

# 상전이물질이 플라이애시 및 고로슬래그를 혼입한 모르타르의 수화발열에 미치는 영향

남의현<sup>1</sup> 장석준<sup>2</sup> 김선웅<sup>3</sup> 박완신<sup>4</sup> 윤현도<sup>5\*</sup>

## Effect of Phase Change Material on Hydration Heat of Mortar with Fly Ash and Blast Furnace Slag

Yi-Hyun Nam<sup>1</sup>, Seok-Joon Jang<sup>2</sup>, Sun-Woong Kim<sup>3</sup>, Wan-Shin Park<sup>4</sup>, Hyun-Do Yun<sup>5\*</sup>

**Abstract:** Phase change material(PCM) has the capacity to absorb or release energy in heat when the phase changes. This study conducted to investigate the effect of strontium-based PCM on the hydration heat and mechanical properties of mortar with fly ash and blast furnace slag. The amounts of PCM were 1%, 2%, 3%, 4%, and 5% by the cementitious materials weight. The tests about mortar flow, semi-adiabatic temperature rise, compressive and flexural strength tests were carried out for twelve types of mortar mixtures. The test results indicated that the use of PCM was effective to reduce hydration heat and retard hydration of mortar with industrial by-products. In particular, the heat generation rate of mortars with fly ash was lower than that of mortars with blast furnace slag. The compressive strength of mortar with fly ash and blast furnace slag were decreased with increasing PCM ratio.

**Keywords:** Phase change material(PCM), Hydration heat, Mechanical properties, Fly ash, Blast furnace slag

### 1. 서론

콘크리트표준시방서(KCI, 2009)에서는 매스콘크리트의 적용 범위를 넓이가 넓은 평판구조의 경우 두께 0.8m 이며, 하단이 구속된 벽조의 경우 두께 0.5m 이상으로 규정하고 있다. 또한 매스콘크리트를 시공할 때는 구조물의 기능 및 품질을 손상시키지 않도록 온도균열 제어의 필요성을 규정하고 있다. 매스콘크리트 타설 후 양생 시 콘크리트 응결에 의해 발생되는 수화열에 의한 표면과 내부의 온도차이가 발생하며, 이로 인해 발생하는 온도균열은 건축물의 구조성능 및 내구성 문제를 발생시킨다. 따라서 매스콘크리트의 수화열을 제어하고 온도균열을 예방하기 위한 연구가 활발하게 진행되었다(Kim et al., 2008; Kim et al., 2012; Lee and Chung, 2000; Kim et al., 2006; Son et al., 2006). 매스콘크리트 수화열제어의 대표적인 방법으로 저발열 바인더를 사용하는 재료적 방

법(Park et al., 2008; Yum et al., 2006)과 파이프쿨링 공법(Seo et al., 2014; Park et al., 2001)과 같이 매스콘크리트 내에 냉각 장치를 삽입하여 수화열을 제어하는 시공적방법이 있다. 하지만 시공적방법은 콘크리트 내에 온도제어를 위한 파이프 매설 등 시공비용 및 공사기간이 증가되는 문제점이 있다.

시멘트 사용에 따른 다량의 이산화탄소 배출을 저감하고자 시멘트를 산업부산물로 대체하여 사용하는 경우가 증가하고 있다(Choi et al., 2013; Kim et al., 2012). 또한 이러한 산업부산물을 바인더로 사용할 경우 매스콘크리트의 수화열을 저감에도 효과적인 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2002). 고로슬래그 및 플라이애시 치환율에 따른 콘크리트의 발열 특성을 평가한 기존연구(Jang et al., 2015)에서는 보통콘크리트에 비해 시멘트를 고로슬래그 및 플라이애시로 치환하는 경우 치환율이 증가할수록 수화열 저감 및 수화 지연효과가 나타나는 것으로 보고되고 있다.

또한, 상전이물질(Phase Change Material; PCM)을 사용하여 매스콘크리트의 수화열을 저감하려는 연구도 진행되고 있다. PCM 물질 혼입률에 따른 모르타르의 수화발열 및 강도 특성을 평가한 기존연구(Jang et al., 2016)에 의하면 비례 PCM 물질을 사용하는 경우 혼입률 1~4% 내외에서 순차적인 수화지연 효과를 나타내었으며, 스트론튬계 PCM 물질을 사용하는 경우 혼입률 1~5%의 범위에서 PCM 혼입률이 증

<sup>1</sup>정회원, 충남대학교 융복합시스템공학과 석사

<sup>2</sup>정회원, 한국시설안전공단 시설성능연구소 선임연구원

<sup>3</sup>정회원, 충남대학교 융복합시스템공학과 박사과정

<sup>4</sup>정회원, 충남대학교 건설공학교육과 교수

<sup>5</sup>정회원, 충남대학교 건축공학과 교수

\*Corresponding author: wiseroad@cnu.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Chungnam National University

• 본 논문에 대한 토의를 2019년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

가할수록 모르타르의 수화열이 저감되는 효과를 나타내는 것으로 보고되고 있다. 하지만 상기연구에서는 시멘트를 사용한 모르타르에 한정적인 연구결과만 보고되었다.

따라서 친환경성 및 수화열저감 효과를 위한 시멘트 대체재로 활용성이 높은 플라이애시 및 고로슬래그와 PCM의 혼용에 대한 연구가 요구되며, 이를 통해 수화열 감소 효과 및 친환경성을 동시에 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 현행 건축구조기준(AIK, 2016)에서 제시된 가장 엄격한 동결융해 조건(노출등급 F3)에 대한 최대 혼화재 비율인 플라이애시 25% 및 고로슬래그 50% 이내로 제시하고 있다. 본 연구에서는 상기의 범위 내에서 혼화재의 치환비율을 설정하고, 1~5% 범위의 PCM을 혼입하여 기존의 저발열 바인더와 PCM의 혼용가능성을 평가하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험계획

본 연구는 스트론튬계 PCM 혼입률이 플라이애시 및 고로슬래그 치환 모르타르의 수화발열 및 역학적 특성에 미치는 영향을 실험적으로 평가하기 위하여 실시되었다. PCM 혼입률은 결합재 중량비 1, 2, 3, 4, 5%로 설정하였다. KS L ISO 679(2006)에 의거하여 물-결합재비는 0.5로 설정하였으며, 플라이애시 및 고로슬래그 치환율은 시멘트 중량비 20 및 40%로 설정하였다. 혼화재의 사용은 모르타르의 초기 수화발열에 영향을 줄 수 있기 때문에(Kim et al., 2010), 본 연구에서는 별도의 혼화제를 사용하지 않았다. 실험변수에 따른 배합표를 Table 1에 나타내었다.

**Table 1** Mixture proportions of mortar

Mixture	W/B (%)	Weight (kg)					
		W	C	FA	BFS	S	PCM
F0							-
F1							0.01
F2	50	0.5	0.8	0.2	-	1.5	0.02
F3							0.03
F4							0.04
F5							0.05
B0							-
B1							0.01
B2	50	0.5	0.6	-	0.4	1.5	0.02
B3							0.03
B4							0.04
B5							0.05

W: Water, C : Cement, FA: Fly ash, BFS: Blast furnace slag  
S: Fine aggregate, PCM: Phase Change Material

### 2.2 사용재료

본 연구에서 사용한 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 플라이애시는 보령 화력발전에서 생산된 F급 플라이애시를 사용하였다. 고로슬래그는 3종을 사용하였으며, 잔골재는 주문진에서 생산된 해사를 사용하였다. 기존연구결과(Kim and Lee, 2009)에 따르면 본 연구에서 사용된 스트론튬계 PCM의 상전이 온도는 88.0°C 및 잠열량은 343 J/g으로 보고되었다. Table 2에 시멘트, 플라이애시 및 고로슬래그의 화학적 조성을 나타내었다.

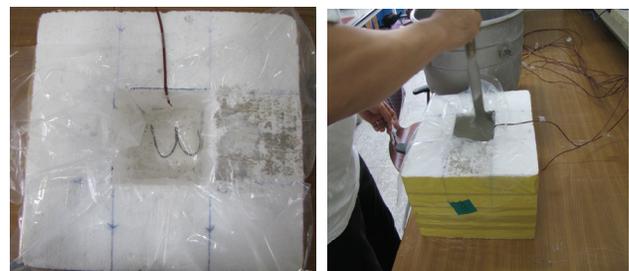
**Table 2** Chemical properties of materials

Chemical properties	Composition (%)		
	C	FA	BFS
Silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> )	20.90	50.72	33.20
Aluminium oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.39	20.73	15.52
Calcium oxide (CaO)	64.70	3.61	41.52
Iron oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2.38	-	0.34
Magnesium oxide (MgO)	1.51	1.08	9.74
Titanium dioxide (TiO <sub>2</sub> )	1.33	-	-
Sodium oxide (Na <sub>2</sub> O)	0.27	-	-
Potassium oxide (K <sub>2</sub> O)	0.22	-	-
Sulfur trioxide (SO <sub>3</sub> )	1.65	0.54	3.98
Loss on ignition (LOI)	5.80	3.04	3.02

### 2.3 실험방법

#### 2.3.1 간이단열온도상승 실험

Fig. 1에 나타난 바와 같이, 간이단열온도상승 실험을 위해 내경 100×100×100 mm 및 두께 100 mm 정육면체 형태의 단열재 몰드를 제작하였으며 단열재는 비드법 보온판을 사용하였다. 온도의 측정은 열전대(Thermal couple)를 이용하여 실험체 중앙부 및 외기의 온도를 측정하였다. 간이단열온도상승 실험 시 초기타설 온도에 따른 영향을 최소화하기 위하여 20°C 내·외로 목표온도를 설정하였으며, 타설 전 24시간 동안 모든 재료를 항온항습챔퍼에 밀봉상태로 보관하였다. 배합은 20L 용량의 물타믹서를 사용하여 실시하였으며, 시멘트, 잔



**Fig. 1** Semi-adiabatic temperature rise test

골재, PCM을 혼합하여 투입 후 저속으로 60초 동안 건비빔을 하였다. 그 후 물을 투입하고 90초간 저속혼합 후 용기의 바닥과 벽에 혼합되지 못한 재료를 풀어준 후 추가적으로 120초간 고속으로 혼합을 실시하였다.

### 2.3.2 역학적 특성 평가

플라이애시 및 고로슬래그 치환 모르타르의 흐름성을 평가하기 위하여 배합직후 모르타르 흐름 값을 측정하였으며, KS L 5111(2007)에 의거하여 15회 타격 이후 플로우를 측정하였다. 플라이애시 및 고로슬래그 치환 모르타르의 역학적 특성을 평가하기 위하여 압축 및 휨강도 실험을 계획하였다. 휨강도 평가를 위한 시험체의 제작은 KS L ISO 679(2006)에 의거하여 40×40×160 mm 몰드에 타설하여 제작하였다. 압축강도 실험은 휨강도 실험에 의해 중앙부 파단된 시험체를 사용하여 실시하였다. 압축 및 휨강도 시험체는 제작 후 온도 20±2℃의 항온수조에서 수중양생 하였으며, 재령 1, 3, 7, 28, 91일에 시험을 실시하였다. 휨 및 압축 시험을 위하여 1,000 kN 용량의 만능재료시험기를 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 PCM 혼입률에 따른 흐름성 평가

Fig. 2는 플라이애시 및 고로슬래그 치환 모르타르의 흐름성 평가결과를 나타내는 것이다. 흐름 값은 4방향의 측정값의 평균으로 산정하였다. PCM을 혼입하지 않은 F0 및 B0 배합의 흐름 값은 각각 220 및 229 mm로 나타났다. F1, F2, F3, F4 및 F5 배합은 PCM을 혼입하지 않은 배합에 비해 흐름 값이 모두 증가하는 것으로 나타났지만 PCM 혼입이 플라이

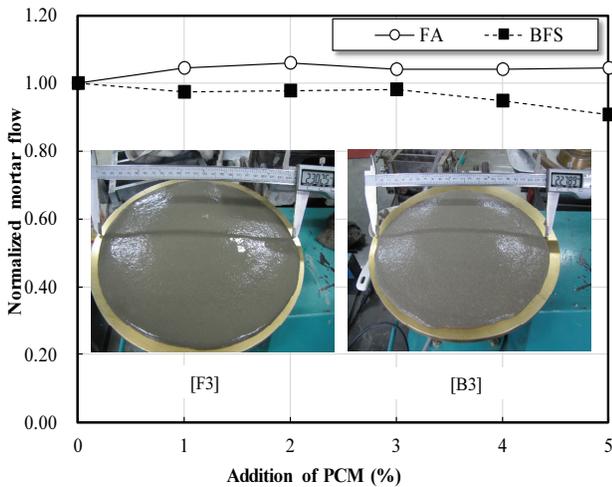


Fig. 2 Effect of binder type and PCM on mortar flow

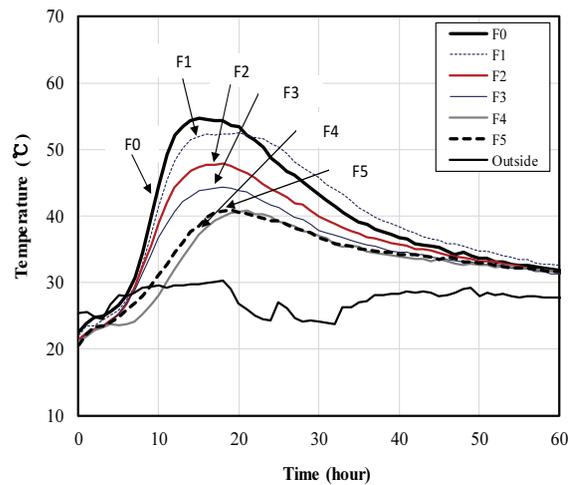
애시 치환 모르타르의 흐름성능에 미치는 영향은 미소한 것으로 판단된다.

B1 및 B2 배합은 PCM을 혼입하지 않은 비교배합에 비해 흐름 값이 모두 3% 감소되는 것으로 나타났다. B3, B4 및 B5 배합은 흐름 값이 각각 2, 5 및 9% 감소되는 것으로 나타났다. 따라서 PCM 혼입률이 증가함에 따라 고로슬래그 치환 모르타르의 흐름성능이 다소 감소하는 것으로 판단된다. 또한 PCM이 혼입될 경우 플라이애시 치환 모르타르에 비해 고로슬래그 치환 모르타르의 작업성이 더 크게 감소하는 것으로 나타났다.

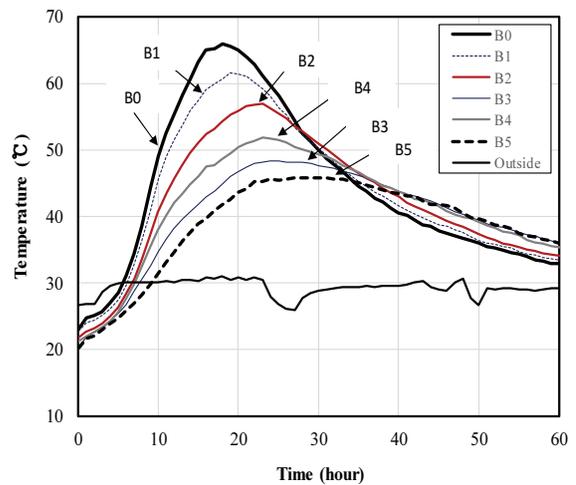
### 3.2 PCM 간이단열온도상승 실험

#### 3.2.1 간이단열온도상승 이력

Fig. 3은 플라이애시 및 고로슬래그 치환 모르타르의 간이



(a) Mortar with fly ash and PCM (0~5%)



(b) Mortar with Blast furnace slag and PCM (0~5%)

Fig. 3 Effects of PCM on semi-adiabatic temperature rise

단열온도상승 이력을 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 PCM 혼입률 0~5%의 플라이애시 치환 모르타르 실험결과를 나타낸 것이며, PCM을 혼입한 배합이 PCM을 혼입하지 않은 배합에 비해 발열속도가 감소하고, 최대 발열온도 시점이 지연되는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 PCM 혼입률이 증가함에 따라 뚜렷하게 나타났다. F3 배합에 비해 F4 및 F5 배합의 발열속도가 감소하였으며, F4 및 F5 배합의 간이단열온도상승 이력은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 플라이애시를 사용한 모르타르의 경우 PCM 혼입률 4%가 수화특성을 개선을 위한 적정 혼입률로 판단된다.

Fig. 3(b)는 PCM 혼입률 0~5%에 따른 고로슬래그 치환 모르타르의 실험결과를 나타낸 것이며, PCM을 혼입한 배합이 혼입하지 않은 B0 배합에 비해 최대 발열온도 시점에 지연되었으며, 발열속도가 감소하였다. 또한 B1 배합에 비해 B2 배합의 최대 발열온도 시점이 지연되었으며, 발열속도가 감소하였다. B4 배합에 비해 B3 및 B5 배합의 발열속도가 감소하였으며, B3 및 B4 배합의 최대 발열온도 시점이 크게 차이가 없는 것으로 나타났다. 플라이애시 및 고로슬래그 치환 모르타르 모두 PCM을 혼입한 배합이 PCM을 혼입하지 않은 배합에 비해 발열속도가 감소하였으며, 최대 발열온도 시점이 지연되어 나타났다.

### 3.2.2 최대온도 상승량 및 발현시간

Fig. 4는 PCM 혼입률에 따른 플라이애시 및 고로슬래그 치환 모르타르의 최대온도 상승량 및 발현시간을 나타낸 것이다. PCM을 사용함에 따라 최대온도 상승량이 감소하였으며, 최대온도 발현시간이 지연되는 것으로 나타났다. 특히 플라이애시 치환 모르타르는 고로슬래그 치환 모르타르에 비해 최대온도 상승량이 더 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 고로슬래그 치환 모르타르는 플라이애시 치환 모르타르에 비해 최대온도 발현시간이 더 지연되는 것으로 나타났다.

F1 및 F2 배합의 최대온도 상승량은 F0 배합에 비해 각각 5 및 18% 감소되어 나타났다. F3 배합의 최대온도 상승량은 F0 배합에 비해 28% 감소되어 나타났으며, F4 및 F5 배합의 최대온도 상승량은 F0 배합에 비해 각각 38 및 37% 감소되어 나타났다. PCM을 시멘트 중량대비 1~4% 혼입한 경우에는 혼입률이 증가함에 따라 최대온도 상승폭이 선형적으로 감소하였지만, 4 및 5% 혼입한 경우에는 최대온도 상승폭이 유사하게 나타났다. 따라서 플라이애시 치환 모르타르에 PCM을 4% 이상 혼입하여도 최대온도 상승폭에는 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 최대온도 발현시간에서도 유사한 양상이 나타났으며, 혼입률 1~4%에서는 기준배합 대비 선형적으로 시간이

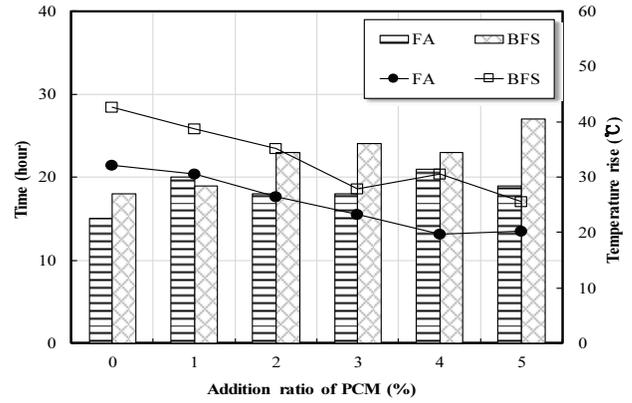


Fig. 4 Effects of PCM on hydration heat of mortar

지연되는 것으로 나타났으나, PCM 혼입률 5%에서는 4% 보다 최대온도 발현시간이 단축되는 것으로 나타났다.

B1 및 B2 배합의 최대온도 상승량은 B0 배합에 비해 각각 9 및 18% 감소되어 나타났다. B3 및 B4 배합의 최대온도 상승량은 B0 배합에 비해 각각 35 및 28% 감소되어 나타났으며, B5 배합의 경우 B0 배합에 비해 최대온도 상승량이 40% 감소되어 나타났다. PCM을 시멘트 중량대비 1~3% 혼입한 경우에는 혼입률이 증가함에 따라 최대온도 상승폭이 선형적으로 감소하였지만, 4% 이상 혼입하는 경우 3% 혼입률에 비해 최대온도 상승폭의 차이가 미소한 것으로 판단된다. 최대온도 발현시간은 PCM 혼입률이 증가함에 따라서 기준배합 대비 선형적으로 시간이 지연되는 것으로 나타났다.

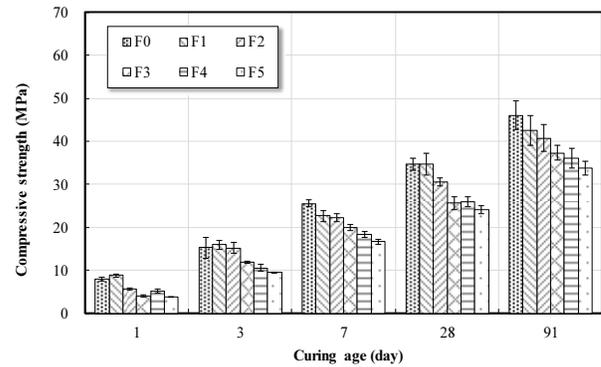
### 3.3 압축강도 특성

PCM 혼입률에 따른 플라이애시 치환 모르타르의 압축강도를 Fig. 5(a)에 나타내었다. PCM 혼입률이 증가함에 따라 압축강도는 감소하는 경향을 나타내었으며, 이러한 연구결과는 선행연구(Jang, 2016)에서도 보고되고 있다. 초기 재령 1, 3, 7일에서 플라이애시 치환 모르타르에 PCM을 1% 혼입한 경우 기준 시험체에 비해 압축강도가 0~11% 감소하는 것으로 나타났으며, 2% 혼입한 경우 1~29% 감소하는 것으로 나타났다. PCM을 3% 혼입함에 따라 기준 시험체에 비해 압축강도가 22~50%로 크게 감소하였으며, 4% 혼입한 경우 압축강도가 28~36% 감소하는 것으로 나타났다. 5% 혼입한 경우에는 기준 시험체에 비해 압축강도가 35~52% 감소하는 것으로 나타났다. 재령 28일에서 플라이애시 치환 모르타르에 PCM을 1% 혼입한 경우 기준 시험체와 동등한 강도를 나타냈으며, 2% 혼입한 경우 압축강도가 12% 감소하는 것으로 나타났다. PCM을 3% 혼입한 경우 기준 시험체에 비해 압축강도가 26% 감소하였으며, 4 및 5% 혼입한 경우 압축강도가 각각

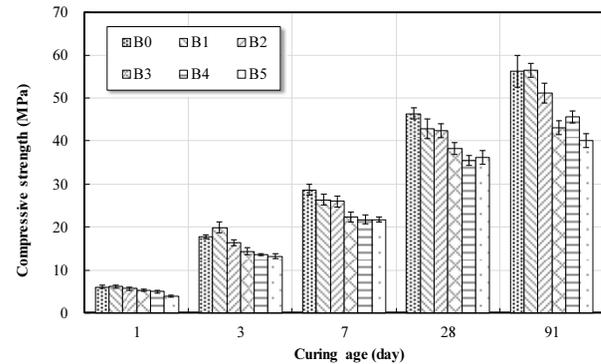
25 및 30% 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 재령이 증가함에 따라 PCM 혼입에 따른 강도감소율이 저감되는 것으로 판단된다. 특히 PCM을 1% 혼입한 경우 재령 28일까지 재령이 증가함에 따라 기준 시험체와 동등한 강도 발현을 나타내는 것으로 판단된다. 재령 91일에서 플라이애시 치환 모르타르에 PCM을 1% 혼입한 경우 기준 시험체에 비해 압축강도가 8% 감소하는 것으로 나타났으며, 2% 혼입한 경우 압축강도가 12% 감소하는 것으로 나타났다. PCM을 3% 혼입한 경우 기준 시험체에 비하여 압축강도가 19% 감소하였으며, 4 및 5% 혼입한 경우 각각 22 및 26% 감소하는 것으로 나타났다. 재령 91일에서도 재령 28일 압축강도에 비해 재령이 증가함에 따라 PCM 혼입률에 따른 강도감소율이 저감되는 것으로 판단된다. 모든 재령에서 플라이애시 치환 모르타르에 PCM을 3% 이상 혼입한 경우 기준 시험체에 비하여 압축강도가 크게 감소하는 것으로 나타나 구조부재 적용시 강도에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

PCM 혼입률에 따른 고로슬래그 치환 모르타르의 압축강도를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 초기 재령 1, 3, 7일에서 고로슬래그 치환 모르타르에 PCM을 1% 혼입한 경우 기준 시험체에 비해 압축강도가 0~8% 감소하는 것으로 나타났으며, 2% 혼입한 경우 압축강도가 7~9% 감소하는 것으로 나타났다. PCM을 3% 혼입한 경우 기준 시험체에 비하여 압축강도가 19~22% 감소하는 것으로 나타났으며, 4% 혼입한 경우 압축강도가 17~24% 감소하는 것으로 나타났다. PCM을 5% 혼입한 경우 기준 시험체에 비해 압축강도가 24~35% 감소하는 것으로 나타났다. 재령 28일에서 고로슬래그 치환 모르타르에 PCM을 1% 혼입한 경우 압축강도가 8% 감소하는 것으로 나타났으며, 2% 혼입한 경우 압축강도가 9% 감소하는 것으로 나타났다. PCM을 3% 혼입함에 따라 기준 시험체에 비하여 압축강도가 18% 감소하였으며, 4 및 5% 혼입한 경우 압축강도가 각각 23 및 22% 감소하는 것으로 나타났다. 초기재령 및 재령 28일에서 고로 슬래그 치환 모르타르가 플라이애시 치환 모르타르에 비해 높은 강도 발현을 나타내는 것으로 판단된다. 또한 고로슬래그 치환 모르타르는 재령이 증가함에 따라 PCM 혼입률에 따른 강도감소율이 저감되지 않는 것으로 판단된다. 재령 91일에서 고로슬래그 치환 모르타르에 PCM을 1% 혼입한 경우 기준 시험체와 동등한 압축강도를 나타내었으며, 2% 혼입하는 경우 압축강도가 9% 감소하는 것으로 나타났다. PCM을 3, 4, 5% 혼입한 경우 기준 시험체에 비하여 압축강도가 각각 23, 19, 29% 감소하는 것으로 나타났다. 재령 91일에서도 초기 재령 및 28일에서의 압축강도 발현과 유사하게 재령이 증가함에 따라 PCM 혼입률에 따른 강도 감소

율이 저감되지 않는 것으로 판단된다. 특히 모든 재령에서 플라이애시 치환 모르타르와 유사하게 고로슬래그 치환 모르타르에 PCM을 3% 이상 혼입하는 경우 기준 시험체에 비해 압축강도가 크게 감소하는 것으로 나타나 강도 확보에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.



(a) Mortar with fly ash and PCM (0~5%)



(b) Mortar with blast furnace slag and PCM (0~5%)

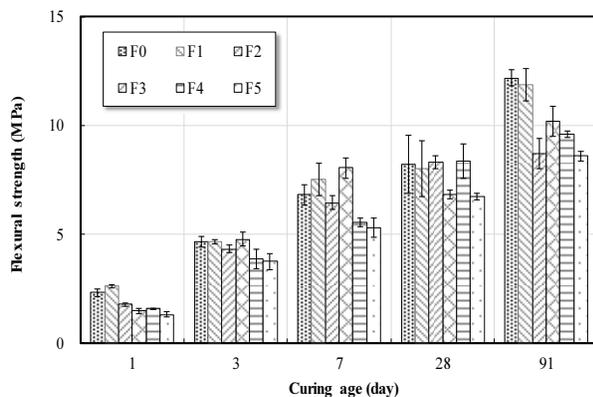
Fig. 5 Effects of PCM on compressive strength

### 3.4 휨강도 특성

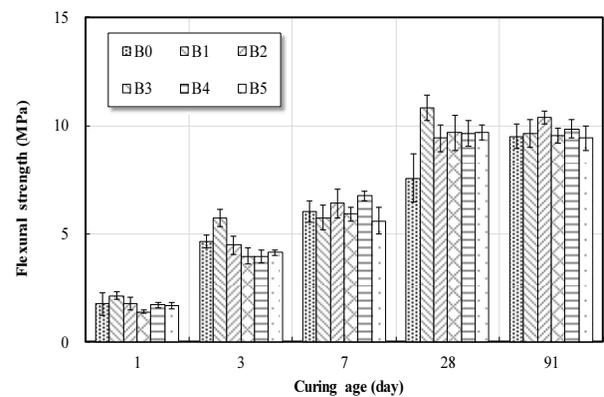
Fig. 6은 PCM 혼입률에 따른 플라이애시 및 고로슬래그 치환 모르타르의 휨강도를 나타내는 것이다. 전반적으로 동일한 배합의 실험에서 강도의 분포가 넓게 나타났다. PCM 혼입이 휨강도 발현에 미치는 영향은 플라이애시 치환 모르타르가 고로슬래그 치환 모르타르에 비해 큰 것으로 나타났다. 모든 재령에서 플라이애시 치환 모르타르에 PCM을 1% 혼입한 경우 기준 시험체에 비하여 휨강도가 0~3% 감소하는 것으로 나타났으며, PCM을 2% 혼입한 경우 기준 시험체에 비해 휨강도가 0~28% 감소하는 것으로 나타났다. PCM을 3% 혼입한 경우 기준 시험체에 비하여 휨강도가 0~36% 감소하는 것으로 나타났으며, 4% 혼입한 경우 휨강도가 0~31% 감소하는 것으로 나타났다. PCM을 5% 혼입한 경우에는 기준 시험체에

**Table 3** Summarizes of compressive and flexural test results

Mixture	Compressive strength (MPa)					Flexural strength (MPa)				
	1 day	3 days	7 days	28 days	91 days	1 day	3 days	7 days	28 days	91 days
F0	8.03 (±0.44)	15.29 (±2.39)	25.6 (±0.77)	34.66 (±1.42)	46.08 (±3.35)	2.32 (±0.17)	4.66 (±0.25)	6.81 (±0.46)	8.22 (±1.31)	12.19 (±0.38)
F1	8.84 (±0.41)	15.95 (±1.13)	22.66 (±1.22)	34.63 (±2.50)	42.51 (±3.45)	2.63 (±0.07)	4.67 (±0.09)	7.54 (±0.73)	8.03 (±1.27)	11.88 (±0.76)
F2	5.74 (±0.23)	15.20 (±1.22)	22.29 (±0.84)	30.57 (±0.97)	40.73 (±3.13)	1.77 (±0.09)	4.33 (±0.18)	6.45 (±0.33)	8.32 (±0.29)	8.72 (±0.68)
F3	4.02 (±0.19)	11.89 (±0.31)	19.95 (±0.72)	25.63 (±1.44)	37.35 (±1.74)	1.48 (±0.11)	4.78 (±0.31)	8.06 (±0.47)	6.84 (±0.21)	10.19 (±0.70)
F4	5.17 (±0.46)	10.60 (±0.75)	18.42 (±0.67)	25.98 (±1.24)	35.99 (±2.29)	1.59 (±0.03)	3.88 (±0.44)	5.54 (±0.21)	8.36 (±0.79)	9.59 (±0.16)
F5	3.84 (±0.11)	9.54 (±0.18)	16.67 (±0.51)	24.19 (±0.90)	33.88 (±1.60)	1.31 (±0.12)	3.75 (±0.36)	5.30 (±0.44)	6.75 (±0.16)	8.59 (±0.25)
B0	6.07 (±0.36)	17.82 (±0.48)	28.64 (±1.22)	46.37 (±1.29)	56.29 (±3.72)	1.77 (±0.51)	4.63 (±0.29)	6.03 (±0.51)	7.58 (±1.12)	9.50 (±0.58)
B1	6.14 (±0.40)	19.89 (±1.34)	26.33 (±1.30)	42.84 (±2.29)	56.51 (±1.63)	2.14 (±0.18)	5.72 (±0.40)	5.75 (±0.59)	10.83 (±0.60)	9.63 (±0.66)
B2	5.64 (±0.31)	16.34 (±0.65)	25.92 (±1.35)	42.38 (±1.51)	51.07 (±2.33)	1.78 (±0.30)	4.47 (±0.42)	6.41 (±0.67)	9.41 (±0.61)	10.38 (±0.31)
B3	5.24 (±0.19)	14.38 (±0.85)	22.24 (±1.15)	38.25 (±1.38)	43.11 (±1.57)	1.39 (±0.08)	3.97 (±0.36)	5.91 (±0.33)	9.66 (±0.82)	9.53 (±0.35)
B4	5.03 (±0.85)	13.58 (±0.24)	21.75 (±1.13)	35.52 (±1.15)	45.66 (±1.42)	1.72 (±0.12)	3.97 (±0.29)	6.75 (±0.23)	9.65 (±0.59)	9.84 (±0.43)
B5	3.93 (±0.19)	13.23 (±0.49)	21.76 (±0.61)	36.2 (±1.56)	40.00 (±1.60)	1.67 (±0.16)	4.13 (±0.13)	5.59 (±0.62)	9.69 (±0.34)	9.41 (±0.56)



(a) Mortar with fly ash and PCM (0~5%)



(b) Mortar with blast furnace slag and PCM (0~5%)

**Fig. 6** Effects of PCM on flexural strength

비하여 휨강도가 18~44% 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 플라이애시 치환 모르타르에 PCM을 1% 혼입한 경우 기준 시험체와 동등한 강도를 확보하는 것으로 나타났으며, PCM을 2% 이상 혼입한 경우 각 재령에 따른 강도 발현에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

모든 재령에서 고로슬래그 치환 모르타르에 PCM을 1% 혼입한 경우 기준 시험체에 비해 휨강도가 0~5% 감소하는 것으로 나타났으며, 2% 혼입한 경우 기준 시험체에 비해 휨강도가 0~3% 감소하는 것으로 나타났다. PCM을 3% 혼입한 경우 기준 시험체에 비하여 휨강도가 0~21% 감소하는 것으로 나타

났으며, 4 및 5% 혼입하는 경우 기준 시험체에 비해 휨강도가 각각 0~14% 및 0~11% 감소하는 것으로 나타났다.

압축강도의 경향과 유사하게 고로슬래그 치환 모르타르가 플라이애시 치환 모르타르에 비해 높은 휨강도 발현을 나타냈으며, 이러한 결과는 휨강도의 발현과 압축강도의 발현이 밀접한 관련을 갖는 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 스트론튬계 PCM 혼입이 플라이애시 및 고로슬래그 치환 모르타르의 수화발열 및 역학적 특성에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였다. 제한된 실험결과를 근거하여 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) PCM 혼입이 플라이애시 및 고로슬래그 치환 모르타르의 흐름성능에 미치는 영향은 미소한 것으로 판단되며, PCM 혼입률에 따른 흐름 값의 감소는 플라이애시 치환 모르타르에 비해 고로슬래그 치환 모르타르에서 다소 크게 나타났다.

2) 플라이애시 및 고로슬래그 치환 모르타르에 PCM을 혼입한 경우 최대온도 상승량이 감소하고 최대 발열온도 시점이 지연되는 것으로 나타났다. 특히 플라이애시 치환 모르타르는 고로슬래그 치환 모르타르에 비해 최대온도 상승량이 더 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 고로슬래그 치환 모르타르는 플라이애시 치환 모르타르에 비해 최대온도 발현시간이 더 지연되는 것으로 나타났다.

3) PCM 혼입률이 증가함에 따라 플라이애시 및 고로슬래그 치환 모르타르의 압축강도가 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 PCM을 3% 이상 혼입하는 경우 압축강도가 급격하게 감소하는 것으로 나타나 강도 확보에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

4) PCM 혼입률에 따른 휨강도 감소는 고로슬래그 치환 모르타르에 비해 플라이애시 치환 모르타르에서 더 크게 나타났으며, 특히 PCM 혼입이 고로슬래그 치환 모르타르 휨강도 발현에 미치는 영향은 미소한 것으로 판단된다.

5) 저발열 바인더 및 PCM의 현장적용을 위하여, 콘크리트 단계에서의 단열온도상승시험 및 역학적특성 평가에 대한 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 논문은 2014년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의 인력양성사업(NRF-2014H1C1A1066970)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

## References

1. Choi, Y. W., Park, M. S., Jeong, J. G., Choi B. G., and Kim, K. H. (2013), A Study on Estimation Model of Strength Development of Concrete Using Fly Ash and Ground Granulated Blast-Furnace Slag, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 17(5), 87-93.
2. Jang, J. D., Cho, H. D., and Park, S. W. (2015), Properties of Hydration Heat of High-Strength Concrete and Reduction Strategy for Heat Production, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 12(2), 203-210.
3. Jang, S. J., Kim, B. S., Kim, S. W., Kim, S. W., Park, W. S., and Yun, H. D. (2016), Hydration Heat and Strength Characteristics of Cement Mortar with Phase Change Materials(PCMs), *Journal of the Korea Concrete Institute*, 28(6), 665-672.
4. Kim, D. M., Jang, M. W., Park, K. Y., and Cha, C. Y. (2010), Physical Properties of Early Strength Concrete Using Poly Carboxylic Acid Type Admixtures for Accelerated Hydration Reaction, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(2), 183-184.
5. Kim, H. S., and Lee, D. U. (2009), A Study on the Properties of Hydration Heat of Mass Concrete using Blast-Furnace Slag Cement and Fly-ash, *Journal of the regional association of architectural institute of korea*, 11(4), 291-297.
6. Kim, J. B., Shin, Ki Su and Yang, E. I. (2012), Mechanical Properties of Ultra High Strength Concrete Using Ternary Blended Cement, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 16(6), 56-62.
7. Kim, J. K., and Yang, E. I. (1997), Factors for Hydration Heat and Thermal Stress in Mass Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 9(3), 15-23.
8. Kim, M. H., Choi, S. J., Oh, S. D., Kim, Y. R., and Lee, J. H. (2002), A Study on the Effect of Admixture Types and Replacement Ratio on Hydration Heat Reduction of High-Strength Concrete, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2(2), 145-150.
9. Kim, S. S., Cho, T. J., and Lee, J. B. (2008), Innovative Transient Thermal Gradient Control to Prevent Early Aged Cracking of Massive Concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 12(6), 164-172.
10. Kim, Y. R., Jung, Y. H., Lee, S. H., Kim, D. S., Khil, B. S., and Kim, W. K. (2006), The Characteristics of Hydration Heat Generation of Low Heat Concrete using Hydration Heat Reducing Admixtures, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 18(2), 709-712.
11. Korean Building Code and Commentary (2016), Architectural Institute of Korea (in Korea).
12. Korea Agency for Technology and Standard (KATS) (2006), Methods of Testing Cements: Determination of Strength (KS L ISO 679), Korean Standards Association, KSA, 16 (In Korean).
13. Korea Agency for Technology and Standard (KATS) (2007), Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement (KS L 5111), Korean Standards Association, KSA, 5 (In Korea).
14. Lee, J. W., and Chung, K. S. (2000), Application and Concrete Mix design by Control methods of Thermal Cracking in Mass Concrete Structure considering the Constructional condition, *Journal of the architectural institute of Korea Structure & Construction*, 16(7), 87-94.
15. Park, C. K., Lee, S. H., Kim, H. J., Kim, S. J., and Lee, T. W. (2008),

- The Characteristics of Strength of Development and Hydration Heat on High Volume Fly-Ash Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 20(1), 417-420.
16. Park, C. K., Son, S. H., Lee, S. H., Jang, K. U., Jeong, J. H., and Kim, M. S. (2001), *Journal of the Korea Concrete Institute*, 13(2), 403-408.
  17. Seo, T. S., Lim, C. K., and Cho, Y. G. (2014), Experimental Study on Hydration Heat Control of Mass Concrete by Vertical Pipe Cooling Method, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 26(1), 911-912.
  18. Son, Y. J., Ha, J. D., Um, T. S., Lee, J. R., and Kim, T. H. (2006), Study on the Properties of Dam Concrete Using Low Heat Portland Cementer, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 18(1), 445-448.
  19. The Standard Specification for Reinforced Concrete (2009), Korea Concrete Institute (in Korea).
  20. Yum, C. S., Bae, W. M., Kim, M. S., Beak, D. I., and Kim, K. M. (2006), A Study on Field Applications of Hydration Heat Control in the Mass Concrete Using Oscillating Capillary Tube Heat Pipe, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 18(1), 413-416.

Received : 06/05/2017

Revised : 06/28/2017

Accepted : 07/11/2018

---

**요 지 :** 스트론튬계 상전이물질은 특정한 온도에서 물질의 상태가 변함에 따라서 열을 흡수하거나 방출하게 된다. 본 연구의 목적은 스트론튬계 상전이물질의 혼입이 플라이애시 치환 모르타르 및 고로슬래그 치환 모르타르의 수화발열 및 역학적 특성에 미치는 영향을 실험적으로 평가하는 것이다. 스트론튬계 상전이물질의 혼입량은 결합재 질량의 1, 2, 3, 4, 5%로 하였다. 총 12개 수준의 모르타르 배합에 대해서 모르타르 흐름성능, 간이수화열온도상승, 압축 및 휨강도 실험을 각각 수행하였다. 실험결과 본 연구에서 사용한 스트론튬계 상전이물질은 모르타르의 수화열 저감 및 수화지연에 효과적인 것으로 판단된다. 특히 플라이애시 치환 모르타르의 최대온도 상승량은 고로슬래그 치환 모르타르의 최대온도 상승량에 비해 낮게 나타났다. 플라이애시 및 고로슬래그 치환 모르타르의 압축강도는 상전이물질 혼입량이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** 상전이물질, 수화열, 역학적 특성, 플라이애시, 고로슬래그

---