



상전이물질을 혼입한 시멘트 모르타르의 수화발열 및 강도 특성 평가

장석준¹⁾ · 김병선¹⁾ · 김선웅²⁾ · 박완신³⁾ · 윤현도^{1)*}

¹⁾충남대학교 건축공학과 ²⁾충남대학교 융복합시스템공학과 ³⁾충남대학교 건설공학교육과

Hydration Heat and Strength Characteristics of Cement Mortar with Phase Change Materials(PCMs)

Seok-Joon Jang,¹⁾ Byung-Seon Kim,¹⁾ Sun-Woong Kim,²⁾ Wan-Shin Park,³⁾ and Hyun-Do Yun^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²⁾Dept. of Convergence System Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

³⁾Dept. of Construction Engineering Education, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

ABSTRACT This study is conducted to investigate the effect of phase change materials (PCM) on hydration heat and strength characteristics of cement mortar. Two types of Barium and Strontium-based PCMs were used in this study and the addition ratio of each PCM to the cement mortar ranged from 1% to 5% by cement weight. Flow test, semi-adiabatic temperature rise test, compressive strength and flexural strength test were carried out to examine the PCM effect on heat and mechanical properties of cement mortar. Test results indicated that PCMs used in this study were effective to control hydration heat of cement mortar, and Barium-based PCM slightly reduce flow value. The compressive and flexural strength of cement mortar with PCM decreased with increasing the adding amount of PCM. The prediction model for compressive strength of cement mortar with different addition levels of PCMs are suggested in this study.

Keywords : phase change material(PCM), hydration heat, mechanical properties, compressive strength

1. 서 론

상전이물질(Phase Change Material, PCM)은 물질의 위상이 변할 때 필요한 잠열을 축적하는 물질로써, 상전이온도를 경계로 고체에서 액체 또는 액체에서 고체로 상전이가 되면서 열을 흡수 및 방출한다.^{1,2)} 이러한 특성 이외에도 PCM은 잠열 저장 성능을 통해 열을 발산하는 물질의 급격한 온도상승을 제어하는 역할을 할 수 있다.³⁾ 따라서 PCM을 활용하여 콘크리트의 온도변화를 제어하고 콘크리트 벽체의 단열성능 및 동결융해 저항성을 향상시키는 연구⁴⁻⁶⁾가 진행되었다.

최근 고층건물 및 장기간 교량 등 대형구조물이 증가하면서 마스콘크리트의 온도제어가 중요시되고 있다. 초기 마스콘크리트는 급격한 수화열 상승에 의해 높은 온도응력이 발생하게 되며, 콘크리트 내·외부에 예측이 불가능한 균열이 발생할 수 있다. 따라서 마스콘크리트의 온도저감을 위한 다양한 연구가 진행되었으며, 플라이애쉬 및 고로슬래그 등

다양한 저열재료를 사용하는 방법,⁷⁻⁹⁾ 프리쿨링 및 파이프쿨링 공법등을 활용하는 시공적 방법의 마스콘크리트 온도저감 기술에 대한 연구가 진행되었다.¹⁰⁻¹²⁾ 프리쿨링 공법은 배합이전에 물, 골재, 바인더와 같은 재료를 냉각하여 초기 타설 온도 저감을 통해 마스콘크리트의 수화열을 저감하는 공법이며, 파이프쿨링 공법은 콘크리트 내에 온도제어를 위한 파이프를 매설하는 공법이다. 이러한 시공적 방법은 재료의 물성 및 배합의 변화 없이 초기 수화열을 크게 저감할 수 있다는 장점이 있지만 추가적인 시공에 따른 비용 및 공사기간 증가의 우려가 있다.

Hunger et al.¹³⁾의 연구에서는 마이크로 캡슐형태의 PCM을 사용한 콘크리트의 수화특성 및 역학적특성 평가를 진행하였다. 콘크리트 부피비 1, 3, 5%의 PCM을 혼입한 콘크리트의 열적특성 평가결과 PCM 혼입률이 증가할수록 수화발열량이 감소하고 최대온도 시점이 지연되는 것으로 나타났으며, PCM 혼입률이 증가할수록 압축강도는 감소하는 것으로 나타났다. Choi et al.¹⁴⁾의 연구에서는 PCM을 사용한 시멘트 복합체의 열적특성 평가에 대한 연구를 진행하였으며, 간이단열온도 평가를 통해 PCM 혼입에 따른 수화발열의 감소를 확인하였다.

온도상승에 따른 마스콘크리트의 균열을 예측하기 위해

*Corresponding author E-mail : wiseroad@cnu.ac.kr

Received July 5, 2016, Revised September 7, 2016,

Accepted October 13, 2016

©2016 by Korea Concrete Institute

서는 온도상승의 급격하게 발생하는 타설 초기의 강도 및 수화특성에 대한 평가 요구된다. 하지만 PCM 혼입에 따른 초기강도의 변화 및 PCM 종류에 따른 시멘트 모르타르의 수화특성에 대한 평가는 아직까지 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 바륨 및 스트론튬계 PCM 혼입물에 따른 시멘트 모르타르의 역학적특성을 평가하고, 간이단열 온도상승 실험을 통한 열적특성을 평가하고자 한다.

2. 실험

2.1 사용재료

Fig. 1은 사용된 PCM의 형상을 나타낸 것으로, 본 연구에서는 PCM 종류에 따른 영향을 평가하기 위하여 바륨($\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) 및 스트론튬($\text{Sr}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)계 PCM을 사용하였다. 기존연구³⁾ 결과에 따르면 바륨의 상전이온도는 78.0°C 이며, 잠열량은 266 J/g 로 보고되었으며, 스트론튬의 경우 상전이온도 88.0°C , 잠열량 343 J/g 으로 보고되었다. 시멘트의 경우 분말도 $3,300 \text{ cm}^2/\text{g}$ 의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다. 잔골재는 흡수율 0.76% 및 밀도 2.61 g/cm^3 의 주무진 표준사를 사용하였다. 사용된 시멘트 및 표준사의 화학적조성을 Table 1에 정리하여 나타내었다.

2.2 실험계획

본 연구에서 사용된 배합을 Table 2에 나타내었으며, 물시멘트 비 50%의 시멘트 모르타르 배합을 사용하였다. 바륨 및

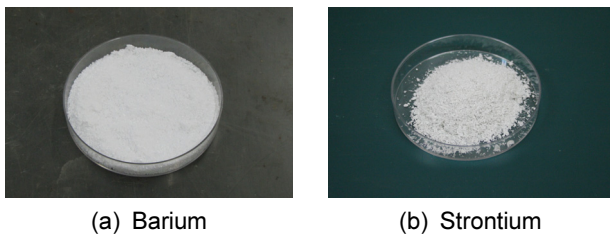


Fig. 1 Normal appearance of PCM

Table 1 Chemical composition of cement and sand

	Cement (%)	Sand (%)
Silicon dioxide (SiO_2)	20.90	86.02
Aluminium oxide (Al_2O_3)	5.39	5.44
Calcium oxide (CaO)	64.70	0.12
Iron oxide (Fe_2O_3)	2.38	0.17
Magnesium oxide (MgO)	1.51	0.03
Titanium dioxide (TiO_2)	1.33	0.04
Sodium oxide (Na_2O)	0.27	0.51
Potassium oxide (K_2O)	0.22	3.58
Sulfur trioxide (SO_3)	1.65	-
Loss on ignition (LOI)	5.80	4.90

스트론튬계 PCM의 첨가율은 각각 시멘트 중량대비 1~5%로 설정하였다. PCM 혼입에 따른 영향을 정밀 하게 평가하기 위하여 초기 수화반응에 영향을 줄 수 있는 혼화제를 사용하지 않았으며, 동일한 생산일의 시멘트를 사용하였다. 작업성을 평가를 위하여 배합 직후 모르타르 플로우 평가를 실시하였으며, 수화특성을 평가하기 위하여 간이단열 온도상승 실험을 실시하였다. 압축강도 및 휨 강도의 평가를 위해 총 3개의 휨 강도 시험체를 제작하였으며, 이를 통해 6번의 압축 강도를 평가하였다. 평가재령은 1, 3, 7, 28, 91일에 평가하였으며, 압축 및 휨 시험체 양생은 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 조건에서 수증양 생을 실시하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 간이단열 온도상승 실험

PCM 혼입률이 시멘트 모르타르의 수화발열 특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Fig. 2와 같이 간이단열 온도상승 실험을 실시하였다. 내경 $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ 의 정육면체 형태의 단열재 몰드를 제작하였으며, 단열재의 두께는 100 mm 로 설정하였다. 온도의 측정은 열전대(Thermal couple)을 이용하여 실험체 중앙부 및 외기의 온도를 동시에 측정하였다. 간이단열 온도상승 실험 시 초기타설 온도에 따른 영향을 최소화하기 위하여 20°C 내·외의 목표온도를 설정하였으며, 이를 위해 타설 전 24시간동안 모든 재료를 항온항습챔퍼에 밀봉상태로 보관하였다.

2.3.2 역학적특성 평가

PCM 혼입률에 따른 작업성의 변화를 평가하기 위하여 배합직후 시멘트 모르타르 플로우를 측정하였으며, 15회 타격 이후 플로우를 측정하였다. Fig. 3은 PCM이 혼입된 시멘트 모르타르의 역학적특성 평가방법을 나타낸 것으로, 본 연구에서는 KS L ISO 679¹⁵⁾에 준하여 실험을 수행하였다. 각 배합 당 $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ 의 각주형 공시체를 3개씩 제작하였으며, 지간거리를 100 mm 로 설정하고 중앙점 가력방식을 통해 휨 강도를 측정하였다. 압축강도 평가는 휨 강도 실험의 의해 판단된 실험체를 대상으로 실시하였다.

Table 2 Mixture proportions of cement mortar

W (kg)	C (kg)	S (kg)	PCM (kg)					
			0%	1%	2%	3%	4%	5%
1	2	3	-	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10



Fig. 2 Test set-up for semi-adiabatic temperature rise test

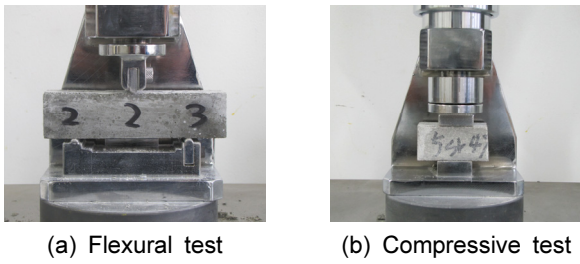


Fig. 3 Test set-up for mechanical properties

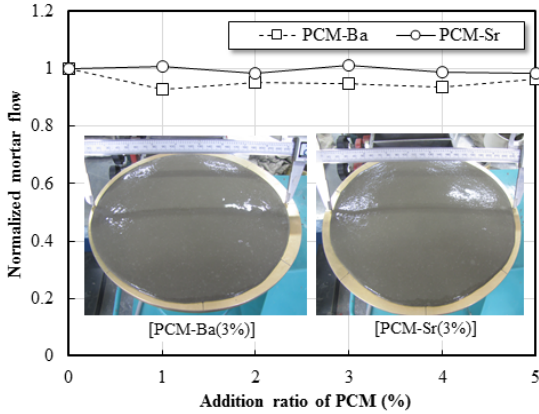


Fig. 4 Effects of addition ratio of PCM on cement mortar flow

3. 실험결과 및 분석

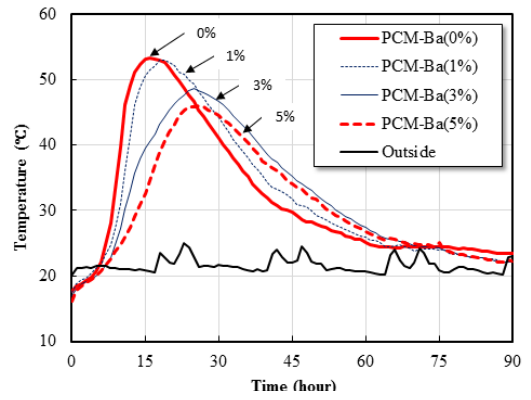
3.1 PCM 혼입률에 따른 유동성 평가

Fig. 4는 바륨 및 스트론튬계 PCM을 사용한 시멘트 모르타르의 유동성 평가결과를 혼입률에 따라 나타낸 것으로, 흐름 값의 경우 4방향 측정값의 평균으로 나타내었다. PCM을 혼입하지 않은 시멘트 모르타르의 유동성 평가결과 244 및 230 mm로 나타났다. 바륨계 PCM을 사용한 경우 혼입률에 따라 4~8%의 작업성 감소를 나타내었고, 스트론튬계 PCM을 사용한 경우에는 0~2%의 감소를 나타내었다. 따라서 PCM 혼입률에 따른 시멘트 모르타르 유동성의 변화는 미소한 것으로 판단되며, 동일한 혼입률에서는 스트론튬계 PCM을 사용한 경우 바륨계 PCM을 사용한 경우에 비해 다소 높은 작업성을 보유할 것으로 판단된다.

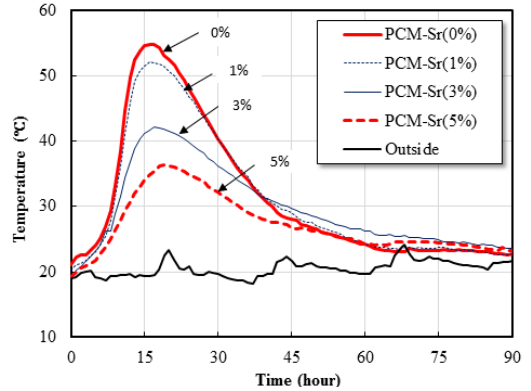
3.2 간이단열온도상승 실험

3.2.1 간이단열온도상승 이력

Fig. 5는 대표적인 배합의 PCM 혼입률에 따른 간이단열 온도상승 이력을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 바륨계 PCM을 혼입한 시멘트 모르타르의 실험결과를 나타낸 것으로, PCM을 혼입률이 증가함에 따라 수화속도가 감소하고 최대 수화열 발열 시점이 지연되고 최대 온도상승량이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 혼입률 1~4%에서 순차적으로 나타났으며, 혼입률 5%에서는 혼입률 4%의 실험체와 유사



(a) Cement mortar with PCM based on barium



(b) Cement mortar with PCM based on strontium

Fig. 5 Effects of addition ratio of PCM on semi-adiabatic temperature rise

한 간이단열온도 상승이력을 나타내었다. Fig. 5(b)는 스트론튬계 PCM을 혼입한 시멘트 모르타르의 온도이력을 나타낸 것으로, PCM을 혼입률이 증가함에 따라 수화발열 속도가 감소하고 최대수화열이 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 혼입률 5%까지 순차적으로 관찰되었으며, PCM 혼입률에 따른 발현시간의 변화는 미소한 것으로 나타났다.

3.2.2 최대 온도상승량 및 발현시간

Fig. 6은 PCM 종류 및 혼입률에 따른 최대 온도상승량 및 발현시간을 나타낸 것이다. 바륨계 PCM을 사용한 경우 혼

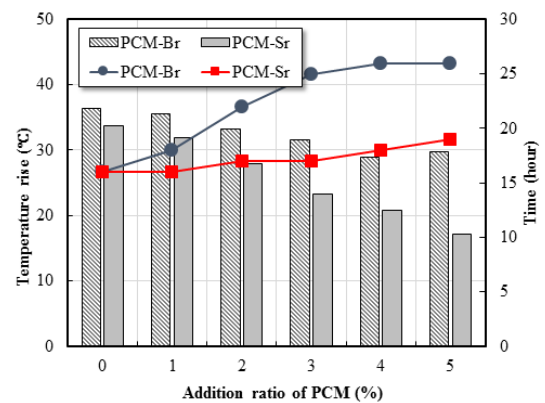
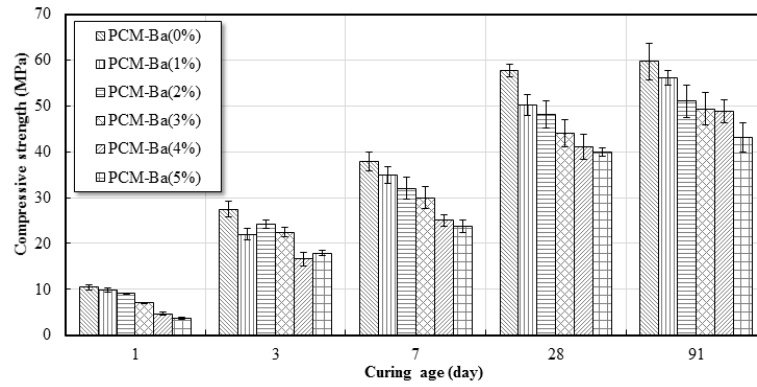
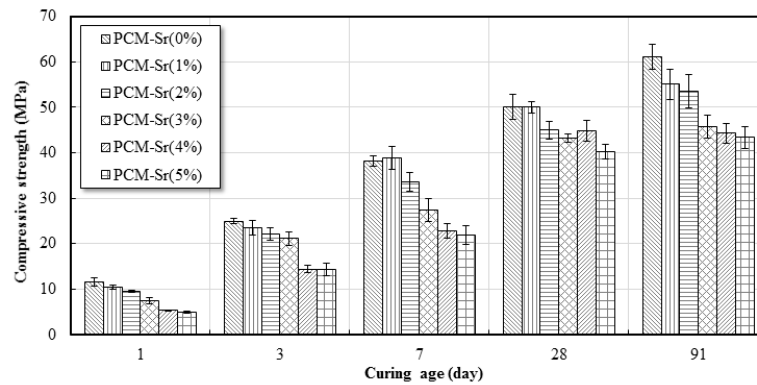


Fig. 6 Effects of addition ratio of PCM on hydration heat properties



(a) Cement mortar with PCM based on barium



(b) Cement mortar with PCM based on strontium

Fig. 7 Effects of addition ratio of PCM on compressive strength

Table 3 Test results of compressive strength of mixtures

Mixture	1 day		3 days		7 days		28 days		91 days	
	Average (MPa)	Normalized	Average (MPa)	Normalized	Average (MPa)	Normalized	Average (MPa)	Normalized	Average (MPa)	Normalized
PCM-Ba(0%)	10.4 (±0.5)	1.00	27.5 (±1.7)	1.00	37.9 (±2.0)	1.00	57.8 (±1.4)	1.00	59.6 (±4.0)	1.00
PCM-Ba(1%)	9.9 (±0.5)	0.95	22.0 (±1.2)	0.80	34.9 (±1.8)	0.92	50.2 (±2.2)	0.87	56.1 (±1.5)	0.94
PCM-Ba(2%)	9.1 (±0.4)	0.87	24.2 (±2.3)	0.88	32.0 (±1.7)	0.84	48.2 (±2.3)	0.83	51.0 (±2.6)	0.86
PCM-Ba(3%)	7.0 (±0.2)	0.67	22.4 (±1.0)	0.82	30.0 (±2.4)	0.79	44.1 (±3.0)	0.76	49.4 (±3.6)	0.83
PCM-Ba(4%)	4.7 (±0.3)	0.45	16.6 (±1.4)	0.60	25.1 (±1.2)	0.66	41.0 (±2.8)	0.71	48.8 (±2.5)	0.82
PCM-Ba(5%)	3.6 (±0.2)	0.35	17.9 (±0.6)	0.65	23.8 (±1.3)	0.63	40.0 (±0.9)	0.69	43.1 (±3.3)	0.72
PCM-Sr(0%)	11.6 (±0.9)	1.00	25.0 (±0.6)	1.00	38.0 (±1.1)	1.00	50.1 (±2.7)	1.00	61.1 (±2.7)	1.00
PCM-Sr(1%)	10.5 (±0.4)	0.90	23.5 (±1.7)	0.94	38.8 (±2.5)	1.02	50.0 (±1.2)	1.00	55.0 (±3.3)	0.90
PCM-Sr(2%)	9.5 (±0.2)	0.82	22.1 (±1.4)	0.88	33.6 (±2.1)	0.88	44.9 (±1.9)	0.90	53.5 (±3.7)	0.87
PCM-Sr(3%)	7.4 (±0.6)	0.64	21.1 (±1.5)	0.85	27.4 (±2.5)	0.72	43.2 (±0.9)	0.86	45.8 (±2.6)	0.75
PCM-Sr(4%)	5.3 (±0.2)	0.46	14.4 (±0.9)	0.58	22.8 (±1.6)	0.60	44.7 (±2.3)	0.89	44.3 (±2.2)	0.73
PCM-Sr(5%)	4.9 (±0.2)	0.42	14.4 (±1.3)	0.58	21.9 (±2.0)	0.57	40.2 (±1.5)	0.80	43.4 (±2.4)	0.71

입물 1%에서 2.2%의 수화열 저감을 나타내어 저감효과가 미소한 것으로 나타났다. 혼입률이 증가함에 따라 혼입률 2, 3 및 4%에서 8.3, 12.9, 20.4%의 수화열 저감효과를 나타내었다. 혼입률 5%에서는 17.9%의 저감효과를 나타내어, 바륨계 PCM을 사용하였을 경우 수화열 저감을 위한 유효한 혼입률은 4% 내·외로 판단된다. 스트론튬계 PCM을 사용한 경우에는 혼입률 1, 2, 3, 4, 5%에서 각각 12.1, 22.9, 36.1, 42.7, 52.9%의 저감효과를 나타내어 바륨계 PCM을 사용한 경우에 비해 5%의 혼입률까지 순차적인 수화열 저감효과를 나타내었다.

최대온도 발현시간은 스트론튬계 PCM을 사용할 경우 1~5%의 혼입률에서 1~1.2배의 시간지연을 나타내어, PCM이 수화 지연에 미치는 영향은 미소한 것으로 판단된다. 바륨계 PCM을 사용한 경우에는 혼입률 1~4%에서 1.6배까지 순차적인 수화 지연 효과를 나타내었다. 혼입률 5%의 경우 혼입률 4%와 동일한 수화 지연 효과를 나타내었으며, 앞서 기술한 바와 같이 4% 내·외에서 유효한 효과를 나타내는 것으로 판단된다.

따라서 바륨계 PCM을 사용할 경우 수화지연에 효과적인 것으로 판단되며, 스트론튬계 PCM을 사용할 경우 수화열 저감에 효과적인 것으로 판단된다. 또한 수화특성만을 고려하였을 때 바륨계 PCM의 최대혼입률은 시멘트 중량비 4% 내·외로 판단된다.

3.3 압축강도 특성

3.3.1 PCM 종류 및 혼입률에 따른 압축강도 특성

Fig. 7은 PCM 혼입률에 따른 압축강도의 변화를 혼입률 및 재령에 따라 나타낸 것으로, 바륨계 및 스트론튬계 PCM을 구별하여 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 PCM을 혼입함에 따라 압축강도가 감소하는 경향을 나타내었으며, 혼입률이 증가할수록 감소폭이 커지는 것으로 나타났다. 초기재령 1일에서는 바륨계 PCM을 혼입할 경우 5~55%의 압축강도 감소를 나타내었으며, 스트론튬계 PCM을 혼입할 경우 10~58%의 압축강도 감소를 나타내었다. 재령 3일에서의 압축강도 감소는 바륨 및 스트론튬계 PCM 혼입에서 각각 12~40% 및 6~42%의 감소를 나타내었다. 압축강도 실험결과를 Table 3에 정리하여 나타내었으며, 양생재령 1 및 3일에서는 PCM 혼입률이 4% 일 때 혼입률 3% 비해 압축강도가 다소 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 재령 7일에서도 유사한 양상을 나타내었으며, 바륨 및 스트론튬계 PCM을 혼입함에 따라 8~37% 및 0~43%의 감소를 나타내었다. 수화열에 의한 균열발생 가능성이 높은 7일 이내의 압축강도의 감소는 온도균열의 발생가능성을 높일 수 있기 때문에, 3% 이상의 PCM을 혼입할 경우 강도측면에서의 검증이 필요할 것으로 판단된다.

재령 28일에서 압축강도의 변화는 바륨계 PCM을 사용할 경우 혼입률이 1~5%에서 13~31%의 감소를 나타내었으며, 스트론튬계 PCM을 혼입할 경우에는 0~20%의 감소를 나타내었다. 따라서 재령 28 및 91에서의 압축강도 감소폭은 초

기재령에 비해 적어지는 것으로 판단된다. 하지만 PCM 혼입에 따른 압축강도의 감소는 장기재령에서도 검토가 필요할 것으로 사료된다.

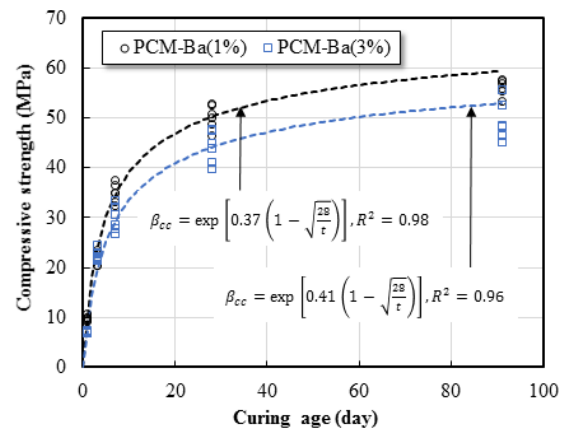
3.3.2 PCM 혼입률에 따른 강도추정식의 변화

수화열에 의한 균열을 예측하기 위해서는 수화열에 의한 응력과 더불어 매스콘크리트의 강도발현에 대한 예측이 요구된다. 본 연구는 식 (1)에 나타난 바와 같이 콘크리트 구조기준¹⁶⁾에서 제시된 콘크리트의 강도추정식에 근거하여 PCM 혼입률이 재령에 따른 압축강도 발현에 미치는 영향을 평가하였다.

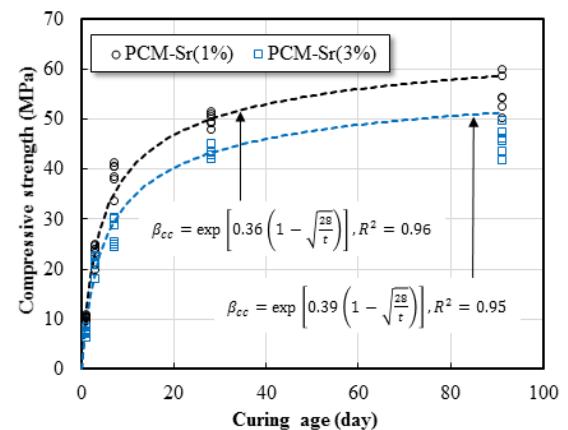
$$f_{cu}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cu} \quad (1)$$

여기서, f_{cu} 는 재령 28일에서의 압축강도, $f_{cu}(t)$ 는 재령 t 일에서 콘크리트의 평균 압축강도(MPa), $\beta_{cc}(t)$ 는 콘크리트 강도 발현에 대한 재령에 따른 보정계수로 식 (2)에 따라 산정할 수 있다.

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left[\beta_{sc} \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right] \quad (2)$$



(a) Cement mortar with PCM based on barium



(b) Cement mortar with PCM based on strontium

Fig. 8 Effects of curing age on compressive strength of cement mortar with PCM

Table 4 Results of comparison between measured data and formulas

Mixture	β_{sc}	Coefficient of determination
PCM-Ba (0%)	0.38	0.94
PCM-Ba (1%)	0.37	0.98
PCM-Ba (2%)	0.37	0.95
PCM-Ba (3%)	0.41	0.96
PCM-Ba (4%)	0.49	0.98
PCM-Ba (5%)	0.52	0.92
PCM-Sr (0%)	0.35	0.98
PCM-Sr (1%)	0.36	0.96
PCM-Sr (2%)	0.36	0.98
PCM-Sr (3%)	0.39	0.95
PCM-Sr (4%)	0.47	0.87
PCM-Sr (5%)	0.47	0.94

여기서, β_{sc} 는 시멘트 종류에 따른 계수로써, 현행기준에서는 1종 보통 시멘트 0.35, 3종 조강시멘트 0.25, 2종 중용열 시멘트의 경우 0.40을 제시하고 있다(습윤양생).

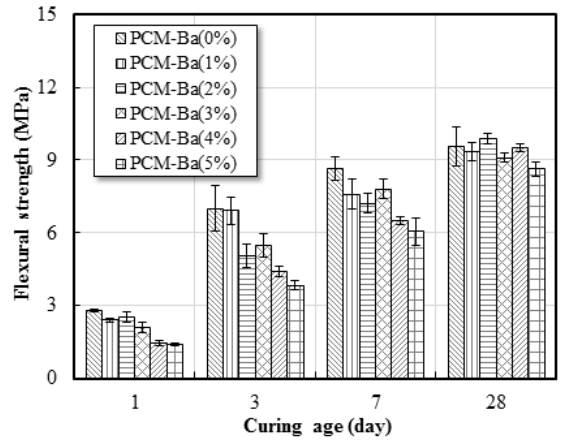
Fig. 8은 대표적인 실험체의 재령에 따른 압축강도의 발현율식 (1) 및 (2)에 따라 평가한 결과를 나타낸 것으로, 대체적으로 각 배합의 압축강도 발현을 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

Table 4는 각 배합의 β_{sc} 및 결정계수를 정리하여 나타낸 것으로, 혼입률이 증가함에 따라 β_{sc} 가 증가하는 경향을 나타내었다. PCM이 혼입되지 않은 시멘트 모르타르의 경우 0.38 및 0.35의 값을 나타내었으며, 현행기준에서 제시된 0.35와 유사한 경향을 나타내었다. 혼입률 1 및 2%에서 바륨 및 스트론튬계 PCM을 사용할 경우 β_{sc} 는 0.37 및 0.36을 나타내었으며, 현행기준의 1종 보통 시멘트와 유사한 양상을 나타내었다. PCM 혼입률 3%의 경우 β_{sc} 는 바륨 및 스트론튬에서 0.41 및 0.39를 나타내어 현행기준의 중용열 시멘트와 유사한 거동을 나타내었다. 이는 초기 압축강도의 감소에 기인한 것으로 판단된다. 혼입률 4 및 5%에서는 바륨 및 스트론튬에서 0.49 및 0.47의 β_{sc} 를 나타내어 초기 압축강도 저하에 따른 온도균열의 검토가 필요할 것으로 판단된다. 또한 초기균열의 발현이 비교적 높은 스트론튬계 PCM을 사용할 경우 바륨계 PCM 보다 동일한 온도응력에서 균열이 저감이 용이할 것으로 판단된다.

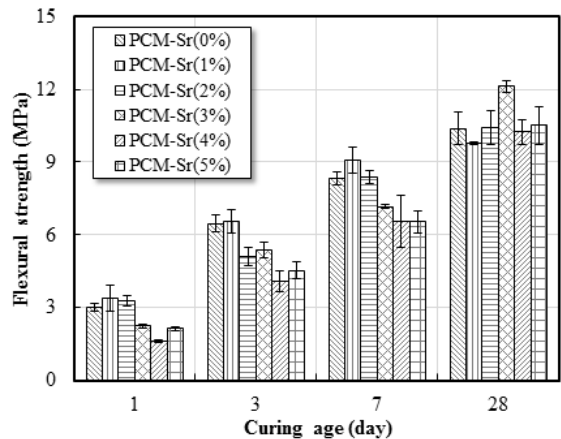
3.4 휨 강도특성

3.4.1 PCM 종류 및 혼입률에 따른 휨 강도 특성

Fig. 9는 PCM 종류 및 혼입률에 따른 휨 강도의 변화를 나타낸 것으로, 재령 28일까지의 실험결과를 정리하여 나타내었다. 전반적으로 PCM 혼입이 증가함에 따른 휨도의 저하가 관찰되었으며, 재령이 증가함에 따라 휨 강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 예상된 바와 같이 이러한 결과는 압



(a) cement mortar with PCM based on barium



(b) cement mortar with PCM based on strontium

Fig. 9 Effects of addition ratio of PCM on flexural strength

축강도의 발현과 밀접한 관련을 갖는 것으로 판단된다.

초기재령 1일에서 바륨계 PCM을 1~3% 혼입한 경우 기준 실험체에 비해 13~25%의 강도감소를 나타내었으나, 스트론튬계 PCM을 혼입할 경우에는 혼입률 1~2%에는 오히려 강도가 8~11% 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향을 초기 휨 강도가 매우 작기 때문에 실험에 의한 오차로 판단되며, 혼입률 3%에서는 26% 휨 강도가 감소하는 것으로 나타났다. 이에 반해 PCM 혼입률 4~5%에서는 휨 강도가 약 40%이상 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 앞서 기술한 바와 같이 혼입률 4% 이상에서 압축강도가 크게 감소하기 때문으로 판단된다.

재령 3일에서의 휨 강도에서도 동일한 경향을 나타냈다. 바륨계 PCM을 사용한 경우 혼입률 1~3%에서 1~28%의 휨 강도 저하가 나타났으며, 혼입률 4~5%에서는 37~45%로 다소 높은 휨 강도 저하를 나타내었다. 스트론튬계 PCM을 사용한 경우에는 혼입률 1~3%에서 0~21%의 휨 강도 저하가 나타났으며, 혼입률 4~5%에서는 30~37%로 의 비교적 높은 휨 강도의 저하를 나타내었다.

재령 28일에서의 휨 강도 평가결과 바륨계 PCM 및 스트론튬계 PCM을 사용한 경우 모두 PCM을 혼입하지 않은 시멘트 모르타르와 유사한 강도를 나타내었으며, 재령이 증가함에 따라 PCM 혼입에 따른 휨 강도 저하가 완화되는 것으로 판단된다.

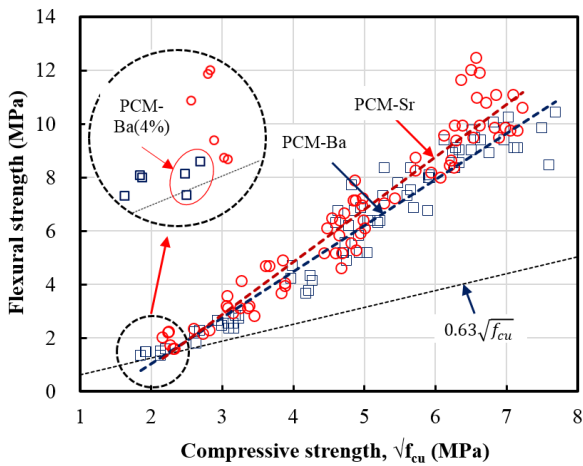


Fig. 10 Correlation between flexural strength and compressive strength

3.4.2 휨 강도와 압축강도의 관계

Fig. 10은 휨 강도와 압축강도의 관계를 나타낸 것으로, 예상된 바와 같이 재령에 따라 압축강도가 증가함에 따라 휨 강도도 증가하는 결과를 나타내었다. 각기 상의한 재령이기 때문에 절대적인 비교는 어렵지만, 콘크리트 구조설계기준¹⁶⁾에서 제시되고 있는 식 (3)과 비교하여 나타내었을 때 대체적으로 안전측으로 평가되었다. 다만 초기 재령 1일에서 바륨을 4% 혼입한 경우 휨 강도가 다소 감소하는 특성을 나타내었다.

$$f_r = 0.63 \sqrt{f_{cu}} \quad (3)$$

여기서, f_r 은 콘크리트의 휨 강도(파괴계수)를 나타낸다. 재령이 증가함에 따라 현행기준에 비해 휨 강도가 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 스트론튬계 PCM을 혼입할 경우 바륨계 PCM을 혼입할 경우에 비해 상대적으로 안전측으로 평가되었다.

4. 결 론

본 연구는 PCM 종류 및 혼입률에 따른 시멘트 모르타르의 수화열 및 역학적특성을 평가하기 위하여 실시되었으며, 이를 위하여 바륨 및 스트론튬계 PCM을 1~5% 혼입한 시멘트 모르타르를 대상으로 작업성평가, 간이단열 온도상승 실험, 압축 휨 강도 평가를 실시하였다. 제한된 실험체를 대상으로 본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 작업성 평가결과 PCM을 혼입하지 않은 시멘트 모르타르의 유동성이 230 mm 이상 확보된 경우, PCM 혼입률 5%까지는 PCM 혼입이 유동성에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 판단된다. 또한 스트론튬계 PCM을 사용한 경우 바륨계 PCM을 사용한 경우에 비해 동일한 혼입률에서 작업성이 향상되는 것으로 나타났다.

- 2) 간이단열 온도상승 실험결과 PCM 혼입률이 증가함에 따라 온도상승량 및 최대온도 발현시간이 지연되는 것으로 나타났다. 바륨계 PCM의 경우 수화열저감에 효과적이며, 스트론튬계 PCM은 수화열저감에 효과적으로 나타났다. 따라서 추후 연구에서 바륨 및 스트론튬계 PCM을 동시혼입 및 적절한 혼입비 선정에 대한 연구가 요구된다.
- 3) 압축강도 평가결과 PCM 혼입에 따른 압축강도의 저하가 나타났으며, 초기강도에서 저하가 큰 것으로 나타났다. 또한 혼입률 4%에서 급격한 압축 및 휨 강도저하가 나타났다. 따라서 PCM 혼입률 4% 이상의 복합체를 적용할 경우 초기강도 저하에 따른 온도균열 발생가능성의 검토가 필요할 것으로 사료된다.
- 4) 재령에 따른 압축강도 발현을 현행기준의 수식과 비교한 결과 혼입률 1 및 2%에서는 보통 시멘트와 유사한 양상을 나타내었고, 혼입률 3%의 경우 중용열 시멘트와 유사한 양상을 나타내었다. 혼입률 4 및 5%의 경우 초기강도의 급격한 감소를 나타내었으며, 수화열 해석 시 적절한 고려가 필요할 것으로 판단된다.
- 5) 휨 강도 평가결과 압축강도 변화와 유사하게 PCM 혼입률이 증가함에 따라 휨 강도가 감소하는 경향을 나타내었다. 재령에 증가함에 따라 휨 강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 압축강도발현과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2014 H1C1A1066970).

References

1. Ling, T. C., and Poon, C. S., "Use of Phase Change Materials for Thermal Energy Storage in Concrete: An Overview", *Construction and Building Materials*, Vol. 46, 2013, pp. 55-62.
2. Bentz, D. P., and Turpin, R., "Potential Applications of Phase Change Materials in Concrete Technology", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, No. 7, 2007, pp. 527-532.
3. Kim, Y. R., Kim, D. S., Khil, B. S., Kim, O. J., and Lee, D. B., "An Experimental on Properties of Concrete Using Latent Heat Binder", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 5, 2008, pp. 661-668.
4. Zhang, D., Li, Z., Zhou, J., and Wu, K., "Development of Thermal Energy Storage Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 6, 2004, pp. 927-934.
5. Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., and Buddhi, D., "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications", *Renewable and Sustainable energy reviews*, Vol. 13, No. 2, 2009, pp. 318-345.
6. Kim B. H., and Lee, H. S., "A Study on Thermal Performance

- of Cement Mortar with PCM”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 4, 2011, pp. 521-528.
7. Langan, B. W., Weng, K., and Ward, M. A., “Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 7, 2002, pp. 1045-1051.
 8. De Schutter, G., “Hydration and Temperature Development of Concrete Made with Blast-Furnace Slag Cement”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 1, 1999, pp. 143-149.
 9. Wang, X. Y., and Lee, H. S., “Modeling the Hydration of Concrete Incorporating Fly Ash or Slag” *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 7, 2010, pp. 984-996.
 10. Baek, D. I., and Kim, M. S., “Appication of Heat Pipe for Hydration Heat Control of Mass Concrete”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 2, 2008 pp. 157-164.
 11. Gajda, J., and Vangeem, M. “Controlling Temperatures in Mass Concrete”, *Concrete international*, Vol. 24, No. 1, pp. 58-62.
 12. Kim, J. K., Kim, K. H., and Yang, J. K., “Thermal Analysis of Hydration Heat in Concrete Structures with Pipe-Cooling System” *Computers and Structures*, Vol. 79, No. 2, 2001, pp. 163-171.
 13. Hunger, M., Entrop, A. G., Mandilaras, I., Brouwers, H. J. H., and Founti, M., “The Behavior of Self-Compacting Concrete Containing Micro-Encapsulated Phase Change Materials”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, No. 10, 2009, pp. 731-743.
 14. Choi, W. C., Khil, B. S., Chae, Y. S., Liang, Q. B., and Yun, H. D., “Feasibility of using Phase Change Materials to Control the Heat of Hydration in Massive Concrete Structures”, *The Scientific World Journal 2014*, 2014, pp. 1-6.
 15. KS L ISO 679, “Methods of Testing Cements-Determination of Strength”, *Korean Standards Association*, 2011, pp. 9-11.
 16. Korea Concrete Institute, *Concrete Structural Design Code*, 2012.

요 약 본 연구는 상전이물질이 시멘트 모르타르의 수화특성 및 강도특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실시되었다. 이를 위하여 바륨 및 스트론튬계 상전이물질을 사용하였으며, 상전이물질 혼입률 1~5%에 대한 실험을 수행하였으며, 시멘트 모르타르 작업성 평가, 간이단열온도상승 실험, 압축 및 휨 강도 평가를 실시하였다. 실험결과 상전이물질의 혼입은 시멘트 모르타르의 수화열 감소에 효과적인 것으로 나타났으며, 바륨 기반 PCM을 사용할 경우 흐름성능이 다소 감소하는 것으로 나타났다. 압축 휨 강도의 경우 상전이물질의 혼입률이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, PCM을 사용할 경우 혼입률에 따라 압축강도 발현추이의 변화가 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 상전이물질이 혼입률에 따른 압축강도 추정식을 제시하였다.

핵심용어 : 상전이물질, 수화열, 역학적특성, 압축강도