

PCC(Powder Compacted Capsule) 크기 및 혼입율에 따른 자기치유 모르타르의 공학적 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Engineering Properties of Self-healing Mortar according to PCC(Powder Compacted Capsule) Size and Mixing Ratio

이재인¹ · 김채영² · 최세진^{3*}

Jae-In Lee¹ · Chae-Young Kim² · Se-Jin Choi^{3*}

(Received November 15, 2022 / Revised December 6, 2022 / Accepted December 6, 2022)

In this study, as part of a study to improve the self-healing performance of concrete structures by applying self-healing capsules made of cementitious materials to cement composite materials, the engineering characteristics of mortars according to PCC(Powder Compacted Capsule) size and mixing ratio were compared and analyzed. For this, fluidity, compressive strength, reload test, carbonation, ultrasonic velocity, and water permeability characteristics were measured according to PCC size and mixing ratio of mortar. As a result of the measurement, the fluidity and compressive strength increased as the mixing ratio of PCC increased, and in the case of the load reload test, the healing ratio increased as the mixing ratio of PCC increased in the o3PC formulation. In the case of water permeability test, it was found that when PCC was used, the reduction ratio of water flow was up to 35 % higher than that of Plain, and when PCC with a size of 0.3 to 0.6 mm was mixed with 15 %, it was found to be effective in improving the crack healing ratio of the mortar.

키워드 : 자기치유, 자기치유캡슐, 모르타르, 플로우, 압축강도

Keywords : Self-healing, Self-healing capsule, Mortar, Flow, Compressive strength

1. 서론

콘크리트는 높은 압축강도와 낮은 단위가격으로 건설산업에서 대표적으로 사용되는 재료 중 하나이다(Choi et al,2021; Lee et al 2022). 그러나 수축 및 외부 환경 등의 요인으로 인해 균열을 수반하게 되며 발생한 균열을 통하여 콘크리트 내부에 염소이온, CO₂ 등의 유해인자가 유입되어 콘크리트의 열화 및 부식이 발생하게 된다(Liu et al. 2021; Cheng et al. 2016). 최근에는 이와 같은 콘크리트의 문제점을 보완하기 위해 콘크리트가 스스로 균열을 치유하는 자기치유 콘크리트에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Van Mullem et al. 2020; Chen et al. 2019; Hu et al. 2018; Wiktor and Jonkers 2011). 콘크리트는 시멘트의 수화반응과 수산화칼슘

탄산화에 의해 균열을 치유하는 자생적 균열 치유를 하나 수분을 필수적으로 요하며 매우 작은 크기의 균열에만 적용이 가능하다 (Lv and Chen 2014). 따라서 더 큰 균열에 적용이 가능한 자율적 균열 치유 방법이 개발되고 있는 실정으로 미생물을 활용한 자기 치유 및 시멘트계 재료를 캡슐화 하여 콘크리트 내부에 혼입하는 자기치유 연구 등이 이루어지고 있다(Luo et al. 2015; Jonkers 2021; Wang et al. 2014; Luo et al. 2018).

Luo et al.(2015)의 연구에서는 박테리아 기반 자기치유 콘크리트의 균열 치유 능력에 영향을 미치는 요인에 대하여 검토하였다. 검토 결과 박테리아를 혼입한 시멘트 페이스트 시편 균열부에 층상 형태의 침전물이 형성되었으며 균열 치유율의 경우 균열 폭이 증가하고 재령이 증가할수록 균열 치유율은 감소한다고 보고하였

* Corresponding author E-mail: csj2378@wku.ac.kr

¹원광대학교 건축공학과 석사과정 (Department of Architectural Engineering, Wonkwang University, Iksan, Iksandaero 460, Korea)

²원광대학교 건축공학과 학부생 (Department of Architectural Engineering, Wonkwang University, Iksan, Iksandaero 460, Korea)

³원광대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Wonkwang University, Iksan, Iksandaero 460, Korea)

다. Jonkers(2021)의 연구에서는 다공성 팽창 점토에 박테리아를 첨가한 화학 첨가제를 사용한 콘크리트의 자기치유 성능을 검토하였으며 검토 결과 박테리아를 첨가한 시편의 경우 균열의 완전한 치유가 발생되었지만 박테리아를 첨가하지 않은 시편의 경우 균열의 일부만이 치유되었다고 보고하였다. Wang et al.(2014)의 연구에서는 박테리아를 마이크로캡슐화 하여 사용한 자기치유 콘크리트에 대하여 검토 하였으며 검토 결과 박테리아를 마이크로캡슐화 하여 사용한 시편이 박테리아를 사용하지 않은 시편에 비해 상대적으로 높은 치유 비율을 나타내었다고 보고하였다. Luo et al.(2018)의 연구에서는 곱팡이를 사용한 콘크리트의 성능을 검토 하였다. 검토 결과 곱팡이를 사용할 경우 pH가 급격히 증가하였으며 SEM 및 XRD를 통해 진균 균사에서 석출된 결정이 탄산칼슘으로 구성되어 있다고 보고하였다. 한편 시멘트계 재료를 시멘트 복합체에 그대로 적용하거나(Choi et al. 2022; Van Tittelboom and De Belie 2013; Li et al. 2018; Sahmaran et al. 2013; Tang et al. 2015) 시멘트계 재료를 마이크로캡슐화 하여 시멘트 복합체에 적용하고자 하는 연구도 다수 보고되고 있다(Liu et al. 2017; Zhang et al. 2018; Li et al. 2013; Yoon et al. 2022). Liu et al.(2017)의 연구에서 시멘트 복합재료를 적용한 콘크리트의 미세 균열 치유 성능을 검토하여 검토 결과 시멘트 복합재료를 적용한 배합에서 미세균열의 자기치유가 관찰되고 기계적 특성이 부분적으로 회복되었다고 보고하였다. Zhang et al.(2018)의 연구에서는 시멘트계 복합재료의 다중 미세균열 자가 치유 거동을 검토하였으며 검토 결과 플라이애시와 Ca(OH)₂ 용액을 사용할 경우 포졸란 반응을 촉진하여 치유반응을 촉진시키며 균열의 폐쇄 정도가 크게 증가 하였다고 보고하였다. Li et al.(2013)의 연구에서는 마이크로 캡슐을 포함하는 시멘트질 재료의 자기치유 효율에 대하여 검토하였으며 캡슐을 1% 혼입한 배합에서 치유율이 우수하였고 2%를 혼입할 시 치유율이 감소하였다고 보고하였다. Yoon et al.(2022)의 경우 시멘트계 재료기반의 균열 자기치유 환을 혼입한 모르타르의 균열 치유 성능을 검토하였으며 검토 결과 0.5 mm 폭의 균열을 유도한 시편의 재령 56일 균열 치유율의 경우 32~37%로 일반 시편에 비해 약 5배 높은 수준을 나타내었다고 보고하였다.

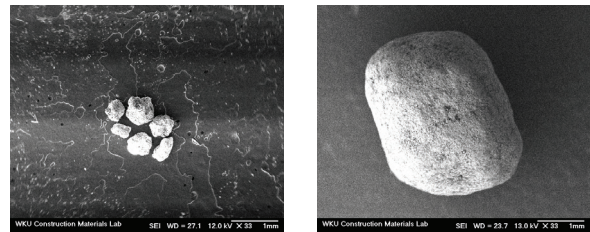
본 연구는 시멘트 복합체에 시멘트계 재료로 구성된 자기치유

캡슐을 적용하여 콘크리트 구조물의 자기치유 성능을 향상시키기 위한 연구의 일환으로 PCC(Powder Compacted Capsule) 크기 및 혼입율에 따른 모르타르의 유동성, 압축강도, 하중재부하 시험, 탄산화, 초음파속도 및 투수 특성 등을 비교·분석하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료

본 연구에 사용된 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트 (한일현대시멘트, 한국)를 사용하였다. 천연잔골재의 경우 비중 2.60, 조립율 2.45의 남원산 산모래를 사용하였다. PCC의 경우 기존문헌(Choi et al. 2022)을 참고하여 크기 0.3~0.6 mm, 2.5~5.0 mm의 PCC를 제조하였으며 사용재료의 경우 보통 포틀랜드 시멘트 (한일현대시멘트), 고로슬래그 미분말 3종 (대한슬래그) 및 플라이애시 2종 (당진화력발전소)을 사용하였다. PCC 제조의 경우 시멘트, 고로슬래그 미분말, 플라이애시를 교반하여 제조하였으며 교반시 응집력 향상을 위해 PVA (Amos, 한국)를 사용하였다. 또한 시험체 제작시 수화하는 것을 방지하기 위해 폴리우레탄(Jevisco, 한국)을 이용해 코팅을 진행하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 시멘트계 재료의 화학적 특성을 나타내었으며 Fig. 1은 사용된 PCC의 SEM Image를 나타낸 것이다.



(a) 0.3~0.6 mm SEM image (b) 2.5~5.0 mm SEM image

Fig. 1. PCC(Powder Compacted Capsule) SEM image

2.2 실험방법

Table 2는 본 연구에 사용된 실험배합을 나타낸 것으로 물결합

Table 1. Chemical composition of cementitious material

Components	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Blaine (cm ² /g)	Density (g/cm ³)
Cement	17.43	6.50	3.57	64.40	2.55	1.17	3,430	3.15
Blast furnace slag powder	30.61	13.98	0.32	40.71	6.43	0.60	4,210	2.93
Fly ash	64.88	20.56	6.06	2.58	0.80	1.45	3,710	2.21

Table 2. Mix proportion

Mix.	W/B (%)	S/a (%)	PCC size (mm)	PCC (S*%)	Unit weight (kg/m ³)			
					W ¹⁾	C ²⁾	S ³⁾	PCC ⁴⁾
Plain	50	42	-	-	170	340	739	-
03PC05			0.3~0.6	5	170	340	702	37
03PC10				10	170	340	665	74
03PC15				15	170	340	628	111
25PC05			2.5~5.0	5	170	340	702	37
25PC10				10	170	340	665	74
25PC15				15	170	340	628	111

1)Water, 2)Cement 3)Sand, 4)Powder Compacted Capsule

재비는 50 %로 고정하였으며 PCC의 경우 천연잔골재 대체재로서 크기 0.3~0.6 mm 및 2.5~5.0 mm의 PCC를 각각 천연잔골재 질량에 대하여 5, 10, 15 % 대체하여 사용하였다. 시험체의 경우 압축강도 및 하중재부하 시험은 50 × 50 × 50 mm 큐빅형 시험체, 초음파속도의 경우 40 × 40 × 160 mm 각주형 시험체, 탄산화 깊이의 경우 Ø50 × 100 mm 원주형 시험체, 정수위투수 시험의 경우 Ø100 × 50 mm 원주형 시험체를 제작하였으며 시험체 제작 24시간 이후 탈형하였다. 양생의 경우 소요의 재령까지 20 °C 수 중양생을 실시하였다.

2.3 측정방법

Table 3은 본 연구의 측정항목 및 규준을 나타낸 것으로 측정항목의 경우 캡슐을 혼입할 시 유동성과 압축강도의 감소가 발생하고 내부 공극이 증가한다는 기존연구에 따라 PCC를 혼입한 시멘트 복합체의 유동성, 압축강도 및 내부의 밀실함을 확인하기 위해 초음파속도, 탄산화 깊이 등을 선정하였다. 또한 자기치유 캡슐인 PCC를 사용함에 따른 자기치유 성능 평가를 위해 정수위투수 시험을 선정하였다. Table 3에서 볼 수 있듯이 모르타르 플로우 및 압축강도의 경우 KS L 5105 시험방법에 준하여 측정을 진행하였다. 하중재부하 시험의 경우 재령 28일 압축강도를 기준으로 약 80 %의 하중을 하중재부하용 시편에 가한 후 재양생 28일 후에 압축강도를 측정하였다. 탄산화 시험은 KS F 2584 “콘크리트의 촉진 탄산화 시험방법”에 따라 CO₂ 농도 5 % 환경 하에서 촉진 탄산화시험 챔버를 사용하여 소요의 재령까지 촉진 탄산화 시킨 후 페놀프탈레인 용액을 이용하여 탄산화 깊이를 측정하였다. 초음파속도의 경우 콘크리트 초음파 탐상기(Pundit, Proceq, 스위스)를 이용하여 KS F 2731 시험방법에 준하여 측정을 진행하였다. 정수위투수 시험의 경우 KCI-CT114 시험방법에 따라 재령 28일에

시험체 할렬 후 할렬 부위에 이물질 제거하였으며 균열 유도를 위해 실리콘 시트를 시험체 양 측면에 부착하였다. 또한 균열 폭의 조절을 위해 클램프로 상하부를 고정된 후 균열 폭을 0.2 mm로 조절하였으며 소요재령에 따라 측정하였다. 미세구조 분석의 경우 SEM(SERON, AIS1800C, 한국) 및 EDS(OXFORD INSTRUMENTS, Xplore, 영국)를 통해 미세구조와 성분 분석을 진행하였다.

Table 3. Test item and standard

Test item	Standard	Age (days)
Mortar flow	KS L 5105	-
Compressive strength	KS L 5105	7, 28
Reloading test of compressive strength	-	7, 28
Ultrasonic pulse velocity	KS F 2731	7, 28, 56
Carbonation depth	KS F 2584	28
Ratio of water flow	KCI-CT 114	0, 7, 14, 21, 28
SEM & EDS	-	28 days of after reload

3. 실험결과

3.1 모르타르 플로우

PCC혼입율에 따른 모르타르의 플로우 변화를 나타낸 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 Plain배합의 경우 약 169 mm의 플로우를 나타내었다. 03PC배합의 경우 약 159~179 mm의 플로우를 나타내었으며 0.3 mm 크기의 PCC를 5 % 혼입한 03PC05배합에서 약 179 mm의 플로우로 03PC 배합중 가장 높은 플로우를 나타내었다. 03PC15배합의 경우 약 159 mm의 가장 낮은 플로우로 Plain배합에 비해 약 6 % 낮은 수준을 나타내었다. 25PC배합의 경우 약

161~188 mm의 플로우를 나타내었으며 03PC배합과 유사하게 PCC를 5% 혼입한 25PC05배합이 약 188 mm의 가장 높은 플로우를 나타내었다. 모르타르 플로우의 경우 PCC를 사용한 배합의 경우 Plain배합에 비해 약 6~21% 높은 플로우를 나타내었는데 이는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 PCC의 경우 둥근 입형을 가지고 있어 거친 표면을 가진 천연잔골재에 비해 유동성이 증가한 것으로 사료된다. 또한, PCC의 혼입율이 증가함에 따라 플로우가 저하되는 경향은 배합중 손상된 일부 PCC의 원재료가 누출되어 일부 배합수를 흡수하여 나타난 현상으로 판단된다.

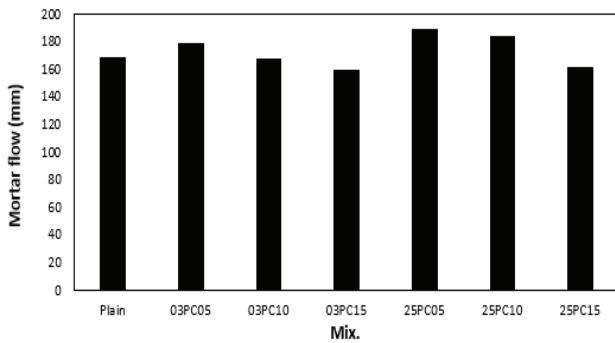


Fig. 2. Mortar flow

3.2 압축강도

PCC혼입율에 따른 모르타르의 재령별 압축강도를 나타낸 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 재령 7일의 경우 Plain배합에서 약 34.6 MPa의 압축강도를 발현하였다. 03PC배합의 경우 PCC를 5% 사용한 03PC05배합의 압축강도가 약 34.3 MPa로서 전체배합 중 가장 낮은 압축강도를 발현하였으며 03PC10배합에서 약 39.3 MPa의 압축강도로 03PC배합중 가장 높은 압축강도를 발현하였다. 25PC배합의 경우 PCC를 15% 혼입한 25PC15배합이 약 41.6 MPa의 압축강도로 Plain배합에 비해 약 17% 높은 압축강도를 나타내었다. 또한 25PC배합의 경우 PCC의 혼입율이 증가할수록 압축강도가 증가하는 경향을 나타내었으며 25PC05배합에서 약 37.5 MPa의 압축강도로 25PC배합 중 가장 낮은 압축강도를 발현하였다.

재령 28일 압축강도의 경우 Plain배합에서 약 36.7 MPa의 가장 낮은 압축강도를 발현하였다. 03PC배합의 경우 PCC를 15% 혼입한 03PC15배합에서 약 49.6 MPa의 가장 높은 압축강도로 Plain배합에 비해 약 35% 높은 압축강도를 나타내었다. 03PC05배합의 경우 약 45.0 MPa의 압축강도로 03PC배합 중 가장 낮은 압축강도를 발현하였으나 Plain배합에 비해 약 22% 높은 압축강도를 나타내었다. 25PC배합의 경우에도 03PC배합과 유사하게 PCC를

15% 혼입한 25PC15배합이 약 48.8 MPa의 압축강도로 25PC배합 중 가장 높은 압축강도를 나타내었으며 25PC05배합의 경우 약 44.8 MPa의 가장 낮은 압축강도를 나타내었다. 28일 압축강도의 경우 PCC크기에 관계없이 PCC의 혼입율이 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 경향을 나타내었으며 03PC배합의 경우 Plain배합에 비해 최대 약 35%, 25PC배합의 경우에도 최대 약 33% 높은 압축강도를 나타내었다. PCC를 혼입한 배합에서 Plain배합에 비해 상대적으로 높은 압축강도를 나타낸 것은 배합시 일부 PCC의 손상으로 PCC를 구성하던 재료가 누출되어 일정량의 물을 흡수함으로써 물결합재비가 감소된 측면과(Jiang et al, 2021) 누출된 재료가 흡수된 물과 반응한 것에 기인한 것으로 사료된다. 따라서 향후 PCC의 손상 및 사전수화를 방지하기 위해 균질한 코팅층의 형성이 필요할 것으로 판단된다.

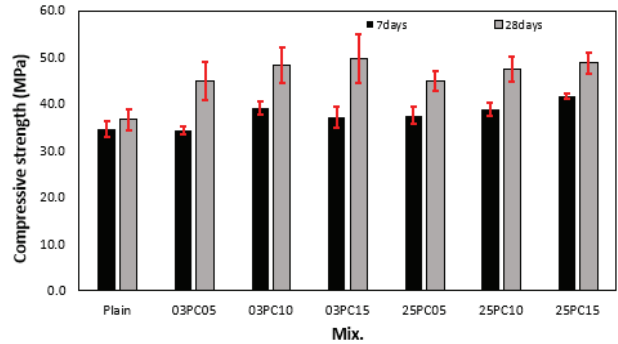


Fig. 3. Compressive strength

3.3 하중재부하 시험

PCC혼입율에 따른 모르타르의 치유재령별 압축강도를 나타낸 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 치유재령 7일의 경우 Plain배합에서 약 28일 압축강도 대비 91% 수준의 압축강도를 발현하였다. 03PC배합의 경우 03PC05배합이 28일 압축강도 대비 78% 수준의 압축강도를 나타내었다. 03PC10배합의 경우 28일 압축강도 대비 약 74%의 발현율로 전체 배합 중 가장 낮은 압축강도를 나타내었다. 03PC15배합의 경우 28일 압축강도 대비 약 86%의 발현율을 나타내었으며 03PC배합 중 가장 높은 압축강도를 나타내었다. 25PC배합의 경우 25PC05배합에서 28일 압축강도 대비 90%의 발현율을 나타내었으며 PCC를 사용한 배합 중 가장 높은 압축강도를 나타내었다. 25PC15배합의 경우 28일 압축강도 대비 약 85%의 수준으로 25PC배합 중 가장 낮은 압축강도를 나타내었다.

치유재령 28일의 경우 Plain배합에서 약 94%의 압축강도를 나타내었다. 03PC배합의 경우 PCC를 15% 혼입한 03PC15배합

이 28일 압축강도 대비 약 96 %의 압축강도를 나타내었다. 03PC05배합의 경우 약 77 %의 발현율로 전체 배합 중 가장 낮은 압축강도를 나타내었다. 25PC배합의 경우 25PC05배합이 약 110 %의 발현율로 28일 압축강도에 비해 상대적으로 증가한 압축강도를 발현하였다. 25PC15배합의 경우 약 86 %의 발현율로 25PC배합 중 가장 낮은 압축강도를 나타내었다. 또한 03PC배합의 경우 PCC의 혼입율이 증가함에 따라 발현율이 증가하였지만 25PC배합의 경우 이와 상이하게 PCC의 혼입율이 증가함에 따라 발현율은 감소하는 경향을 나타내었다.

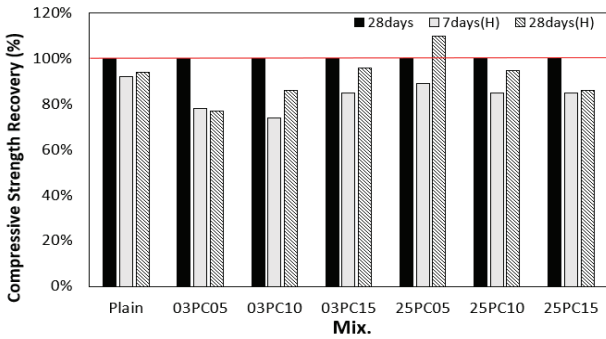


Fig. 4. Reloading test result of compressive strength

3.4 초음파속도

PCC혼입율에 따른 모르타르의 재령별 초음파속도 변화를 나타낸 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 재령 7일 초음파속도의 경우 Plain배합에서 약 3.94 km/s의 초음파속도를 나타내었다. 03PC배합의 경우 03PC05배합의 초음파속도가 약 3.94 km/s로 Plain배합과 유사한 수준을 나타내었다. 03PC10, 03PC15배합의 경우 각각 3.92 km/s, 3.88 km/s의 초음파속도로 PCC의 혼입율이 증가함에 따라 초음파속도가 느려지는 경향을 나타내었다. 이는 PCC의 경우 시멘트, 플라이애시, 고로슬래그 미분말을 혼합한 캡슐로서 천연잔 골재에 비해 내부 밀도가 낮는데 기인한 것으로 사료되며 향후 PCC를 사용한 시멘트 복합체의 미세구조와 초음파속도 및 역학적 성과의 상관관계에 관한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 25PC배합의 경우에도 03PC배합과 유사하게 PCC의 혼입율이 증가함에 따라 초음파속도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 25PC05배합에서 약 3.87 km/s의 초음파속도로 25PC배합 중 가장 빠른 초음파속도를 나타내었으며 25PC15배합에서 약 3.66 km/s의 가장 낮은 초음파속도를 나타내었다.

재령 28일의 경우 Plain배합에서 약 4.12 km/s의 가장 빠른 초음파속도를 나타내었다. 03PC배합의 경우 03PC10배합의 초음파

속도가 약 4.11 km/s로 Plain배합과 유사한 수준을 나타내었다. 03PC05배합 및 03PC15배합의 경우 약 4.00~4.07 km/s의 유사한 초음파속도를 나타내었다. 25PC배합의 경우 7일 초음파속도와 유사하게 PCC의 혼입율이 증가함에 따라 초음파속도가 감소하는 것으로 나타났다. 재령 56일 초음파속도의 경우에도 Plain배합에서 가장 빠른 초음파속도를 나타내었으며 03PC배합의 경우 03PC10배합의 초음파속도가 약 4.25 km/s로 Plain배합과 유사한 수준을 나타내었다.

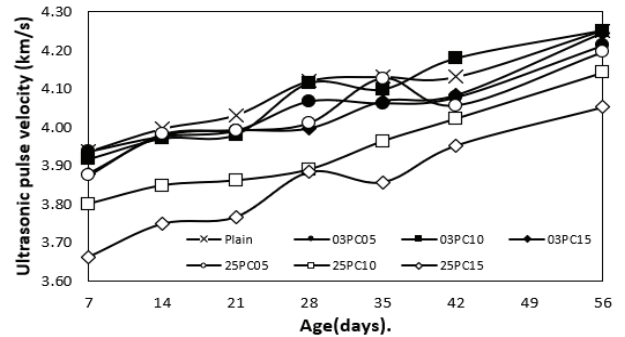


Fig. 5. Ultrasonic pulse velocity

3.5 탄산화깊이

PCC혼입율에 따른 모르타르의 촉진 재령 28일 탄산화깊이를 나타낸 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 Plain배합에서 약 1.82 mm의 가장 큰 탄산화깊이를 나타내었다. 03PC배합의 경우 PCC의 혼입율이 증가함에 따라 탄산화깊이가 낮아지는 경향을 나타내었으며 03PC15배합에서 약 1.08 mm의 가장 낮은 탄산화깊이를 나타내었다. 03PC05배합의 경우 약 1.58 mm의 탄산화깊이로 03PC배합 중 가장 높은 탄산화깊이를 나타내었으나 Plain배합에 비해 약 13 % 낮은 탄산화깊이를 나타내었다. 25PC배합의 경우 03PC배합과는 상이한 경향으로 PCC의 혼입율이 증가함에 따라 탄산화깊이가 높아지는 경향을 나타내었다. 25PC15배합의 탄산화깊이의 경우 약 1.58 mm로 03PC05배합(1.58 mm)과 유사한 수준을 나타내었다. 25PC05배합의 경우 약 1.20 mm의 가장 낮은 탄산화깊이로 Plain배합에 비해 약 34 % 낮은 탄산화깊이를 나타내었다. 탄산화깊이의 경우 PCC를 사용한 배합이 Plain배합에 비해 약 14~38 % 낮은 탄산화깊이를 나타내었는데 이는 Fig. 30에서 볼 수 있듯이 PCC를 사용한 배합이 Plain배합에 비해 상대적으로 높은 압축강도를 발현한 경향과 유사하게 PCC의 사용으로 인해 시멘트 복합체 내부가 치밀하게 조직되어 탄산화깊이가 감소한 것으로 사료된다.

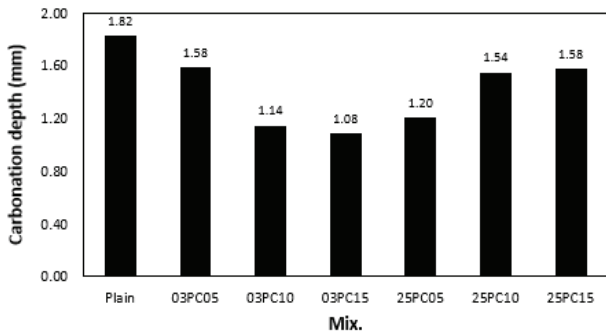


Fig. 6. Carbonation depth

3.6 정수위투수

PCC혼입율에 따른 모르타르의 재령별 정수위투수 시험을 통해 측정된 유출수량 및 유출수량 감소율을 나타낸 Table 4와 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 0일 초기 유출수량의 경우 Plain배합에서 약 3914.8 ml로 측정되었으며, 03PC배합은 1097.1 ml~2490.5 ml, 25PC배합의 경우 626.1 ml~1159.8 ml로 측정되었다. 치유재령 7일 경과 후 Plain배합의 유출수량의 경우 약 3% 감소한 것으로 나타났다. 03PC배합의 경우 PCC의 혼입율이 증가함에 따라 유출수량의 감소율이 낮아졌으며 03PC05배합의 유출수량 감소율이 약 10%로 가장 높은 감소율을 나타내었고 03PC15배합의 유출수량 감소율의 경우 약 8%로 03PC배합 중 가장 낮은 감소율을 나타내었다. 25PC배합의 경우 25PC10배합의 유출수량 감소율이 약 10%로 25PC배합 중 가장 낮은 감소율을 나타내었으며 25PC15배합의 유출수량 감소율의 경우 약 26%로 전체 배합 중 가장 높은 감소율을 나타내었다. 치유재령 28일 경과 후 Plain배합의 유출수량의 경우 약 3490.1 ml로 치유재령 0일에 비해 약 11% 감소한 유출수량을 나타내었다. 03PC배합의 경우 PCC의 혼입율이 증가할수록 유출수량이 감소하는 경향으로 03PC05배합에서 약 23%, 03PC10배합의 경우 약 31% 감소한 유출수량을 나타내었다. 03PC15배합의 유출수량의 경우 약 1240.9 ml로 치유재령 0일에 비해 약 47% 감소한 유출수량을 나타내었다. 25PC배합의 경우 25PC15배합의 유출수량이 약 244.8 ml로 치유재령 0일에 비해 약 62% 감소한 유출수량으로 가장 큰 감소율을 나타내었다. PCC를 사용한 배합의 경우 Plain배합에 비해 상대적으로 높은 감소율을 나타내었는데 이는 시험체에 균열 유도를 진행할 때 할렬된 시험체 단면에 존재하던 PCC가 파괴되며 자기치유 성능이 증가한 것으로 사료된다(Nam et al, 2021). 본 실험 결과에 따르면 03PC15, 25PC15배합 등 PCC의 혼입율이 가장 높았던 배합에서 가장 높은 유출수량 감소율을 보이고 있는데 이는 PCC

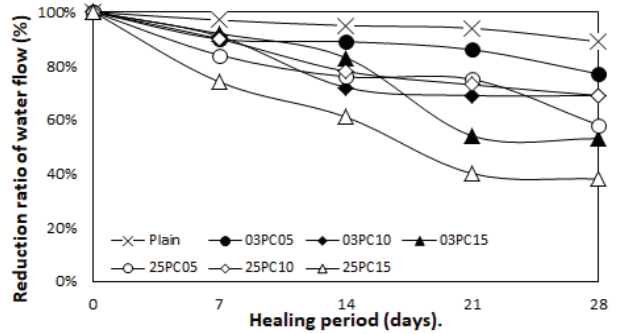


Fig. 7. Reduction ratio of water flow

의 치유효과와 더불어 초기 유출수량이 가장 적은 것에 기인한 것으로 판단된다. 또한 PCC의 혼입율과 유출수량 감소율의 경향이 상이하게 나타난 것은 초기 균열에 따른 유출수량의 편차에 기인한 것으로 사료되며 향후 균열크기의 조절을 통해 초기 유출수량의 편차를 감소시킨 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.7 미세구조

PCC혼입율에 따른 모르타르의 하중재부하 후 재양생 28일이 경과한 시험체의 SEM image를 나타낸 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 PCC를 사용한 배합의 경우 하중 재부하시 가해진 하중에 의해 파괴된 캡슐이 존재하던 부위가 관찰되었으며 Plain배합에 비해 상대적으로 많은 수화생성물이 관찰되었다. Fig. 9은 SEM image에 나타난 흰색 Spot 위치를 EDS를 통해 분석한 결과로, EDS를 통한 성분 분석 결과에 따르면 03PC15배합의 경우 Ca, Si, Al, K 순으로 성분이 검출되었으며 25PC15배합의 경우에는 Ca, Al, Si, K 순으로 성분이 검출되었다. 반면 Plain배합의 경우 Si, Al, K, Ca 순으로 검출되었다. 이를 통해 PCC를 사용한 배합의 경우 Plain배합에 비해 월등히 많은 양의 Ca가 함유된 것을 확인할 수 있다. 이는 SEM image에서 볼 수 있듯이 PCC를 사용한 배합의 경우 PCC 내부에 존재하던 시멘트계 재료가 반응을 하여 Plain배합에 비해 상대적으로 다량의 수화생성물이 생성된 것에 기인한 것으로 사료된다. 또한, 역학적 치유 특성 결과를 나타낸 하중재부하 시험 결과와 같이 PCC를 혼입한 배합이 Plain배합에 비해 향상된 치유성을 나타내었는데 이는, 미세구조 분석 결과에서 볼 수 있듯이 누출된 재료들이 물과 반응하여 시험체 내부의 미세균열을 충전한 것으로 판단된다(Beglarigale et al, 2021).

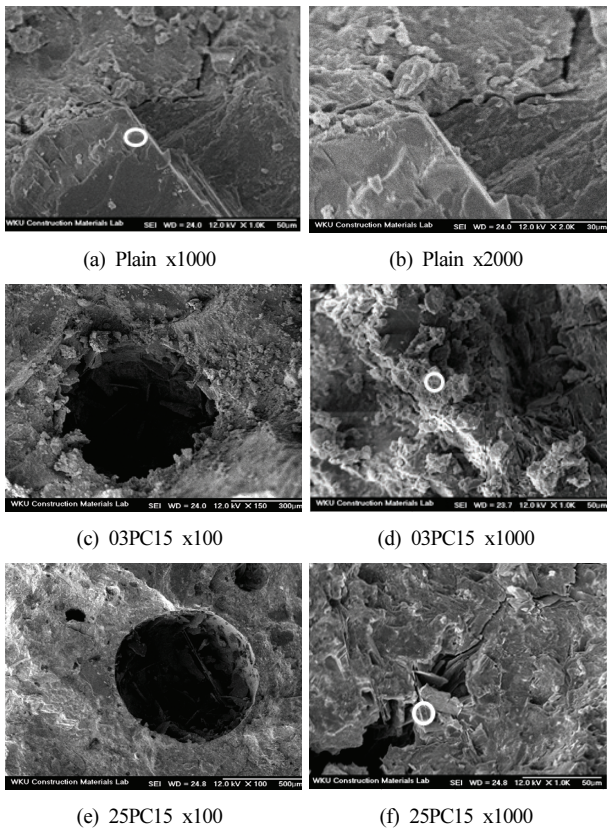


Fig. 8. Specimen SEM image (healing period 28days)

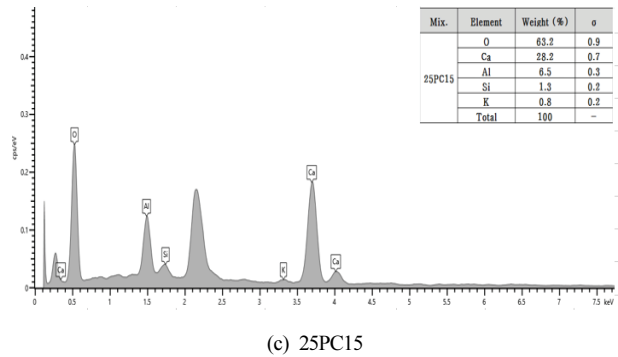
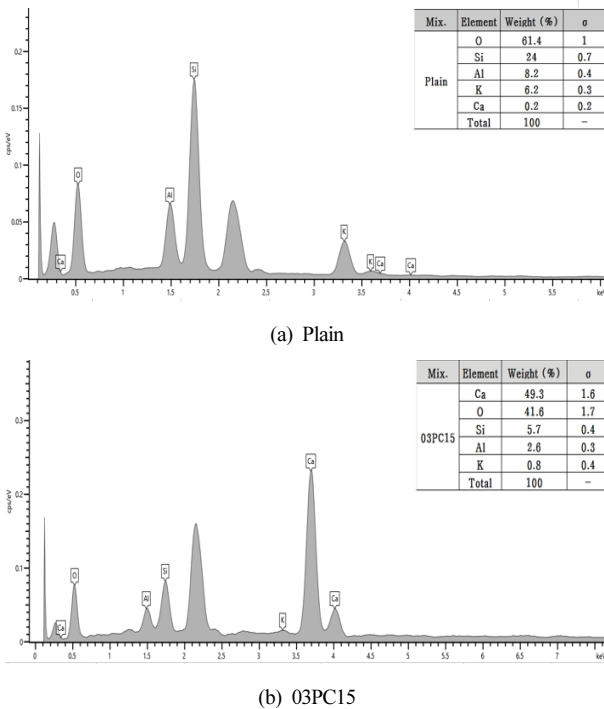


Fig. 9. EDS analysis

4. 결론

본 연구는 자기치유형 고상캡슐인 PCC(Powder Compacted Capsule) 혼입율에 따른 모르타르의 역학특성, 내구특성 및 자기치유 특성을 검토하기 위하여 PCC(Powder Compacted Capsule) 혼입율에 따른 모르타르의 유동성, 압축강도, 하중재부하 시험, 초음파속도, 탄산화 깊이, 정수위투수 및 미세구조 분석 등을 비교·분석한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모르타르 플로우의 경우 PCC를 사용할 시 PCC 크기에 관계없이 PCC의 혼입율이 증가함에 따라 플로우가 감소하였는데, 이는 배합시 손상된 일부 PCC가 물을 흡수하여 물결합재비가 감소된 것에 기인한 것으로 사료된다.
2. 03PC배합의 경우 PCC를 5% 사용한 03PC05배합의 7일 압축강도가 34.3 MPa로서 전체 배합중 가장 낮은 압축강도를 발현하였다. 또한 압축강도의 경우 PCC의 혼입율이 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 경향을 나타내었으며, PCC를 사용한 모든 배합이 Plain배합에 비해 상대적으로 높은 압축강도를 발현하였다.
3. 하중재부하 시험 결과, 2.5 mm 크기의 PCC를 5% 혼입한 25PC05배합이 28일 압축강도에 비해 약 110% 수준의 압축강도로 전체 배합 중 가장 높은 발현율을 나타내었다.
4. 탄산화깊이의 경우 PCC를 사용한 배합에서 PCC 크기에 관계없이 Plain배합에 비해 상대적으로 낮은 탄산화깊이를 나타내었으며 03PC15배합의 경우 약 1.08 mm의 가장 낮은 탄산화깊이를 나타내었다.
5. 정수위투수 시험 결과, PCC를 사용한 배합이 Plain배합에 비해 월등히 감소한 유출수량을 나타내었으며 25PC15배합의 경우 약 62% 감소한 유출수량을 나타내었다. 또한 PCC를 사용한

배합의 경우 PCC의 크기에 관계없이 혼입율이 가장 높았던 03PC15배합 및 25PC15배합에서 가장 높은 치유성능을 나타내었다.

위와 같은 결과를 토대로 자기치유 특성 검토를 위해 진행한 하중재부하 시험 및 정수위투수 시험 결과에 따르면 PCC를 사용한 배합이 Plain배합에 비해 상대적으로 높은 치유성능을 나타내었으며, 이는 미세구조 분석에서 볼 수 있듯이 PCC를 사용할 경우 하중을 받은 PCC가 파괴되어 내부에 존재하던 시멘트계 재료에 반응을 통해 다량의 수화물이 생성된 것에 기인한 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서는 사전실험을 통해 가장 우수한 역학특성을 나타낸 0.3 mm 및 2.5 mm 크기의 PCC를 혼입하여 캡슐 크기에 따른 역학, 내구특성 및 치유특성을 검토하였으며 향후 PCC를 크기별로 혼입하여 사용한 시멘트 복합체의 역학, 내구특성 및 치유 특성에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(NRF2019 R11A3A01049510).

This work was also supported by a National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korean government (MSIT)(NO.2020R1A4A3079595).

References

Beglarigale, A., Eyice, D., Seki, Y., Yalçınkaya, C., Çopuroğlu, O., Yazıcı, H. (2021). Sodium silicate/polyurethane microcapsules synthesized for enhancing self-healing ability of cementitious materials: optimization of stirring speeds and evaluation of self-healing efficiency, *Journal of Building Engineering*, **39**, 102279.

Chen, H.J., Peng, C.F., Tang, C.W., Chen, Y.T. (2019). Self-healing

concrete by biological substratio, *Materials*, **12(24)**, 4099.

Cheng, Y., Zhang, Y., Jiao, Y., Yang, J. (2016). Quantitative analysis of concrete property under effects of crack, freeze-thaw and carbonation, *Construction and Building Materials*, **129**, 106–115.

Choi, S.J., Bae, S.H., Ji, D.M., Kim, S.H. (2022). Effects of capsule type on the characteristics of cement mortars containing powder compacted capsules, *Materials*, **15(19)**, 6773.

Choi, S.J., Bae, S.H., Lee, J.I., Bang, E.J., Ko, H.M.(2021). Strength, carbonation resistance, and chloride-ion penetrability of cement mortars containing catechol-functionalized chitosan polymer, *Materials*, **14(21)**, 6395.

Hu, Z.X., Hu, X.M., Cheng, W.M., Zhao, Y.Y., Wu, M.Y. (2018). Performance optimization of one-component polyurethane healing agent for self-healing concrete, *Construction and Building Materials*, **179**, 151–159.

Jiang, S., Lin, Z., Tang, C., Hao, W. (2021). Preparation and mechanical properties of microcapsule-based self-healing cementitious composites, *Materials*, **14(17)**, 4866.

Jonkers, H.M. (2021). Bacteria-based self-healing concrete, *In-Genium*; no.1, 84–93.

Lee, J.I., Bae, S.H., Kim, J.H., Choi, S.J. (2022). Effect of cementitious materials on the engineering properties of lightweight aggregate mortars containing recycled water, *Materials*, **15(5)**, 1967.

Li, W., Dong, B., Yang, Z., Xu, J., Chen, Q., Li, H., Xing, F., Jiang, Z. (2018). Recent advances in intrinsic self-healing cementitious materials, *Advanced Materials*, **30(17)**, 1705679.

Li, W., Jiang, W.Z., Yang, Z., Zao, N., Yuan, W. (2013). Self-healing efficiency of cementitious materials containing microcapsules filled with healing adhesive: mechanical restoration and healing process monitored by water absorption, *PLoS ONE*, **8(11)**, e81616.

Liu, H., Zhang, Q., Gu, C., Su, H., Li, V. (2017). Self-healing of microcracks in engineered cementitious composites under sulfate and chloride environment, *Construction and Building Materials*, **153**, 948–956.

Liu, Z., Van den Heede, P., De Belie, N. (2021). Effect of the mechanical load on the carbonation of concrete: a review of the underlying mechanisms, test methods, and results, *Materials*, **14(16)**, 4407.

Luo, J., Chen, X., Crump, J., Zhou, H., Davies, D.G., Zhou, G., Zhang, N., Jin, C. (2018). Interactions of fungi with concrete: significant importance for bio-based self-healing concrete, *Construction and Building Materials*, **164**, 275–285.

Luo, M., Qian, C.X., Li, R.Y. (2015). Factors affecting crack repairing

- capacity of bacteria-based self-healing concrete, *Construction and Building Materials*, **87**, 1–7.
- Lv, Z., Chen, D. (2014). Overview of recent work on self-healing in cementitious materials, *Materiales de Construcción*, **64(316)**, e034–e034.
- Nam, E.J., Oh, S.R., Kim, C.G., Choi, Y.W. (2021). An experimental study on the self-healing performance of solid capsules according to the composition ratio of crystal growth type inorganic materials, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **25(2)**, 16–22 [in Korean].
- Sahmaran, M., Yildirim, G., Erdem, T.K. (2013). Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials, *Cement and Concrete Composites*, **35(1)**, 89–101.
- Tang, W., Kardani, O., Cui, H. (2015). Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials—a review, *Construction and Building Materials*, **81**, 233–247.
- Van Mullem, T., Gruyaert, E., Caspeele, R., De Belie, N. (2020). First large scale application with self-healing concrete in Belgium: analysis of the laboratory control tests, *Materials*, **13(4)**, 997.
- Van Tittelboom, K., De Belie, N. (2013). Self-healing in cementitious materials—a review, *Materials*, **6(6)**, 2182–2217.
- Wang, J.Y., Soens, H., Verstraete, W., De Belie, N. (2014). Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores, *Cement and Concrete Research*, **56**, 139–152.
- Wiktor, V., Jonkers, H.M. (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete, *Cement and Concrete Composites*, **33(7)**, 763–770.
- Yoon, H.S., Lee, J.Y., Yang, K.H., Park, S.H. (2022). Evaluation of the crack healing efficiency of mortar incorporating self-healing pellets based on cementitious materials, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **38(4)**, 207–215 [in Korean].
- Zhang, P., Dai, Y., Ding, X., Zhou, C., Xue, X., Zhao, T. (2018). Self-healing behaviour of multiple microcracks of strain hardening cementitious composites(SHCC), *Construction and Building Materials*, **169**, 705–715.

PCC(Powder Compacted Capsule) 크기 및 혼입율에 따른 자기치유 모르타르의 공학적 특성에 관한 실험적 연구

본 연구에서는 시멘트 복합체에 시멘트계 재료로 구성된 자기치유 캡슐을 적용하여 콘크리트 구조물의 자기치유 성능을 향상시키기 위한 연구의 일환으로 PCC(Powder Compacted Capsule) 크기 및 혼입율에 따른 모르타르의 공학적 특성을 비교·분석하였다. 이를 위해 PCC 크기 및 혼입율에 따른 모르타르의 유동성, 압축강도, 하중재부하 시험, 탄산화, 초음파속도, 투수 특성 등을 측정하였다. 측정 결과, PCC의 혼입율이 증가할수록 유동성과 압축강도가 증가하였으며, 치유특성 검토를 위해 진행한 하중재부하 시험의 경우 03PC 배합에서 PCC 혼입율이 증가할수록 치유율이 증가하였다. 정수위투수 시험의 경우 PCC를 사용할 경우 유출수량 감소율이 Plain 배합에 비해 최대 35 % 높은것으로 나타났으며, 크기 0.3~0.6 mm의 PCC를 15 % 혼입할 시 모르타르의 균열 치유율 향상에 효과적인 것으로 나타났다.