

습윤/건조 반복 작용이 고흡수율 폴리머를 함유한 시멘트계 재료의 자기치유에 미치는 영향

Effect of Cyclic Wetting-drying on Self-healing of Cementitious Materials Containing Superabsorbent Polymers

홍근태¹ · 최성철^{2*}

Geuntae Hong¹ · Seongcheol Choi^{2*}

(Received February 13, 2020 / Revised March 7, 2020 / Accepted March 9, 2020)

In this study, the effect of cyclic wetting-drying on the self-healing of cementitious materials containing superabsorbent polymers (SAPs) were experimentally evaluated. In each cycle, cracked cement paste specimens containing various SAP dosages were exposed to wet conditions for 1 h, during which the capillary water absorption tests and water flow tests were conducted, and then exposed to dry conditions for 47 h. The capillary water absorption test results showed that the sorptivity values of the specimen without SAPs, SAP 0.5%, SAP 1.0%, and SAP 1.5% specimens were decreased by approximately 22.9%, 36.8%, 42.8%, and 46.3%, respectively, after 8 cycles. In addition, the water flow test results showed that the amount of water runoff through the cracks of all cracked specimens gradually decreased over wet/dry cycles, especially the reduction ratio of the amount of water runoff increased with increasing SAP dosage. Furthermore, the swelling behavior of SAPs in cracks by ingress water was confirmed via X-ray computed tomography (CT) analysis. These results indicate that the effective crack width can be reduced as SAPs absorb water and swell, while the water absorbed in SAPs can be released to crack surfaces under dry conditions, further promoting healing product formation. This study demonstrates that the incorporation of SAPs can increase the water tightness of cracks, thereby improving the self-healing efficiency of cementitious materials.

키워드 : 균열, 자기치유, 고흡수율 폴리머, 수밀성, 습윤/건조

Keywords : Crack, Self-healing, Superabsorbent polymer(SAP), Water tightness, Wetting-drying

1. 서 론

고흡수율 폴리머(SAPs: Super Absorbent Polymers)는 겔 내부와 외부 용액 사이의 삼투압 차이로 인해 자체 중량 대비 수백 배에 이르는 물을 흡수하여 팽윤할 수 있는 재료로써, 겔 구조의 용해 없이 주변 환경 조건에 따라 흡수한 물을 유지하거나 방출할 수 있는 특성을 갖고 있다(Kim and Park 2004). 이러한 특성으로 인해 SAPs를 다양한 목적으로 시멘트계 재료에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다(Mechtcherine et al. 2012). SAPs가 적용된 시멘트계 재료에 대한 기존 연구 중 가장 대표적인 연구

분야로는 물-시멘트 비율이 낮은 고강도/고성능 콘크리트의 자기 건조 및 자기수축의 완화(Jensen and Hansen 2001), 보통 콘크리트의 동결-융해 저항 성능 향상(Mönnig and Lura 2007), 균열을 통한 누수 방지 성능 향상(Hong and Choi 2017)이 대부분을 차지하고 있다. 특히, SAPs를 시멘트계 재료의 균열 자기치유 성능 향상을 위한 소재로서 적용한 최근의 연구 결과는(Hong and Choi 2017; Hong et al. 2020) SAPs가 시멘트계 재료의 급속 자기치유(rapid self-sealing) 및 장기 자기치유(long-term self-healing) 성능을 향상시키는데 도움이 될 수 있음을 나타내고 있다.

SAPs에 의한 균열 self-sealing 효과의 발현은 다음과 같이 정

* Corresponding author E-mail: schoi@cau.ac.kr

¹중앙대학교 토목공학과 박사후연구원 (Department of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang University, Seoul, 06979, Korea)

²중앙대학교 건설환경플랜트공학과 교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang University, Seoul, 06979, Korea)

의될 수 있다. 시멘트계 재료에 혼입된 SAP 입자들은 균열 발생에 따라 균열면으로 노출되며, 외부로부터 균열을 통해 유입되는 물을 흡수하여 급속하게 팽윤한다. 그에 따라 균열을 통한 물의 흐름이 수분 이내에 급속하게 차단될 수 있는 것이다(Hong and Choi 2018).

SAPs에 의한 균열 self-healing 효과의 발현은 다음과 같이 정의될 수 있다. 유입수를 흡수하여 팽윤된 SAP 입자들에 의해 유효 균열폭이 줄어들 뿐 아니라, 이후 건조 조건에 노출된 경우에도 SAPs는 흡수했던 물을 균열면에 공급하여 내부 양생 효과(internal curing effect)를 유발한다. 그로 인해 미수화 시멘트 입자들의 수화반응이 촉진되어 장기적으로 자기치유물 생성에 따른 autogenous healing 효율이 향상될 수 있는 것이다(Hong et al. 2020).

대부분의 현장 타설 콘크리트는 온도 및 상대습도(RH)가 변하는 대기에 노출되기 때문에, 온도 및 상대습도 변화에 따른 구속된 체적 변화로 인해 일반적으로 다수의 초기 균열이 발생한다(Springenschmid 1998). 또한, 대부분의 균열이 발생한 콘크리트 구조물은 지속적으로 물에 노출되지 않고 습윤/건조 반복 환경에 노출됨을 고려할 때, 실제 환경 조건(습윤/건조 반복)에서 SAPs에 의한 시멘트계 재료의 자기치유 효과에 대한 평가는 매우 중요한 의미를 갖는다. 또한, 자기치유의 주요 목적이 콘크리트의 내구성 저하를 유발하는 해로운 액체 또는 기체상태의 인자들이 균열을 통해 내부로 유입되는 것을 차단하는 것임을 고려할 때, 균열 수밀성(water tightness) 변화에 대한 평가는 자기치유 성능을 가늠할 수 있는 주요 지표 중 하나이다.

따라서 이 연구의 목적은 균열 발생 이후 습윤/건조 반복 환경에 노출된 SAPs를 포함한 시멘트계 재료의 자기치유 효율을 균열 수밀성 변화 분석을 통해 정량적으로 평가하는 것이다. 이를 위하여 흡수율시험(capillary water absorption test) 및 투수시험(water flow test)을 수행하였으며, 균열을 통한 흡수율 및 물 유출량의 변화를 모니터링 하였다. 또한, X-ray CT를 통해 균열 내 SAPs의 유입수에 의한 실제 팽윤 거동 및 치유 전/후 균열의 변화를 분석하였다.

2. 실험개요

2.1 사용 재료

기준 페이스트 혼합물은 보통 포틀랜드 시멘트(OPC: Ordinary Portland Cement, CEM I 42.5N)를 포함하고 있다. Table 1은 실험

에 사용한 페이스트 시편의 혼합물 조성을 나타내며, 물/시멘트 비(w/c)는 0.35로 하였다. 이 연구에서는 SAP의 함량을 변수로 하여 시편을 제작하였으며, 시편 이름에서 S 다음에 나오는 숫자는 시멘트 중량 대비 SAP 함량(%)을 나타낸다. SAP 혼입 페이스트 혼합물의 경우 SAP가 혼입되지 않은 기준 페이스트 혼합물과 동일한 유동성을 갖도록 하기 위하여, 믹싱 과정에서 SAP가 추가적으로 흡수하는 물의 양을 결정하였다.

Table 1. Composition of mortar mixtures

Specimen	d% SAP* (wt.%)	Cement (kg/m ³)	SAP (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Water in SAP (kg/m ³)
REF	-	1493.7	-	522.8	-
S-0.5	0.5	1384.1	6.9	484.4	69.2
S-1.0	1.0	1289.5	12.9	451.3	129.0
S-1.5	1.5	1206.9	18.1	422.4	181.0

* SAP dosage by weight of cement.

Table 2는 실험에 사용한 SAPs의 입도, 형상 및 팽윤 특성을 나타낸다. 사용 SAPs는 일반적으로 상용되는 제품으로, 벌크 중합(bulk polymerization)에 의해 생성된 불규칙한 모양의 흰색 파우더이며, 폴리아크릴산($-\text{CH}_2\text{CH}(\text{COOH})-$)_n, 아크릴산(acrylic acid)의 중합체)이다.

Table 2. Properties of the used SAPs

SAP type	Size	Shape	Absorption capacity(g/g)		
			DW	TW	FCPS
Poly(AA)	150-850μm	Irregular	139.5	113.1	31.5

Poly(AA)=Poly(acrylic acid), DW=distilled water, TW=tap water, and FCPS=filtered cement pore solution.

Fig. 1은 주사 전자 현미경(SEM: Scanning Electron Microscope, S-3400 N, Hitachi)을 사용하여 측정된 SAPs의 입자 크기 분포, 형상, 표면 질감을 나타낸다. SAPs의 팽윤 특성을 평가하기 위해, tea-bag test를 통해 SAPs의 초기 건조 상태 무게 대비 용액을 흡수하여 팽윤된 상태의 무게의 비율을 계산하여 흡수율(absorption capacity)을 측정하였다. Tea-bag test는 소량의 SAPs의 흡수율을 측정하는데 가장 일반적이며 용이하다. 실험에 사용한 SAPs는 흡수 용액에 관계없이 약 10분 이내에 최대 팽윤하는 특성을 나타냈기 때문에, 흡수율은 SAPs가 용액에 노출된 지 20분 후에 측정하였다. SAP의 흡수율의 크기는 DW, TW, FCPS 순으로 나타났다. 이는

SAP의 팽윤도가 노출 용액의 특성(pH, 이온 종류 및 농도)에 따라 달라지기 때문이다(Peppas et al. 2000). 특히 FCPS에는 Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , OH^- 등과 같은 다양한 이온을 포함하고 있어 높은 pH 및 이온 농도를 형성하며, Ca^{2+} 와 SAPs의 카르복실 그룹 간의 복합체 형성으로 인해 SAPs의 팽윤이 제한된다(Hong et al. 2019).

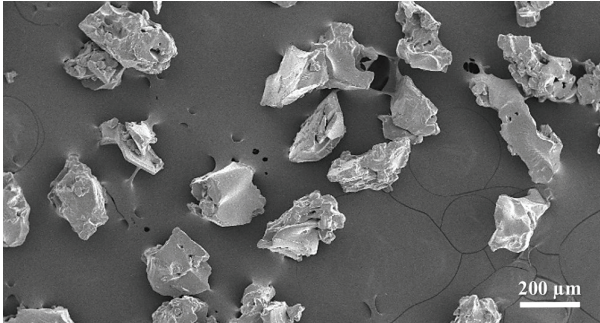


Fig. 1. SEM micrographs of the used SAP particles

2.2 시편 준비

SAPs가 혼입되지 않은 기준 페이스트 혼합물은 ASTM C 305에 따라 혼합되었다. SAPs가 혼입된 모르타르 혼합물은 SAP 입자들이 혼합 과정에서 골고루 분산될 수 있도록, 먼저 시멘트와 SAPs를 1분간 건비빔한 후에 ASTM C 305 절차에 따라 혼합되었다. 흡수율시험을 위해 치수 40mm×40mm×160mm인 각주형 시편을 제작하였으며, 투수시험을 위해 지름 70mm, 높이 30mm의 원통형 시편을 제작하였다. 모든 시험편은 타설 이후 일정한 온도 및 상대습도 조건에서 7일간 표준 양생($23 \pm 1^\circ\text{C}$; 100% RH)을 실시하였다.

Fig. 2는 흡수율시험 시편의 준비 절차를 나타낸다. 흡수율 시편의 경우 용이한 균열 유도 및 균열폭 제어를 위해 바닥면 중앙에 노치를 주었으며, 직경 3mm의 스테인리스 강봉 2개를 시편의 높이 방향으로 10mm 지점에 매립하였다. 양생 이후 3점 굽힘 시험(3-point bending test)을 통해 시편 중앙부에 힘 균열을 유발하였다. 시편 바닥에서 최대 균열폭이 약 250–300μm 범위가 되도록 균열을 제어하였으며, 실제 환경에서 균열 발생 이후 균열면에 노출되어 건조된 상태의 SAPs를 모사하기 위하여 균열이 유발된 시편을 72시간 동안 일정한 온도 및 습도 조건($20 \pm 1^\circ\text{C}$; 50% RH)으로 건조하였다. 이후, 시편 바닥면의 균열부(흡수 영역)를 제외한 모든 표면을 알루미늄 호일 테이프를 통해 밀봉하여, 흡수율시험 중에 균열을 통한 모세관 작용에 의해서만 물의 흡수가 가능하도록 하였다(Fig. 2).

Fig. 3은 투수시험 시편의 준비 절차를 나타낸다. 투수시험 시

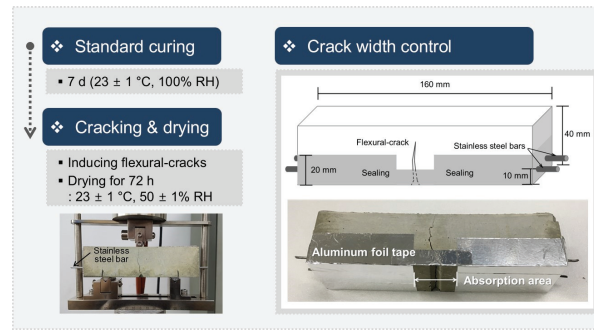


Fig. 2. Preparation procedure of specimens for the capillary water absorption test

편의 경우 균열 유도 방향의 수직 방향으로 직경 0.3mm의 스테인리스 강선을 설치하였는데(Fig. 3), 이는 균열 유도 과정에서 시편의 순간적인 분할에 따른 균열 표면의 SAPs의 유실 및 균열면의 손상을 방지하기 위함이다. 양생 이후 할렬 시험(splitting test)을 통해 모든 시편의 중앙에 관통 균열을 유발하였으며, 흡수율시험과 동일하게 72시간동안 건조시켰다. 건조 이후, 모든 시편에 대해 균열폭 제어(250–300μm) 및 투수시험 중에 균열을 제외한 시편 옆면으로의 물의 흐름을 방지하기 위하여, 균열면 양 끝단에 실리콘 시트(silicone sheet)를 삽입 하였으며 각 시편의 측면 중앙부를 클램프를 통해 고정하였다(Fig. 3).

모든 시험 시편의 제어 균열폭은 광학현미경(EGVM-456, EG Tech)을 통해 측정되었다. 시편의 표면 균열에서 5개의 측정 지점을 등간격으로 선택하였으며, 각 측정지점마다 균열폭을 2번씩 측정하여 평균 표면 균열폭을 계산하였다.

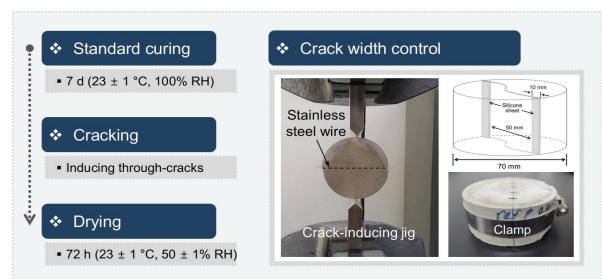


Fig. 3. Preparation procedure of specimens for the water flow test

X-ray CT 측정을 통해 균열 내 SAPs의 유입수에 의한 팽윤 거동을 분석하기 위해 직경 9mm, 높이 10mm의 작은 시편을 제작하였는데, 이는 최적의 이미지를 얻기 위함이다. 균열 유도 방법 및 양생 조건은 투수시험 시편과 동일하며, 부가적인 샘플 준비 방법은 이전 연구(Hong and Choi 2017)에 상세히 기술되어 있다.

또한, 압축강도를 평가하기 위하여 각각의 혼합물마다 9개씩 $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ 의 입방형 시편을 제작하였으며, ASTM C 109에 따라 재령 3일, 7일, 28일 강도를 측정하였다.

2.3 실험 방법

Fig. 4는 흡수율시험 방법을 나타낸다. 흡수율시험은 ASTM C 1585 기준을 토대로, 측정 시간 및 간격을 달리하여 실시하였다. ASTM C 1585에 따르면 흡수량(I)은 다음 식에 의해 산정될 수 있다.

$$I = \frac{\Delta W_t}{A \cdot d} \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

여기서, ΔW_t 는 시간 t 에서의 흡수된 물의 중량(g)이며, A 는 물에 노출된 시편의 면적(mm^2)이며, d 는 물의 밀도(g/mm^3)이다. 또한, 흡수율(sorptivity, S_n)은 다음 식에 의해 산정될 수 있다.

$$I = S_n \cdot t^{1/2} + I_0 \quad (\text{mm}/\text{h}^{1/2}) \quad (2)$$

여기서, S_n 은 시간의 제곱근($\text{s}^{1/2}$)에 대해 I 에 가장 잘 맞는 선의 기울기($I-t^{1/2}$ 그래프의 기울기)로 정의되며, 선형회귀분석을 통해 얻어진다. I_0 는 시편이 물에 접촉했을 때의 표면 효과에 의한 보정항(mm)이다. ASTM C 1585에 따르면 초기 흡수율(initial sorptivity) 및 2차 흡수율(secondary sorptivity)은 각각 시험 시작 1분부터 6시간까지 및 시험 시작 1일 후부터 7일까지의 흡수량의 변화에 대한 기울기 값으로 정의된다. Fig. 5와 같이, 초기 흡수율은 모세 공극(capillary pore), 균열폭, 균열 길이 및 비틀림 등에 크게 영향을 받으며, 2차 흡수율은 확산에 주로 영향을 받는다(Shim et al. 2018). 이 연구에서는 균열 자기치유에 따른 수분 흡수의 변화의 분석에 중점을 두었기 때문에, 초기 흡수율에 대해서만 평가를 실시하였다. 따라서 흡수율시험은 증류수를 사용하여 시험 시마다 총 60분 동안 수행되었으며, 시편의 흡수량 변화는 10분까지는 1분 간격으로 측정되었고, 10분부터 60분까지는 5분 간격으로 측정되었다. 그리고 초기 흡수율($\text{mm}/\text{s}^{1/2}$)은 시험 시작 1분부터 60분까지의 측정 결과를 통해 결정하였다.

흡수율시험은 16일 동안 8주기(8 cycles)의 습윤/건조 반복 조건에 따라 수행되었으며, 각 주기는 48시간으로 구성된다. 매 주기의 습윤 기간에는 통제된 환경 조건($20 \pm 1^\circ\text{C}$, $50 \pm 1\%$ RH)에서 1시간 동안 균열을 통한 흡수량을 측정하였으며, 측정이 완료된 시편

들은 일정한 온도 및 습도 조건($25 \pm 1^\circ\text{C}$; 40% RH)의 환경 챔버에서 47시간 건조되었다.

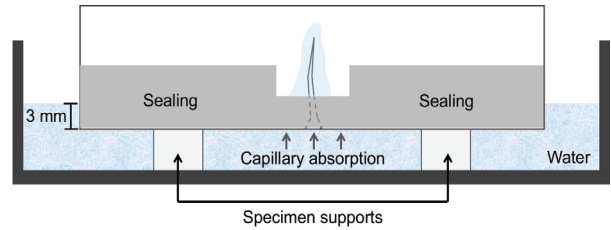


Fig. 4. Experimental setup for the capillary water absorption test

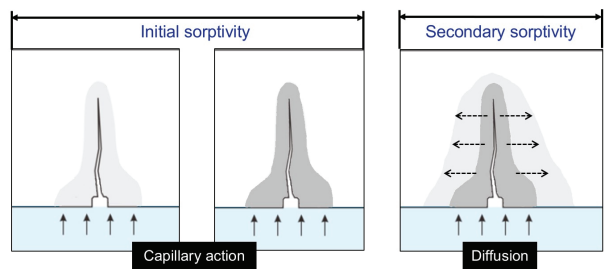


Fig. 5. Conceptual diagram of initial and secondary sorptivity

Fig. 6은 투수시험 방법을 나타낸다. 투수시험은 증류수를 사용하여 시편 상단으로부터 20mm의 정수두 조건으로 실시하였으며, 시험시마다 60분간 연속적으로 시간에 따라 균열을 통해 유출되는 물의 양을 모니터링 하였다. 실험 조건은 흡수율시험의 조건과 동일하게 진행되었으며, 매 주기마다 1시간 동안 균열을 통한 유출수량을 측정하였다.

X-ray CT 분석은 자기치유에 따른 균열의 변화 및 균열에서의 SAPs의 팽윤 거동을 확인하기 위해 실시하였다. 전자의 경우는 흡수율 시편을 활용하여 분석을 실시하였으며, X-ray CT (inspeXio SMX-225CT, Shimadzu)를 통해 8주기 동안의 흡수율 시험 전/후 시편의 균열부 이미지를 측정하여, SAPs 혼입 유무에 따른 균열 치유 정도를 비교하였다. 반면, 후자의 경우는 직경 9mm, 높이 10mm의 제조 시편을 활용하여 분석을 실시하였으며, X-ray CT(Skyscan 1172, Bruker)를 통해 투수시험 전/후의 시편에 대한 이미지 분석을 실시하여, 균열에서 유입수에 의한 SAPs의 팽윤 거동을 시각적으로 확인하였다. X-ray CT 시편에는 동일한 환경 및 수압 조건으로 1차례 투수시험을 실시하였으며(Fig. 6), 투수시험 이후 X-ray CT 스캔을 실시하기 전, 균열에 남아있는 물을 제거하기 위해 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 10% RH 조건에서 30분 동안 시편을

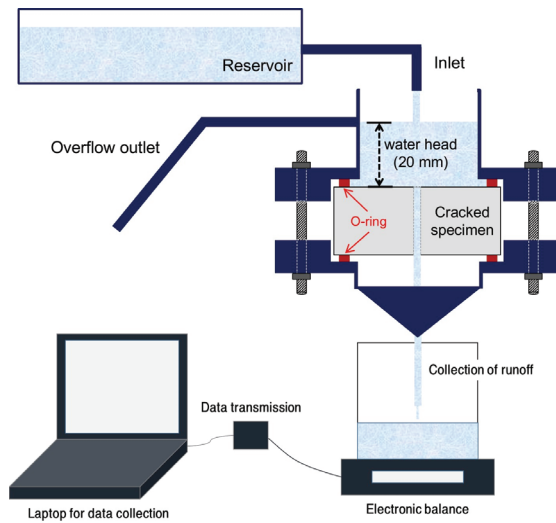


Fig. 6. Experimental setup for the water flow test

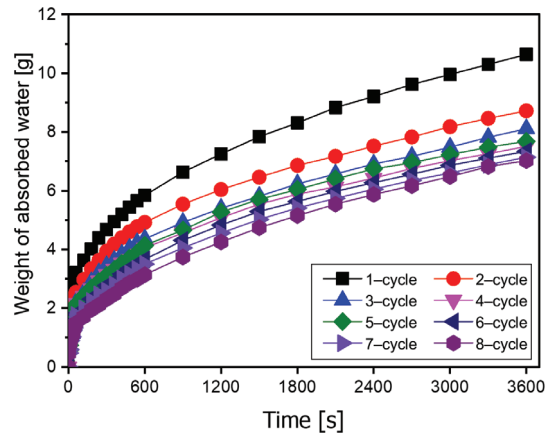
건조시켰다. CT 측정에 대한 세부 방법은 이전 연구(Hong and Choi 2017)에 상세히 기술되어 있다.

3. 실험결과 및 고찰

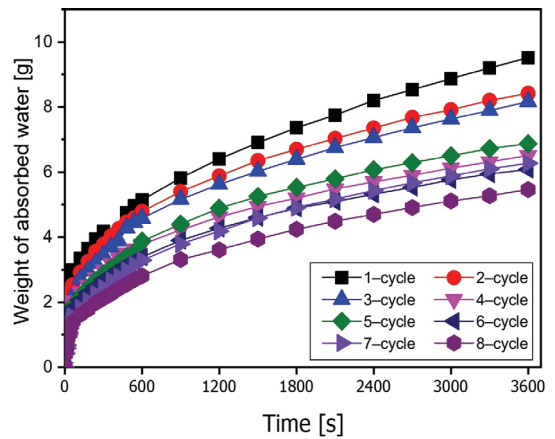
3.1 흡수율시험

Fig. 7은 흡수율시험 결과를 나타내며, 습윤/건조 반복 조건에서 시간에 따라 균열을 통해 흡수된 물의 중량의 변화를 나타낸다. 모든 시편에 대해 유사한 균열폭을 제어했음에도, 첫 번째 시험(1-cycle)에서의 1시간 동안 흡수된 물의 중량(g)은 REF 시편에 비해 SAP가 혼입된 S-series 시편에서 크게 나타났으며, SAP 함량이 증가할수록 흡수량도 증가했다. 이는 REF 시편의 경우 모세관 현상에 의해 균열이 포화되는데 필요한 물만 흡수한 반면, S-series 시편의 경우 균열면의 SAP 입자들이 추가적으로 물을 흡수했기 때문이다.

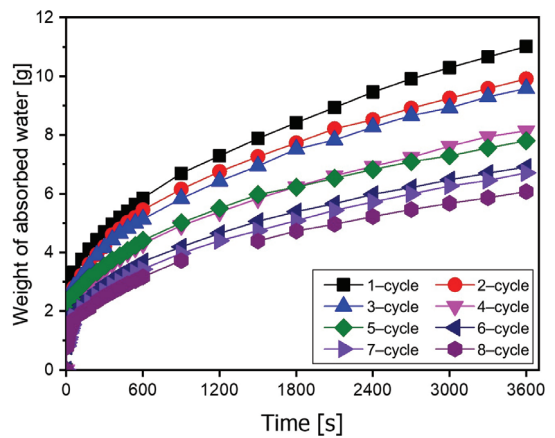
모든 시편의 흡수량은 습윤/건조 주기가 반복됨에 따라 점차 감소하였으며, 특히 대부분의 경우에 약 4-cycle 이내에서 가장 큰 감소를 보였다. 이는 균열 이후 균열면에 노출된 미수화 시멘트 입자들이 균열을 통해 흡수되는 물과 반응하여 수화생성물을 형성함에 따라 균열 자기치유(autogenous healing) 효과가 발현됐기 때문이다. 또한, 주기가 반복될수록 치유 효율은 감소하였는데, 이는 시멘트 매트릭스에서 균열에 이르는 Ca^{2+} 의 확산 속도와 미수화 시멘트 입자의 양이 점차 감소하기 때문이다(Huang et al. 2013).



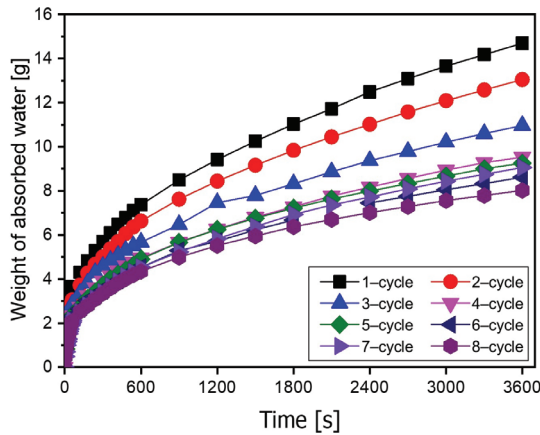
(a) REF



(b) S-0.5



(c) S-1.0



(d) S-1.5

Fig. 7. Variation in the weight of water absorbed with time in the capillary water absorption test under wet/dry cycles, for different specimens

Fig. 8은 배합별 시편들의 습윤/건조 반복에 따른 초기흡수율 (initial sorptivity, S_n)의 변화를 나타낸다. 초기흡수율 값은 Fig. 7의 각 주기에서의 흡수된 물의 중량(g) 결과를 토대로 식 (1) 및 식 (2)를 통해 계산되었다. REF 시편의 초기흡수율 값은 약 2주기 이후 거의 일정한 값을 나타냈으나, SAPs가 혼입된 S-series 시편의 초기흡수율 값은 습윤/건조 주기가 반복됨에 따라 지속적으로 감소하였다. 1주기 대비 8주기 이후 초기흡수율의 감소율(%)은 REF, S-0.5, S-1.0, S-1.5 시편에 대해 각각 22.9%, 36.8%, 42.8%, 46.3%로 나타났다. 감소율은 SAP 함량이 증가할수록 증가하였다.

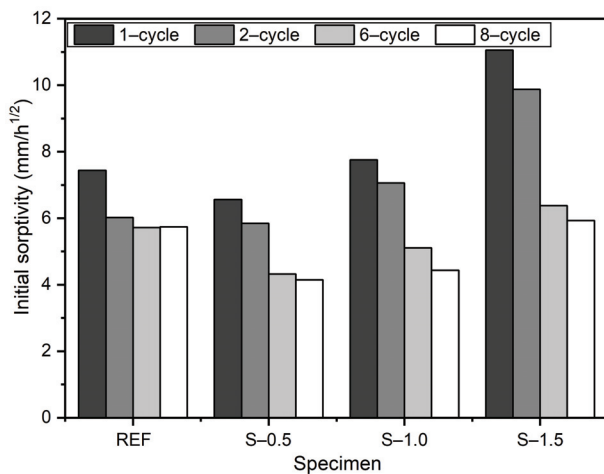


Fig. 8. Variation in initial sorptivity for the REF and S-series specimens under repeated wet/dry cycles

이 결과는 균열면에 위치한 SAP 입자들이 습윤 주기마다 흡수한 물을 건조 주기마다 주변 균열부에 공급함에 따라, 추가 수화반응이 촉진될 수 있음을 나타낸다. 다시 말해, SAPs의 내부 양생 효과(internal curing effect)에 의해 S-series 시편의 균열 표면에서 더 많은 치유생성물(healing products)이 형성되어, 모세관 현상에 의한 균열을 통한 수분 흡수가 감소되는 것으로 판단된다.

3.2 투수시험

Fig. 9는 투수시험을 통해 측정된 습윤/건조 반복에 따른 유량 (flow rate)의 변화를 나타낸다. 여기서, 유량은 매 주기마다의 측정 시간동안의 평균 유량을 나타낸다. 측정 주기에 따른 유량 감소율은 SAP 함량이 증가할수록 증가하였으며, 이는 Fig. 7 및 Fig. 8의 흡수율 시험 결과와 동일하다. 또한, 시편별로 유사한 균열폭을 유발하였음에도, SAP 함량이 증가할수록 첫 번째 실험 (1-cycle)에서의 유량이 감소하는 것으로 확인되었다. 이는 균열면에 위치한 SAP 입자들이 유입되는 물을 흡수하여 팽윤함에 따라, 유효 균열폭이 감소했기 때문이며(Fig. 11), 그로 인해 치유 생성물이 효율적으로 균열부를 충전함에 따라 장기적으로 자기치유 효율이 향상된 것으로 판단된다.

투수시험 결과는 균열 이후 습윤/건조 반복 조건에 노출된 시멘트계 재료에 SAP가 1.0% 이상 혼입될 경우, 낮은 수압 조건 (0.667mm/mm)에서 효과적으로 균열을 통한 물의 흐름을 차단할 수 있음을 나타낸다.

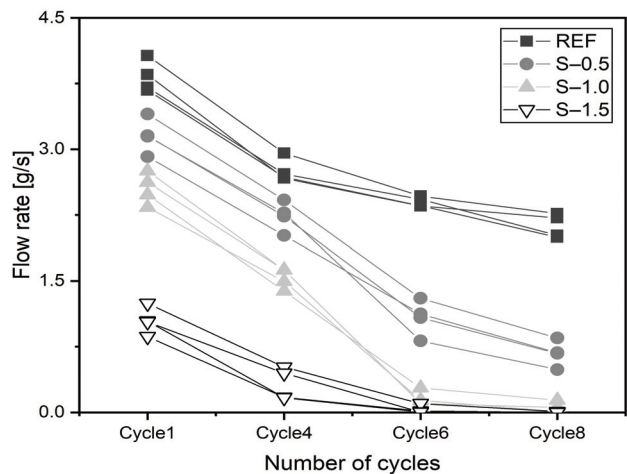
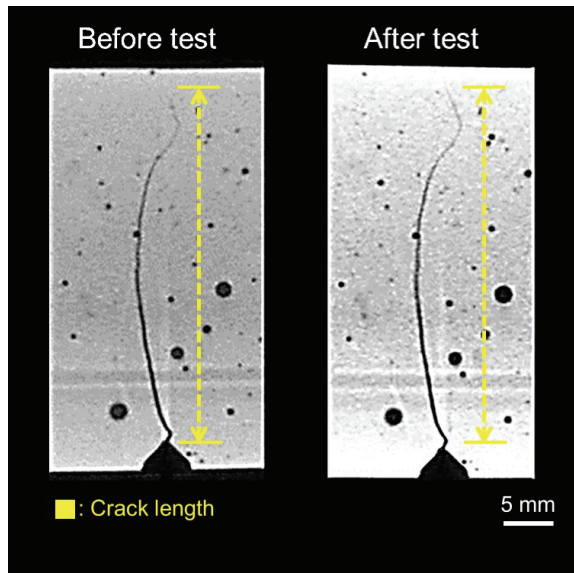


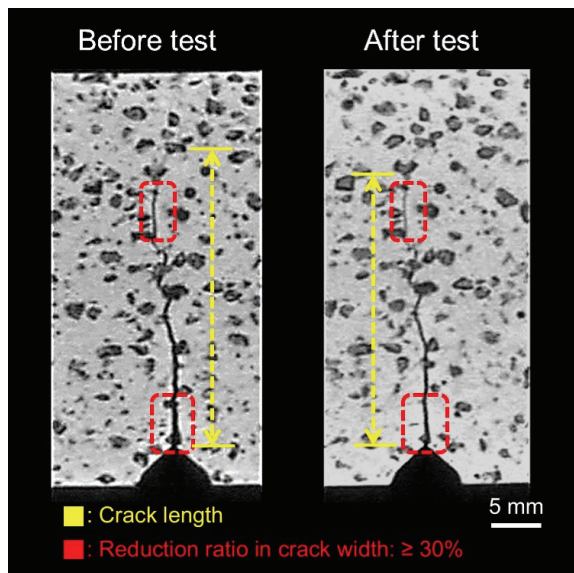
Fig. 9. Variation in flow rate for the REF and S-series specimens under repeated wet/dry cycles

3.3 X-ray CT 이미지 분석

Fig. 10은 8주기 동안의 흡수율 시험 전/후에 측정된 REF 및 S-1.5 시편의 균열부 X-ray CT 이미지를 나타낸다. REF 시편의 경우 시험 전/후 이미지에 차이가 없는 반면, S-1.5 시편의 경우는 균열의 폭 및 길이가 줄어든 것으로 확인되었다. 이는 앞서 말한 SAPs의 내부 양생 효과로 인해 균열 치유 효율이 향상됐기 때문이며, 흡수율시험 결과(Fig. 7 및 Fig. 8)가 타당함을 나타낸다.



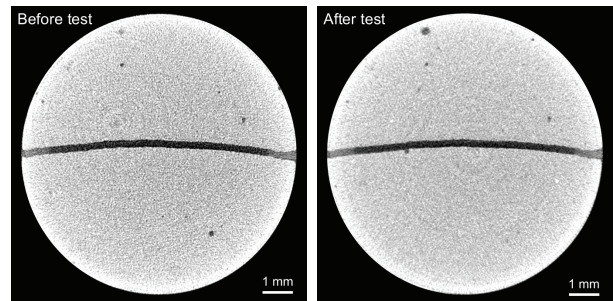
(a) REF



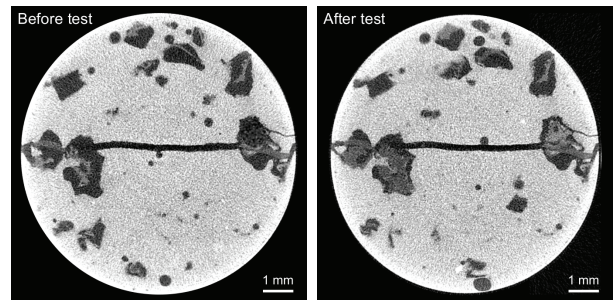
(b) S-1.5

Fig. 10. X-ray CT images of the capillary water absorption test specimens

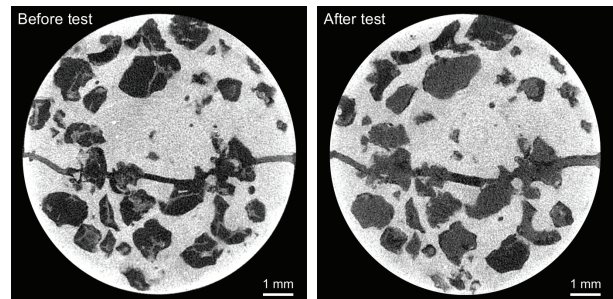
Fig. 11은 첫 번째 투수시험(1-cycle) 전/후에 측정된 REF 및 S-series 시편의 X-ray CT 이미지를 나타낸다. REF 시편의 경우 투수시험 전/후 이미지에 차이가 없었다. 반면, S-series 시편의 경우 시멘트 매트릭스 내에 다수의 공극이 확인되었으며, 투수시험 전 균열부의 공극 내에 건조되어 있던 SAP 입자들이 투수시험 이후 균열을 포함한 공극 내에서 팽윤하는 것으로 확인되었다. 이는 SAP 입자들은 최초 배합수를 흡수하여 팽윤함에 따라 공극을 형성하며, 균열이 발생 이후 균열면에 노출된 SAP 입자들이 유입수를 흡수하여 재 팽윤하는 것이다. 그로 인해 유효 균열폭이 감소되어, SAPs는 흡수한 물을 건조 조건에서 주변 균열부에 공급함에 따라 치유 생성물의 형성을 촉진하여 궁극적으로 자기치유 효율이 향상되는 것이다.



(a) REF



(b) S-0.5



(d) S-1.5

Fig. 11. X-ray CT images of the water flow test specimens

3.5 압축강도

Fig. 12는 REF 및 S-series 시편의 재령에 따른 압축강도를 나타낸다. REF 시편의 압축강도가 가장 크게 나타났으며, SAP 함량이 증가할수록 강도 감소는 커졌다. 이는 Fig. 10 및 Fig. 11과 같이, SAP 혼입에 따라 시멘트 매트릭스 내에 형성된 다수의 공극이 강도 저하를 유발했기 때문이며, SAP 함량이 증가할수록 시편 내부에 형성된 공극의 부피가 증가했기 때문이다. REF 시편의 28일 압축강도는 약 66.1MPa로 측정되었으나, S-series 시편의 강도는 각각 약 55.6MPa, 43.3MPa, 35.3MPa로 측정되어, REF 시편의 강도 대비 약 84%, 66%, 53% 수준으로 나타났다.

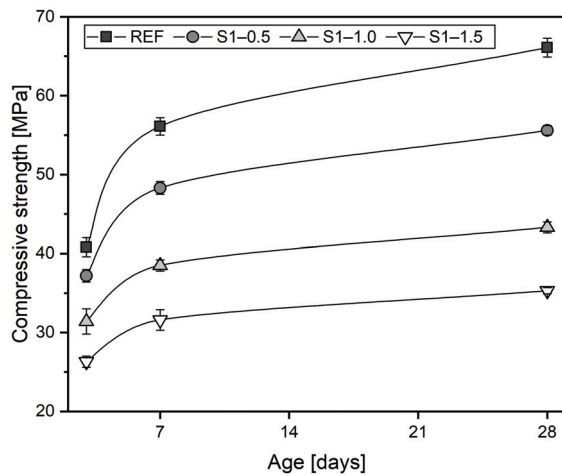


Fig. 12. Compressive strength development in specimens over time

4. 결론

이 연구에서는 실험적 분석을 통해 SAPs가 실제 콘크리트 일반적으로 노출되는 환경조건(습윤/건조 반복)에서 시멘트계 재료의 균열 자기치유 효율을 향상시킬 수 있는지를 확인하였다. 흡수율 시험 및 투수시험 결과, SAPs에 의해 균열 수밀성이 높아짐에 따라 궁극적으로 자기치유 효율이 향상되는 것으로 나타났으며, 투수시험 결과 습윤/건조 반복 조건에 노출된 시멘트계 재료에 SAPs가 1.0% 이상 혼입될 경우, 낮은 수압 조건에서 0.3mm 이하 균열을 통한 물의 흐름이 효과적으로 차단될 수 있는 것으로 확인되었다. X-ray CT 분석 결과 균열면의 SAP 입자들은 습윤 조건에서 팽윤하여 유효 균열폭을 감소시키며, 건조 조건에서 주변 균열부에 물을 공급하여 자기치유 효과를 촉진하는 것으로 나타났다.

연구 결과에 따르면 SAPs가 혼입된 시멘트계 재료는 균열 이후 지속적으로 물이 공급되지 않는 환경에서도 효과적으로 자기치유

를 발현할 수 있음을 시사한다. 하지만 이 연구에서는 제한된 조건(균열 특성, 치유 양생 기간, 노출 환경 조건 등)에 대한 결과를 포함하므로, 보다 다양한 환경 조건을 고려한 추가 연구가 요구된다. 또한, 향후 SAPs를 활용한 콘크리트의 실용화를 위해서는 자기치유 성능 발현과 동시에 수축 및 강도 저하 등을 최소화할 수 있는 SAPs의 최적 함량 및 배합을 도출하는 것이 요구된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(19SCIP-B103739-05)에 의해 수행되었습니다.

References

- ASTM C1585. (2004). Test Methods for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes, ASTM International, PA, USA.
- Hong, G.T., Choi, S.C. (2017). Rapid self-sealing of cracks in cementitious materials incorporating superabsorbent polymers, *Construction and Building Materials*, **143**, 366-375.
- Hong, G.T., Choi, S.C. (2018). Modeling rapid self-sealing of cracks in cementitious materials using superabsorbent polymers, *Construction and Building Materials*, **164**, 570-578.
- Hong, G.T., Song, C.W., Choi, S.C. (2020). Autogenous healing of early-age cracks in cementitious materials by superabsorbent polymers, *Materials* **13**(3), 690.
- Hong, G.T., Song, C.W., Park, J.S., Choi, S.C. (2019). Hysteretic behavior of rapid self-sealing of cracks in cementitious materials incorporating superabsorbent polymers, *Construction and Building Materials*, **195**, 187-197.
- Huang, H., Ye, G., Damidot, D. (2013). Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste, *Cement and Concrete Research*, **52**, 71-81.
- Jensen, O.M., Hansen, P.F. (2001). Water-entrained cement-based materials: I. Principles and theoretical background, *Cement and Concrete Research*, **31**(4), 647-654.
- Kim, D.J., Park, K.N. (2004). Swelling and mechanical properties

- of superporous hydrogels of poly(acrylamide-co-acrylic acid)/polyethylenimine interpenetrating polymer networks, *Polymer*, **45(1)**, 189–196.
- Mechtcherine, V., Reinhardt, H.W. (2012). Application of super absorbent polymers (SAP) in concrete construction, State-of-the-art Report of the RILEM TC 225-SAP, Springer, Heidelberg, Germany.
- Mönnig, S., Lura, P. (2007). Superabsorbent polymers—an additive to increase the freeze-thaw resistance of high strength concrete, C.U. Grosse (Ed.), *Advances in Construction Materials*, Berlin Heidelberg, Berlin, 351–358.
- Peppas, N.A., Bures, P., Leobandung, W.S., Ichikawa, H. (2000). Hydrogels in pharmaceutical formulations, *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, **50(1)**, 27–46.
- Shim, Y.W., Hong, G.T., Choi, S.C. (2018). Autogenous Healing of Early-Age Cementitious Materials Incorporating Superabsorbent Polymers Exposed to Wet/Dry Cycles, *Materials*, **11(12)**, 2476.
- Springenschmid, R. (1998). Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, E&FN Spon: New York, USA.

습윤/건조 반복 작용이 고흡수율 폴리머를 함유한 시멘트계 재료의 자기치유에 미치는 영향

이 연구에서는 고흡수율 폴리머(SAPs)를 포함하는 시멘트계 재료의 자기치유에 대한 습윤/건조 반복 작용의 영향을 실험적으로 평가하였다. 매 주기마다 SAP 함량을 변수로 하는 시멘트 페이스트 시편을 균열 이후 1시간 동안 습윤 조건에 노출시키고(흡수율시험 및 투수시험 진행), 47시간 동안 건조 조건에 노출시켰다. 흡수율시험 결과 SAP 미혼입 시편, SAP 0.5%, SAP 1.0%, SAP 1.5% 혼입 시편의 균열을 통한 흡수율이 각각 1주기 대비 8주기 이후 22.9%, 36.8%, 42.8%, 46.3% 감소한 것으로 나타났다. 또한, 투수시험 결과 모든 시편의 균열을 통한 물 유출량은 습윤/건조 주기에 따라 점차 감소하였으며, 특히 SAP 함량이 증가할수록 유량 감소율은 증가하였다. 또한, X-ray CT 분석을 통해 균열 내 SAPs의 유입수에 의한 팽윤 거동이 확인되었다. 실험 결과는 SAPs가 유입수를 흡수하여 팽윤함에 따라 유효 균열폭이 감소될 수 있고, SAPs는 흡수한 물을 건조 조건에서 주변 균열부에 공급함에 따라 치유 생성물의 형성을 촉진시킬 수 있음을 나타낸다. 이 연구의 결과는 SAPs의 혼입이 균열의 수밀성을 증가시킴에 따라 시멘트계 재료의 자기치유 성능을 향상시킬 수 있음을 나타낸다.