



## 상변화물질 함침 경량골재를 사용한 콘크리트의 특성

김세환<sup>1)</sup> · 전현규<sup>2)</sup> · 황인동<sup>3)</sup> · 서치호<sup>1)</sup> · 김상현<sup>4)\*</sup>

<sup>1)</sup>건국대학교 건축대학 <sup>2)</sup>GS건설 기술연구소 <sup>3)</sup>세일건설(주) 기술연구소 <sup>4)</sup>건국대학교 산업기술연구원

## The Properties of Concrete with Lightweight Aggregate Impregnated by Phase Change Material

Se-Hwan Kim,<sup>1)</sup> Hyun-Kyu Jeon,<sup>2)</sup> In-Dong Hwang,<sup>3)</sup> Chee-Ho Seo,<sup>1)</sup> and Sang-Heon Kim<sup>4)\*</sup>

<sup>1)</sup>College of Architecture, KonKuk University, Seoul 143-130, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Research, GS E&C, Yongin 449-831, Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Research, Seil Construction, Gyunggi-Do 462-121, Korea

<sup>4)</sup>The Academy of Applied Science and Technology, KonKuk University, Seoul 143-130, Korea

**ABSTRACT** Under the paradigm of sustainable green growth at the national level, various researches and applications for energy saving in the construction field has been attempted. As a part of energy saving efforts, lightweight concrete was investigated for thermal insulation concrete with phase change material (PCM) which has high heat storage capacity. As a part of energy saving efforts, thermal insulation concrete was investigated and evaluated with lightweight aggregate impregnated by PCM which has high heat storage capacity. As a result, it is found that concrete with lightweight aggregate impregnated by PCM is effective to prevent its quality deterioration by reducing water absorption rate of lightweight aggregate. In addition, it has shown that concretes using lightweight aggregate and impregnated lightweight aggregate improve heat insulation property 33% and 40~43% compared with using normal aggregate, respectively. It is that the lightweight aggregate concrete with impregnated lightweight aggregate has 12~14% lower thermal conductivity than unimpregnated.

**Keywords** : lightweight aggregate, lightweight aggregate concrete, phase change material, thermal conductivity

### 1. 서 론

현재 전 세계는 기술 발달의 가속화 및 경제규모의 거대화, 지구 온난화방지를 위한 협력체계 구축 등 글로벌화가 심화되고 있으며, 이는 건설 분야에서도 글로벌화, 녹색 건설 증대 및 기술 혁신이 요구되고 있다. 이를 위하여 정부에서는 2009년부터 친환경 주택의 설계 및 성능 평가 지침을 작성하여 친환경 주택 건설기준을 시행하고 있으며, 건물 에너지 효율 등급/친환경 건축물 인증 제도를 도입하여 단계적으로 총 에너지 절감 목표를 수립하였으며, 2025년 제로에너지의 의무화를 추진하고 있다.<sup>1)</sup>

현대의 콘크리트는 높은 안전성, 시공성 및 경제성 등의 장점으로 인해 건축물에 약 70% 이상 사용되고 있으나 낮은 단열성능으로 인하여 단열재의 추가 시공 등이

필수적으로 요구되고 있으며, 이에 따른 공사기간 및 공사비 증대뿐 아니라 결로현상 등 주거환경을 저해하는 문제 등을 발생시켜 이에 대한 개선이 요구되고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 자체의 단열 성능이 향상된 콘크리트의 개발이 제안되었으며 이에 대하여 다공성의 경량골재를 사용하는 경량골재 콘크리트가 단열성능의 향상 가능성이 높은 것으로 알려져 있다.<sup>2-4)</sup> 그러나 다공질의 경량골재는 보통골재보다 빠르고 높은 흡수 특성에 의해 콘크리트의 작업성 및 품질에 많은 문제가 있다고 알려져 있다.<sup>5-7)</sup>

또한 1980년대 이전부터 에너지 절감을 위한 건축 공학적 관점에서 상변화물질(phase change materials, 이하 PCM)은 매우 유용한 재료로 평가되어져 왔으며, 콘크리트, 석고 보드 등에 마이크로캡슐의 형태로 사용하여 부재에서의 에너지 효율 향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>8)</sup> 이중 선형적인 분자구조로 이루어진 왁스는 제조상의 간편성과 비교적 높은 열저장 용량, 높은 순도 등과 같은 장점으로 대표적인 PCM으로 알려져 있다.<sup>9)</sup>

\*Corresponding author E-mail : granalma@hanmail.net

Received January 16, 2013, Revised March 27, 2013,

Accepted May 23, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

따라서 이 연구에서는 다공질의 경량골재에 PCM을 함침(impregnation) 시킨 후 코팅하여 이에 대한 경량골재를 적용하여 제조된 콘크리트에 대하여 물리, 역학적 특성 및 열전도율을 평가하여 에너지 저감을 위한 단열콘크리트 개발의 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 실험 계획 및 방법

### 2.1 실험 개요

이 연구는 구조용 콘크리트로서 사용 가능하고 건물의 에너지 절감이 가능한 단열콘크리트 개발을 위하여 PCM을 함침시킨 경량골재를 사용한 경량골재 콘크리트에 대하여 역학적 특성 및 열전도율의 특성을 측정하였다.

### 2.2 사용 재료

#### 2.2.1 시멘트

이 실험에서는 KS L 5201 규정을 만족하는 H사 제품의 1종 보통 포틀랜드 시멘트로서 물리적 성질과 화학적 성질은 Table 1 및 2와 같다.

#### 2.2.2 플라이애쉬

플라이애쉬는 KS L 5405 규정을 만족하는 플라이애쉬를 사용하였고 그 물리적 성질은 Table 3에 나타내었다.

#### 2.2.3 경량골재<sup>10)</sup>

1) PCM(phase change material) 및 코팅재료  
경량골재의 열저장 능력의 증가를 위하여 사용된 상변

화물질은 일반적으로 용점으로 분류되며 분자의 구조에 따라 열저장 용량이 달라진다. 이 연구에서 사용한 PCM은 용융온도가 31℃이며 열용량은 169 kJ/kg인 독일의 R사의 제품을 사용하였다.

또한 경량골재의 높은 흡수 특성에 대한 개질 개선 및 PCM의 용융시 경량골재 외부로의 누출을 막기 위한 표면 코팅을 위하여 에폭시 수지를 사용하였다. 에폭시 수지의 주제는 국내 L사의 당량가 182의 bis-phenol A type을 사용하였으며 경화제는 미국 A사의 제품을 사용하였으며 각각의 특성은 Table 4~6과 같다.

#### 2) 함침 전 경량골재

이 실험에서 사용한 경량골재는 아시아 지역의 중국에서 생산한 A골재와 유럽 지역의 벨기에에서 생산한 B골재, 미주지역의 미국에서 생산한 C골재를 사용하였으며 그 물리적 성질은 Table 7와 같으며 외형은 Fig. 1과 같다.

Table 4 Properties of phase change material

Melting area (°C)	Heat storage capacity (kJ/kg)	Density solid (kg/L)	Heat conductivity (W/mk)	Kin. viscosity at 50°C (mm <sup>2</sup> /s)
27-31	169	0.88	0.2	28.57

Table 5 Properties of epoxy resin

Viscosity at 25°C (cps)	Equivalent weight	Flash point (°C)	Specific gravity at 25°C
12000	182	251	1.02

Table 6 Properties of epoxy hardener

Viscosity at 25°C (cps)	Equivalent weight	Solids (%)	Gardner color
35000	166	98	12

Table 7 Physical properties of lightweight aggregates

Type	Oven-dry density (g/cm <sup>3</sup> )	24hours water absorption (%)	Porosity in Agg. (%)	Absolute volume (%)	Fineness modulus (FM)
A	1.2	12.1	53.2	64.9	5.2
B	1.3	14.7	53.1	69.2	5.0
C	1.4	5.6	45.5	58.6	6.4



Fig. 1 Shapes of lightweight aggregates

Table 1 Physical properties of cement

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Setting time (min)		Soundness (%)	Compressive strength (MPa)		
		Initial setting	Final setting		3-day	7-day	28-day
3.15	3400	230	390	0.1	22.54	29.40	40.18

Table 2 Chemical properties of cement

Elements	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Ign. loss	Free CaO	Insol
Contents (%)	61.3	21.1	5.2	4.0	2.8	2.4	2.0	0.6	0.2

Table 3 Properties of fly-ash

Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Ig. loss (%)	Hyg. moisture (Wt %)	Com. strength Rate (%)	Unit water rate (%)	SiO <sub>2</sub>
3501	2.22	4.7	0.2	89	97	52

중국에서 생산되어진 A골재는 팽창혈암을 주원료로 로터리 킬른을 이용하여 1000~1100℃의 온도로 소성하여 생산된 구형입자의 조립형 경량골재이다. A골재의 최대치수는 20 mm이며, 밀도는 약 1.2 g/cm<sup>3</sup>, 24시간 흡수율은 약 12.1%를 보인다. 골재 내부 단면을 SEM 촬영한 Fig. 2(a)에서와 같이 불규칙한 형상과 100 μm 이상의 공극이 분포되어 있으면서 일부의 독립공극과 함께 연속공극의 형태로 나타났다.

벨기에에서 생산된 B골재는 팽창혈암을 주원료로 하여 약 1100℃의 온도로 로터리 킬른에서 소성한 구형입자의 조립형 경량골재이다. B골재의 최대치수는 12 mm

이며, 밀도는 약 1.3 g/cm<sup>3</sup>, 24시간 흡수율은 약 14.7%로서 SEM 촬영한 내부 공극의 형상은 Fig. 2(b)와 같다. B골재는 A골재에 비해 내부에 0.2~9.2 μm의 미세한 공극이 고르게 분산되고 공극사이의 격벽이 매우 얇게 구성되었다.

미국에서 생산된 C골재는 팽창점판암을 주원료로 로터리 킬른을 이용하여 약 1200℃의 온도로 소성한 쉼개 모양의 비조립형 경량골재이다. C골재의 최대치수는 20 mm이며, 밀도는 약 1.4 g/cm<sup>3</sup>, 24시간 흡수율은 약 5.6%로서 A, B골재에 비해 낮은 흡수율을 갖는 것을 특징으로 한다. 내부 공극의 형상은 Fig. 2(c)와 같다. 내부 공극은 A골재 보다는 다소 작은 12~66 μm의 크기를 갖는 것으로 나타났으며 연속되지 않은 독립된 공극을 형성하고 있다. 또한 A, B골재에 비해 표면에 요철이 없고 평평한 형상을 보이고 있다.

### 3) 함침 후 경량골재

열저장 능력을 향상시키기 위하여 PCM 물질을 경량골재에 함침시키는 방법으로 경량골재를 105℃에서 골재 내에 포함된 수분을 모두 증발시킨 후, 105℃의 경량골재를 60℃로 승온된 PCM 물질에 2시간 보존하여 경량골재의 내부에 PCM 물질이 충분히 흡수되도록 하였다. 이후 경량골재의 표면에 남은 PCM은 마른 부직포로 제거하였다. 이후 PCM가 온도변화에 따라 용융되어 경량골재 외부로 누출되는 것을 막기 위하여 골재 중량의 15%의 에폭시 수지에 의하여 3 μm 두께로 코팅 처리를 실시하였다.

Fig. 3은 시차 주사 열량법(differential scanning calorimetry, DSC)에 의해 함침 이후의 각 경량골재의 열저장 용량을 측정한 결과이다.

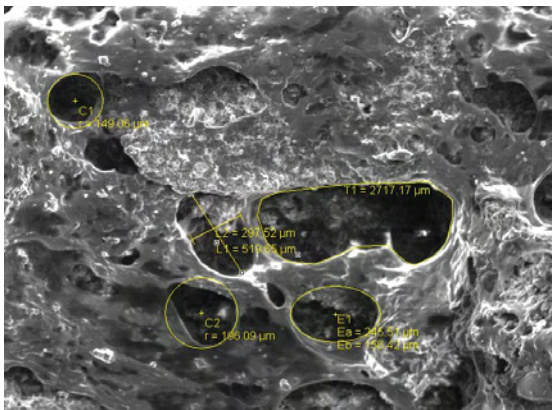
PCM 함침 경량골재의 PCM 함침량 및 에폭시 수지 코팅량 및 24시간 흡수율에 대한 평가 결과는 Table 8과 같다. PCM 함침량 및 에폭시 수지 코팅량은 초기 경량골재 질량을 기준으로 함침후 질량 변화를 통하여 평가하였다. PCM가 함침된 골재의 열저장 용량을 [흡수된 PCM의 중량 분율×이론 열저장 용량] 및 [실험에 의한 측정 열저장 용량]으로 계산하여 Table 9에 나타내었다.

### 2.2.4 잔골재

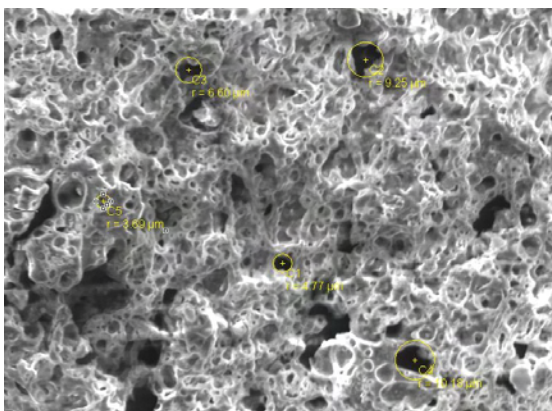
잔골재는 인천산 세척사를 사용하였으며 잔골재의 물리적 성질은 Table 10과 같다.

**Table 8** Physical properties of lightweight aggregate impregnated PCM

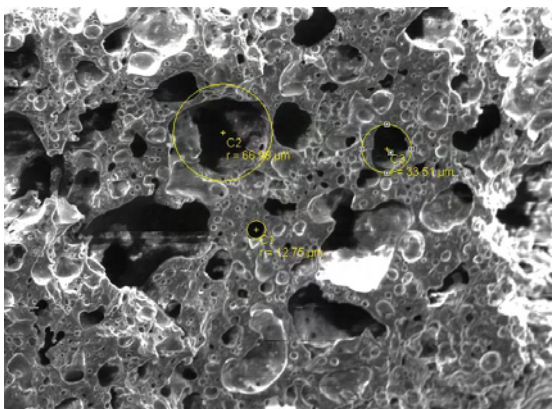
Type	Initial weight (g)	Treated PCM (g)	Treated epoxy resin (g)	24 hours water absorption (%)
A	100	107.5	107.6	0.1
B	100	111.0	111.9	0.2
C	100	104.1	104.7	0.2



(a) Type A

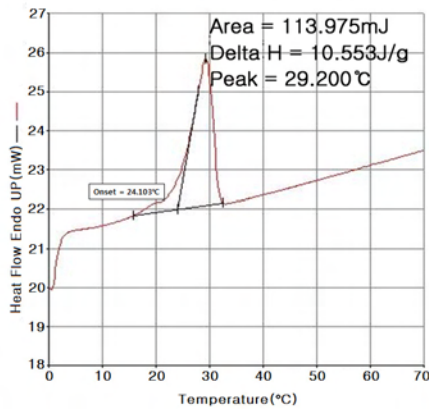


(b) Type B

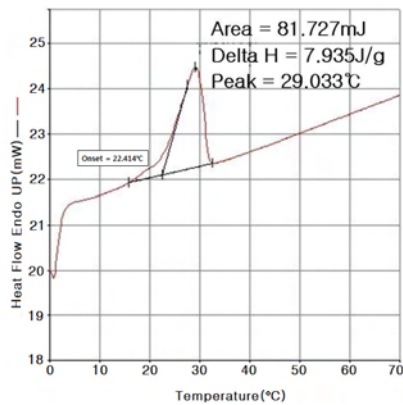


(c) Type C

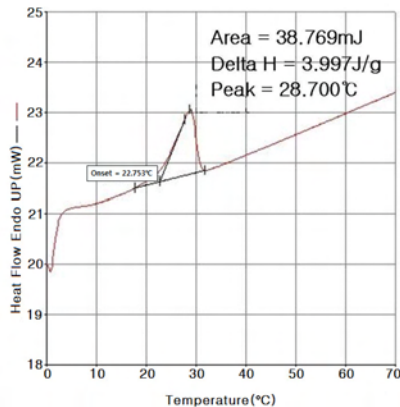
**Fig. 2** Internal micro-structure of lightweight aggregates used



(a) Type A



(b) Type B



(c) Type C

Fig. 3 Heat storage capacity with DSC

Table 9 Heat storage capacities of lightweight aggregate impregnated PCM

Type	Absorption rate of PCM (%)	Theoretical Heat storage capacity (J/g)		Heat storage capacity with DSC (J/g)
		by Theo.	by Test	
Treated & coated	A	7.5	12.6	9.2
	B	11.0	18.6	13.5
	C	4.1	6.9	5.0

## 2.2.5 고성능 감수제

혼화제는 폴리카본산계 고성능 감수제로 그 물리·화학적 성질은 Table 11과 같다.

## 2.3 실험 계획

이 연구의 실험 계획은 Table 12와 같다. PCM에 함침된 경량골재 콘크리트의 물리적 특성 및 열전도율을 평가하기 위하여 공극구조가 각기 다른 3종의 경량골재를 함침 전후로 나누어 배합하였으며 경량골재의 상태에 따른 특성 평가를 위하여 모르타르 부분의 배합비는 동일하게 적용하였으며 배합계획은 Table 13과 같다.

Table 10 Physical properties of fine aggregate

Class	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Density of SSD (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption ratio (%)	Fineness modulus
Fine aggregate	1576	2.61	1.03	2.57

Table 11 Physical and chemical characteristic of chemical admixture

Section	Main component	Ikon	Color	Density (g/cm <sup>3</sup> )	pH
Superplasticize	Polycarboxy late type	Liquid	Dark brown	1.07	6.5 ~ 7.5

Table 12 Design of experiment

Factor of experiment	Number of experiment	
Type of agg.	7	Normal aggregate, impregnated and unimpregnated lightweight aggregate (3 types)
S/a	1	43%
W/B	1	39%

Table 13 Mix table of concrete

Type	Weight (kg/m <sup>3</sup> )				
	Cement	Fly ash	Water	Fine agg.	Course agg.
Plain	351	39	152	754	983
A	351	39	152	754	484
B	351	39	152	754	559
C	351	39	152	754	552
A (PCM)	351	39	152	754	477
B (PCM)	351	39	152	754	532
C (PCM)	351	39	152	754	533

## 2.4 실험 방법

### 2.4.1 경량골재 콘크리트의 물리적 특성 분석

이 실험의 시험 항목은 굳지않은 콘크리트의 슬럼프, 공기량 등을 평가하였으며, 굳은 콘크리트의 압축강도, 기건단위용적질량 시험을 KS시험기준에 적합한 시험방법에 따라 실시하여 비교 분석하였다. 시험체 제작을 위한 골재 상태는 PCM 미함침 경량골재의 경우 절건 후 24시간동안 침수하여 표면 건조 상태에서 시험을 하였으며 PCM 함침 경량골재는 침수하지 않은 자연상태에서 시험을 실시하였다.

### 2.4.2 경량골재 콘크리트의 열전도율 특성 분석

경량골재 콘크리트의 열전도율을 평가하기 위하여 Fig. 4의 표면 접촉식 열전도율 장비를 사용하였으며 장비의 열전도율 측정 범위는 0.05~2.0 W/mK이다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 슬럼프

보통골재와 공극구조가 각기 다른 3종의 경량골재를 함침 여부로 구분하여 배합하여 실험한 골재의 종류에 따른 경량골재 콘크리트의 슬럼프는 Fig. 5와 같다.

기준 배합인 보통골재를 사용한 콘크리트는 205 mm의 슬럼프를 나타내었으며 A골재는 250 mm, B, C골재는 각



Fig. 4 Thermal properties analyzer (Quickline-30)

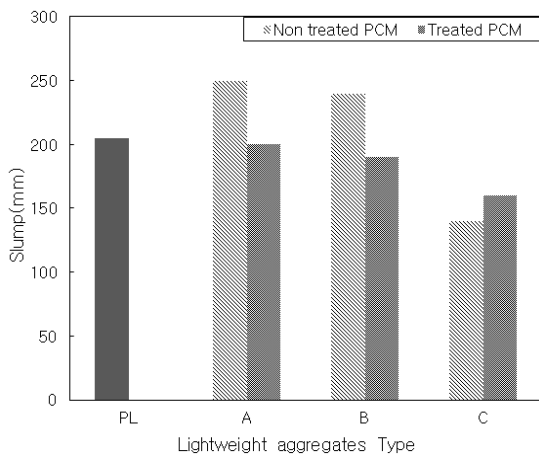


Fig. 5 Slump at fresh concrete

각 240, 140 mm의 슬럼프 값을 나타내었다. 경량골재의 경우 다공극을 갖는 형태로 24시간 침수 후에 상압 조건에 두면 흡수된 수분이 방출되기도 한다.<sup>11)</sup> 이 실험에서도 24시간 침수 후 사용된 미함침 A, B골재의 경우 골재 내에 흡수된 수분이 배합 과정에서 일부 방출되면서 슬럼프가 증가한 것으로 판단된다. 다만 미함침 C골재는 절건 후 침수에서 다른 경량골재에 비해 24시간 이후 흡수율이 상대적으로 높아 이로인해 배합과정에서 경량골재 내부로 수분이 흡수되는 것에 기인하여 슬럼프 저하가 발생한 것으로 판단된다.

PCM 함침 및 에폭시로 표면 코팅한 A, B, C 골재는 각각 200, 190, 160 mm로 측정되었다. A, B골재는 plain 배합인 보통골재를 사용한 콘크리트와 동등하거나 미소하게 낮은 것으로 나타났다. 이는 경량골재 코팅에 따라 흡수율이 저감되어 배합 후 자유수의 흡수 및 방출이 없는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 단 C골재의 경우 plain배합보다 약 22% 낮은 슬럼프를 보였으며, 이는 A, B골재와는 달리 쉘석형의 입형을 가진 C골재가 페이스트와 마찰력이 커져 나타난 것으로 판단된다.

### 3.2 단위용적질량

#### 3.2.1 굳지 않은 콘크리트의 단위용적질량

경량골재의 함침 전후 및 종류에 따른 경량골재 콘크리트의 굳지 않은 콘크리트의 단위용적질량은 Fig. 6과 같다. 보통골재를 사용한 plain배합은 2388 kg/m<sup>3</sup>의 단위용적 질량을 나타냈으며 함침하지 않은 경량골재 A, B, C는 각각 1907, 1992, 1956 kg/m<sup>3</sup>로 측정되었다. 함침된 경량골재는 함침하지 않은 경량골재보다 모두 다소 낮은 1830, 1877, 1907 kg/m<sup>3</sup>로 측정되어 4.0, 5.7, 2.5%의 단위질량감소가 나타났다.

이는 PCM 함침 후 에폭시수지로 표면이 코팅되어 경량골재 내부로의 수분 흡수가 차단된 결과로 판단되어 PCM누출을 막기 위한 표면 코팅은 경량골재의 단점인

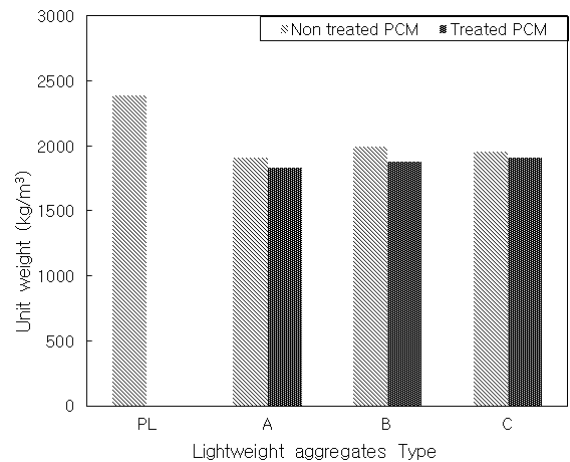


Fig. 6 Unit weight at fresh concrete

높은 흡수율을 저감할 수 있는 방안으로도 활용이 기대된다.

### 3.2.2 굳은 콘크리트의 단위용적질량

경량골재의 함침 전후 및 종류에 따른 경량골재 콘크리트의 굳은 콘크리트의 단위용적질량은 Fig. 7과 같다. 보통골재를 사용한 plain배합은 2358 kg/m<sup>3</sup>의 단위용적질량을 나타냈으며 함침하지 않은 경량골재 A, B, C는 각각 1869, 1957, 1913 kg/m<sup>3</sup>로 측정되었다. 함침된 경량골재는 함침하지 않은 경량골재보다 모두 다소 낮은 1781, 1860, 1872 kg/m<sup>3</sup>로 측정되었다.

굳은 콘크리트의 단위질량의 경우 굳지 않은 콘크리트의 단위질량과 비슷한 경향으로 낮으며 평균 1.9%의 단위질량 감소가 나타났다.

### 3.3 압축강도

경량골재를 함침 전후로 나누어 배합하여 시험한 경량골재 콘크리트의 압축강도는 Fig. 8과 같다. 보통골재를 사용한 plain배합에서는 3, 7, 28일에서 각각 24, 33, 47 N/mm<sup>2</sup>의 압축강도를 나타내었다. PCM에 함침되지 않은

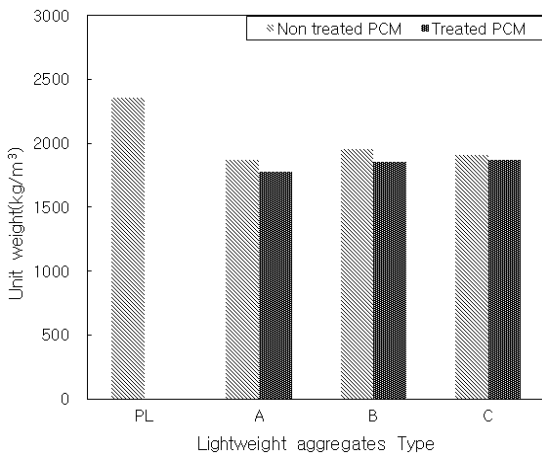


Fig. 7 Unit weight at hardened concrete

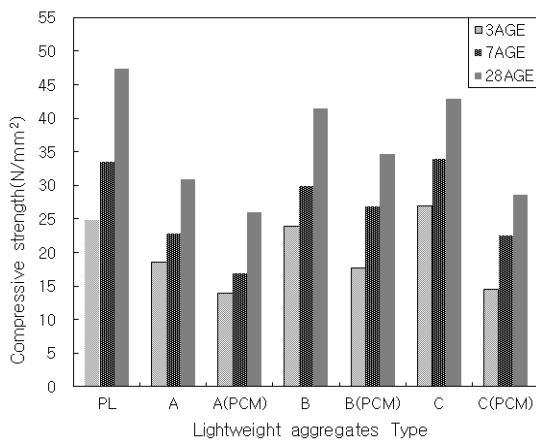


Fig. 8 Compressive strength at different ages

경량골재 A의 경우 18, 22, 30 N/mm<sup>2</sup>를 나타내어 시험한 3개의 경량골재 중 가장 낮은 강도로 나타났다. B경량골재는 23, 29, 41 N/mm<sup>2</sup>의 강도를 나타냈으며, C골재는 26, 33, 42 N/mm<sup>2</sup>의 강도를 나타내어 경량골재 중 가장 높은 강도를 나타내었다. 이는 경량골재의 밀도, 공극률 및 파쇄강도에 기인하여 나타난 것으로 판단되며 특히 C골재의 경우 1시간 살수 후 배합함에 따라 배합 후 자유수 흡수에 따라 W/B가 낮아져 강도 발현이 높았던 것으로 판단된다.<sup>10)</sup>

PCM 함침 및 에폭시 코팅한 A골재의 경우 3, 7, 28일 압축강도 측정 결과 각각 13, 16, 30 N/mm<sup>2</sup>의 값으로 나타났으며, B경량골재는 17, 26, 34 N/mm<sup>2</sup>, C골재는 14, 22, 28 N/mm<sup>2</sup>의 값을 나타내어 모든 경량골재에서 PCM 함침 및 에폭시 코팅 이후 강도가 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 경량골재에 표면 공극에 침투된 PCM이 상변화 시 누출 되는 것을 방지하기 위하여 에폭시 코팅을 한 것에 기인한 결과로 코팅에 따른 경량골재의 표면이 매끄러운 상태로 경화콘크리트 매트릭스와의 부착강도를 저하시켜 압축강도가 낮아지는 것으로 판단된다.

함침 및 코팅 전 경량골재 콘크리트의 강도는 C>B>A 순으로 나타났으나 함침 이후의 강도는 B>C>A 순으로 C골재와 B골재의 강도 순서가 바뀌는 것으로 나타났다. 이는 경량골재의 표면형상이 A, B골재에 비해 매끄럽고 요철이 적은 것에 기인한 것으로 판단된다.

### 3.4 열전도율

Fig. 9는 PCM 함침 전후의 경량골재를 사용한 경량골재 콘크리트의 열전도율 결과를 나타낸 그림이다. 공기의 열전도율이 보통 재료 중에 가장 낮기 때문에 공극을 많이 함유한 재료는 낮은 열전도율을 나타내는 것이 일반적이다. 이 실험에서도 다공극의 경량골재를 사용한 결과 함침하지 않은 경량골재를 사용한 경량골재 콘크리트의 열전도율은 A, B, C골재 각각 1.36, 1.37, 1.39 W/mK의 값을 나타내어 plain배합의 2.03 W/mK보다 약 33%의

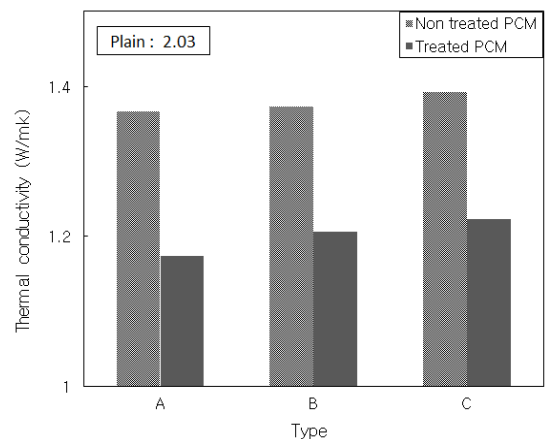


Fig. 9 Thermal conductivity of hardened concrete

단열성능 향상이 있는 것으로 나타났다.

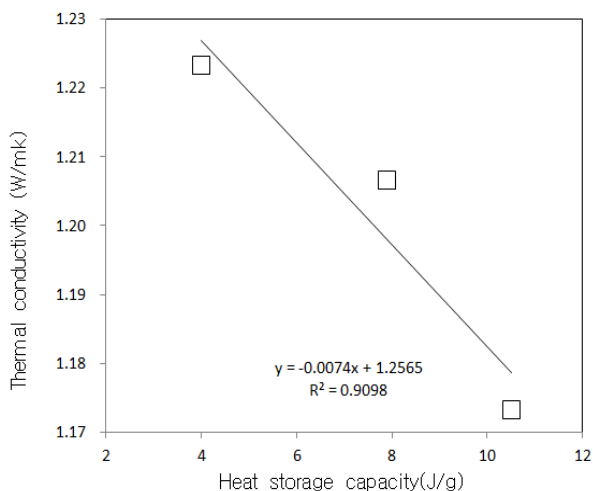
함침된 A골재의 경우 비함침 골재의 열전도율은 1.37 W/mK에 비해 14.1% 낮은 1.21 W/mK로 측정되었으며, B골재는 12.1% 낮은 1.22 W/mK, C골재는 비함침 대비 12.2% 낮은 1.22 W/mK로 측정되어 모든 골재에서 함침 후 열전도율 성능향상을 보였다. 또한 함침된 골재의 경우 plain 배합에 비해 A, B, C 경량골재는 각각 43%, 41%, 40%의 단열성능 향상을 나타내었다. 함침 후 열전도율이 낮게 측정되는 것은 함침된 PCM의 열저장용량에 값에 기인하는 것으로 판단된다. 열저장용량이 가장 큰 A골재가 14%의 열전도율 감소를 나타냈으며 B, C 골재는 12%의 감소율을 나타내었다.

Table 14는 경량골재의 함침 유무에 따른 경량골재 콘크리트의 초음파 속도와 속도이다. 미함침 경량골재의 초음파속도는 3.98, 3.98, 4.29 km/s로 나타내어 측정된 열전도율 1.36, 1.37, 1.39 W/mK로 비례하는 것으로 나타났다. 또한 PCM 함침 경량골재는 3.90, 3.91, 4.12 km/s로 미함침 경량골재에 비해 2~4%정도 낮은 것으로 나타났다. 이는 PCM 함침 및 에폭시 코팅에 따라 콘크리트 배합 및 양생과정에서 경량골재 내부공극으로의 수분 이동이 발생하지 않고 내부공극이 유지되는 것에 기인하는 것으로 판단된다.

PCM 함침 이후 경량골재의 열저장용량과 열전도율을 비교한 결과는 Fig. 10과 같으며, 경량골재의 열저장용량이 증가함에 따라 열전도율이 감소하여 단열성능 향상에 효과가 있는 것으로 판단된다.

**Table 14** Pulse velocity of hardened concrete

TYPE	A	B	C
Non treated PCM	3980 (m/s)	3980 (m/s)	4290 (m/s)
Treated PCM	3900 (m/s)	3910 (m/s)	4120 (m/s)



**Fig. 10** Thermal conductivity by heat storage capacity of lightweight aggregate concrete

## 4. 결 론

이 연구는 에너지 저감을 위한 단열콘크리트 개발의 기초자료로써 다공성의 경량골재를 상변화물질에 함침 및 에폭시 코팅처리를 한 후 경량골재 콘크리트로 배합하여 특성을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PCM 함침 및 에폭시 코팅을 실시한 경량골재 콘크리트는 미함침 경량골재에 비하여 plain배합인 보통골재 콘크리트의 슬럼프와 비슷한 경향을 나타냈으며 이는 경량골재 표면 처리에 따라 흡수율이 저감되어 배합 후 자유수의 흡수 및 방출이 없는 것에 기인하는 것으로 판단된다.
- 2) PCM 함침 및 에폭시 코팅을 실시한 경량골재 콘크리트의 단위용적질량이 plain 및 미함침 경량골재 콘크리트에 비해 가장 낮은 것으로 나타났다. 이는 경량골재의 낮은 흡수율 및 흡수 상태에 기인하는 것으로 판단되며 슬럼프와 단위용적질량의 평가를 통해 PCM 함침 및 에폭시 코팅이 경량골재의 단점인 높은 흡수율을 저감하여 작업성 및 품질관리에 유리할 것으로 판단된다.
- 3) 모든 경량골재에서 PCM 함침 및 에폭시 코팅을 실시 후 콘크리트의 강도가 저하되는 것으로 나타났다. 이는 경량골재의 내부공극에 함침된 PCM이 온도변화에 따라 액체 상태에서 누출 되는 것을 방지하기 위하여 실시한 에폭시 코팅이 경량골재의 표면을 매끄러운 상태로 하며 이에 따라 굳은 콘크리트에서 골재와 매트릭스간의 부착강도의 약화를 가져와 최종 압축강도의 저하를 초래하는 것으로 판단된다.
- 4) 미함침 경량골재를 사용한 경량골재 콘크리트의 열전도율은 plain배합보다 약 33%의 단열성능 향상을 보였으며 PCM 함침 경량골재의 경우 plain배합 및 미함침 경량골재 콘크리트에 비해 40~43%, 12~14%의 단열성능 향상이 있는 것으로 나타나 경량골재의 사용을 통해 얻은 단열성능이 PCM의 적용을 통해 더욱 향상되는 것을 알 수 있었다.

이상과 같이 이 연구에서는 상변화물질의 함침을 통해 경량골재 콘크리트의 열전도율 저감 및 경량골재 콘크리트의 품질 향상의 가능성을 확인하였다. 그러나 에폭시 코팅에 따른 콘크리트의 강도저하가 발생하는 것도 알 수 있었다. 향후 강도 저하 방지를 위한 방안 및 내구성 등 구조재료 특성에 대한 추가 연구가 진행된다면 이 연구의 최종 목표인 에너지 저감을 위한 단열콘크리트의 실용화가 가능할 것이라 기대된다.

## 감사의 글

이 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지

원(11-기술혁신F04)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. National Research Group on Greenhouse Gas, Development Program of the Greenhouse Gas Reduction Technologies to Address the Convention on Climate Change, Korea Institute of Energy Research, 2003, pp. 1-5.
2. Seo, C. H., "On Study the Properties of Experimental to Lightweight Concrete," Ph. D. Dissertation, Hanyang University, Seoul, 1985, pp. 19-20.
3. Mindess, S., Young, J., and Darwin, D., *Concrete*, 2nd Edition, Upper Saddle River, Prentice Hall, 2003, pp. 461-464.
4. Newman, J. and Choo, B. S.(eds), *Advanced Concrete Technology; Processes*, Oxford, Elsevier Butterworth Heinemann, 2003, 2/24 pp.
5. Seo, C. H., "On Study the Properties of Experimental to Lightweight Concrete," Ph. D. Dissertation, Hanyang University, Seoul, 1985, pp. 19-20.
6. Expanded Shale, Clay and Slate Institute, *Pumping Structural Lightweight Concrete*, 1996, Salt Lake City, 4 pp.
7. ACI Committee 213, *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete (ACI 213R-03)*, American Concrete Institute, Detroit, 2003.
8. Korea Institute of Science and Technology, *International Cooperation Activities on IEA/ECES IA (International Energy Agency/Energy Conservation through Energy Storage Implementing Agreements)*, Daejeon, 2008, pp. 1-4.
9. *ECES Annex 17, Advanced Thermal Energy Storage through Phase Change Materials and Chemical Reactions-Feasibility Studies and Demonstration Projects Final Report*, 2010, pp. 22-23.
10. Kim, S. H., Jeon, H. K., and Hwang, I. D., "A Study on the Properties of Lightweight Aggregate Impregnated with Phase Change Material," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 29, No. 2, 2013, pp. 39-46.
11. Kwan, D. S., "A Study on the Physical characteristics of Lightweight Aggregate Concrete applied Pressure by Containing Moisture Condition in Lightweight Aggregates," Master's thesis, Konkuk University, Seoul, 2012, pp. 77-78.

---

**요 약** 최근 국가적 차원의 녹색성장이라는 패러다임 아래 건설분야에서도 자원과 에너지 절감을 위한 다양한 노력이 시도되고 있다. 이러한 방안의 하나로 단열성능이 향상된 콘크리트의 개발을 목적으로 높은 열저장 용량의 장점이 있는 PCM(phase change material)을 다공성의 경량골재에 함침 및 코팅 처리하여 경량골재 콘크리트를 개발하였으며 이를 평가하였다. 그 결과 흡수율이 높은 경량골재는 PCM 함침 및 코팅에 의해 흡수율이 저하되어 높은 흡수율에 따른 경량골재 콘크리트의 품질 저하를 방지하는 효과가 있음을 확인하였다. 또한 함침하지 않은 경량골재를 사용한 경량골재 콘크리트의 열전도율은 보통골재 콘크리트보다 약 33%의 단열성능 향상을 보였으며 함침된 골재의 경우 보통골재 콘크리트에 비해 40~43%의 단열성능 향상이 있는 것을 확인하였다. 또한 함침된 골재의 경우 비함침 골재에 비해 열전도율이 12~14% 정도 낮아지는 것을 확인 할 수 있었다.

**핵심용어** : 경량골재, 경량골재 콘크리트, 상변화물질, 열전도율