

## 저온 PCM 혼입을 위한 경량기포콘크리트의 배합설계 및 기계적 특성

बाटया बासंकु<sup>2</sup>, 임명관<sup>1\*</sup>, 임희섭<sup>3</sup>, 최동욱<sup>4</sup>

## Mix Design and Mechanical Properties of Aerated Concrete for Incorporation of Low Temperature PCM

Batzaya Baasankhuu<sup>2</sup>, Myung-Kwan Lim<sup>1\*</sup>, Hee-Seob Lim<sup>3</sup>, Dong-Uk Choi<sup>4</sup>

**Abstract:** This research was performed to investigate the mechanical performance of lightweight concrete including phase changing material(Low temperature PCM). Micro capsulised PCM consisted of wax type core and melamine based wall. Also, for PCM of one single kind, paraffin wax was inserted into Vermiculite and the surface was coated with melamine resin. Interfacial polymerization is based on the principle that macromolecule reaction takes place on the surfaces between 1-dodecanol(core material) and water (solvent) to form the wall material. Lightweight concrete has compressive strength of 10 MPa, tensile strength of 1.5 MPa, and oven dried density of 1.0kg/liter which included 10%, 20%, or 30% PCM by weight. To do so, this study fabricated light-weight foamed concrete (1.0 kg/m<sup>3</sup>) in pre-foaming method and mixed it with PCM micro capsule of 1-dodecanol and melamine to examine its physical properties.

**Keywords:** Aerated concrete, Phase changing material, Compressive strength, Flexural strength

### 1. 서 론

현대사회는 고도의 경제성장과 급속한 사회발전으로 도시가 대형화·고층화·고밀화 되면서 도시의 기능을 유지하기 위한 물류의 중요성이 부각되어지고 있다.

경제성장과 소비자의 생활 수준 향상으로 다양한 식품소비와 함께 품질 좋고 신선한 식품을 찾는 소비 형태로 많은 수입 농축수산물도 국내에 반입되고 있으며, 국제 무역 협정으로 시장개방이 가속화되어짐에 따라 항만 물류창고 및 농수산물 냉동 창고의 형태가 다양해지고 그 중요성 또한 커지고 있다.

또한 보관물품이 다양화되고 변화됨에 따라 이러한 물류창고 및 냉동 창고의 대형화, 다양화, 집중화는 재난발생의 위험성을 증가시켰고, 창고시설 중에서도 냉동 창고의 경우 비교적 고 위험성을 가지고 있음에도 불구하고 영하의 온도에서 착화현상이 일어나기 어렵다는 구시대적인 생각으로 인하여

대형 인명피해와 재산피해로 이어졌다.

물류창고 등은 대부분 샌드위치 패널을 사용하며, 저온유지와 보·냉 효과를 높이기 위해 가연성 우레탄폼 등의 단열재를 사용하고 있다. 하지만 이와 같은 재료들은 높은 화재 확산의 위험으로 화재가 발생하면 짧은 시간에 열과 유독성 가스 등에 의하여 화재 확산을 가속화 시켜 인명과 재산피해를 키우는 주원인이 되었으며, 항만물류창고 등의 경우, 해안가에 근접되어 비래염분 등 염소이온에 따른 부식 등에 대한 문제가 제기되고 있는 실정이다.

우리나라의 녹색건축정책은 2020년까지 그린 홈 200만 가구 공급을 우선 목표로 하고, 2025년부터 제로에너지 건축물을 지향하고 있다. 건물의 계획, 시공, 사용 및 유지관리, 해체 및 재활용에 이르는 건물의 생애주기에 대한 전과정(life cycle) 개념을 도입한 녹색건축물을 지향하고 있다. 이러한 개념은 이미 건축공사에 반영되어 2013 건축공사표준시방서 총칙은 “환경관리 및 친환경 시공”이라는 ISO 14000 시리즈 환경경영 개념에 입각한 “환경관리 및 친환경 시공 계획서”를 요구하고 있다.

이 연구는 이러한 흐름에 따라서 기존 유기계 패널의 대체 제품 개발을 목표로 내화성 및 염해 부식 등에 내구성이 강하며, 이를 포함하여 건축물의 열교환이 가장 중요하게 이루어지는 외벽 시스템 개발을 포함한 “열제어 기능을 갖는 차세대 경량콘크리트 벽체 개발”을 위한 기초 연구이다. 개발되어진

<sup>1</sup>정회원, 송원대학교 건축공학과 조교수, 교신저자

<sup>2</sup>학생회원, 환경대학교 건축공학 대학원 석사과정

<sup>3</sup>정회원, 한양대학교 건축시스템공학과 박사과정

<sup>4</sup>정회원, 환경대학교 건축학부 교수

\*Corresponding author: limmk79@naver.com

Dept. of Architectural Engineering, Sonwon University, Gwangju 61756, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

저온 상변화 물질(PCM: Phase Changing Material)을 적용하기 위해 경량기포 콘크리트 모체의 배합설계 및 기계적 특성을 검토하였다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 PCM(Phase Changing Material : 이하 PCM)

본 연구에서는 파라핀 왁스를 수용액에서 에멀전화 한 후 벽재물질인 멜라민 수지를 투입하여 왁스의 계면에서 계면중합이 일어나도록 하여 마이크로캡슐 반응을 행하였다. 계면중합은 Fig. 1에 나타난 모식도와 같이 심물질인 파라핀 왁스와 용매인 물 간의 계면에서 고분자반응이 일어나서 벽재가 형성되는 원리이다.

제조 반응장치는 Fig. 2 와 같다. 반응은 제조장치인 자켓형 특수 반응장치 내부에 정량의 물과 파라핀 왁스를 온도를 70°C로 유지한 후 SDS를 정량 투입한 후 호모믹서에 의하여 격렬한 교반을 통하여 파라핀 에멀전을 생성하였다.

벽재 형성을 위한 계면중합은 2.3에서 보인 미리 제조된 전중합 용액과 아세트산을 정량 투입하여 100분간 350 rpm의 속도로 교반한 후에 실온으로 냉각 후 건조하여 최종 제품을 얻었다.

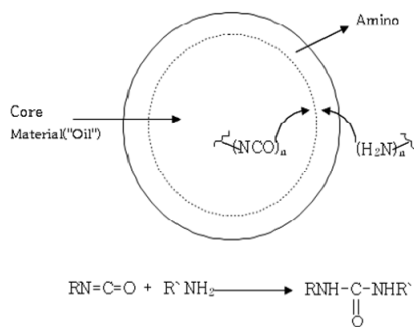


Fig. 1 Principle of the interfacial polymerization in micro-capsulation

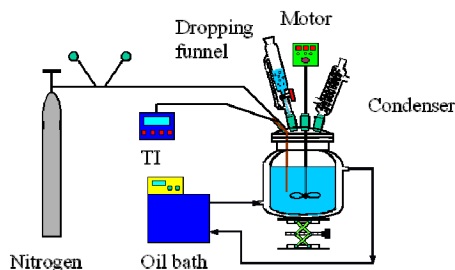


Fig. 2 Schematic diagram of the reaction apparatus for micro-capsulation.

Table 1 Physical properties of foaming agent

Color	Viscosity (CPS)	pH	sulphate (%)	freezing point(°C)	Specific gravity	
Brown	20~50	7	0.01~0.1	-18	1.2~1.26	
(Unit: %)						
Water	Protein	NaCl	NH <sub>4</sub> Cl	CaCl	MgCl	FeSO <sub>4</sub>
36	32	10	1	6	5	10

#### 2.1.2 기포제

이 연구에 사용한 기포제는 독립 기포형 기포제로서 그 화학조성 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

#### 2.1.3 시멘트 및 결합제

기포콘크리트의 페이스트 부분의 영향을 평가하기 위한 실험변수로서, 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 응결축진을 위해 칼슘알루미네이트계(ACC(blended mixture of calcium aluminate)) 급결제를 사용하였다.

Table 2 Chemical composition and physical properties of cement

Chemical composition	Chemical composition	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Lg. loss
	Content (%)	21.95	6.59	2.81	60.12	3.32	2.11	2.58
Physical properties	Specific surface area(cm <sup>2</sup> /g)	Weight	Setting time		Compressive Strength(kg/cm <sup>2</sup> )			
			Start	End-ing	3 days	7 days	28 days	
	3.112	3.14	4 hours	6 hours	198	272	389	

Table 3 Test variables for environmental effect evaluation

Test variables	Contents	Remarks
Cement	OPC(ordinary cement)	-
Viscosity agent(V.A.)	MC(methyl cellulous)	Solid = 47% pH = 4.6

Table 4 Chemical composition and physical properties of fly-ash

Chemical composition					Physical Properties		
Chemical composition	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Weight	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Grain size
Content (%)	92.5	1.68	2.51	0.56	2.21	263000	1.36

### 2.1.4 배합

기포콘크리트의 배합은 총 3개의 Part로 진행을 하였다. 1차 배합에서는 단위 시멘트량 및 물·결합재 비를 고정시켜 실시를 하였으며, 기포량은 단위용적에 대하여 시멘트 페이스트의 용적을 제외한 용적만큼 투입되도록 조정하였다. Fly-ash 혼입에 따른 강도성상을 파악하기 위하여 Fly-ash 20%치환 배합과 0% 배합 수준을 두어 비교 검토를 진행하였다. 또한 경시변화에 따른 체적변화에 대한 대응으로 급결제를 첨가하여 검토를 실시하였다.

2차 배합에서는 1차 배합에서 물성을 검토하여 도출되어진 1개의 배합을 기준으로 급결제의 치환율을 변화시켜 실험을 실시하였다. 급결제에 따른 변화를 확인하기 위해 단위결합재와 기포제 용적을 고정하였으며, 기포제에 혼입되는 기포제 혼입량을 변화시켜 배합을 실시하였다.

### 2.1.5 실험방법

이 연구는 경량기포콘크리트 패널개발을 위한 기초적인 연구로서 KS F 4736 압출성형 경량콘크리트 패널 기준에 부합

하기 위해 각 배합에 따른 기포콘크리트의 기본적인 물성을 확인하였다. 각 실험 방법은 KS기준 및 ASTM기준에 의거하여 실험을 실시하였다. 배합 방법을 Fig. 3에 나타내었다.

- 1) 물리적 특성
  - 겉보기 비중 실험(KS F 2459)
  - 플로우 테스트(ASTM C 1437 for Flow Table, KS F 4039 for Free Flow Test)

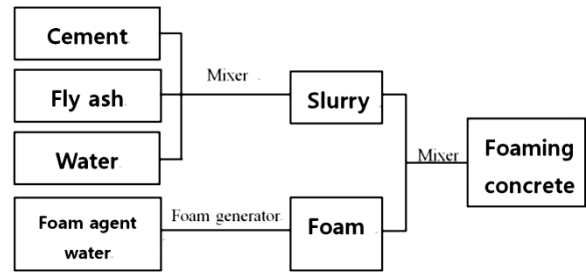


Fig. 3 Development of blended foaming concrete

Table 5 Mix proportion of preliminary test(part 1)

Test	C (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	Weight(Kg/m <sup>3</sup> )										
				1 m <sup>3</sup>		20 L					Foaming agent			
				C.P	Foam	C(kg)	F.A.(kg)	W(kg)	V.A.(kg)	Foam(L)	(%)	(kg)	W(kg)	
#1						7	3		0			3	0.24	7.76
#2						7	3		0			4	0.32	7.68
#3						7	3		0			5	0.40	7.60
#4	500	50	250	409.24	590.76	10	0	5	0	23.63		5	0.40	7.60
#5						7	3		5+0.1ad			5	0.40	7.60
#6						10	0		5+0.1ad			5	0.40	7.60

Table 6 Mix proportion of test(part 2)

Test	C (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	Weight(Kg/m <sup>3</sup> )											
				1 m <sup>3</sup>		20 L					Foaming agent			PCM (kg)	
				C.P	Foam	C(kg)	F.A.(kg)	W(kg)	V.A.(kg)	Foam(L)	(%)	(kg)	W(kg)		
#1														7.76	0.00
#2														7.68	1.00
#3														7.60	2.00
#4														7.60	3.00
#5	500	50	250	409.24	590.76	7	3	5	5+0.1ad	23.63	5	0.40		7.60	0.00
#6									5+0.3ad					7.60	1.00
#7									5+0.3ad					7.60	2.00
#8									5+0.3ad					7.60	3.00

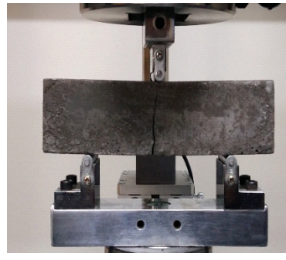
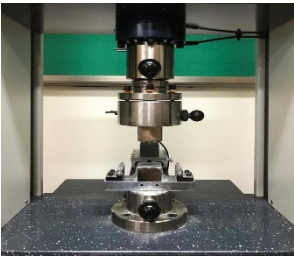


Fig. 4 Compressive test

Fig. 5 Beam sample in flexural test

## 2) 기계적 특성

압축강도와 휨강도 측정을 위해 500 kN 용량의 UTM(Universal Testing Machine)를 사용했으며, 압축강도의 경우 50×50×50 mm 입방체를 사용(압축강도 실험(ASTM C 39))했으며, 휨강도의 경우 40×40×160 mm의 시험체(휨강도 실험(ASTM C 293))를 제작하여 3개 시험체의 평균 값을 적용하였다.

$$f_r = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

여기서  $f_r$ 는 휨강도,  $P$ 는 적용하중,  $L$ 은 자간거리(100 mm),  $b$ 는 보의 폭,  $d$ 는 보의 높이이다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 Part 1 실험결과 및 고찰

#### 3.1.1 압축강도 결과

이 실험은 혼합기포 방식(Mixed-foaming type)에서 내부 젤라틴 성분의 양을 변경시켜 플라이애시의 미연탄소분이 유기체 기포의 흡착을 방지하도록 조정하였으며, 변경되어진 기포의 희석비 조정을 통해 기포제의 희석비를 3.0%에서 5%까지의 범위내로 조정하여 실험을 진행하였다.

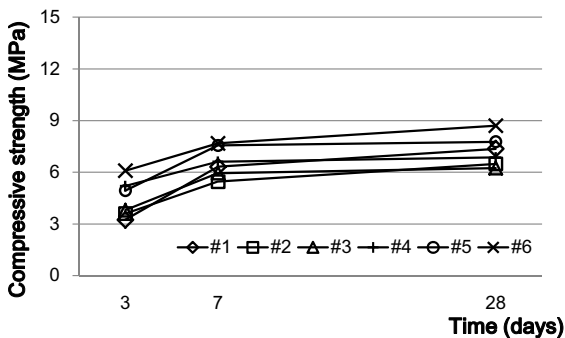


Fig. 6 Compressive strength test result(part 1)

재령 7일에서의 압축강도와 28일에서의 압축강도 및 휨강도를 측정된 결과를 Fig. 6에 나타낸다.

압축강도 실험결과 기포제 희석비가 증가할수록 7일에서의 압축강도가 증가되는 경향을 나타냈으며, 28일 압축강도는 희석비 5%가 가장 높은 것으로 확인되었다. 3~4%까지의 희석비를 적용한 결과에서는 재령 28일 강도에서는 큰 차이를 나타내지 않았다.

또한 급결제를 혼입한 경우, 같은 5%의 희석비율에서 Fly-ash가 치환되지 않은 시험체가 급결제의 영향을 크게 받아 강도가 크게 증가되는 경향을 나타냈다. 같은 5% 희석비율에서도 Fly-ash가 치환되지 않은 경우에서 강도가 더욱 높게 발현 되는 것이 확인 되었다. 하지만 28일 재령에서 Fly-ash가 치환되지 않은 시험체와 급결제가 추가되어진 Fly-ash 20% 치환 배합에서의 압축강도 차이는 1 MPa 이하로 큰 차이를 나타내지 않았다.

이 결과는 Fly-ash 상의 미연탄소분이 기포콘크리트 내부의 기포를 흡착하여 사이즈가 큰 공극을 만들어 강도가 저하되는 것으로 판단되며, 기포제의 경우 미연탄소분에 대한 저항성이 향상되도록 조정하였지만, 미연탄소분이 없는 일반보통포틀랜드 시멘트를 사용했을 경우와 비교하는 경우, 강도 차이가 생기는 것으로 판단된다. 하지만 급결제를 소량 사용하는 경우 압축강도의 차이를 감소시키는 것이 가능한 것으로 사료된다.

#### 3.1.2 휨강도 결과

Fig. 7에 나타난 것과 같이 휨강도의 경우, 모든 시험체에서 재령 7일에 KS F 4736 압출성형 경량기포콘크리트 기준에서 제시하는 1.5 MPa를 모두 상회하는 결과를 나타내었으며, 재령 28일에서는 모든 시험체가 2 MPa를 상회하는 결과를 나타내었다. 휨강도의 경우에서도 압축강도와 유사하게 Fly-ash가 치환되지 않은 시험체에서 휨강도가 다소 증가하는 결과

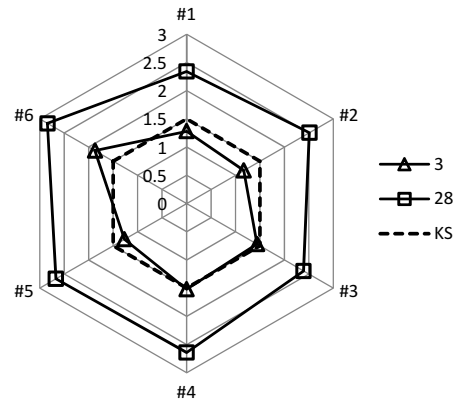


Fig. 7 Flexural strength test result(part 1)

를 나타냈으며 이 또한 Fly-ash의 미연탄소가 영향을 미친 것으로 판단된다.

### 3.2 Part 2 실험결과 및 고찰

#### 3.2.1 압축강도 결과

Part 1에서의 실험결과에서 급결제를 치환하는 경우 일반 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 배합과 가장 유사한 강도결과를 나타내었다. 이를 2단계 배합에 적용하여 급결제의 치환율을 증가시켜 배합을 설계했으며, 그 양을 점차 증가시켜 실험을 실시하였다. 또한 PCM을 10~30% 범위에서 시멘트 질량에 따른 비율로 조정하여 실험을 실시하였다.

압축강도의 경우 기포제의 희석비는 5%로 고정하였으며, 급결제를 0.1%와 0.3%로 구분하여 배합을 실시하였다. 또한 각 배합에 PCM을 0%, 10%, 20%, 30%로 추가하여 배합을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 8에 나타낸다.

PCM을 추가하지 않고 급결제만을 사용한 경우 0.1% 사용에서 0.3%보다 높은 강도성상을 나타내어 0.1%의 사용량이 가장 적절한 것으로 판단된다.

PCM을 추가하는 경우 급결제 0.1% 시험체에서는 PCM 0%와 10%의 차이는 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. 하지만 PCM이 20% 이상으로 추가되는 경우 강도가 감소되는 것으로 확인 되었다. 또한 급결제 0.3%에서는 PCM이 추가될 수록 강도가 감소하는 결과를 나타내었다. 이는 PCM이 기포콘크리트에 잔골재와 같이 적용이 되어 천이대영역이 형성되고 하중을 받는 경우 PCM 계면에서 균열이 시작되어 파괴가 되므로 인해 강도가 감소되는 것으로 판단된다. 또한 PCM이 배합 시 분산성이 감소되어 뭉침 현상이 발생되어 치환율이 증가됨에 따라 강도 감소 폭이 커지는 것으로 판단된다.

하지만 재령 28일 이후의 장기 강도의 경우, Fly-Ash의 수화반응으로 인해 강도가 증가되면서 급결제 0.1%혼입된 PCM 10% 배합은 PCM 0%의 강도를 다소 상회하는 결과를 나타냈으며, KS F 4736에서 기준하는 10 MPa를 상회하는 결

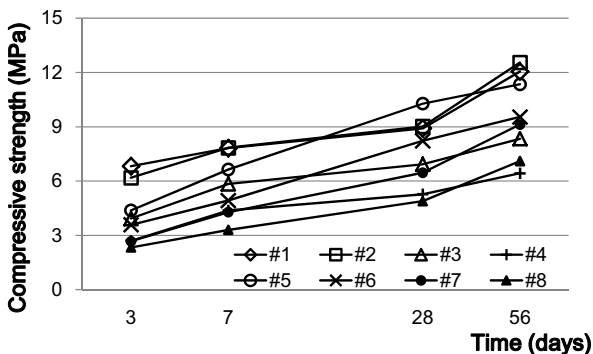


Fig. 8 Compressive strength test result(part 2)

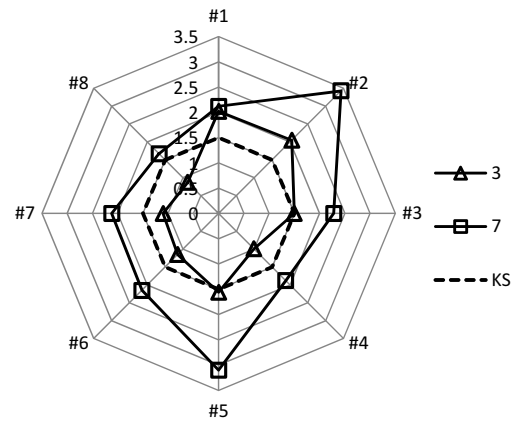


Fig. 9 Flexural strength test result(part 2)

과를 나타내어 최적 배합으로 사용이 가능한 것으로 판단된다.

#### 3.2.2 휨강도 결과

Fig. 9에 나타낸 것과 같이 휨강도의 경우, Part 1의 결과와 같이 대부분의 시험체에서 재령 7일에 KS F 4736 압출성형 경량기포콘크리트 기준에서 제시하는 1.5 MPa를 모두 상회하는 결과를 나타내었으나 PCM 치환율이 30%의 경우에 강도에 미치지 못하는 결과를 나타내었다. 하지만, 재령 28일에서는 모든 시험체가 기준인 1.5 MPa를 상회하는 결과를 나타내었다.

압축강도의 결과와 유사하게 급결제 0.1%의 배합에서는 PCM 0%와 10% 추가에 따른 강도 차이는 크지 않은 것으로 나타났으며, 오히려 PCM이 치환된 경우 강도가 다소 증가된 결과를 나타내었다. 또한 Part 1의 시험결과와 큰 차이를 나타내지 않았다. 급결제 0.3%의 배합에서는 압축강도와 유사한 강도발현 성향을 나타내었다. 이는 PCM이 치환되는 경우 천이대 영역이 생겨 압축에 대한 강도가 감소되나 PCM의 심재를 멜라민으로 코팅하면서 생긴 표면은 마찰계수의 증가에 따라 적정 범위 내에서의 휨강도에는 강도 감소에 미치는 영향이 다소 감소되는 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 논문은 저온 PCM을 적용하기 위한 경량기포콘크리트 최적 배합을 도출하기 위한 기초적인 배합설계에 결과를 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Fly-ash가 치환되는 경우 압축강도 있어서 강도가 다소 감소되는 경향을 나타낸다. 하지만 급결제를 시멘트 질량 대비 0.1%범위로 첨가하는 경우 Fly-ash 치환에 따른 강도 감소의 보완이 가능하다.

- 2) Fly-ash가 치환되는 경우 휨강도에 있어서 강도가 다소 감소되나 그 차이는 크지 않으며, 급결제 치환에 따라 보완이 가능하며, Fly-ash의 미연탄소에 좀 더 효과적인 기포제를 적용하는 경우, 강도차의 범위를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) PCM을 적용하는 경우, 급결제 치환량과 관계없이 10% 범위 내에서는 적용이 가능하다. 급결제의 경우 0.1%의 범위가 가장 적절한 것으로 판단되며, 그 이상의 사용은 강도 저감에 영향을 크게 미친다. PCM 20% 이상의 적용에 있어서는 세심한 검토가 필요하다.
- 4) 휨강도에 있어서 PCM을 적용하는 경우 20% 사용까지는 KS F 4736에서 기준하는 강도에 문제가 없는 것으로 판단된다. 하지만 PCM 효율을 증대시키기 위하여 그 사용량을 증가시키는 경우 세심한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구의 결과로 Fly-ash 20% 치환 영역에서 급결제를 시멘트 질량대비 0.1% 혼입하여 사용하는 경우 PCM 10% 적용까지는 KS F 4736 압축성형 경량기포콘크리트 패널에서 기준하고 있는 압축강도 10 MPa, 휨강도 1.5 MPa를 모두 상회하므로 그 사용에 문제가 없을 것으로 판단되나 이후 열적특성에 따라 PCM의 사용량의 증가가 필요한 경우, 세심한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행(GRRC 환경2011-B05)되었으며 지원에 감사드립니다.

## References

- Yuan, B., Straub, C., Segers, S. Yu, Q. L., and Brouwers, H. J. H. (2017), Sodium Carbonate Activated Slag as Cement Replacement in Autoclaved Aerated Concrete, *Ceramics International*, 43(8), 6039-6047.
- Im J. K. (2004), The Climatic Change Convention Counteract for Long Term Policies and Aggrement, Korea Energy Economics Institute, 289.
- Jadvyga Kerienė, Modestas Kligys, Antanas Laukaitis, Grigory Yakovlev, Algimantas Špokauskas, Marius Aleknevičius, (2013), The Influence of Multi-walled Carbon Nanotubes Additive on Properties of Non-autoclaved and Autoclaved Aerated Concretes, *Construction and Building Materials*, 49, 527-535.
- Ghazi Wakili, K., Hugi, E., Karvonen, L., Schnewlin, P. and Winnefeld, F. (2015), Thermal Behaviour of Autoclaved Aerated Concrete Exposed to Fire, *Cement and Concrete Composites*, 62, 52-58.
- Sim, K. S. (2009), An Experimental Study on the Insulation Property and the Mechanical Property of structural Lightweight Mortar using Micro Form Agent, MA Thesis, Hanyang University.
- The Concrete Center (2006), Utilization of Thermal Mass in Non-residential Buildings, CCIP 020, UK.
- Yuanming Song, Baoling Li, En-Hua Yang, Yiquan Liu, Tian Ding, (2015), Feasibility Study on Utilization of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash as Aerating Agent for the Production of Autoclaved Aerated Concrete, *Cement and Concrete Composites*, 56, 51-58.
- Zhan Li, Li Chen, Qin Fang, Hong Hao, Yadong Zhang, Wensu Chen, Hengbo Xiang, Qi Bao, (2017), Study of Autoclaved Aerated Concrete Masonry Walls Under Vented Gas Explosions Original, *Engineering Structures*, 141, 444-460.

Received : 05/08/2017

Revised : 05/16/2017

Accepted : 05/23/2017

---

**요 지 :** 이 연구는 상변화 물질(저온 PCM)을 포함한 경량 콘크리트의 기계적 성능을 검토하기 위해 수행되었다. Micro capsulised PCM은 wax type core와 melamine based wall으로 구성되어있다. 또한, 단일 종류의 PCM의 경우, Vermiculite에 파라핀 왁스를 삽입하고 그 표면을 멜라민 수지로 코팅 하였다. 계면 중합은 1-dodecanol(핵심 물질)과 물(용매) 사이의 표면에서 중합반응이 일어나 벽 물질을 형성한다는 원리에 기반한다. 경량 콘크리트는 10 MPa의 압축강도, 1.5 MPa의 인장강도 및 1.0 kg/L의 절건 밀도를 가지며 10%, 20% 또는 30%의 PCM을 포함하고 있다. 이를 위해 예비 배합으로 경량 기포 콘크리트(1.0 kg/m<sup>3</sup>)를 제조 한 후 1-dodecanol 및 멜라민의 PCM 마이크로 캡슐과 혼합하여 그 물성을 조사하였다.

**핵심용어 :** 경량기포콘크리트, 상변화물질, 압축강도, 휨강도

---