



SSPCM 혼입 콘크리트의 역학적 성능 기반 배합설계기법 연구

민해원¹ · 김희선²

이화여자대학교 건축공학과 석사과정¹, 이화여자대학교 건축공학과 교수²

Investigation of Mix Design Method in Concrete Mixed with SSPCM Based on Mechanical Behaviors

Min, Hae-Won¹ · Kim, Hee-Sun²

¹Graduate student, Department of Architectural Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea

²Professor, Department of Architectural Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea

Abstract: As energy consumption of building and the reduction of carbon dioxide emissions have been emphasized, phase change materials(PCM) have been introduced as building materials due to its high heat storage performance. Using shape-stabilizing technique, octadecane/xGnP shape-stabilized PCM(SSPCM) can prevent leakage and improve heat storage performance. The objectives of this study are to propose mix design method of concrete mixed with SSPCM and to evaluate mechanical behaviors of the concrete mixed with SSPCM manufactured according to the proposed mix design. Based on the previously reported material test result, the existing mix design of plain concrete(Concrete standard specification, 2009) is modified to consider reduction of strength in concrete due to the addition of SSPCM. To verify the proposed mix design, specimens are fabricated according to the proposed mix design and axial strength tests and three-point loading tests are performed. Test results show that compressive strengths of the tested specimens reach the designed strength even when two different mix ratios of SSPCM are used. From three-point loading tests, flexural stresses decrease as mix ratio of SSPCM increases.

Key Words: Phase change material, Mix design method, Compressive and tensile strength, Flexural and shear stress

1. 서론

최근 건축물의 사용에너지와 이산화탄소 발생량 저감이 강조됨에 따라 친환경 건축 기술에 대한 관심이 증가하면서 국내·외로 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 건축물의 에너지 절약 및 효율 향상을 위한 대안으로 잠열성능이 우수한 PCM(Phase change material, 상변화물질)을 활용하는 방안이 논의되고 있으며, PCM의 온도에 따라 고체 또는 액체로 변화하는 축열 성능은 많은 논문을 통해 입증되고 있다(Cabeza et al., 2011; Jeong et al., 2011, 2013; Kim et al., 2014).

PCM을 건축물에 적용할 경우, 온도가 상승하는 구간에는 열을 흡수하고 온도가 하강하는 야간에는 열을 재방출하는 축열 성능을 이용할 수 있기 때문에 실내 온도를 안정적으로 유지하고 건축물 에너지 저감에 기여할 수 있다. 그러나 PCM은 액체 상태에서 누수가 일어나기 쉽고, 상변화 온도 범위에 따라 다양한 종류가 있기 때문에 목적에 알맞은 PCM을 선택하기 어렵다 (Bayes-Garcia et al., 2010; Chen et al., 2012; Hu et al., 2014; Kim et al., 2013; Monica et al., 2014).

PCM을 혼입한 콘크리트의 구조재료실험과 관련된 기존 연구를 살펴보면, PCM의 혼입률이 증가함에 따라 압축강도 및 인장강도 등의 역학적 성질은 저하되

주요어: SSPCM, 배합설계, 역학적 거동, 압축강도, 휨 응력

Corresponding author: Kim, Hee-Sun

Department of Architectural Engineering, Ewha Womans University, 52 Ewhayeodae-gil, Seodaemun-gu, Seoul 120-750, Korea
 Tel: +82-2-3277-6872, Fax: +82-2-3277-6875, E-mail: hskim3@ewha.ac.kr

Received January 30, 2015 / Revised February 28, 2015 / Accepted March 15, 2015

는 것을 알 수 있다 (Fenollera et al., 2013; Jayalath et al., 2013; Meshgin et al., 2012). 그러나 건축구조재료 도입을 목적으로 다양한 상변화 물질을 포함하는 콘크리트의 구조역학적 성질이나 온도변화에 따른 물성치에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서 사용된 상변화 물질은 검은색 잔골재 형태의 SSPCM(shape-stabilized PCM, 숭실대학교 건축학부 건축환경재료연구실 개발)으로, 흑연기반의 xGnP(Exfoliated graphite nanoplatelets)에 상변화 물질인 octadecane을 함침시킨 물질이다. 이 SSPCM은 xGnP를 통해 상안정화가 가능하여 액체 상태에서도 누수가 잘 발생되지 않고 온도 변화에 따라 열이 콘크리트에 잘 전달되는 장점을 가진다 (Kim et al., 2013). 또한, xGnP는 여러 겹의 나노클레이가 혼합된 물질로서 가격이 저렴하며 다른 물질에 적용되어 화학적 또는 물리적으로 물성 개선 효과를 개선시킬 수 있는 다공성의 탄소 나노튜브의 소재로, 겉보기 밀도 0.0053~0.01g/cm³, 열 전도도 2~300W/m·K, 비열 710J/kg·K로 나타났다. 유기 계열의 상변화 물질인 octadecane은 탄소와 수소로 이루어졌으며, 녹는점은 26~29°C, 열 용량은 256J/g, 비열 92J/kg·K, 열 전도도 0.26W/m·K, 25°C의 밀도는 777kg/m³이다. 이 밖의 SSPCM의 상세한 열적거동은 Kim 등 (2013)의 연구에서 찾아볼 수 있으며, octadecane/xGnP SSPCM을 시멘트 질량대비 30% 혼입한 모르타르의 열적 성능에 대한 실험을 수행한 결과로 SSPCM이 변화하는 온도 22~33°C에서 가장 높은 잠열성능을 가지는 것으로 나타나(Kim et al., 2014), 건축물 내부와 외부의 온도를 안정하게 유지할 수 있으며, SSPCM을 혼입한 콘크리트에서도 이와 비슷한 성능을 기대해 볼 수 있다.

본 연구에서는 SSPCM을 혼입한 콘크리트가 구조재료로 활용될 수 있도록 하기 위해 기존의 콘크리트 배합설계(콘크리트 표준시방서, 2009)를 기준으로 다양한 SSPCM 혼입률에 따라 설계강도 구현이 가능한 SSPCM 혼입 콘크리트 배합설계기법을 제안하였고, SSPCM을 혼입한 콘크리트에서 압축강도를 측정하여 설계강도와 유사한 강도로 발현되는지 확인하였다. 그리고 3점 재하실험을 통해 얻은 휨 강도를 평가하여 SSPCM을 혼입한 콘크리트가 구조재료로써 사용될 수 있는 역학적 기반을 제공하고자 한다.

2. 배합설계에 따른 배합검증방법 및 결과

1. SSPCM의 혼입률에 따른 배합량 산정

Kim 등 (2014)의 연구에서는 일반 콘크리트 배합에 SSPCM을 추가적으로 넣어 재료 실험을 진행하였

다. 이에 대한 연구 결과로 SSPCM을 혼입한 콘크리트의 압축강도는 SSPCM의 혼입률에 비례하여 저하되는 것으로 발표되었다. 따라서 기존의 콘크리트 배합설계(콘크리트 표준시방서, 2009)를 기반으로 SSPCM 혼입률에 따른 강도 변화를 고려하여 콘크리트 설계강도(F_{ck})에 근접한 값이 나올 수 있도록 설계하였으며, SSPCM 혼입률에 따른 콘크리트 제조방법에 있어서 배합강도(F_{cr}) 계산식을 다음 식 (1)과 같이 제안한다.

$$F_{cr} = [(1 + (0.069 \times P)) \times F_{ck}] + 10 \quad (1)$$

식 (2)에서 F_{cr} 은 콘크리트 배합강도(MPa)이고, F_{ck} 는 콘크리트 설계강도(MPa)이며, P는 전체 콘크리트 질량 대비 SSPCM 질량의 비율로 계산한 혼입률(%)을 의미한다.

배합강도가 산정된 후에는 기존 콘크리트 배합설계에 따라 식 (2)와 같이 물-시멘트비(W/C)를 산정할 수 있다.

$$W/C = \frac{14.4}{(F_{cr} - 2.2)} \quad (2)$$

물-시멘트비(W/C)를 산정한 후에는 잔골재율(S/a)과 단위 수량(W)을 Table 1의 굵은 골재의 최대 치수, 조립률, 슬럼프(Slump) 등을 이용하여 산정한다.

Table 1. Fine Aggregate Rate and Water According to Maximum Size of Coarse Aggregate

Maximum size of coarse aggregate (mm)	Unit volume of coarse aggregate (%)	Fineness modulus (%)	Water/cement ratio (%)	Slump (mm)	Concrete without AE agent		
					Entrapped air (%)	Fine aggregate modulus (%)	Unit quantity of water (kg)
15	58	2.8	55	80	2.5	49	190
20	62	2.8	55	80	2.0	45	185
25	67	2.8	55	80	1.5	41	175
40	72	2.8	55	80	1.2	36	165

앞서 산정한 물-시멘트비(W/C)와 단위 수량(W)을 이용하여 단위 시멘트량(C)을 산정하는 방법은 다음 식 (3)과 같다.

$$C = \frac{100}{W/C(\%)} \times W \quad (3)$$

단위 시멘트량(C)을 산정한 후에는 기존의 단위 골재량의 절대 용적(A)을 구하는 식 (4)에 SSPCM 혼입률을 고려하여 다음의 식 (5)와 같이 산정하였다.

$$A = 1000 - [W + (\frac{C}{C_d}) + A_v] \quad (4)$$

$$A = 1000 - [W + (\frac{C}{C_d}) + (W + C + S + G) \times (\frac{P}{P_d}) + A_v] \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)는 콘크리트 1m³의 배합 기준량을 의미하며, A는 단위 골재량의 절대용적(m³), W는 단위 수량(kg/m³), C는 단위 시멘트량(kg/m³), C_d는 시멘트 밀도, S는 잔골재량(kg/m³), G는 굵은 골재량(kg/m³), P는 전체 콘크리트 질량 대비 SSPCM 질량의 비율로 계산한 혼입률(%), P_d는 SSPCM 밀도, A_v는 공기량의 절대용적을 의미한다.

앞서 산정한 식 (5)에서 잔골재량(S)과 굵은 골재량(G)을 좌항으로 정리하여 단위 수량(W), 단위 시멘트량(C)을 분리시킨 다음 식 (6)을 유도하였다.

$$\begin{aligned} A + (S + G) \times (\frac{P}{P_d}) \\ = 1000 - [W + (\frac{C}{C_d}) + (W + C) \times (\frac{P}{P_d}) + A_v] \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 단위 골재량의 절대용적(A)은 잔골재의 절대용적($\frac{S}{S_d}$)과 굵은 골재의 절대용적($\frac{G}{G_d}$)의 합으로 식 (7)과 같으며, 여기서 잔골재의 절대용적($\frac{S}{S_d}$)은 단위 골재량의 절대용적(A)과 잔골재율(S/a)의 곱으로 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 이와 같이 굵은 골재의 절대용적($\frac{G}{G_d}$)을 식 (9)에서 구하면 잔골재량(S)과 굵은 골재량(G)을 다음 식 (10)과 (11)로 유도할 수 있다.

$$A = (\frac{S}{S_d} + \frac{G}{G_d}) \quad (7)$$

$$\frac{S}{S_d} = A \times S/a \quad (8)$$

$$\frac{G}{G_d} = A \times (1 - S/a) \quad (9)$$

$$S = A \times S/a \times S_d \quad (10)$$

$$G = A \times (1 - S/a) \times G_d \quad (11)$$

식(10)과 (11)을 식 (6)에 대입하여 단위 골재량의 절대 용적(A)에 따른 식으로 정리하면 다음 식 (12)를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} A \times [1 + S/a \times S_d \times (\frac{P}{P_d}) + (1 - S/a) \times G_d \times (\frac{P}{P_d})] \\ = 1000 - [W + (\frac{C}{C_d}) + (W + C) \times (\frac{P}{P_d}) + A_v] \end{aligned} \quad (12)$$

위의 식 (7), (8), (9), (10), (11), (12)에서 S_d는 잔골재 밀도, G_d는 굵은골재 밀도, S/a는 잔골재율을 말한다.

식 (12)를 다시 정리하여 SSPCM의 혼입률을 고려한 단위 골재량의 절대 용적(A)을 다음 식 (13)과 같이 구할 수 있다.

$$A = \frac{1000 - [W + (\frac{C}{C_d}) + (W + C) \times (\frac{P}{P_d}) + A_v]}{1 + S/a \times S_d \times (\frac{P}{P_d}) + (1 - S/a) \times G_d \times (\frac{P}{P_d})} \quad (13)$$

식 (12)의 단위 골재량의 절대용적(A)에 따른 잔골재량(S)과 굵은 골재량(G)은 기존의 콘크리트 배합설계(콘크리트 표준시방서, 2009)에 따르고자 한다.

2. SSPCM을 혼입한 콘크리트의 배합검증방법

1) SSPCM의 혼입률에 따른 실험 변수 및 배합량
SSPCM의 혼입률을 4%와 6%로 정하고, 제안된 배합설계기법에 따라 SSPCM을 혼입한 콘크리트의 배합량을 설계하였으며, 압축강도, 3점 재하실험을 통해 적정 강도가 도출되는지 검증하였다. 이 때, SSPCM의 혼입률을 4%와 6%로 선정한 이유는 선행 연구(Kim et al., 2014)에서 축열 성능에 효과적인 SSPCM의 혼입률이 4% 이상으로 나타났기 때문이다.

SSPCM을 혼입한 콘크리트 실험체는 설계강도 30MPa를 만족하도록 배합설계기법에 적용하여 Table 2와 같이 SSPCM을 4%, 6% 혼입한 콘크리트의 배합량을 산정하였고, 이에 따라 공시체를 제작하여 수중에서 28일간 양생하였다.

Table 2. Mix proportions

Replacement ratio of SSPCM (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit mass(kg/m ³)			
			W	C	S	G
4%	32	28.5	151.45	473.28	439.82	1086.63
6%	29	27	149.2	514.48	375.87	1000.79

압축강도를 측정하기 위한 공시체의 치수는 KS F 2403(콘크리트의 강도 시험용 공시체의 제작 방법)에 의거하여, 지름 100mm, 높이 200mm의 공시체 규격을 사용하였으며, 공시체의 개수는 SSPCM 혼입률 4%, 6%의 변수 당 2개씩 총 4개를 제작하였다.

휨 실험을 위한 보의 규격은 KS F 2408(콘크리트의 휨강도 시험방법)에 따라 가로, 세로 150mm, 길이 550mm로 Fig. 1과 같이 실험체를 제작하였으며, SSPCM 혼입률 4%, 6%의 변수 당 1개씩 제작하여 실험하였다.

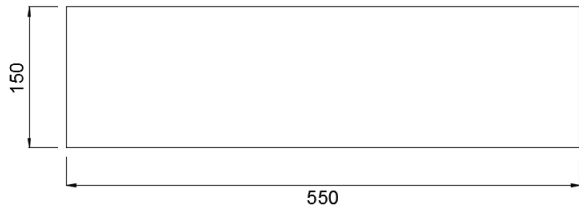


Fig. 1 Flexural-Shear Stress Test Specimen (unit:mm)

2) 압축강도 실험 방법

본 연구에서는 28일 압축강도를 통하여 SSPCM을 혼입한 콘크리트에 대한 역학적 성질을 알아보고자 하였다. 압축강도를 측정하기 위해 KS F 2405(콘크리트 압축강도 시험방법)에 의거하여 Fig. 2와 같이 가력 실험을 수행하였다.



Fig. 2 Compressive stress test

3) 3점 재하실험 방법

휨 거동을 평가하기 위한 3점 재하실험 방법은 Fig. 3와 같다. 변형률을 측정하는 게이지는 SSPCM을 혼입한 콘크리트 보의 옆면에 20mm 간격으로 보의 상단에서부터 20mm, 40mm, 60mm의 위치에 3개의 게이지를 부착하였고, 보의 지지점은 보의 하단 양 끝에서 50mm 간격으로 배치하였다.

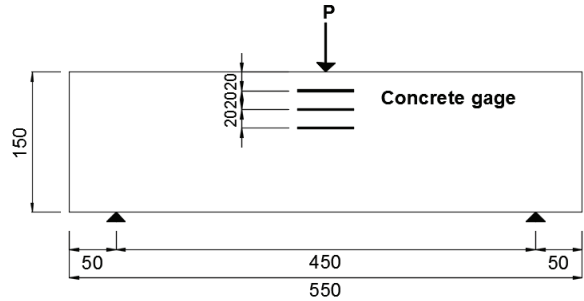


Fig. 3 Flexural-Shear Stress Test Method (unit:mm)

휨 거동을 측정하기 위해 사용한 장비는 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)와 데이터 로거(Data logger)이며, Fig. 4와 같이 보의 중앙에 0.3mm/min의 속도로 가력하였다.



Fig. 4 Flexural-Shear Stress Test Set Up

3. SSPCM 혼입 콘크리트의 배합검증결과

1) 압축강도 실험 결과

Table 3은 배합설계기법에 따른 SSPCM을 혼입한 콘크리트의 압축응력과 변형률을 나타낸 것으로 SSPCM 혼입률 4% 공시체의 최대 압축강도는 30.95MPa와 29.41MPa이며, SSPCM 혼입률 6% 공시체의 최대 압축강도는 29.56MPa와 28.86MPa로 나타났다. 이에 따라 네 실험체 모두 설계강도 30MPa와 유사한 최대 압축강도로 발현되었다. 그러므로 제안된 배합설계기법이 적용된 SSPCM 혼입 콘크리트에서는 SSPCM의 혼입률이 다르더라도 목표로 설정한 설계강도 30MPa에 유사하게 나타나기 때문에 제안된 기법을 통해 SSPCM이 혼입된 콘크리트를 구조

재료로 사용할 때 필요한 설계강도를 구현할 수 있는 것으로 사료된다.

Table 3. Compressive Ultimate Stress and Strain at Failure

Specimens (%)	Stress (MPa)	Strain (mm)
SSPCM 4%_1	30.95	0.0020
SSPCM 4%_2	29.41	0.0015
SSPCM 6%_1	29.56	0.0016
SSPCM 6%_2	28.86	0.0018

2) 3점 재하실험 결과

3점 재하실험에 따른 SSPCM 혼입 콘크리트 보의 파괴모드는 Fig. 5와 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 하중이 가해지는 보의 중앙에 큰 균열이 발생하는 휨 파괴모드인 것으로 확인할 수 있다. 이에 따른 최대 휨 강도는 SSPCM 혼입률 4%의 보는 25.79kN, SSPCM 혼입률 6% 보는 15.53kN으로 Table 4와 같다.

Table 4. Maximum Load

Replacement ratio of SSPCM (%)	Maximum load (kN)
4%	25.79
6%	15.53



Fig. 5 Failure Mode of Concrete Beam Mixed with 4% of SSPCM



Fig. 6 Failure Mode of Concrete Beam Mixed with 6% of SSPCM

콘크리트 보 측면에 부착된 게이지에서 측정된 압축 변형률을 이용하여, 3점 재하실험에 따른 하중-변형률 곡선을 다음 Fig. 7과 Fig. 8에 나타냈다. SSPCM 혼입률 4%의 보가 SSPCM 혼입률 6%의 보에 비해 좀 더 가파른 곡선을 가지는 것으로 나타났으며, 최대 하중에 도달하였을 때, 혼입률 4%의 최대 변형률은 보 상단으로부터 20mm의 지점에서 0.00017로 가장 큰 값을 가지며, 혼입률 6%도 보의 상단으로부터 20mm 지점에서 0.00013으로 가장 큰 값을 가졌다. 이를 이용하여 SSPCM 혼입 콘크리트 보의 중립축을 도출하면 SSPCM 혼입률 4% 보에서 72.35mm, SSPCM 혼입률 6% 보는 상단으로부터 70.13mm로 보 높이의 중간지점에서 유사하게 나타나 는 것을 확인하였다.

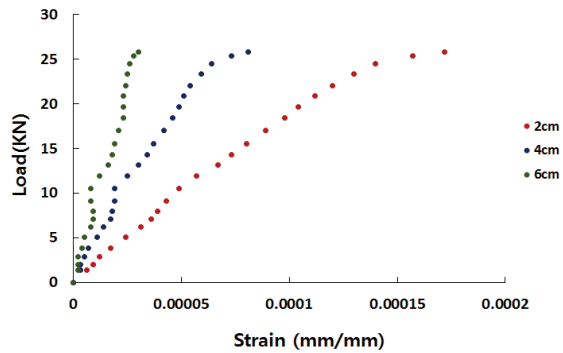


Fig. 7 Load-strain Curve of Concrete Beam Mixed with 4% of SSPCM

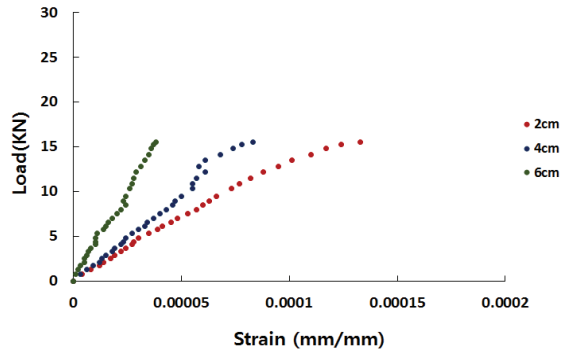


Fig. 8 Load-strain Curve of Concrete Beam Mixed with 6% of SSPCM

Table 4의 최대 하중을 식 (14)에 적용하여 Table 5와 같이 휨 응력을 계산하였다. SSPCM 혼입률 4%와 6% 콘크리트 공시체의 압축강도는 유사한 값을 얻은 것과 달리 휨 응력은 SSPCM 혼입률이 증가함에 따라 저하되는 경향성을 갖는다.

$$f = \frac{3PL}{2BH^2} \tag{14}$$

식 (7)에서 f 는 휨 응력(MPa), P 는 최대 하중(N), L 은 보의 길이(mm), B 는 보의 너비 (mm), H 는 보의 높이(mm)이다.

Table 5. Flexural Stress

Replacement ratio of SSPCM (%)	Experimental flexural stress (MPa) $f = \frac{3PL}{2BH^2}$
4%	6.3
6%	3.8

3. 결론

본 연구에서는 상변화물질인 SSPCM이 혼입된 콘크리트 배합설계기법을 제안하고 구조·역학적 성능을 평가하고자 다양한 구조재료실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 기존의 연구를 통해 얻은 SSPCM을 혼입한 콘크리트의 압축강도 저감률과 SSPCM 혼입률의 상관관계를 이용하여 SSPCM을 혼입한 콘크리트의 배합설계기법을 제안하였다.
- 2) 제안된 배합설계기법에 따라 제작된 실험체를 통해, SSPCM이 혼입된 콘크리트에서 구조재료로써 사용가능한 설계강도 구현이 가능한 것으로 나타났다.
- 3) SSPCM이 혼입된 콘크리트에서 혼입률에 관계없이 유사한 압축강도를 갖더라도 휨 응력은 SSPCM의 혼입률이 증가함에 따라 저하되는 경향성을 갖는다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술촉진연구 사업의 연구비 지원(13CHUD-C061954-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Bayes-Garcia, L., Ventola, L., Cordobilla, R., Benages, R., Calvet, T., Cuevas-Diarte, M. A.(2010), "Phase Change Materials (PCM) microcapsules with different shell compositions: Preparation, characterization and thermal stability," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 94, No. 7, pp. 1235-1240.
- Cabeza, L.F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., Fenandez, A. I. (2011), "Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 3, pp. 1675-1695.
- Chen, Z., Shan, F., Cao L, Fang, G. (2012), "Synthesis and thermal properties of shape-stabilized lauric acid/activated carbon composites as phase change materials for thermal energy storage," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 102, pp. 131-136.
- Fenollera, M., Miguez, J., Goicoechea, I., Lorenzo, J., Alvarez, M.. (2013), "The Influence of Phase Change Materials on the Properties of Self-Compacting Concrete," *MDPI Materials*, Vol. 6, pp. 3530-3546.
- Hu, W., Yu, X. (2014), "Thermal and mechanical properties of bio-based PCMs encapsulated with nanofibrous structure," *Renewable Energy*, Vol. 62, pp. 454-458.
- Jayalth, A., Mendis, P., Gammampila, R., Aye, L. (2013), "Applications of Phase Change Materials in Concrete for Sustainable Built Environment: A Review." *Proceedings of International Conference On Structural Engineering Construction & Management 2011*, Kandy, Sri Lanka, pp. 1-13.
- Jeong, S. G., Chung, O., Yu, S., Kim, S., Kim, S. (2013), "Improvement of the thermal properties of Bio-based PCM using exfoliated graphite nanoplatelets," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 117, pp. 87-92.
- Jeong, S. G., Jeon, J., Seo, J. (2011), "Consideration for application of Phase change material(PCM) for building energy saving," *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, Vol. 5, No. 1, pp. 7-15.
- Kim, H. S., Min, H. W., Ryu, E. M., An, A. Y. (2014), "Compressive strength of concrete mixed with phase change material(PCM) under thermal changes", *Proceeding of ICCE-22*, Malta, pp. 469-470.

- Kim, S., Chang, S. J., Chung, O., Jeong, S. G., Kim, S. (2014), "Thermal characteristics of mortar containing hexadecane/xGnP SSPCM and energy storage behaviors of envelopes integrated with enhanced heat storage composites for energy efficient buildings," *Energy and Buildings*, Vol. 70, 2014, pp. 472-479.
- Kim, S., Jeong, S. G., Lee, J. H., Kim, S. (2013), "Preparation and Thermal Properties of Octadecane/xGnP Shape-Stabilized Phase Change Materials to Improve Heat Storage Performance of Buildings," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 126-130.
- Kim, S., Paek, S., Jeong, S., Lee, J., Kim, S. (2014), "Thermal performance enhancement of mortar mixed with octadecane/xGnP SSPCM to save building energy consumption," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 122, pp. 257-263.
- KS F 2403 (2014), Standard test method for making and curing concrete specimens, *Korean Agency for Technology and Standards (KS)*, Seoul, Korea. (in Korean).
- KS F 2405 (2014), Standard test method for compressive strength of concrete, *Korean Agency for Technology and Standards (KS)*, Seoul, Korea. (in Korean).
- KS F 2408 (2014), Standard test method for flexural strength of concrete, *Korean Agency for Technology and Standards (KS)*, Seoul, Korea. (in Korean).
- Meshgin, P., Xi, Y.. (2012), "Effect of Phase-Change Materials on Properties of Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 109, No. 1, pp. 71-90.
- Monica, D., Ana, L., Conchita, P., Belen, Z. (2014), "Experimental analysis of the influence of microcapsule mass fraction on the thermal and rheological behavior of a PCM slurry," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 63, No. 1, pp. 11-22.