack widths according to humidity change

꺼내어 표면균열폭을 측정하였다. 건습변화에 따른 균열폭의 변동 조사는 온도변화에 따른 균열폭의 변동 조사방법과 동일하게 광학현미경 측정사진을 상호 비교하면서 동일 시험체 및 동일 위치에서 측정된 표면균열폭을 대상으로 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 자기치유형 보수 모르타르의 기초물성

자기치유형 보수 모르타르의 유동성 및 압축강도 시험결과는 Table 3과 같다. 유무기 하이브리드 치유소재를 첨가한 자기치유형 보수 모르타르인 SHRM의 플로우는 195mm이고, 28일 압축강도는 37.8MPa이었다.

3.2 온도 및 건습상태가 균열시험체의 균열폭 변화에 미치는 영향

균열시험체의 온도가 20°C ⇨ 5°C ⇨ 35°C로 변화함에 따라 각각의 온도조건에서의 균열폭을 측정된 결과가 Table 4에 정리되어 있다. 균열시험체의 온도가 최저 5°C에서 최고 35°C까지 증가하여도 표면균열폭의 변화는 최대 5μm로 측정되어 균열시험체의 온도변화는 균열폭 변동에 거의 영향을 미치지 않았다.

Table 3. Flow and compressive strength of self-healing repair mortar

Mix	W/M (%)	Flow (mm)	Compressive strength(MPa)		
			3 days	7 days	28 days
SHRM	18.0	195	26.2	28.9	37.8

Table 4. Measurement results of crack widths at each temperature of cracked specimen

Specimen No.	w (Crack width, μm)			Δw (Variation of crack width)		
	20°C	5°C	35°C	20°C	5°C	35°C
SHRM-1	242	241	243	0	-1	1
SHRM-2	296	294	296	0	-2	0
SHRM-3	297	295	302	0	-2	5

Table 5. Measurement results of crack widths according to exposure conditions of cracked specimen

	Initial	Water immersion at 20°C		Air exposure at 20°C, RH 60±5%	
		0	4hr	24hr	28hr
Crack width (μm)	277	274	263	265	272
Difference	0	-4	-14	-12	-5

균열시험체가 수중에서 24hr 동안 침지한 후에 대기 중에 24hr 동안 건조되는 과정 중에 표면균열폭을 측정된 결과는 Table 5와 같다. 수중침지 24hr 후에 측정된 표면균열폭은 수중 침지전 보다 14 μ m가 감소하였는데 이는 모르타르 시험체에 팽윤현상이 발생하여 부피가 팽창하지만 호스밴드의 횡구속 작용으로 인하여 균열 닫힘현상이 발생한 것으로 판단된다. 한편, 건조양생 24hr 후의 표면균열폭은 수중침지 24hr 경과시 표면균열폭 대비 9 μ m가 증가하였다. 이는 모르타르 시험체의 건조에 의해 수축이 발생함으로써 수중 침지전의 상태로 상당 부분 회복된 것으로 판단된다.

3.3 균열면에 생성된 치유물질의 특징

수중에서 양생한 V-Water 시험체와 H-Water 시험체의 균열면

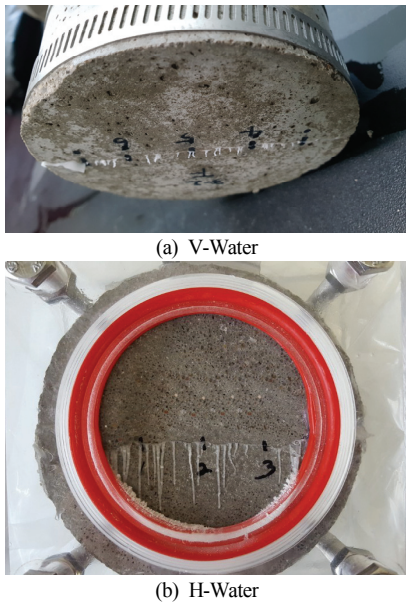


Fig. 4. Precipitation of healing products in cracked specimens

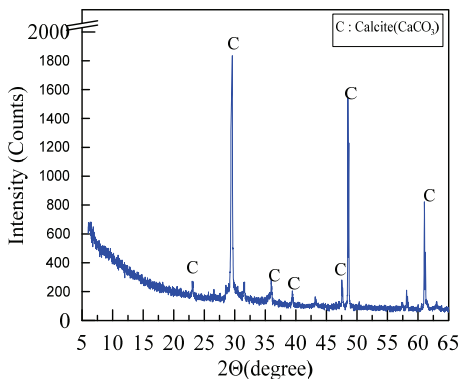


Fig. 5. XRD analysis results of healing product in cracked specimen

에 생성된 치유물질을 관찰한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 균열면이 수직으로 되어 있어 중력방향과 평행한 V-Water 시험체에 생성된 치유물질(Fig. 4(a))은 균열시험체 하면의 균열부에서 석회암 동굴의 종유석과 같은 형태로 생성되었으나, 경도는 종유석에 비해 현저히 낮은 수준이었다. 균열면이 수평으로 되어 있어 중력방향과 직교하는 H-Water 시험체에 생성된 치유물질(Fig. 4(b))은 균열길이를 따라서 중력방향으로 흘러내린 모습을 하고 있다. 여기서 채취한 치유물질들을 건조시키면 모두 백색을 띠었으며, XRD 분석을 수행한 결과인 Fig. 5와 같이 Calcite 광물인 것으로 확인되었다. 이는 시멘트 매트릭스로부터 용출된 칼슘이온과 치유 소재로부터의 탄산이온이 결합하여 탄산칼슘(밀도 : 2.93g/cm³)으로 침강하면서 생성된 것으로 판단된다.

3.4 균열면의 방향 및 건조노출환경 조건이 치유성능에 미치는 영향

치유성능 평가 시험에서 고려한 균열면의 방향 및 건조노출환경 조건에 대해 치유기간 경과에 따른 투수량과 투수감소율의 변화를 각각 Fig. 6와 Table 6에 나타내었으며, 광학현미경으로 측정된 균열시험체의 표면균열폭도 함께 표기하였다. 표면균열폭이 커짐에 따라 초기 투수량(ml/min-mm)은 증가하는 경향을 나타냈으나, 예외도 있었다(Table 6). 예를 들면, H-Water 시험체 중에서 초기 투수량이 1.557인 시험체의 표면균열폭은 0.267mm 이었으나, 초기 투수량이 1.613인 시험체의 표면균열폭은 0.255mm로 오히려 작게 측정되었다. 따라서 광학 현미경으로 측정된 표면균열폭은 투수량을 예측하는 참고값으로 활용하는 것이 더욱 적절하다고 판단된다.

수중에서 균열면이 수직으로 되어 있어 중력방향과 평행한 V-Water 시험체의 경우를 보면, 초기 투수량(ml/min-mm)이 1.077에서 1.906으로 증가함에 따라 치유기간 28일에서의 투수감소율은 94%에서 81%까지 감소함을 알 수 있다. 이는 초기 투수량이 증가할수록 치유성능이 감소하는 것을 의미하기 때문에 치유성능 비교의 신뢰성을 높이기 위하여 성능평가는 동등의 초기 투수량을 기준으로 하였다.

따라서 V-Water, H-Water 그리고 H-Air 시험체들 중에서 동등의 초기 투수량 즉, 1.60~1.62ml/min-mm의 범위에 있는 시험체를 선정하여 치유기간 증가에 따른 투수량과 투수감소율의 변화를 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. H-Water 시험체의 투수감소율은 치유기간 21일까지 V-Water 시험체 대비 높게 유지되고 있으나, 치유기간 28일에서는 유사한 수준을 나타내었

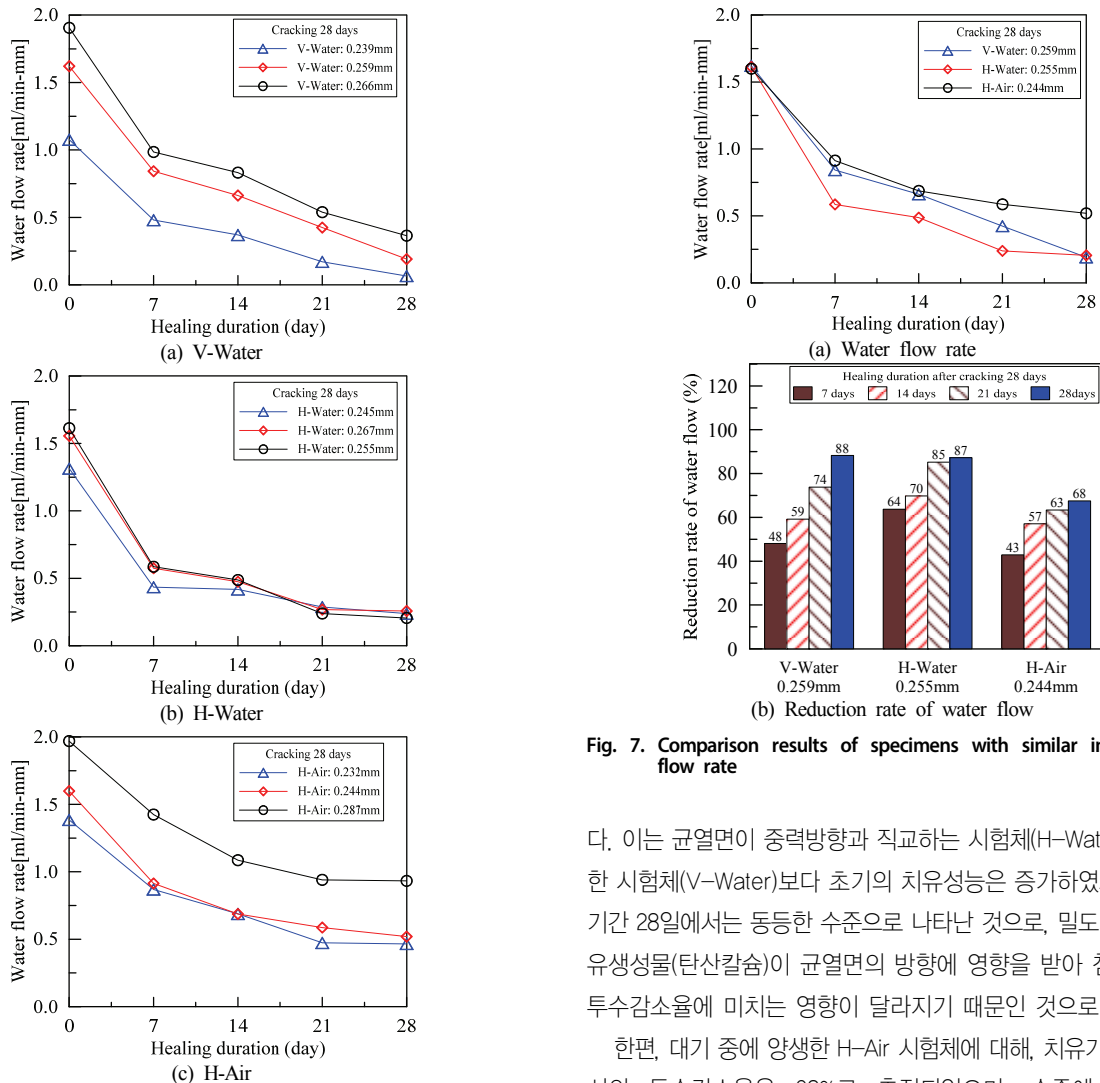


Fig. 6. The results of water permeability test

Table 6. Change in reduction rate of water flow with healing duration after cracking 28 days

Specimen	Initial water flow rate (ml/min-mm)	Surface crack width (mm)	Reduction rate of water flow(%)			
			7 days*	14 days	21 days	28 days
V-Water	1.077	0.239	55	66	84	94
	1.621	0.259	48	59	74	88
	1.906	0.266	48	56	72	81
H-Water	1.314	0.245	67	68	78	82
	1.557	0.267	63	70	83	83
	1.613	0.255	64	70	85	87
H-Air	1.385	0.232	37	50	66	66
	1.599	0.244	43	57	63	68
	1.970	0.287	28	45	52	53

*) Healing duration

Fig. 7. Comparison results of specimens with similar initial water flow rate

다. 이는 균열면이 중력방향과 직교하는 시험체(H-Water)가 평행한 시험체(V-Water)보다 초기의 치유성능은 증가하였으나, 치유기간 28일에서는 동등한 수준으로 나타난 것으로, 밀도가 높은 치유생성물(탄산칼슘)이 균열면의 방향에 영향을 받아 침강하면서 투수감소율에 미치는 영향이 달라지기 때문인 것으로 사료된다.

한편, 대기 중에 양생한 H-Air 시험체에 대해, 치유기간 28일에서의 투수감소율은 68%로 측정되었으며, 수중에서 양생한 H-Water 대비 19% 감소된 결과를 얻었다. 이는 치유소재로서 결정질 혼화재를 첨가한 콘크리트의 경우 수분이 충분히 공급되지 않은 조건하에서 자기치유 성능이 저조하다고 보고한 기존의 연구결과와 일치하였다(Roig-Flores et al, 2015; Roig-Flores et al, 2016). 따라서 본 연구에서 사용한 유기기 하이브리드 치유소재가 최적의 성능을 발휘하기 위해서는 치유기간 동안 균열면에서 수분과 접촉할 있는 노출환경 조건을 확보하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 자기치유형 보수 모르타르 시험체의 균열면의 방향과 건설 노출환경 조건이 치유성능에 미치는 영향에 대해 조

사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 균열시험체의 양생과정 중 온도 및 건습변화가 초기 균열폭에 미치는 영향을 분석한 결과, 온도변화는 균열폭에 영향을 미치지 않았으나, 건습변화에 의해서는 균열 닫힘 현상이 발생하였다.
- 2) 수중에서 양생한 균열시험체의 균열면에 생성된 치유생성물질을 XRD로 분석한 결과, 균열 자기치유 성능에 효과가 있는 Calcite 광물(탄산칼슘)로 확인되었다.
- 3) 자기치유형 보수 모르타르는 수중양생 조건에서 밀도가 높은 치유생성물(탄산칼슘)이 중력의 영향을 받으면서 균열면의 방향에 따라 생성되어 투수감소율의 변화에 영향을 미쳤으며, 대기양생 조건보다 습윤 조건에서 균열시험체의 치유 성능이 향상되는 결과를 얻었다.
- 4) 본 연구에서 사용한 자기치유형 보수 모르타르를 현장에서 활용하기 위해서는 실구조물의 노출환경을 모사한 Mock-up 시험에 의한 검증이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비 지원(18SCIP-B103706-04)에 의해 수행되었습니다.

References

Ahn, T.H., Kishi, T. (2010). Crack self-healing behavior of cementitious

composites incorporating various mineral admixtures, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **8(2)**, 171-186.

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.

Koide, T., Kishi, T., Ahn, T.H., Morita, T. (2011). A study on semi-capsulation technique for concrete incorporating crack self-healing material, *Journal of the Japan Concrete Institute*, **33(1)**, 1451-1456.

Lee, W.J., Hwang, J.S., Ahn, S.W., Lee, K.M. (2016). Water permeability performance evaluation of mortar containing crack self-healing mineral admixtures, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **4(4)**, 463-469.

Roig-Flores, M., Moscato, S., Serna, P., Ferrara, L. (2015). Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments, *Construction and Building Materials*, **86**, 1-11.

Roig-Flores, M., Pirritano, F., Serna, P., Ferrara, L. (2016). Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests, *Construction and Building Materials*, **114**, 447-457.

Sisomphon, K., Copuroglu, O., Koenders, E.A.B. (2012). Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive, *Cement & Concrete Composite*, **34**, 566-574.

Sisomphon, K., Copuroglu, O., Koenders, E.A.B. (2013). Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials, *Construction and Building Materials*, **42**, 217-224.

노출환경 조건이 자기치유형 보수 모르타르 시험체의 균열 치유성능에 미치는 영향

균열 자기치유 소재는 균열발생 시점부터 노출환경 조건에 따라 활성화되기 때문에 치유성능과 균열면의 노출환경 조건과의 관계 규명이 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 자기치유형 보수 모르타르의 치유성능에 노출환경 조건이 미치는 영향을 투수시험을 통하여 조사하였다. 균열시험체의 초기 균열폭에 대한 온도 및 습도의 영향을 조사한 결과, 양생온도의 영향은 미미하였으나, 건습변화에 의해서는 균열닫힘 현상이 발생하고 있음을 확인하였다. 그리고 자기치유형 보수 모르타르 시험체의 균열부위에서 생성된 치유물질은 calcite 광물로 확인되었다. 밀도가 높은 calcite 광물은 중력의 영향을 받아 침강하기 때문에, 균열면의 방향에 따라 치유성능에 다소 차이를 나타냈으며, 또한 대기노출 조건보다 습윤노출 조건에서 치유성능이 크게 향상되었다.