

매스부재를 고려한 고강도콘크리트의 수화발열상승속도 조절에 따른 자기수축 특성

Properties of Autogenous Shrinkage according to Hydration Heat Velocity of High Strength Concrete Considering Mass Member

구 경 모¹ 김 규 용^{1*} 홍 성 현¹ 남 정 수¹ 신 경 수¹ 길 배 수²
Koo, Kyung-Mo Kim, Gyu-Yong* Hong, Sung-Hyun Nam, Jeong-Soo Shin, Kyoung-Su Khil, Bae-Su
Department of Architectural Engineering, Chungnam University, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-764, Korea¹
Research Institute of Technology, Tripod Co., Yuseong-Gu, Daejeon, 305-308, Korea²

Abstract

In this study, to reduce the hydration heat velocity (HHV) of high-strength mass concrete at early ages, phase change materials (PCM) that could absorb hydration heat were applied, and the changes in autogenous shrinkage were investigated, as well as the relationship between the hydration temperature and autogenous shrinkage. The acceleration of the cement hydration process by the PCM leads to an early setting and a higher development of the compressive strength and elastic modulus of concrete at very early ages. The function of PCM could be worked below the original melting point due to the eutectic effect, while the hydration temperature and HHV of high-strength mass concrete can be decreased through the use of the PCM. A close relationship was found between the hydration temperature and autogenous shrinkage: the higher the HHV, the greater the ultimate autogenous shrinkage.

Keywords : phase change material, mass member, high-strength concrete, hydration heat velocity, autogenous shrinkage

1. 서 론

시멘트가 물과 반응하면 수화반응과 함께 수화열 및 수축 현상이 발생한다. 특히 고강도콘크리트의 경우 낮은 물비인 더비와 높은 결합재량에 의해 초기에 높은 수화열 및 자기 수축이 나타나며, 이는 부재의 치수가 증가됨에 따라 더욱 심화된다. 이에 많은 연구자들이 수화열과 자기수축의 상관성을 구명하기 위해 시멘트 페이스트, 모르타르 및 콘크리트를 대상으로 초기재령의 수화발열량, 수화열 이력 및 자기수축의 발현율 등을 중심으로 비교분석하였으며, 둘 간의 밀접한 상관성을 언급하였다[1,2,3].

이러한 기존의 연구를 바탕으로 선행연구에서는 수화열과 자기수축의 상관관계를 정량적으로 분석할 수 있는 방법을 제시하고, 실험적으로 평가분석하였다. 그 결과 초기재령에 있어서의 수화발열상승속도가 자기수축과 밀접한 관계가 있다는 것을 제시하였다[4].

본 연구에서는 매스부재를 상정한 고강도콘크리트에 대해 수화발열상승속도를 조절함으로써 자기수축에 미치는 영향을 검토하고자 하였다. 여기에서 수화발열상승속도를 조절하는 메커니즘은 재료적 방안으로서 크게 세가지로 구분할 수 있다.

- 1) 수화발열량의 제어 : 수화열을 발생시키는 결합재의 특성 제어 (저열시멘트, 고로슬래그미분말 등의 사용)[4]
- 2) 시멘트수화반응속도의 제어 (지연제, 마이크로캡슐형 지연제 등의 사용)
- 3) 수화반응에 의해 발생된 수화열의 제어 (잠열재, 상전

Received : December 6, 2011

Revision received : June 11, 2012

Accepted : June 18, 2012

* Corresponding author : Kim, Gyu-Yong

[Tel: 82-42-821-7731, E-mail: gyuyongkim@cnu.ac.kr

©2012 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

이 물질 등의 사용) [5]

이 중 본 연구에서는 수화열 및 수화발열상속도 조절제로서 실제 초고층 건축물에 적용되고 있는 상전이물질을 활용하여 발생된 수화열을 저감시킴으로서 이에 따른 수화열 및 자기수축의 특성을 정량적으로 제시하고자 하였다.

Table 1. Condition of experiment

Experiment Factor	OPC	PCM-3 ¹⁾	PCM-5
Size / Curing	300×300×300mm / Semi-adiabatic		
Addition of PCM	-	3%	5%

1) PCM : Phase Change Materials

Table 2. Concrete mix design

W/C (%)	Slump-flow (mm)	Air Content (%)	S/a	Unit weight (kg/m ³)			
				W	C	S	G
20	650±50	4.5±1.5	0.47	160	800	781	664

Table 3. Physical properties of material

Material	Physical property
Cement	Ordinary portland cement Density 3.15 g/cm ³ , Fineness 3,770 cm ² /g
Fine aggregate	Desalting sand Max size 5mm, F.M. 3.05 Density 2.54, g/cm ³ , Absorptance rate 1.01 %
Coarse aggregate	Crushed aggregate Max size 20mm, F.M. 6.02 Density 2.62 g/cm ³ , Absorptance rate 0.9%
High range water reducer	Polycarboxylic acid type

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

Table 1은 본 연구를 진행하기 위한 실험계획을 나타낸 것이다. 수화발열상속도에 따른 자기수축의 변화를 명확하게 비교하기 위해서는 동일한 배합 조건에서 실험을 실시해야 한다. 이에 본 연구에서는 결합재는 OPC만을 대상으로, 물시멘트비 20%의 고강도콘크리트에 대해 상전이물질(PCM)을 시멘트 중량대비 각각 3% 및 5% 혼입하였을 때의 수화열 및 자기수축을 측정하였다.

또한 PCM의 혼입이 콘크리트의 기초물성에 미치는 영향을 평가하기 위해 굳지 않은 콘크리트의 특성으로서 슬럼프

-플로우, 공기량 및 응결시간을 측정하였으며, 역학적 특성으로서 압축강도를 재령 1, 2, 3, 7, 14, 28, 56일에 측정하였다. 또한 매스부재를 고려한 고강도콘크리트의 수화온도 및 자기수축 측정을 위해 시험체는 300×300×300mm의 간이단열시험체를 배합에 따라 각각 제작하였다.

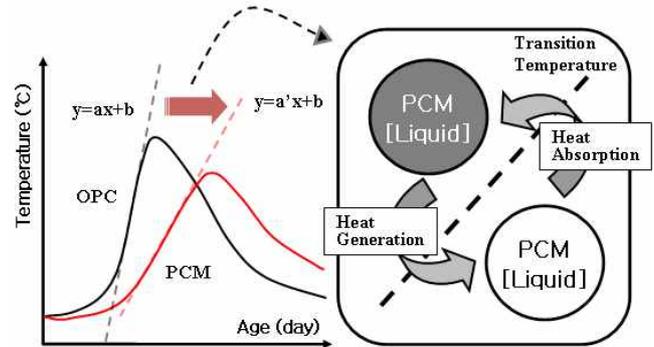


Figure 1. Hydration heat velocity reduction by applying PCM

Table 4. Properties of PCM

Chemical formula	Melting point (°C)	Heat of fusion (cal/g)	Density (g/cm ³)	Specific heat (cal/g°C)
Sr(OH) ₂ · 8H ₂ O	88	82	1.90	0.44

2.2 콘크리트 배합 및 사용재료

Table 2 및 Table 3은 콘크리트 배합과 사용재료의 종류 및 특성을 나타낸 것이다. 80MPa급 고강도 콘크리트를 제작하기 위한 시멘트량은 800kg/m³이며, 시멘트의 종류는 일반적으로 사용되는 보통 포틀랜드시멘트를 대상으로 하였다.

한편, 본 연구에서 적용된 상전이물질(PCM)은 Figure 1에 나타낸 바와 같이 일정한 온도에서 고체↔액체로 성상이 변화되면서 열을 흡수하거나 방출하는 물질이다. 이에 건축 생산현장에서는 태양에너지 또는 댐과 같은 매스부재 구조물의 높은 수화열에 의한 영향 또는 문제점을 줄이기 위해 PCM을 적용하고 있다[8]. 이와 같은 원리로 본 연구에서는 초기재령에 있어 고강도콘크리트 내에서 발생하는 수화열의 흡수와 수화발열상속도의 저감을 목적으로 PCM을 적용하였다. Table 4는 PCM의 물리적 성질을 나타낸 것으로, 분말형 스트론튬계 수화물의 PCM을 사용하였다.

2.2 실험방법

매스부재를 고려한 고강도콘크리트의 내부 수화온도 및

자기수축 측정을 위한 시험체는 300×300×300mm 간이 단열시험체로, 몰드는 두께 100mm의 폴리스틸렌보드를 활용하여 제작하였다. 시험체의 내부온도 및 수축변형량은 열전대 및 매립형 게이지를 사용하여 측정하였으며, 타설 직후 탈형없이 10분 간격으로 측정을 실시하였다.

한편 KS F 2586에 준하여 자기수축을 평가할 때 사용되는 100×100×400mm 시험체는 준등온이라는 가정하에 수화열에 의한 열변형을 배제하고 자기수축을 측정하는 것이 가능하다[6]. 그러나 300×300×300mm 간이단열시험체는 내부온도가 높게 상승하기 때문에 수화열에 의한 변형을 고려해야 한다. 이에 본 연구에서는 다음의 식 (1)을 사용하여 자기수축에 대한 열팽창보정을 실시하였다.

$$\epsilon_{auto} = \epsilon_{total} - \epsilon_{thermal} \text{ ----- 식 (1)}$$

여기서, ϵ_{auto} : 자기수축 ($\times 10^{-6}$)
 ϵ_{total} : 측정된 총 변형 ($\times 10^{-6}$)
 $\epsilon_{thermal}$: 수화열에 의한 열변형 ($\times 10^{-6}$)

또한 수화열에 의한 열변형은 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\epsilon_{thermal} = \gamma \times \Delta t \text{ ----- 식 (2)}$$

여기서, γ : 콘크리트의 열팽창계수 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
 Δt : 온도변화량 ($^{\circ}\text{C}$)

한편, 콘크리트의 열팽창계수(Thermal Expansion Coefficient, 이하 TEC)는 각 배합 및 골재 특성에 따라 달라지기 때문에 실측값을 대입해야 한다. 특히, 초기재령 콘크리트의 경우 수화반응이 진행되고 있는 상태이기 때문에 그 값은 시간에 따라 변한다.

본 연구에서는 기존문헌 및 선행연구를 기초로 써머커플과 매립형 게이지를 매입한 $\Phi 100 \times 200\text{mm}$ 시험체를 제작한 후, 수조 안의 물의 온도를 상승시켜 타설 후 시간에 따른 초기재령 콘크리트의 열팽창계수를 측정하였다[2].

한편 열팽창계수는 Figure 2(a)에 나타난 바와 같이 시간에 따라 측정이 가능하며, 이를 토대로 회귀분석을 실시하면 Figure 2(b)와 같이 열팽창계수 이력곡선을 유추할 수 있다. 그러나 측정된 열팽창계수는 고온이력을 받지 않는 $\Phi 100 \times 200\text{mm}$ 시험체의 값으로 300×300×300mm 간이단열시험체의 경우 초기재령시 고온이력에 의해 수화반응이 촉진되고 성상이 빠르게 변화하기 때문에 보정없이 적용하기엔 적합하지 않다.

본 연구에서는 열팽창계수를 측정한 $\Phi 100 \times 200\text{mm}$ 시험체와 각각의 시험체의 성숙도(Maturity)를 산정한 뒤 재

령환산계수를 산출하여 Figure 2(c)와 같이 열팽창계수의 보정을 실시하였다. 성숙도를 산정하기 위한 기준온도는 -10°C 로 설정하였다.

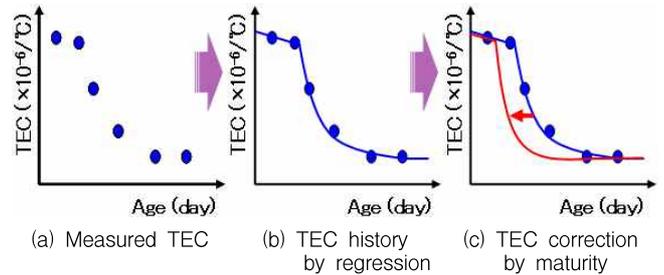


Figure 2. Progress of the TEC calculation and correction

2.3 초기재령의 수화발열상승속도의 설정

초기재령에 있어 수화발열상승속도 조절에 의한 자기수축의 특성을 정량적으로 분석하기 위해, 선행연구에서는 Figure 3에서와 같이 수화온도가 급격하게 상승하는 구간, 즉 수화발열상승구간을 설정하였으며, 구간의 기울기를 수화발열상승속도로 정의하였다[4]. 여기에서 분석구간은 최고온도 상승량의 80%지점을 종점으로 설정하고 종점을 기준으로 회귀분석하여 결정계수가 0.95에 해당하는 지점을 시점으로 산정하였다.

이를 바탕으로 본 연구에서는 상전이물질을 활용하여 수화발열상승속도를 조절함으로써 수화열과 자기수축과의 상관관계를 수치적으로 제시하였다.

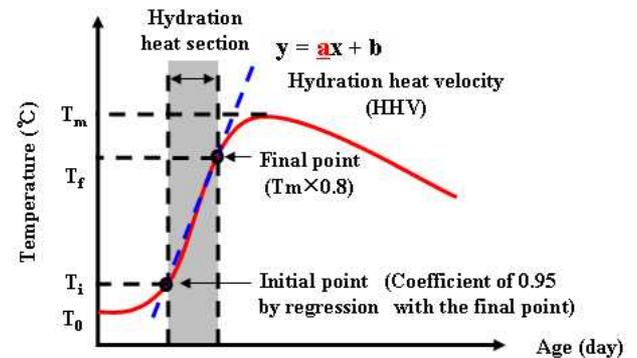


Figure 3. Analysis method for the history of hydration temperature

3. 실험결과 및 고찰

3.1 굳지 않은 콘크리트의 성상

Table 5는 PCM의 혼입율에 따른 슬럼프플로우 및 공기량과 혼화제의 혼입량을 나타낸 것이다. OPC와 동일한 양의 고성능감수제(HRWR)를 혼입한 PCM-3의 경우, 슬럼프플로우가 약 14%감소하였다. 또한 PCM-5는 슬럼프플로우의 목표범위를 만족하기 위해 고성능감수제의 양이 OPC에 대비하여 0.3% 증가하였다.

Table 5. Slump-flow and air content

Classification	Slump flow (mm)	Air (%)	HRWR (C×wt%)	AE agent (HRWR×wt%)
OPC	700	3.5	0.8	0.5
PCM-3	600	5.5	0.8	0.5
PCM-5	650	4.0	1.1	0.2

Figure 4는 상전이물질 혼입율에 따른 콘크리트의 응결시간을 나타낸 것이다. PCM-3 및 PCM-5의 종결시간은 OPC에 비교하여 3.8 및 5.5시간 빨라졌다. 본 연구에서 사용한 상전이물질은 온도가 융해점 이상이 될 경우 열을 흡수하여 고체에서 액체로의 상전이가 발생하며, 이때 화학적으로 결합되어 있던 물분자가 분리되게 된다. 분리된 물분자는 수화반응에 참여하여 시멘트의 수화를 촉진시키는 역할을 하게 되며 이로 인해 상전이물질의 혼입율이 증가할수록 응결시간이 빠르게 나타난 것으로 판단된다.

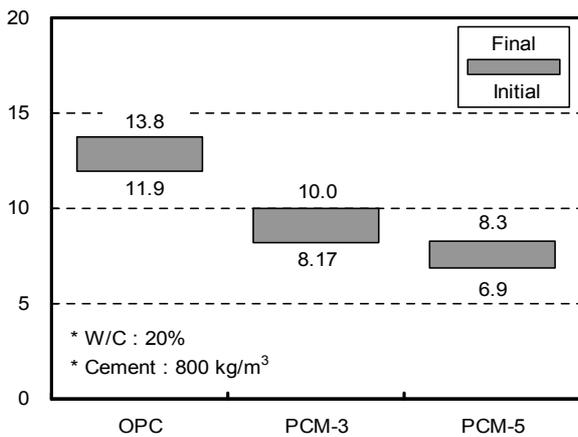


Figure 4. Setting time

3.2 압축강도 특성

Figure 5은 OPC 콘크리트 대비 상전이물질 혼입 콘크리트의 압축강도 발현율을 나타낸 것으로, 괄호안의 값은

OPC의 재령별 압축강도(MPa)이며 이에 대한 상대적인 발현율을 %로 나타냈다. 1일 재령의 경우 상전이물질의 수화반응 촉진효과로 인해 상전이물질을 혼입한 콘크리트는 OPC에 비해 압축강도가 조기에 높게 발현되는 것으로 나타났으나, 2일 재령 이후부터는 모든 배합의 콘크리트가 유사한 발현율을 보여, 상전이물질 혼입이 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

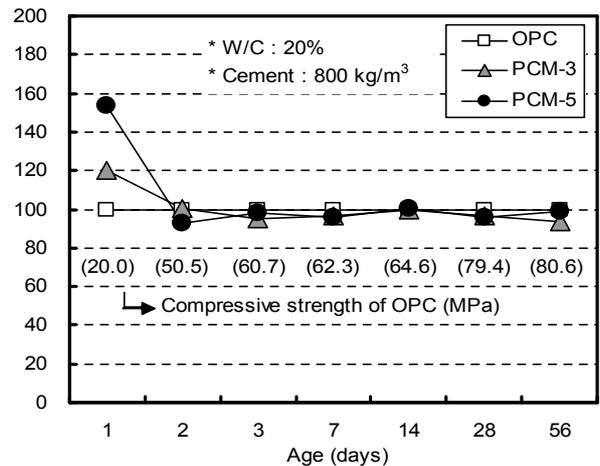


Figure 5. Development ratio of compressive strength

3.3 수화발열 거동특성

Figure 6은 콘크리트 배합에 따른 수화온도 측정결과를 나타낸 것이다. OPC의 최고온도 및 최고온도 도달시간은 72.2℃ 및 21.5시간으로 나타났다. 그러나 상전이물질을 혼입한 PCM-3 및 PCM-5의 최고온도는 재료의 열흡수 효과에 의해 각각 64.3℃ 및 61.2℃로, OPC에 비해 약 10~15% 감소하였다. 또한 PCM-3 및 PCM-5의 최고온도 도달시간은 각각 20.8시간 및 18.7시간으로 나타났으며, 이는 상전이물질에 의한 수화 촉진에 의한 결과로 사료된다.

한편, 본 연구에서 사용한 상전이물질의 상전이온도는 88.0℃ 임에도 불구하고 그 온도 이하에서 상전이물질의 상전이 반응이 나타나고 있다. 상전이물질의 상전이온도는 순수 상전이물질만 존재할 시에 나타나는 특성이며, 만약 시멘트와 같은 타 화합물이 존재할 경우에는 상전이온도가 낮아지는 공융점 형성효과가 나타나게 된다. 이와 같은 특성으로 인해 낮은 온도에서도 상전이물질은 상전이 반응을 일으키며, 그로 인해 수화온도의 저감은 물론 수화반응도 촉진시키는 특성이 나타난 것으로 사료된다.

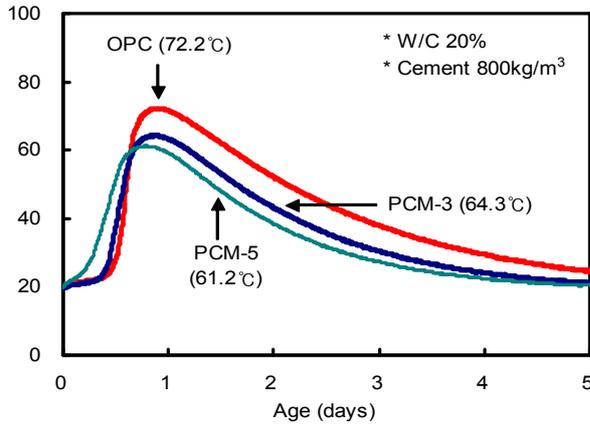


Figure 6 Hydration temperature

Table 6은 수화온도가 급속이 증가하는 수화발열상승구간의 특성을 분석한 결과를 나타낸 것이다. 수화발열상승구간의 직선기울기인 수화발열상승속도의 경우 OPC는 7.79°C/hr로 산정되었다. 상전이물질을 혼입한 PCM-3 및 PCM-5의 수화발열상승속도는 각각 4.81°C/hr 및 3.12°C/hr로 산정되었으며, 이는 OPC의 약 62%와 40% 수준으로 상전이물질의 사용을 통해 매스부재를 고려한 고강도콘크리트의 수화발열상승속도를 저감시키는 것이 가능하였다.

Table 6. Analysis result of hydration heat section

Classification	Initial point		Final point		Regression equation
	Time (hr.)	Tem. (°C)	Time (hr.)	Tem. (°C)	
OPC	10.5	24.1	15.7	61.9	$y = -63.5 + 7.79x$ ($R^2 = 0.95$)
PCM-3	7.2	21.8	14.8	55.5	$y = -18.8 + 4.81x$ ($R^2 = 0.96$)
PCM-5	2.0	22.0	12.3	52.9	$y = 1.10 + 3.12x$ ($R^2 = 0.95$)

3.4 열팽창계수

Figure 7은 각 배합에 따른 $\phi 100 \times 200$ mm 시험체와 $300 \times 300 \times 300$ mm 간이단열시험체의 성숙도 산정결과를 나타낸 것이다. 모든 배합에서 10시간 이후부터 성숙도 차이가 증가하는 것으로 나타났으며, $300 \times 300 \times 300$ mm 간이단열시험체의 내부 성상의 변화, 즉 열팽창계수의 변화가 $\phi 100 \times 200$ mm 시험체에 의해 측정된 열팽창계수보다 빠를 것으로 예상하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 이러한 성숙도를 토대로 재령환산계수를 산출하여 $\phi 100 \times 200$ mm

시험체에 의해 측정된 열팽창계수 이력을 보정하였다.

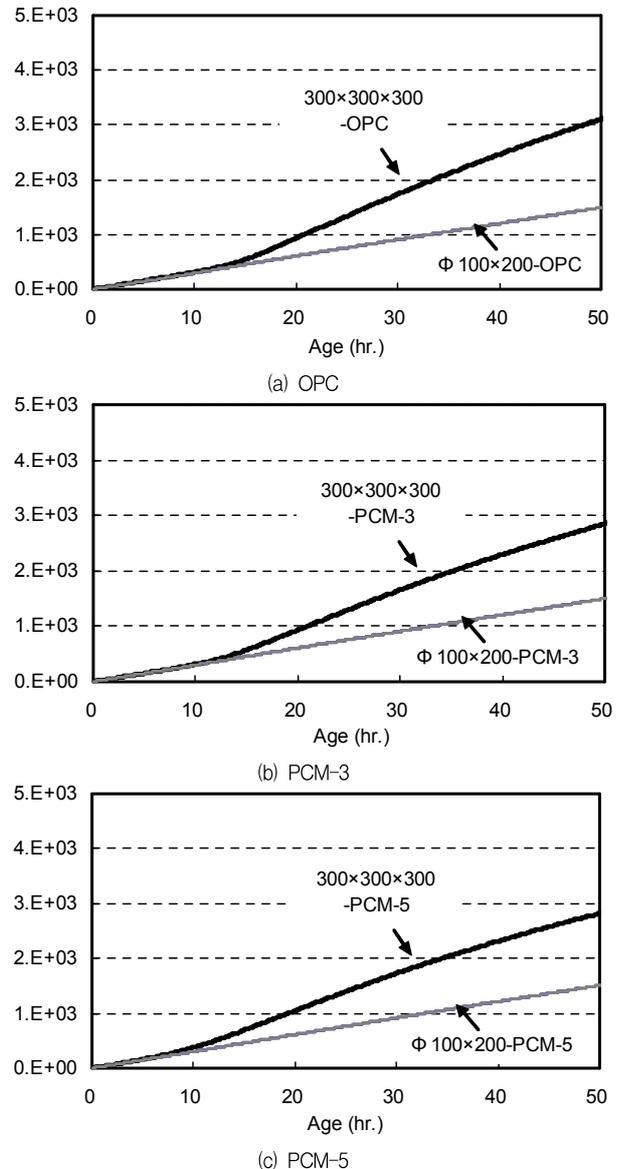


Figure 7. Maturity result of the $300 \times 300 \times 300$ mm and $\phi 100 \times 200$ specimen

Figure 8은 $\phi 100 \times 200$ mm 시험체에 의해 측정된 열팽창계수 및 이력과 성숙도 보정을 실시한 최종 열팽창계수를 나타낸 것이다. OPC의 열팽창계수는 콘크리트의 초기 액성의 특성으로 인해 매우 높은 값을 보이며 시간이 경과함에 따라 서서히 감소하는 경향을 보였다. 시험체 제작 후 약 7.5시간 이후부터는 열팽창계수가 보다 빠르게 감소하는 것으로 나타났으며, 약 17시간부터는 약 $11.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 의 값으로 수렴하는 것으로 나타났다. 상전이물질을 혼입한

PCM-3과 PCM-5의 경우, 열팽창계수는 초기부터 급속히 저하하는 형태를 나타내었으며, PCM-3은 약 8.8시간 이후부터 약 $8.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 으로 수렴하고, PCM-5는 약 6시간 이후부터 약 $7.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 으로 수렴하였다. 이는 상전이물질 혼입한 콘크리트의 경우 상전이물질로 인한 초기 수화 촉진으로 인해 콘크리트의 액성-소성상태의 변화가 OPC에 비해 빠르게 나타난 결과로 판단된다.

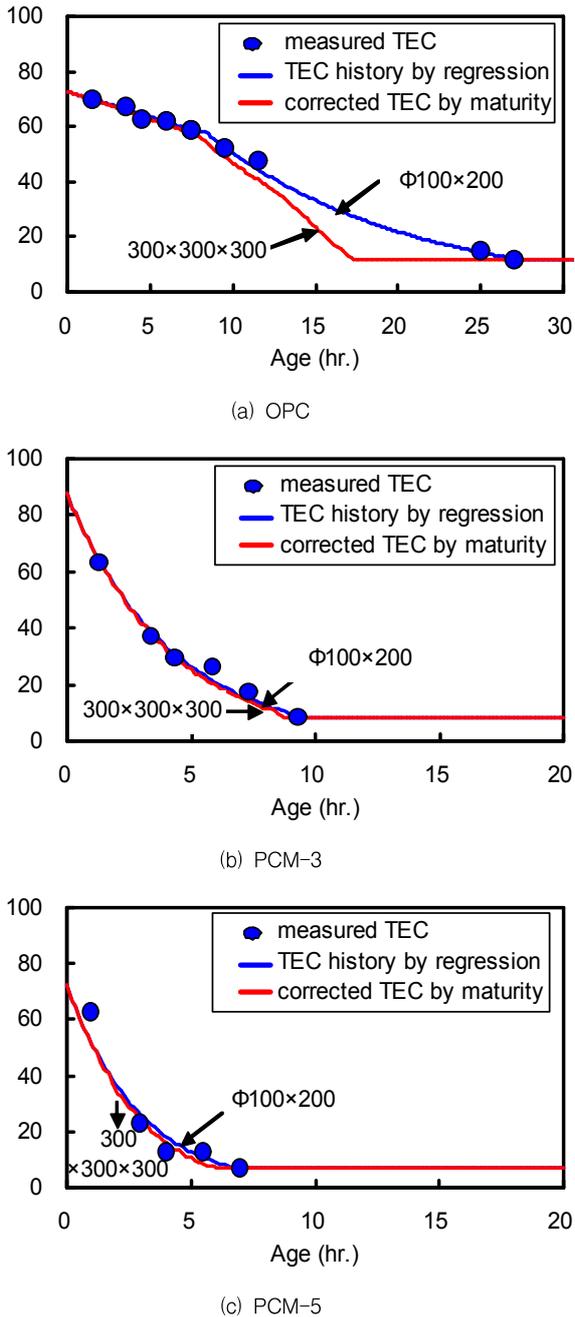


Figure 8. Thermal Expansion Coefficient

3.5 자기수축 거동특성

Figure 9는 상전이물질의 혼입에 따른 전변형, 열변형 및 최종적으로 보정된 자기수축 이력곡선을 나타낸 것이다. OPC 시험체의 경우 측정된 전변형과 자기수축과의 차가 매우 크게 나타나고 있다. 반면 상전이물질을 혼입한 시험체인 PCM-3 및 PCM-5의 경우 측정된 전변형과 자기수축과의 차가 OPC 시험체에 비해 매우 작게 나타나고 있으며, 이는 OPC 시험체에 비해 상전이물질을 사용한 시험체의 열변형이 매우 작게 나타나고 있기 때문이다.

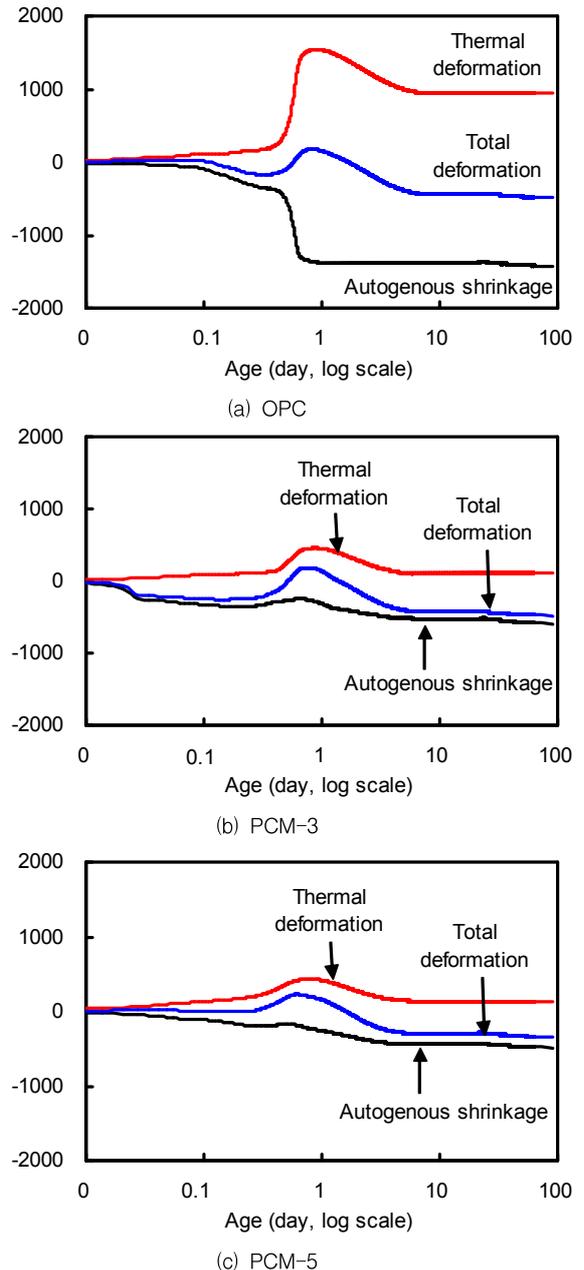


Figure 9 Total deformation, thermal deformation and autogenous shrinkage

OPC 시험체의 재령 91일 자기수축은 -1425×10^{-6} 으로 산정되었으며, PCM-3 및 PCM-5의 경우 OPC 시험체의 각각 42% 및 34% 수준인 -595×10^{-6} , -490×10^{-6} 로 나타났다. OPC 시험체의 경우 내부 수화온도가 상승되는 구간의 열팽창계수는 비교적 높은 값을 보이는 반면, 온도가 하강하는 구간의 열팽창계수는 낮은 값을 보이고 있으며 이로 인해 온도의 상승량 및 하강량은 유사하여도 팽창량과 수축량에서는 큰 차이가 발생한다. 상전이물질을 사용한 시험체의 경우 내부 수화온도가 상승하는 구간과 하강하는 구간의 열팽창계수는 유사하여 팽창량과 수축량은 유사하게 나타난다. 즉 내부 수화온도의 상승 및 하강에 따른 팽창량과 수축량의 차이인 열팽창 잔류량만큼 자기수축의 보정이 이루어지므로 상전이물질을 사용한 시험체의 자기수축은 OPC 시험체에 비해 작은 값으로 산정된다.

3.6 수화발열상승속도 및 자기수축의 상관관계

Figure 10은 수화발열상승속도에 따른 재령 91일의 자기수축량을 나타낸 것으로 선행연구에서 실시한 결과를 동시에 제시하였다. 그 결과, 수화발열상승속도가 증가함에 따라 재령 91일의 자기수축은 증가하는 경향을 나타내었으며, 이를 활용하여 초기재령의 수화발열상승속도 조절에 의해 자기수축의 저감이 가능할 것으로 판단된다. 이러한 관계를 수식으로 나타내면 다음 식 (3)과 같다.

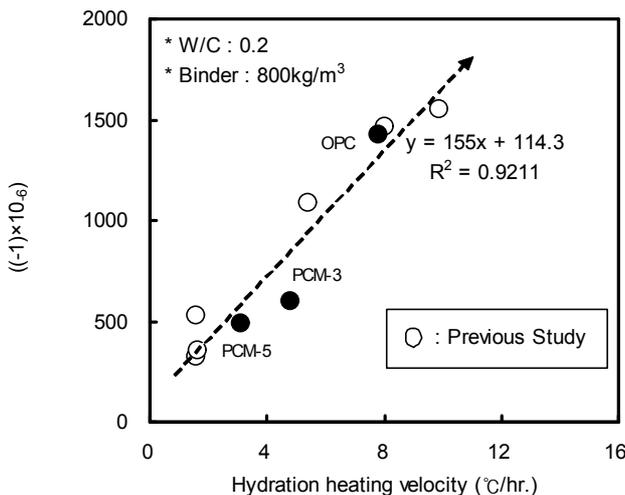


Figure 10. Relation between hydration heat velocity and autogenous shrinkage

$$AS_{91} = a \cdot HHV + b \quad \text{----- 식 (3)}$$

여기서, AS_{91} : 재령 91일 자기수축량 ($\times 10^{-6}$)

HHV : 수화발열상승속도 ($^{\circ}\text{C}/\text{hr}$)

a : 수축 변환계수 ($\times 10^{-6}, \text{hr}/^{\circ}\text{C}$)

b : 자기수축 보정상수 ($\times 10^{-6}$)

선행연구 및 본 연구의 범위에 있어서는 보통포틀랜드시멘트만을 결합재로 사용한 배합에 한하여 다음과 같은 식이 도출되었다.

$$AS_{91} = 155 \cdot HHV + 114.3 \quad (R^2=0.92)$$

4. 결 론

본 연구에서는 매스부재를 고려한 고강도콘크리트의 수화발열상승속도를 제어하기 위한 재료적인 방안으로서 발생된 수화열을 흡수할 수 있는 상전이물질을 사용하였다. 이에 따른 W/C 20%의 고강도 콘크리트에 대해 자기수축 특성의 변화, 그리고 수화열 및 자기수축의 상관성을 검토하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 상전이물질의 혼입에 의해 고강도콘크리트의 슬럼프플로우가 저하되고, 공기량이 증가되는 현상이 나타났다. 또한 상전이물질의 화학적 반응 메커니즘에 의해 응결시간이 촉진되며, 이로 인한 초기재령의 압축강도가 OPC에 비해 높아지는 경향을 나타냈다.
- 2) 초기재령에 있어 상전이물질의 흡열성능에 의해 고강도콘크리트의 수화발열량 및 수화발열상승속도가 저감되었다.
- 3) 상전이물질을 혼입한 콘크리트의 경우 초기 수화촉진으로 인해 콘크리트의 액성-소성상태의 변화가 OPC에 비해 빠르게 나타나며, 그 결과 초기재령의 열팽창계수의 수렴도 빠르게 나타난다.
- 4) 본 연구의 범위에서는 상전이물질 혼입에 따른 고강도콘크리트의 수화발열상승속도 조절에 의해 자기수축량이 저감되었으며, 이러한 결과를 기초로 초기재령의 수화발열상승속도의 제어에 의해 자기수축을 저감하는 것이 가능하다고 판단된다.

요 약

본 연구에서는 초기재령에 있어 매스부재를 고려한 고강도콘크리트에 대해 수화발열상승속도를 저감시키기 위한 방

안의 일환으로 열흡수능이 있는 상전이물질을 사용하였다. 또한 수화발열상승속도의 조절에 의한 고강도콘크리트의 자기수축 특성 변화를 분석하고자 하였다. 그 결과, 상전이물질은 시멘트 수화반응을 촉진함으로써 초기재령에 빠른 응결시간과 높은 압축강도 발현을 나타냈다. 또한 수화열 및 수화발열상승속도를 저감시키고, 자기수축량을 감소시키는 결과를 나타내었다. 이를 통해 초기재령의 수화발열상승속도의 조절에 의해 자기수축량의 저감이 가능하다고 판단된다.

키워드 : 상전이물질, 매스부재, 고강도콘크리트, 수화발열상승속도, 자기수축

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF, 2012H1B8A2025606), and some researchers were supported by Brain Korea 2nd (BK21) funded by the Korean Government.

References

1. Tazawa E, Miyazawa S. Influence of cement and admixtures on autogenous shrinkage of cement paste, *Cement and Concrete Research*, 1995;25(2):281-7.
2. Loukili A, Chopin D, Khelidj A, Touzo J. A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history. *Cement and Concrete Research*, 2000;30(6):915-22.
3. Turcra P, Loukilia A, Barcelob L, Michel J. Can the maturity concept be used to separate the autogenous shrinkage and thermal deformation of a cement paste at early age. *Cement and Concrete Research*, 2002;32(9):464-72.
4. Kim GY, Lee EB, Koo KM. Hydration Heat and Autogenous Shrinkage of High-Strength Mass Concrete, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2009 Nov;9(2):509-16.
5. Zhang D, Li Z, Zhou J, Wu K. Development of thermal energy storage concrete. *Cement and Concrete Research*, 2004;34(6):927-34.
6. Korea Standard Association. [KS F 2586 Standard test method for autogenous shrinkage and expansion of cement paste, mortar and concrete]. KSA (Korea); 2010. 8 p. Korean
7. Meling H, Cabeza LF. Heat and cool storage with PCM-An up to date introduction into basics and applications. 1st ed. Berlin (Germany): Springer; 2008. p. 64-9.
8. Kim YR, Kim DS, Khil BS, Kim OJ, Lee DB. An experimental study on properties of concrete using latent heat binder. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2008 Oct;20(5):661-8.
9. Kang SM, Kang HJ, Song MS, Park PH. A Study on the Early Hydration-Retarding Mechanism of Polymer Modified Cement. *Proceedings of the Korea Concrete Institute*; 2009 may 29; Hanyang university. Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2009. p. 221-2.
10. Ei-ichi T, Shingo M. Prediction Model for Shrinkage of Concrete Including Autogenous Shrinkage, *Proceedings of Sixth International Conference*.; in: F.-J. Ulm, Z.P. Bazant, F.H. Wittmann, Editors, *Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Other Quasi-Brittle Materials*.: Elsevier Science Ltd.; 2001. p. 735-46.