

캡슐형 슬러리 PCM을 혼입한 매스콘크리트의 수화열 평가 및 온도균열 FEM 해석에 관한 연구

Evaluation of Hydration Heat of Mass Concrete with Capsulated Slurry PCM and FEM Study for Analyzing Thermal Crack

박 창 건 김 보 현 이 한 승*

Park, ChangGun Kim, Bo-Hyun Lee, Han-Seung*

Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Sangnok-Gu, Ansan, 426-791, Korea

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of capsulated slurry phase change material (PCM) on the thermal crack in mass concrete by experimental work and FEM analysis. In this study, three conditions of samples were prepared for evaluating the level of hydration heat, i.e., a material condition, a cement paste condition and a concrete condition. Also, a compressive strength test was conducted for FEM inverse analysis. Based on the results of the experiment, exothermic function coefficients of concrete with encapsulated slurry PCM were deducted by the inverse analysis. After that, they applied to FEM analysis of the mass scale concrete structures. From the results of this experiment, 31°C capsulated slurry PCM had no super cooling phenomenon in the material condition. In the cement condition, hydration heat decreased by 34.61J when PCM of 1g was mixed. In the concrete condition, PCM of 6% was deducted as the best level in hydration heat absorption. In FEM inverse analysis, rate coefficient of reaction gradually decreased when PCM mixing ratio increased. But, temperature-rise coefficient increased when PCM mixing ratio exceeded 6%. For the inversed exothermic function coefficients applying to large scale concrete structures, a thermal cracking index increased by 0.05 when PCM of 1% was mixed.

Keywords : mass concrete, hydration heat, phase change material, FEM analysis

1. 서 론

최근 콘크리트 구조물의 초고층화·대형화에 따라 그에 적합한 매스콘크리트 부재의 적용사례가 증가하고 있다. 매스콘크리트는 수화열로 인해 온도 균열이 발생되고, 이로 인해 구조안전성·내구성·강도를 저하시키게 된다. 특히, 온도 균열은 콘크리트 표면의 미세균열 뿐만 아니라 구조물 전체를 관통하는 관통균열로 전이되어 콘크리트의 성능을 저해

하는 요인으로 작용한다. 또한, 수화열은 콘크리트의 초기 특성을 나타내는 기본적인 성질이자 수화 반응에 의해 필연적으로 발생하는 특성으로 매스콘크리트 초기 내부온도 상승에 지대한 영향을 미치며, 이에 따라 수화열 조절에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다. 수화열 조절 방법으로는 플라야시, 고로슬래그 미분말과 같은 혼화재료, 저발열 시멘트, 잠열재료 사용 등의 재료적인 방법[1,2,3]과 Post-cooling, Pre-cooling과 같은 공법적인 방법[4,5]이 주로 적용되고 있다. 기존에 사용되고 있는 재료적인 방법의 경우, 비용 대비 성능 미흡, 공기지연, 낮은 반응성에 따른 초기강도 발현 지연의 문제점이 있으며, 공법적인 방법의 경우 초기 설비에 대한 투자비용 및 부재의 규모에 따른 제한이 있어 수화열 저감 방법으로 적용하는데 여러 가

Received : March 11, 2014

Revision received : April 18, 2014

Accepted : April 18, 2014

* Corresponding author : Lee, Han-Seung

[Tel: 82-31-400-5181, E-mail: ercleehs@hanyang.ac.kr]

©2014 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

지 단점을 가지고 있다. 최근, 온도변화에 따라 특정 온도에서 흡열 및 발열 특성을 나타내는 상변화물질(Phase Change Material 이하, PCM)을 활용한 콘크리트 온도균열 저감에 관한 연구가 진행되었으나, 캡슐화 분말 PCM 및 슬러리 PCM 콘크리트의 압축강도시험, 단열온도상승실험 등 실험적 연구만 진행되었으며[6,7], 캡슐형 슬러리 PCM을 혼입한 콘크리트의 해석에 의한 온도균열 저감 성능 평가에 관한 연구는 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 캡슐형 슬러리 PCM 혼입 매스콘크리트의 온도균열 저감성능 평가를 목적으로 시차열분석기(이하, TG/DTA), 미소수화열량계(이하, Calorimeter), 간이단열온도상승실험, 압축강도시험을 진행하였다. 실험 결과를 토대로, 캡슐형 슬러리 PCM이 혼입된 콘크리트의 발열함수계수를 FEM 역해석을 통해 도출하고, 이를 실구조물 규모 매스콘크리트에 적용하여 온도균열 FEM 해석을 실시하였다.

2. 기존문헌 고찰

2.1 PCM과 일반 잠열재료의 열적 특성

Figure 1은 PCM과 일반 잠열재료의 온도 양상 비교를 나타낸다. 일반 잠열재료(Latent Heat Material, 이하 LHM)는 열이 가해지는 시점부터 자체 열용량에 도달할 때까지 열을 흡수한다. 반면, PCM은 특정 온도에서부터 열을 흡수하여 그 열용량에 도달함에 따라 콘크리트 수화열 저감에 있어 일반 잠열재료에 비해 효율적이라 판단된다. 즉, 강도발현 측면에서 일반 잠열재료는 초기 콘크리트 강도발현을 위한 온도에 도달하는 시간이 지나치게 지연되는 반면, PCM은 온도대 설정을 통해 흡열 시점을 조절할 수 있다.

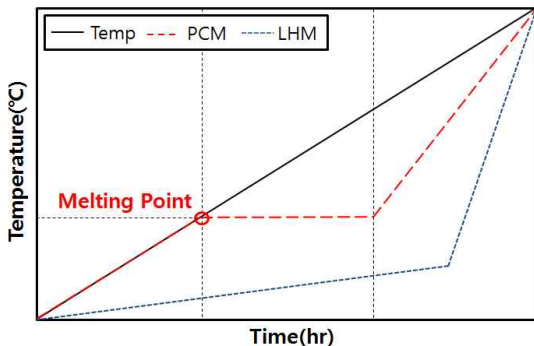


Figure 1. Comparison between PCM and Latent heat materials on temperature-rise

2.2 PCM의 잠열 메커니즘 및 형태에 따른 비교

Figure 2는 PCM의 잠열 메커니즘으로 특정한 온도대에서 응고 및 용해현상에 의하여 상(Phase)이 변화하며 열을 흡수 또는 방출하여 일정 온도에서 잠열에 의하여 온도를 유지하게 만드는 물질로 온도가 유지되는 시간은 PCM 원재료의 열용량에 기인한다[8,9].

Table 1. Comparison between capsulated powder and slurry PCM

Division	Capsulated Powder PCM	Capsulated Slurry PCM
Price	100,000 won/kg	50,000 won/kg
Particle Size	5~30 μ m	2~5 μ m

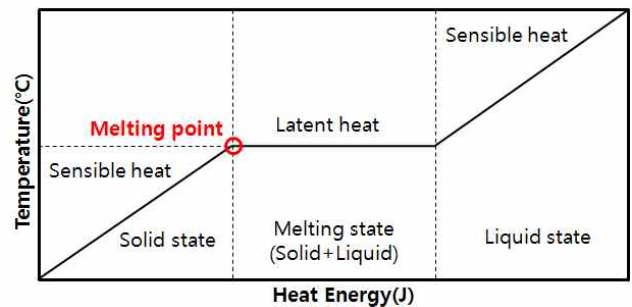


Figure 2. Mechanism for latent heat of PCM

성분에 따라 유기계와 무기계로 분류되며 유기계는 무기계에 비해 밀도가 낮고, 열량이 작으며 경제성은 떨어지나 부피의 수축팽창이 작다[8]. 따라서 건축분야에서는 대부분, 특히 수축팽창으로 인해 균열이 발생하여 내구성이 저하되는 모르타르나 콘크리트의 경우, 유기계가 적합하다. 형태에 따라 크게 캡슐형 분말 PCM과 캡슐형 슬러리 PCM으로 나눌 수 있으며, 마이크로캡슐이 외부로부터 보호하는 벽물질(Shell Material)로 구성되어 있다는 공통점이 있으나 분말 PCM이 제조 방법에 있어서 드라이 공정이 추가됨에 따라 경제성과 입자 크기 면에서 Table 1과 같은 차이를 나타낸다. 드라이 공정은 ton단위로 실시되어 소량 생산 시에는 경제성이 저하된다. 분말 크기 면에서는 30 μ m일 경우 모르타르 비빔 시 캡슐이 깨질 가능성이 높을 뿐 아니라, 모르타르 자체의 균열을 발생시킨다는 일련의 연구보고가 있다[10]. 또한, PCM은 원재료에 따라 반응 온도대와 열용량을 설정할 수 있기 때문에, 적용 재료와 부위, 환경에 따라 적합 온도대의 선정은 필수적이다.

따라서 PCM 혼입 매스콘크리트의 온도균열저감 평가에서는 경제성 및 입자 크기 면에서 유리하고, 콘크리트와 같

은 수화물에 적용이 용이한 유기계 캡슐형 슬러리 PCM을 선정할 필요가 있다. 또한, 특정 온도에서 흡열 및 발열 특성이 나타나는 PCM 특성 상 실험계획 수립 시 온도대 설정 실험을 통한 PCM의 온도대 선정이 필요하다고 판단된다.

3. 실험개요 및 방법

3.1 실험개요

본 연구에서는 PCM 소재, 시멘트 적용 단계에서 온도균열 저감 재료로서의 가능성을 확인하고, 콘크리트 적용 간이단열온도상승실험을 통한 열 성능평가 및 압축강도시험을 통해 FEM 해석에 필요한 데이터를 도출하고자 한다.

3.2. 사용재료

Table 2는 본 실험에서 사용한 1종 보통 포틀랜드 시멘트의 특성을 나타낸다. Table 3은 골재의 특성을 나타내며, 잔골재는 표준사, 굵은 골재는 KS F 2502에 의거한 골재의 체가름 시험을 통해 최대치수 25mm 이하를 사용하였다. 혼화제는 폴리카본산 에테르계 고성능감수제를 사용하였다. Table 4는 캡슐형 슬러리 PCM의 구성성분을 나타내고, Table 5은 캡슐형 슬러리 PCM 내 분체의 특성을 나타낸다.

Table 2. Characteristic of cement

Division	Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Stability (%)
OPC	3.12	5,3,6	0.08

Table 3. Characteristic of aggregate

Division	Maximum size(mm)	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	Fineness modulus(F.M)
Fine aggregate	5.0	2.6	1.45	2.16
Coarse aggregate	25	2.68	1.03	7.05

Table 4. Compound composition of capsulated slurry PCM

Division	Water	PCM Powder	Shell material	Emulsion
Composition(%)	56.60	30.00	10.00	3.40

Table 5. Characteristic of powder in capsulated slurry PCM

Division	Contents
Main component	n-Nonadecane
Molecular formula	CH ₃ (CH ₂) ₁₇ CH ₃
Melting point	31 °C
Size of particle	5-15 micron
Heat capacity	120 kJ/kg
Solubility	Insoluble

3.3. 실험계획

Table 6은 시멘트 적용 단계와 콘크리트 적용 단계 실험에 관한 실험수준 및 인자를 나타내며, Table 7은 시멘트 열량 측정 실험의 배합을 나타낸다. 캡슐형 슬러리 PCM은 슬러리 내 액상으로 인해 초기 워커빌리티에 영향을 미치는 수량의 증가를 가져온다. 따라서 콘크리트 간이단열온도상승실험은 두 절차에 의하여 진행되었으며, 온도대 설정 실험을 통해 콘크리트 간이단열온도상승실험에 적용할 캡슐형 슬러리 PCM의 온도대와 슬러리 PCM 내 액상의 배합수에 대한 치환율을 선정하였다. 온도대 설정 실험을 통해 선정된 PCM의 온도대와 치환율을 적용하여 콘크리트 간이단열온도상승실험 및 압축강도시험을 실시하였다. Table 8은 온도대 설정 실험의 배합을 나타내며, Table 9는 콘크리트 간이단열온도상승실험 및 압축강도시험의 배합을 나타낸다. 배합은 콘크리트의 온도상승량을 크게 하기 위해 단위 시멘트량이 높은 고강도 배합을 적용하였다.

Table 6. Experiment factor and level

Division	Experiment factor	Experiment level	List of measurement
Cement Paste	PCM mix proportion(C×%)	0, 6	Calorimeter
	Role of liquid as free water in Slurry PCM(%)	50, 70, 100	Slump (KS F 2402), Hydration heat, Compressive strength (KS F 2403)
Concrete	PCM mix proportion(C×%)	0, 3, 6, 9	

Table 7. Mix proportion of calorimeter test

Division	W/C (%)	Input(g)		
		W	C	PCM
Plain	35	7	20	-
PCM6%	35	7	20	1.19

3.4. 실험방법

3.4.1 TG/DTA를 통한 PCM 소재 열 특성

PCM의 흡열·발열량에 대한 소재 단계에서의 열 특성평가로 동일 원재료의 PCM은 형태별 열용량이 동일하므로 31°C 분말 PCM을 사용하여 진행하였다. TG/DTA를 이용하여 실험을 진행하였다. Figure 3은 TG/DTA 온도 설정 그래프이며, 1°C/min의 승온 속도로 60°C까지 올리고, 30분의 Hold time 후 Fan을 이용하여 15°C까지 서서히 냉각 시키도록 설정하였다.

Table 8. Mix proportion of concrete to select role percentage of liquid in slurry PCM as free water

Division	W/C (%)	S/a (%)	Air content (%)	Powder in S-PCM(C×%)	Unit weight(kg/m ³)						Slump (mm)
					W	C	S	G	S-PCM	SP	
Plain				-	188.89					-	170
PCM3%	35	47.67	3.5	3 [50]	176.74	540	777.78	900	40.5	0.81	220
PCM6%				3 [70]	171.88						
PCM9%				3 [100]	164.59						

Note) W=water, C=cement, S=sand, G=gravel, SP=Superplasticizer, S-PCM=Slurry PCM, []=Free water substitution percentage

Table 9. Mix proportion of concrete mixed with capsulated slurry PCM in simple adiabatic temperature rise test

Division	W/C (%)	S/a (%)	Air content (%)	Powder in S-PCM(C×%)	Unit weight(kg/m ³)						
					W	C	S	G	S-PCM	SP	
Plain				-	188.89					-	
PCM3%	35	47.67	3.5	3 [70]	171.88	540	777.78	900	40.5	81	0.81
PCM6%				6 [70]	154.87						
PCM9%				9 [70]	115.99						

Note) W=water, C=cement, S=sand, G=gravel, SP=Superplasticizer, S-PCM=Slurry PCM, []=Free water substitution percentage

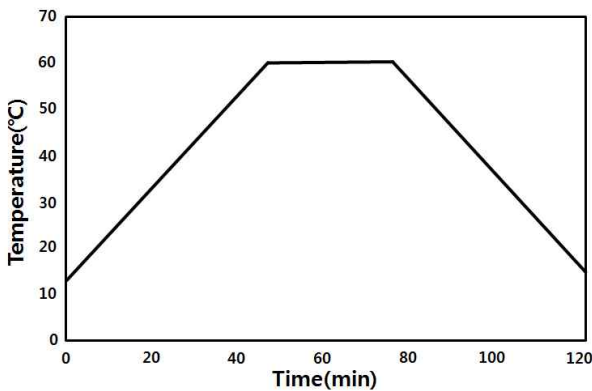


Figure 3. Setting temperature of TG/DTA inside

3.4.2 Calorimeter를 이용한 시멘트페이스트 단계 열 특성

PCM의 시멘트페이스트 단계에서의 흡열 특성을 확인하기 위한 실험으로 분말형 PCM과 시멘트를 Pre-mixing한 후 Calorimeter를 이용하여 72시간 동안 열량 측정을 실시하였다.

3.4.3 PCM 혼입 콘크리트의 열 특성

캡슐형 슬러리 PCM의 콘크리트 적용 단계 온도대 선정 및 슬러리 내 액상의 배합수에 대한 치환율 산정을 위한 실험이다. 슬럼프 테스트에 의하여 캡슐화 슬러리 PCM 내 액상의 자유수 치환율을 산정하였으며, 17L의 스티로폼 박스 내부에 콘크리트를 타설하고, 중심부에 열전대 설치 후

데이터 로거를 이용하여 콘크리트 수화온도를 측정하였다.

Figure 4는 KS F 2402에 의거한 슬럼프 시험 및 온도대 설정 실험 과정을 나타낸다. Plain과 슬럼프가 유사한 70%를 캡슐형 슬러리 PCM 내 자유수 치환율로 선정하였으며, 수화온도가 18~50.6°C로 측정됨에 따라 28, 31°C PCM을 1차적으로 선정하였다. 28°C PCM의 경우 원재료의 수입으로 국내에서 생산되는 31°C PCM에 비해 생산성 및 경제성이 떨어지므로, 간이단열온도실험에 31°C 캡슐형 슬러리 PCM을 선정하였다. 선정된 온도대의 캡슐형 슬러리 PCM과 슬러리 내 액상의 치환율을 적용하여 콘크리트 간이단열온도상승실험을 진행하였다.

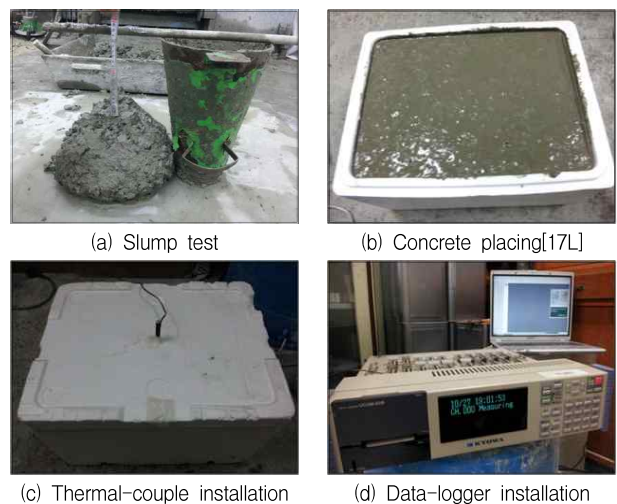


Figure 4. Procedure of selecting PCM temperature experiment

Figure 5는 간이단열온도상승실험에 쓰일 간이단열박스 제작 및 실험과정을 나타낸다. 시험체로 사용될 단열 박스는 두께 10mm합판 틀에 두께 50mm 단열재를 배치하고, 용광로 보수와 같은 내열용으로 사용되는 글라스 테이프를 이용하여 이음부의 열손실을 최소화하여 내경 300×300×300mm 정사각형으로 제작하였다. 제작된 간이단열박스 내부에 콘크리트 타설 후 실험체 중심부와 바깥 중심부에 열전대를 설치하였으며, 데이터 로거를 이용하여 30초 간격으로 온도를 측정하였다. 열전대의 중심부와 바깥 중심부 설치에 간이단열처리에 대해 단열효과가 발휘되는지 확인하기 위함이다.

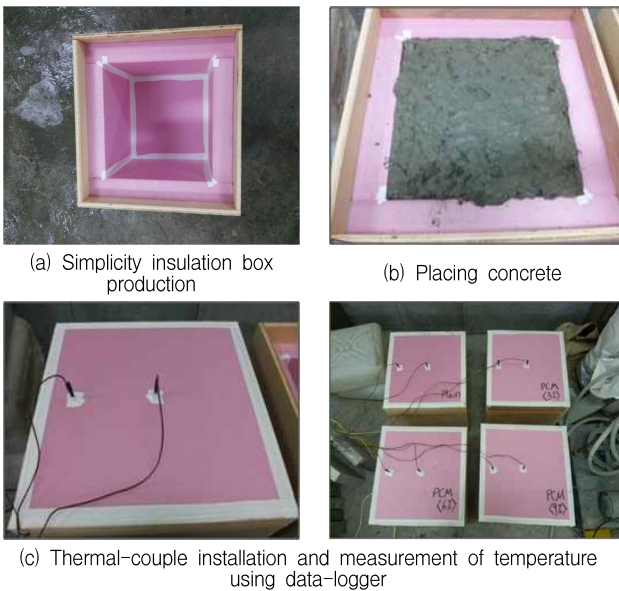


Figure 5. Procedure of simplicity insulation temperature rise test

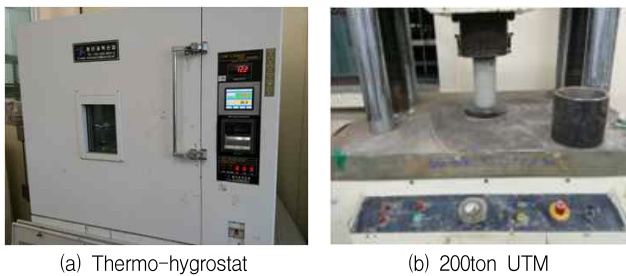


Figure 6. Curing of compressive strength specimen and apparatus of strength measurement

3.4.4 PCM 혼입 콘크리트의 압축강도시험

KS F 2403에 의거하여 $\varnothing 100 \times 200$ mm 표준 몰드에 수준별 9개의 공시체를 제작하였다. 항온·항습기를 이용하여

온도 $20 \pm 3^\circ\text{C}$, 습도 60%의 환경 하에 양생을 진행하였다. 압축강도 시험은 KS F 2405에 의거하여 200ton 만능재료 시험기(이하, 200ton UTM)를 이용하여 120KN/m의 속도로 진행하였다. 3, 7, 28일 재령에서 압축강도를 측정하였으며, 수준별 3개 공시체의 압축강도 측정 후, 세 값의 평균 값을 압축강도로 산출하였다. Figure 6은 시험체의 양생에 사용한 항온·항습기 및 압축강도 시험에 쓰인 200ton UTM 기를 나타낸다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 TG/DTA를 이용한 PCM 소재 열 특성

Figure 7은 TG/DTA 측정 결과를 나타낸다. 31°C PCM은 온도 상승 시 23.44°C 에서 흡열반응을 시작하여 34.47°C 까지 지속하였으며, 흡열 피크는 31.41°C 에서 나타났다. 해당 구간의 면적을 적분한 결과, 총 흡열량은 545.41J/g 으로 측정되었다. 온도가 하강 시 22.60°C 에서 발열반응을 시작하여 19.44°C 까지 지속하였다. 발열 피크는 21.26°C 에서 나타났으며, 총 발열량은 415.84J/g 으로 측정되었다. PCM이 해당 온도에서만뿐만 아니라 7.56°C 낮은 온도에서부터 흡열반응이 시작하는 것을 확인할 수 있으며, 발열반응은 해당 PCM의 온도대보다 8.40°C 낮은 온도대에서 시작되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 본 연구에서 선정한 C사의 31°C PCM은 과냉각의 문제가 발생하지 않고, 흡열·발열 성능이 발휘되는 것을 확인하였다.

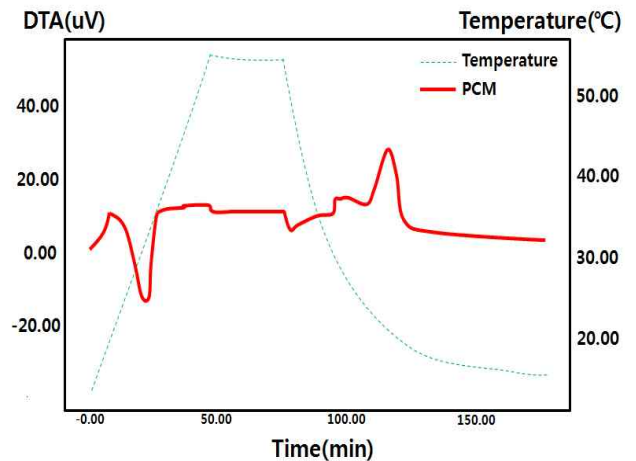


Figure 7. Heat characteristic evaluation of 31°C powder PCM

4.2 Calorimeter를 이용한 PCM 혼입 시멘트페이스트의 수화열 특성

Figure 8은 Calorimeter를 이용한 시멘트 페이스트의 누적열량을 나타낸다. PCM6% 혼입 시 발생하는 열량은 170.90J/g으로 Plain 대비 41.19J/g의 열량저감이 나타났다. 이는 시멘트 적용 시 시멘트에 의한 발열량을 PCM의 흡열 성능에 의해 일부 상쇄된 결과로 시멘트 적용 시 온도 저감효과가 발휘되는 것을 확인하였다.

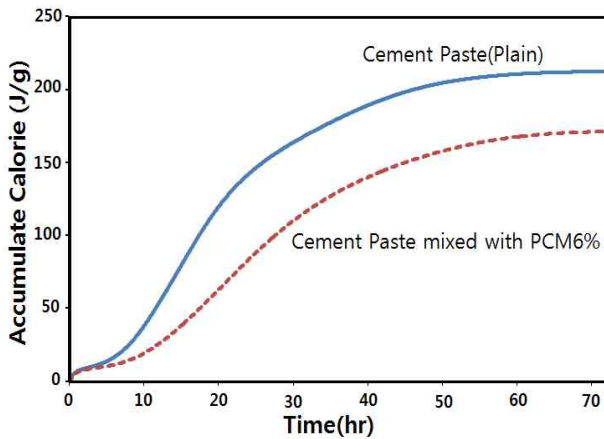


Figure 8. Comparison of accumulate calorimetry

4.3 PCM 혼입 콘크리트의 열 특성

Figure 9는 캡슐형 슬러리 PCM의 혼입율에 따른 콘크리트 간이단열온도상승시험에 의한 열 특성평가 결과 그래프를 나타낸다. 최고 수화온도의 경우, Plain은 63.7°C, PCM3%는 60°C, PCM6%는 55.1°C, PCM9%는 55.2°C로 나타나 슬러리 PCM의 혼입율이 증가함에 따라 최고 수화온도는 저감되는 것을 확인할 수 있었다. PCM3%에서는 PCM 혼입율 1%당 1.2°C의 온도저감효과가 나타났으며, 6%는 1.73°C, 9%에서는 1.51°C로 6%에서 온도 저감율이 가장 높게 나타났다. 최고 수화온도 도달 시간에서는 Plain은 22시간 12분, 슬러리 PCM3% 혼입 시 24시간 17분, 6%는 26시간 39분, 9%는 27시간 51분으로 측정되었다. Figure 9(a), (b)와 같이 슬러리 PCM3%, 6%, 9%에서 각각 2시간 5분, 4시간 27분, 5시간 38분 지연되는 것을 확인할 수 있었으며, PCM 1% 혼입마다 각각 22분, 44분, 38분 지연되는 것으로 나타났다. 지연율에 있어서 PCM6%에서 가장 성능효율이 높게 나타났다. 또한 PCM9% 혼입 시 온도 하강 시에도 다른 수준에 비해 콘크리트 내부 온도가 서

서히 하강되어 역전이 일어났다. 최고 수화온도 및 최고 수화온도 도달시간을 고려할 경우 PCM 혼입율 6%가 적합함을 확인할 수 있었다.

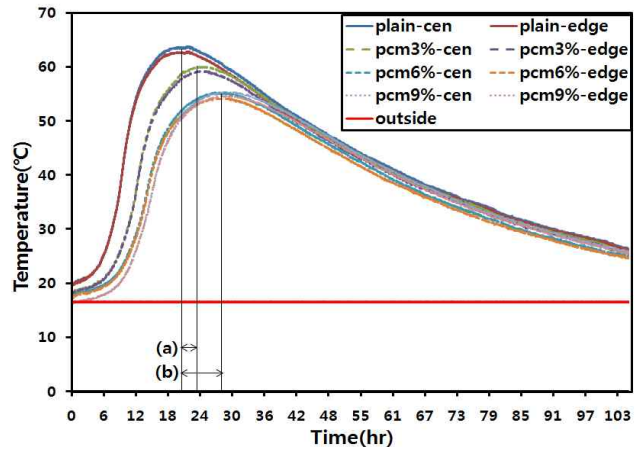


Figure 9. Temperature change in accordance with content of PCM

4.4 PCM 혼입 콘크리트의 압축강도 특성

Figure 10은 압축강도시험 결과그래프를 나타낸다. 슬러리 PCM3% 혼입율에서는 각 재령별 9.9, 32.4, 40.61MPa로 Plain과 비교하여 각각 31, 24, 24%의 강도 저하가 발생했다. 또한 슬러리 PCM6% 혼입율에서는 8.1, 26.7, 32.78 MPa로 각각 45, 40, 40%, PCM9% 혼입율에서는 7, 21.1, 25.24 MPa로 각각 52, 55, 55% 강도 저하가 발생했다. PCM 혼입율이 증가함에 따라 강도가 저하되는 것으로 나타났으며, 이는 PCM 혼입율이 증가함에 따른 계면 파괴에 기인한 것으로 사료된다.

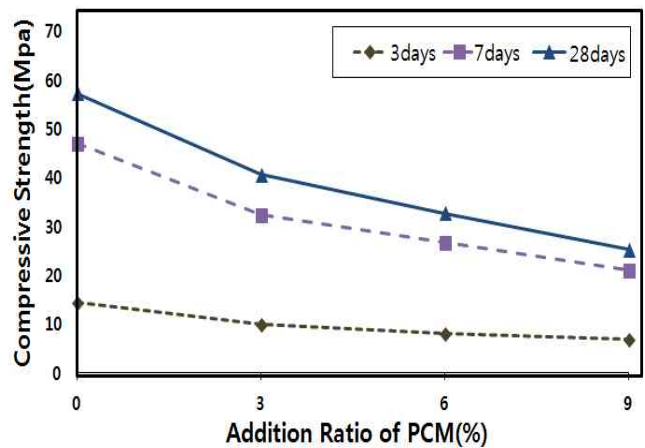


Figure 10. Compressive strength in accordance with age and content of PCM

5. FEM 프로그램을 이용한 온도균열지수 분석

5.1 실험 결과를 이용한 PCM 발열함수계수 역해석

PCM이 혼입된 콘크리트는 수화온도는 저감시키나, 강도 측면에서는 저하되는 것으로 나타났다. 온도균열지수는 온도응력과 콘크리트 인장강도에 기인하므로 수화열해석을 통해 PCM의 온도균열 저감 성능을 확인하고자 한다. 간이 단열온도상승실험 결과를 이용하여 FEM 프로그램을 통해 Plain 및 슬러리 PCM 혼입 콘크리트의 발열함수계수를 도출하였으며, 도출한 발열함수계수와 압축강도시험 결과를 토대로 간이 단열온도상승실험 각 수준의 온도균열지수를 비교분석하였다.

Table 10. Summary of FEM inverse analysis modeling

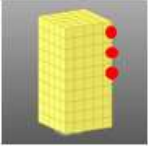
Modeling of specimen	Details
Continuous placement	 <ul style="list-style-type: none"> • 1/4 modeling • 15 × 15 × 30cm • Modeling level : Plain, PCM3%, PCM6%, PCM9%

Table 11. Input data of FEM inverse analysis

Division	Structure
Concrete	Select in KCI-2007 accordance with compressive strength in 28days(C55, C40, C30, C24)
Specific heat(kcal/kg·°C)	0.25
Weight(N/m ³)	23540
Thermal conductivity (kcal/m·hr·°C)	2.3
Convection coefficient (kcal/m ² ·hr·°C)	0.68 (Derived through plain analysis)
Outdoor temperature(°C)	16 (Apply experiment data)
Placement temperature(°C)	Apply experiment data by level
Compressive strength in 28days(N/mm ²)	Apply experiment data by level
Compressive strength expression coefficient	a=10.5, b=0.625 (Derived through experiment data)
Coefficient of thermal expansion	1.0×10 ⁻⁵
Poisson's ratio	0.167

Table 10은 모델링 개요를 나타내며, 입력데이터는 Table 11과 같다. 콘크리트 물성은 28일 강도 기준으로 KCI-2007에서 선정하였으며, 대류계수는 수화온도의 하강 속도에 영향을 미치므로 Plain 실험체의 100시간 수화 온도에 맞추어 도출하였다. 각 수준의 7, 28일 압축강도를 이용하여 강도발현곡선을 구현함으로써 압축강도 발현계수

를 도출하였으며, 그 외 특성은 KCI-2007을 통해 선정된 콘크리트의 물성에 따른다. Figure 11은 발열함수계수의 FEM 역해석 절차를 나타낸다.

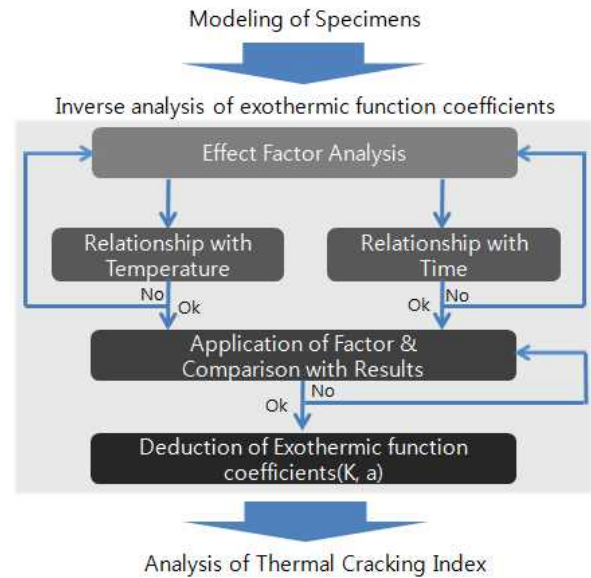


Figure 11. Procedure of heating function coefficients FEM inverse analysis

Table 12. Result of heating function coefficients inverse analysis

Division	K	α	Maximum hydration temperature(°C)	Reaching time to maximum hydration temperature(hr)
Plain	73.93	1.82	63.74	22.17
PCM3%	72.61	1.58	60.00	24.66
PCM6%	68.42	1.36	55.10	26.67
PCM9%	69.16	1.34	55.20	27.84

K : maximum temperature-rise coefficient

α : rate coefficient of reaction

간이 단열온도상승실험 온도결과 그래프의 최고 수화온도 및 도달시간과 유사한 그래프를 도출하기 위해 발열함수계수(K, a)를 변화시키며 역해석을 실시하였다. Table 12는 수준별 발열함수계수의 역해석 결과와 수화열 해석 결과를 나타낸다. Figure 12는 역해석에 의한 발열함수계수의 양상을 나타낸다. 반응속도계수는 최고 수화온도 도달시간이 지연됨에 따라 낮게 도출되었으나, 최고온도계수는 PCM6%에서 변곡점이 발생하여 9%에서는 오히려 6%에 비해 증가하는 것으로 나타났다. Figure 13은 역해석에 의해 도출한 실험체의 수화열 해석 그래프를 나타낸다. 실험결과와 같이 PCM9%에서 온도 하강 시 역전이 일어나는 것을 확인하였다. 온도균열지수는 20으로 동일하게 해석되었으

며, Lab 규모의 실험으로 온도균열이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

은 동일하나, PCM이 6% 혼입된 경우에는 온도 상승 시의 흡열, 온도 하강 시의 발열 성능으로 인해 급격한 온도 변화를 저감시켜줌으로써 온도균열지수가 Plain 대비 높게 해석된 것으로 판단된다.

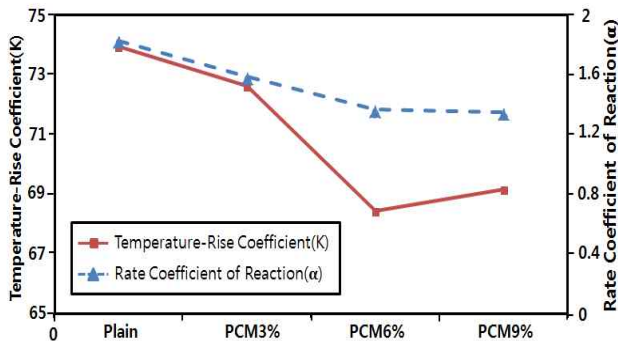


Figure 12. Change of heating function coefficients in accordance with level

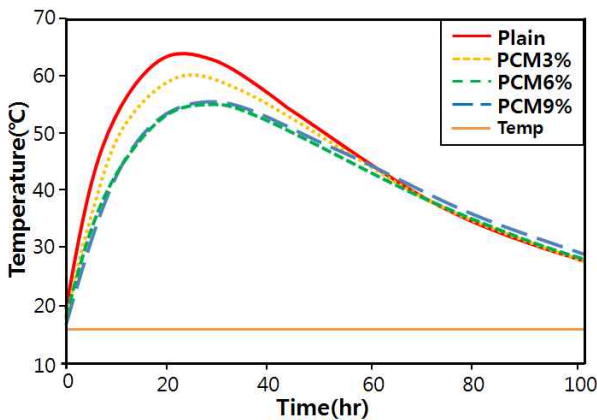


Figure 13. Change of hydration temperature in accordance with age by inverse analysis

5.2 역해석 발열함수계수의 매스콘크리트 적용

역해석한 발열함수계수 분석결과를 토대로 Plain과 PCM6%에 대해 실구조물 크기의 매스콘크리트 수화열 해석에 적용하였다. 구조물은 실무에서 자주 접하는 평판 콘크리트 기초구조물을 선정하였으며, 모델링 개요는 Table 13, 재료 데이터는 Table 14와 같다. Table 15는 매스콘크리트의 수화열 FEM 해석 결과를 나타낸 것이다. 그 결과, 실험에 의한 결과와 동일하게 PCM이 혼입됨에 따라 최고 수화온도가 저감되는 것으로 나타났다. 6% 혼입 시 최고 수화온도는 4.34°C 저감, 도달시간은 10시간 지연되었다. Table 16은 온도균열지수평가 결과를 나타내며, 온도균열 지수는 두 수준 모두 2차타설이 시작되는 시점에서 최저점이 나타났다. 균열발생을 방지할 경우의 제어수준이라는 점

Table 13. Summary of FEM analysis modeling

Modeling of specimen	Details
Sequential placement	<ul style="list-style-type: none"> • 1/4 modeling • Ground 24×19.2×3m • Mat foundation (1st placement/170hr) 14.4×9.6×2.4m • Mat foundation (2nd placement/930hr) 14.4×9.6×2.4m • Plain, PCM6%

Table 14. Input data of FEM analysis

Division	Structure	Ground
Specific heat(kcal/kg·°C)	0.25	0.2
Weight(N/m ³)	23540	17000
Thermal conductivity(kcal/m·hr·°C)	2.3	1.7
Convection coefficient (kcal/m ² ·h·°C)	Exposed surface	12
	Steel form	12
Outdoor temperature(°C)	20	-
Placement temperature(°C)	20	-
Compressive strength in 91days(N/mm ²)	27	-
Compressive strength expression coefficient	a=4.5, b=0.95	-
Heating function coefficients	Plain	K=73.93, α=1.82
	PCM 6%	K=68.42, α=1.36
Elastic modulus in 91days(N/mm ²)	2.7782×10 ⁴	1.0×10 ³
Coefficient of thermal expansion	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵
Poisson's ratio	0.167	0.2

Table 15. Result of mass concrete hydration heat analysis

Division	Maximum hydration temperature(°C)	Reaching time to maximum hydration temperature(hr)
Plain	71.65	25
PCM6%	67.31	35

Table 16. Evaluation of thermal cracking index of analysis model

Division	Thermal cracking index
Plain	1.518 (lowest point : 180hr)
PCM6%	1.804 (lowest point : 180hr)

6. 결 론

캡슐형 슬러리 PCM이 혼입된 콘크리트의 수화열 평가 및 온도균열 FEM 해석에 관한 연구를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) TG/DTA를 이용한 PCM의 소재 단계 열 성능평가 결과, 발열피크는 31℃보다 낮은 구간에서 나타났으며, 발열온도범위가 22.60~19.44℃로 나타나 과냉각이 발생하지 않은 것을 확인할 수 있었다. 또한, PCM이 소재단계에서 온도변화에 따라 흡열 및 발열 특성이 발휘되는 것을 확인하였다.
- 2) PCM의 시멘트 적용 단계 열량 측정평가 결과, PCM 6%가 혼입된 경우, PCM분말 1g당 34.61J만큼의 열량을 흡열하는 것으로 나타났다. 이를 통해 PCM은 시멘트 혼입 시에도 흡열 성능이 충분히 발휘됨을 확인하였다.
- 3) PCM의 콘크리트 혼입 단계에서의 간이단열온도상승 실험 결과, PCM 혼입율이 증가함에 따라 최고 수화온도 도달시간은 지연되었으나, 최고 수화온도에서는 PCM6%와 비교하여 PCM9%에서는 추가적인 온도저감 성능은 미미하게 나타났다. 압축강도시험에서는 PCM 혼입율이 증가함에 따라 압축강도가 저하되는 것으로 나타났다.
- 4) 콘크리트 간이단열온도상승실험의 FEM 역해석을 통해 발열함수계수를 도출한 결과, PCM 혼입율이 증가함에 따라 반응속도계수는 낮게 도출되었으나, 최고 온도계수는 PCM6%에서 변곡점이 발생되어 추가 혼입 시 최고온도계수가 오히려 증가하는 것으로 나타났다.
- 5) 역해석에 의해 도출된 발열함수계수를 실구조물 규모 매스콘크리트 FEM 해석에 적용한 결과, 캡슐형 슬러리 PCM 6% 혼입된 수준이 온도균열지수가 높게 도출됨으로써 콘크리트 내부 온도 상승 시 흡열 성능, 하강시의 발열 성능에 의해 온도응력의 발생이 저감되는 것을 확인하였다.

요 약

본 연구의 목적은 실험 및 FEM 해석을 통해 캡슐형 슬러

리 PCM이 혼입된 매스콘크리트의 수화열 및 온도균열 평가하는 것이다. 자재, 시멘트 혼입, 콘크리트 혼입 단계에서의 수화열 평가 실험을 진행하였으며, FEM 해석을 위해 압축강도시험을 실시하였다. 실험 결과를 토대로 캡슐형 슬러리 PCM이 혼입된 콘크리트의 발열함수계수를 FEM 역해석에 의해 도출하였으며, 도출된 발열함수계수를 실구조물 규모 매스콘크리트 FEM 해석에 적용하였다.

PCM 소재 단계 실험을 통해 31℃ PCM이 과냉각 현상 없이 흡열, 발열 특성이 정상적으로 나타나는 것을 확인하였다. PCM의 시멘트 혼입 단계에서는 PCM 1g당 34.61J 만큼의 수화열을 흡열하는 것으로 나타났으며, 콘크리트 혼입 단계에서는 PCM 혼입율이 증가함에 따라 최고수화온도 도달시간은 지연되고, PCM 6% 혼입 시 수화열 저감성능이 가장 높게 나타났다. 실험결과를 토대로 역해석을 실시한 결과, PCM 혼입율이 증가함에 따라 반응속도계수는 낮게 도출되었으나, 최고온도계수는 6%에서 최소로 나타나고, 초과할 경우 오히려 증가하는 것으로 해석되었다. 역해석을 통해 도출한 발열함수계수를 실구조물 규모 매스콘크리트의 수화열 해석에 적용한 결과, PCM 1% 혼입 당 온도균열 지수가 0.05 증가하는 것으로 나타났다.

키워드 : 매스콘크리트, 수화열, 상변화물질, FEM 해석

Acknowledgement

This research was supported by a grant(Code 11-Technology Innovation-F04) from Construction Technology Research Program(CTRP) funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MLIT) of Korean government.

References

1. Choi SW, Ryu DH, Kim HS, Kim GY. Hydration Properties of Low Carbon type Low Heat Blended Cement, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2013 May;13(3):218-226.
2. Choi SW, Jo HT, Ryu DH. The Experimental Study on the Heat Hydration Properties of Concrete According to Binder Conditions, Journal of the Concrete Institute of Korea, 2006 December;18(6):769-776

3. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Development of ultra-low heat concrete and construction technologies for controlling heat of hydration in massive concrete structures. Ministry of Land, Infrastructure and Transport business of re-research and development final report. 1998
4. Baek DI, Kim MS. Application of Heat Pipe for Hydration Heat Control of Mass Concrete. *Journal of the Concrete Institute of Korea*. 2008 April;20(2):157-164
5. Kang SH. Construction Method for the Thermal Crack Control in Mass Concrete Structures. *Journal of the Concrete Institute of Korea*. 1997 June;9(3):4-14
6. Jeon BG. Properties of Hydration Heat and Autogenous Shrinkage of High Strength Mass Concrete Using Phase Change Material. Graduate School of Industry Chungnam National University the degree of Master of Engineering. 2010 February
7. Shon MS, Lee WJ, Chung, YJ, Kim JK, Hwang, ID. A Study of the Phase Change Material for Reducing Hydration Heat of Mass Concrete. *Journal of the Concrete Institute of Korea*. 2006;2006(11):697-700
8. Ko JS, Kim BY, Park SW. An Experimental Study on the Heat Storage Properties of Phase Change Material Using Paraffin Sheets in Building. A Study on Thermal Performance of Cement Mortar with PCM. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2011 September;11(5):435-441
9. Oh JI, Lee JS. Development Trend of Thermal Storage Building Materials Respond to Climate Change. Korea Land&Housing corporation HURI FOCUS. 2009 March;36
10. Kim BH, Lee HS. A Study on Thermal Performance of Cement Mortar with PCM. *Journal of the Concrete Institute of Korea*. 2011 August;23(4):541-528