

저온 상변화 물질 함침 경량골재를 이용한 나노 개질 용설 콘크리트 개발

경주현* · 김선미** · 허종완***

Kyoung, Joo-Hyun*, Kim, Sean-Mi**, Hu, Jong-Wan***

Development of Nanomodified Snow-Melting Concrete Using Low-Temperature Phase-Change Material Impregnated Lightweight Aggregate

ABSTRACT

In winter, the excessive use of deicing salt deteriorates concrete pavement durability. To reduce the amount of deicing salt used, phase-change materials (PCMs) potentially offer an alternative way to melt snow through their latent heat storage characteristics. In this research, thermal energy storage concrete was developed by using PCM-impregnated expanded clay as 50 % replacement to normal aggregate by volume. In addition, to improve the thermal efficiency of PCM lightweight aggregate (PCM-LWA)-incorporated concrete, multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) were incorporated in proportions of 0.10 %, 0.15 %, and 0.20 % by binder weight. Compressive strength testing and programmed thermal cycling were performed to evaluate the mechanical and thermal responses of the PCM-LWA concrete. Results showed a significant strength reduction of 54 % due to the PCM-LWA; however, the thermal performance of the PCM-LWA concrete was greatly improved with the addition of MWCNTs. Thermal test results showed that 0.10 % MWCNT-incorporated concrete had high thermal fatigue resistance as well as uniform heat flow, whereas specimens with 0.15 % and 0.20 % MWCNT content had a reduced thermal response due to supercooling when the ambient temperature was varied between -5 °C and 10 °C.

Key words : Phase change material, Snow melting pavement, Deicing salt, Tetradecane, Multi-walled carbon nanotubes

초 록

겨울철 제설염의 사용은 콘크리트의 미세구조를 손상시키게 되고 이는 내구성을 감소시켜 콘크리트의 수명 단축으로 이어진다. 이러한 단점을 개선하기 위해 상변화물질(Phase Change Material, PCM)의 함침을 콘크리트에 적용함으로써 손상을 완화하고 제설염의 수요를 감소시킬 수 있는 용설 PCM 함침 경량골재(Phase Change Material Impregnated Light Weight Aggregate, PCM-LWA) 콘크리트를 개발하고자 한다. 콘크리트를 제작할 때, PCM을 함침하고 캡슐화한 팽창점토(Expanded Clay)는 일반골재의 50%를 대체하여 사용되었으며, 열적 성능을 향상시키기 위해 사용된 다중벽 탄소나노튜브(Multi-walled Carbon Nano Tube, MWCNT)는 바인더 중량 대비 0.10%, 0.15% 및 0.20%의 비율로 첨가되었다. PCM-LWA를 적용한 시편들의 압축강도 시험 결과 약 54%의 강도 감소를 보였지만 MWCNT의 첨가를 통하여 PCM-LWA 콘크리트의 열적 성능을 크게 향상시켰다. 열 사이클링 시험에서 모든 시편은 15 °C ~ -5 °C의 온도에서 시험하였다. 주변 온도가 0 °C 미만으로 내려갈 때, 다른 시편들의 내부 온도는 0 °C 미만으로 내려가거나 조금 웃도는 경향을 보였지만, CNT를 0.10% 첨가한 시편의 내부 온도는 2 °C로 유의미한 차이를 보였다. 0.15CNT와 0.20CNT의 경우 CNT의 함유로 인하여 과냉각이 발생하였고 열효율이 떨어지게 되어 시편 내부의 온도가 0 °C 이하로 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 용설 시험에서 열 사이클링 시험의 결과와 유사하게 50PCM-LWA와 0.10CNT는 얼음을 녹이는 데에 가장 뛰어난 성능을 보였지만 시간이 흐름에 따라 열전도율이 높은 0.10CNT 시편이 가장 우수한 성능을 보였다.

검색어 : 상변화물질, 용설포장도로, 제설염, 테트라데칸, 다중벽 탄소나노튜브

* 인천대학교 건설환경공학부 석사과정 (Incheon National University · kjh1020@inu.ac.kr)

** 종신회원 · 인천대학교 건설환경공학부 박사과정 (Incheon National University · mook@hdec.co.kr)

*** 정회원 · 교신저자 · 인천대학교 건설환경공학부 교수 (Corresponding Author · Incheon National University · jongp24@inu.ac.kr)

Received July 3, 2022/ revised July 30, 2022/ accepted August 30, 2022

1. 서론

최근 겨울철 5년간의 교통사고 통계를 살펴보면 블랙아이스에 의한 교통사고 사망자는 적설의 경우보다 3.7배 많이 발생하는 것으로 나타났으며, 겨울철 평균기온이 영하일 때보다 영상 2 °C 이상일 때, 블랙아이스에 의한 치사율은 일반 교통사고에 비해 약 3배 정도 증가하였다(Lim, 2020). 이러한 블랙아이스 현상을 방지하기 위해 콘크리트 포장도로표면의 눈과 얼음을 제거하는 여러 가지 방안이 제시되었는데, 대표적인 방법으로는 제설차 및 염화칼슘의 사용이 있지만 이러한 방법들은 막대한 비용과 노동력을 필요로 하고 환경에도 영향을 끼치며 콘크리트의 표면과 내구성을 손상시켜 콘크리트의 수명을 단축시킨다는 단점이 있다(Fanam et al., 2015; Shi et al., 2010). 따라서 콘크리트 포장도로표면의 얼음과 눈을 제거하기 위한 새로운 방안으로 콘크리트 내부에 PCM을 적용하여 PCM의 잠열효과를 활용하는 방안이 제시되고 있다.

PCM은 용융 또는 응고할 때 발생하는 잠열 에너지를 저장할 수 있는 물질을 의미한다(Baetens et al., 2010; Ling and Poon, 2013; Regin et al., 2008). 따라서, 잠열 에너지를 저장할 수 없는 소재와 결합하여 사용될 경우, 열효율과 온도조절에 대한 PCM의 잠열 에너지 저장 성능은 극대화될 수 있다.

콘크리트는 연간 110억 톤 이상으로 건축 자재 중에서 가장 많이 소비되고 있으며 콘크리트에 PCM을 효과적으로 결합할 경우 블랙아이스 뿐만 아니라 구조물의 열에너지 소비량을 30 % 이상 절감할 수 있고(Bentz and Turpin, 2007) 최종적으로 건물 분야에서 발생하는 탄소배출 또한 감소할 수 있을 것으로 예상된다.

최근 연구 동향을 살펴보면 블랙아이스 및 동결/융해로 인한 구조물의 손상을 해결하기 위해 콘크리트에 PCM을 적용시키려는 노력을 하고 있다. 선행연구에 따르면 PCM을 팽창점도의 약 70 % 함침한 골재를 이용하여 열 저장 콘크리트를 제작하였고, PCM-LWA의 함량이 늘어날수록 강도는 감소하고 열적 성능은 주변 온도에 비하여 약 3 °C까지 차이를 보여주었다(Memon et al., 2015). PCM을 콘크리트에 적용한 선행연구를 살펴보면 콘크리트

기반 시설에서 PCM을 적용하기 위해서 콘크리트와 열적·물리적·화학적 특성이 호환되어야 한다(Mahedi et al., 2019).

따라서 본 연구에서는 겨울철 발생하는 블랙아이스를 방지하고 건물 분야의 에너지 소비 및 탄소배출을 줄이기 위해 상변화온도가 4 ~ 5.5 °C 정도인 Tetradecane PCM을 사용하였으며 진공함침공법을 통하여 팽창점도에 함침한 PCM-LWA를 사용하고 PCM의 단점인 낮은 열전도율을 보완할 수 있는 MWCNT를 혼입하여 용설 콘크리트를 개발하고자 한다.

2. 실험설계 및 방법

본 연구에서 콘크리트 복합체 제작 시 사용되는 재료로는 시멘트, 잔골재, 일반골재, 경량골재, PCM, MWCNT, 실리카 폼, 고로 슬래그 미분말, 고열전도성 에폭시를 사용하였으며, 경량골재는 단위중량이 400 kg/m³이며 9.5 mm 및 13 mm 이하의 직경을 가진 팽창점토를 사용한다.

PCM-LWA의 제조방법은 팽창점토를 PCM에 담가 진공함침기 내부에 배치하여 90분간 진공함침한 후, 팽창점토의 공극에서 PCM이 유출되는 것을 방지하기 위해 PCM의 상변화온도 이하에서 PCM을 고체상태로 결정화하여 보관한다. 결정화된 PCM-LWA에서 팽창점토의 공극을 막아 PCM의 유출을 방지하고 열전도성을 높이기 위하여 고열전도성 에폭시에 15분 동안 담가 1차 코팅을 진행한다. 이후에 코팅층과 시멘트 매트릭스와의 부착성을 증진시키고 밀도가 높은 계면전이대(Interfacial Transition Zone, ITZ)를 형성하기 위해 실리카 폼을 이용하여 2차 코팅을 진행한다. 이중층 코팅을 진행한 후 상온에서 24시간동안 경화시켜 완성한다 (Fig. 1 참고).

본 연구에서 사용한 MWCNT는 높은 중형비를 가지고 있으며 여러개의 탄소 시트로 형성되어 있는 원통형 탄소 동소체를 말한다. MWCNT는 20 ~ 100 GPa의 인장강도와 1TPA의 탄성계수를 가지고 있으며 규산칼슘수화물(Calcium Silicate Hydrate, C-S-H)의 생성을 활성화하여 강도를 증진시킬 수 있고 20 ~ 6000 W/m·K의 열전도율을 가지고 있어 콘크리트의 유효 열전도율을



Fig. 1. Physical Appearance of the Phase-Change Material Lightweight Aggregate (PCM-LWA) As It Undergoes Two Coating Stages

Table 1. Concrete Mix Design

ID	Cement	Sand	Course Aggregate	PCM-LWA	SF	MWCNT	Water	GGBS	SP
OPC	477.97	555.64	1,093.34	-	59.75	-	179.24	59.75	5.98
50PCM-LWA	477.97	555.64	564.66	255.85	59.75	-	179.24	59.75	5.98
0.10CNT	477.97	555.64	564.66	255.85	59.75	0.48	179.24	59.75	5.98
0.15CNT	477.97	555.64	564.66	255.85	59.75	0.72	179.24	59.75	5.98
0.20CNT	477.97	555.64	564.66	255.85	59.75	0.96	179.24	59.75	5.98

높일 수 있다(Naqi et al., 2019; Samani et al., 2012). 그러나 MWCNT는 시멘트 매트릭스에 균일하게 분산되지 않으면 응집되어 콘크리트의 강도를 저하시킬 수 있기 때문에 콘크리트 제작 시 초음파 처리(Ultrasonication)를 이용하여 MWCNT를 물에 분산하여 사용한다.

콘크리트의 배합비는 ACI 211.4R-08 (ACI Committee 211.4R-08, 2008) 지침에 따라 설계하며, 팽창점도를 혼입한 콘크리트의 경우 일반콘크리트의 약 50 % 저하된 강도를 보이기 때문에 콘크리트 설계기준압축강도에 따라 30 MPa 이상의 압축강도를 확보하기 위하여 OPC의 목표강도를 65 MPa로 설정하였다. 시편의 명칭은 PCM-LWA의 혼입량에 따라 OPC에서 일반골재를 PCM-LWA로 50 % 대체한 시편을 50PCM-LWA, 50PCM-LWA 시편에 MWCNT를 바인더 질량 대비 0.10 %, 0.15 %, 0.20 % 혼입함에 따라 0.10CNT, 0.15CNT, 0.20CNT로 명명한다(Table 1 참조).

본 연구에서는 PCM, PCM-LWA, 코팅된 PCM-LWA의 상변화 온도 및 열용량을 연구하기 위해 시차주사 열량측정법(Differential Scanning Calorimetry, DSC)을 사용하였으며, 온도에 따른 질량 손실로 열 안정성을 평가하기 위해 열 중량 분석(Thermogravimetric Analysis, TGA)을 사용하였고 팽창점도, PCM 및 이중층 코팅의 화학적 안정성을 평가하기 위해 푸리에 변환 적외분광법(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)을 사용하였다. 또한, 200 ton의 하중 용량을 가진 만능시험기(Universal Testing Machine, UTM)를 통하여 압축강도를 평가하였으며, 마지막으로 열적 특성을 평가하기 위하여 항온항습기 내부에 시편을 배치하여 열 사이클링 시험 및 융설 시험을 진행하였다.

3. 실험 결과 및 분석

본 연구에서 진행한 DSC 시험은 콘크리트 내부에 혼입되는 재료들의 열용량 및 상변화온도를 알아보기 위해 시행되었으며, -60 °C ~ 60 °C의 온도에서 PCM, PCM-LWA, 코팅된 PCM-LWA 세 가지 시편을 시험하였다. Fig. 2를 보면 PCM의 시험 결과는 열용량은 용해 및 용융에서 각 228.6 J/g 및 213.11 J/g을 보였고 상변화온도는 7.4 °C 및 1.3 °C로 측정되었다.

PCM-LWA의 DSC 결과는 69.64 J/g 및 69.66 J/g을 보였고 상변화온도는 5.8 °C 및 3.1 °C로 측정되었으며, 에폭시 코팅된 PCM-LWA는 97.57 J/g 및 96.92 J/g을 보였고 상변화온도는 6.8 °C 및 2.4 °C로 측정되었다. DSC 시험 결과 PCM-LWA의 그래프를 보았을 때, 피크값이 두 개가 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 PCM이 함침되어 있는 공극의 크기에 따라 상변화온도가 달라지기 때문에 발생하는 현상이며, PCM-LWA와 코팅된 PCM-LWA의 열용량 및 상변화온도의 결과가 다르게 나타나는 이유는 에폭시 코팅을 한 골재의 경우 고열전도성 에폭시가 Tetradecane

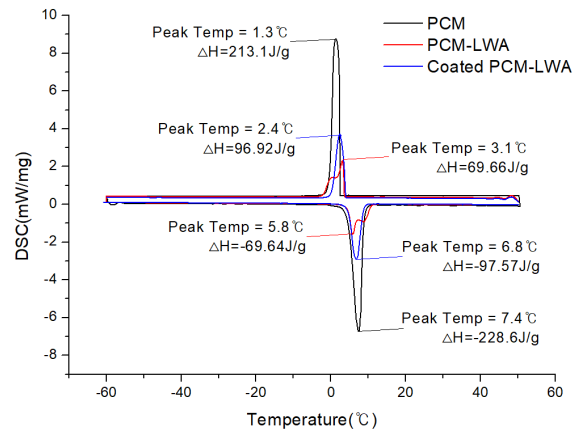


Fig. 2. Differential Scanning Calorimetry (DSC) Results

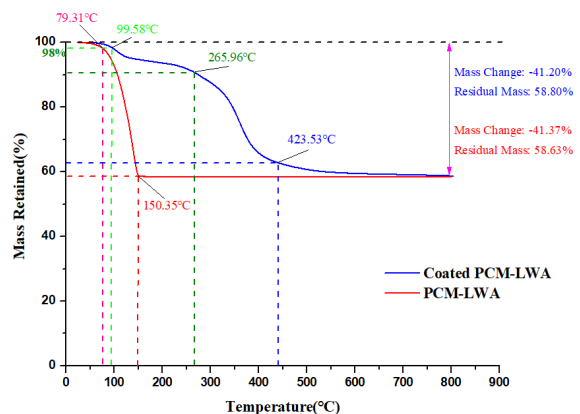


Fig. 3. Thermogravimetric Analysis (TGA) Results

PCM의 낮은 열전도 문제를 보완하고 골재의 공극에서 가열 및 냉각을 균일하게 발생시키기 때문에 코팅된 PCM-LWA의 열용량이 PCM-LWA에 비해 상승하였다.

TGA 시험은 PCM-LWA 및 코팅된 PCM-LWA의 열 안정성을 평가하기 위해 시행되었다. Fig. 3을 보면 PCM-LWA의 공극이 개방되어 있기 때문에 온도가 증가함에 따라 79.31 °C부터 PCM이 증발하기 시작하여 150.35 °C까지 급격한 중량손실을 보이지만, 코팅된 PCM-LWA의 경우 공극이 에폭시로 코팅되어 막혀있기 때문에 중량이 99.58 °C부터 265.96 °C까지 완만하게 감소하고, 이후 에폭시 코팅이 손상됨에 따라 423.53 °C까지 급격한 질량손실을 보인다. 이를 통하여 에폭시 코팅이 PCM-LWA의 열 안정성을 높여줄 수 있다.

FT-IR 시험은 코팅된 PCM-LWA를 구성하는 재료 간의 화학반응 및 상호작용을 확인하기 위한 시험으로 PCM, 에폭시, 팽창점토, 실리카 폼, 코팅된 PCM-LWA의 시험을 진행하였다. Fig. 4를 보면 코팅된 PCM-LWA는 3427 cm⁻¹, 2957 cm⁻¹, 2922 cm⁻¹, 2853 m⁻¹, 1624 cm⁻¹, 1466 cm⁻¹ 및 1123 cm⁻¹에서 피크가 발생하

였으며 이는 구성물질 간의 화학반응 및 상호반응이 일어나지 않아 다른 부분에서 피크가 발생하지 않은 것을 볼 수 있으며, 이는 화학적으로 안정적인 것을 의미한다.

본 연구에서 설계한 압축강도 시편은 OPC, 50PCM-LWA, 0.10CNT, 0.15CNT, 0.20CNT 총 5가지의 배합으로 설계되었으며, 28일간의 수분양생 후 압축강도 시험을 수행하였다. 그 결과 OPC의 압축강도는 66.57 MPa가 나왔으며, 팽창점토를 50 % 혼입한 나머지 시편의 경우는 30.37 MPa, 30.03 MPa, 30.57 MPa 및 28.59 MPa로 OPC의 50 % 이상으로 압축강도가 현저히 감소하였음을 확인할 수 있다(Fig. 5 참고). 이러한 압축강도의 감소는 팽창점토의 다공성 특성 및 낮은 강성때문이며, 팽창점토의 비중은 다른 경량골재보다도 낮은 0.28이기 때문에 강도의 감소가 더 큰 것으로 나타났다.

본 연구에서 진행된 열 사이클링 시험은 실제 건물 내부와 환경을 비슷하게 하기 위해 몰드의 사방에 단열재를 설치하였으며, 시편의 크기는 100 × 100 × 100 mm 크기로 제작하였고, 상부에서 25 mm 떨어진 중심부에 T형 열전대를 내장하여 시험을 진행하였다. 실험 조건은 항온항습기 내부에 시편을 배치하고 온도 사이클을 15 °C ~ -5 °C로 설정하여 총 3회의 사이클의 시험을 진행하였다. 열 사이클링 시험 결과 CNT0.10 시편의 경우 주변 온도가 상승할 때, 시편 내부의 PCM-LWA가 열을 흡수함으로써 가장 낮은 온도를 나타내고, 온도가 하강할 때, 흡수한 잠열을 방출함으로써 가장 높은 온도를 나타내는 것을 확인할 수 있다(Fig. 6 참고). 이러한 결과가 나타나는 이유는 50PCM-LWA 시편의 경우 CNT를 혼입하지 않아 Tetradecane PCM의 낮은 열전도율로 인하여 흡열 및 방열이 늦어지게 되어 CNT0.10 시편의 경우보다 큰 온도 차이를 보이게 된다. 그러나 CNT0.15 및 CNT0.20 시편의 경우는 반대의 경우로 CNT의 함량이 너무 많아 PCM의 과냉각 현상이 발생하게 되어 열 반응이 크게 감소하는 경향을 보이게 되었다.

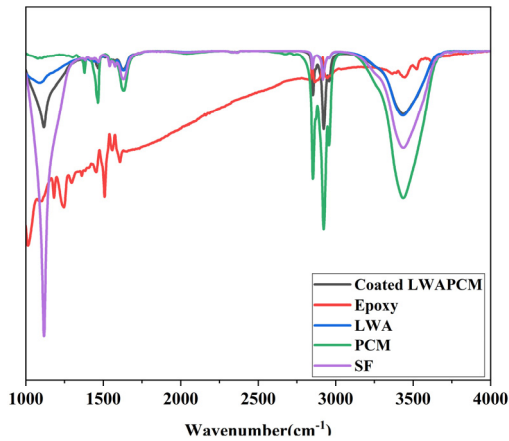


Fig. 4. Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy Results

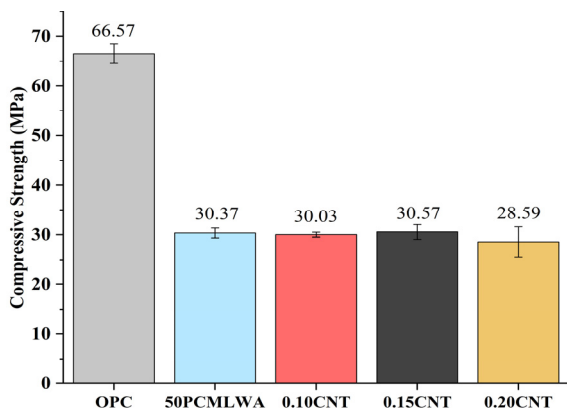


Fig. 5. Compression Strength Test Results

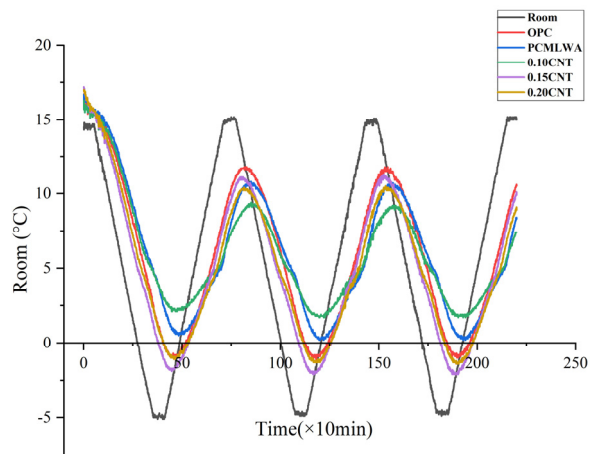


Fig. 6. Thermal Cycling Test Results

융설 시험은 항온항습기를 통하여 겨울철 실제 온도 및 습도를 설정하여 시뮬레이션하였다. 눈이 덮인 모든 시편의 방열 효과를 확인하기 위하여 7 °C에서 열평형 상태가 될 때까지 기다린 후에 항온항습기의 온도를 1 °C로 낮추어 시험을 진행하였다. 시험은 42시간 동안 진행되었으며, 처음 2시간 동안은 시편 간의 유의미한 차이를 보이지 않았지만 10시간 경과 후 0.10CNT 및 50PCM-LWA 시편의 표면에 존재하는 얼음이 투명해지는 것을 확인할 수 있었다. 이후 22시간 경과하였을 때, 50PCM-LWA의 표면이 0.10CNT 보다 많이 녹은 것을 확인할 수 있었지만 시간이 더 흐를수록 50PCM-LWA의 잠열 저장량이 소진되어 42시간 경과 후에는 0.10CNT의 표면 얼음이 거의 남아있지 않을 것을 확인할 수 있었고 이는 다른 시편들과 비교하였을 때, 0.10CNT의 융설 효과가 더 뛰어난 것으로 판단되었다(Fig. 7 참고). 따라서, 열 사이클링 시험에서와 마찬가지로 0.15CNT 및 0.20CNT 시편은 과냉각 현상으로 인하여 표면의 얼음이 녹지 않아 블랙아이스 현상이 발생할 가능성이 더 높은 것으로 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 블랙아이스 현상을 방지하고 건물 분야의 에너지 소비 및 탄소배출 감소를 위해 PCM-LWA 및 MWCNT를 혼합한 콘크리트를 제작하여 재료 시험, 강도 시험, 열적 특성 시험을 진행하였다.

일반적인 팽창점도의 흡수율 시험을 진행하였을 때, 72시간 동안의 흡수율이 약 30 %이었지만 진공함침공법을 이용하여 1시간 동안 함침을 진행한 경우 약 66 %의 흡수율을 보이는 것을 확인하였고 PCM의 함침량이 증가함에 따라 콘크리트의 잠열용량 또한 상승한 것을 확인하였다. DSC 실험의 결과를 통하여 PCM-LWA 보다 코팅된 PCM-LWA가 고열전도성 에폭시의 사용으로 인하여 더 높은 열량을 나타냄을 확인하였다. 또한 열 중량 분석을 통하여 에폭시 코팅을 진행함으로써 온도의 증가에 따른 PCM의 손실량이 적어져 더 높은 열안정성을 나타내는 것을 확인하였다. 또한, 열 사이클링 시험을 통하여 CNT를 0.10 % 넣은 시편의 열전달율이

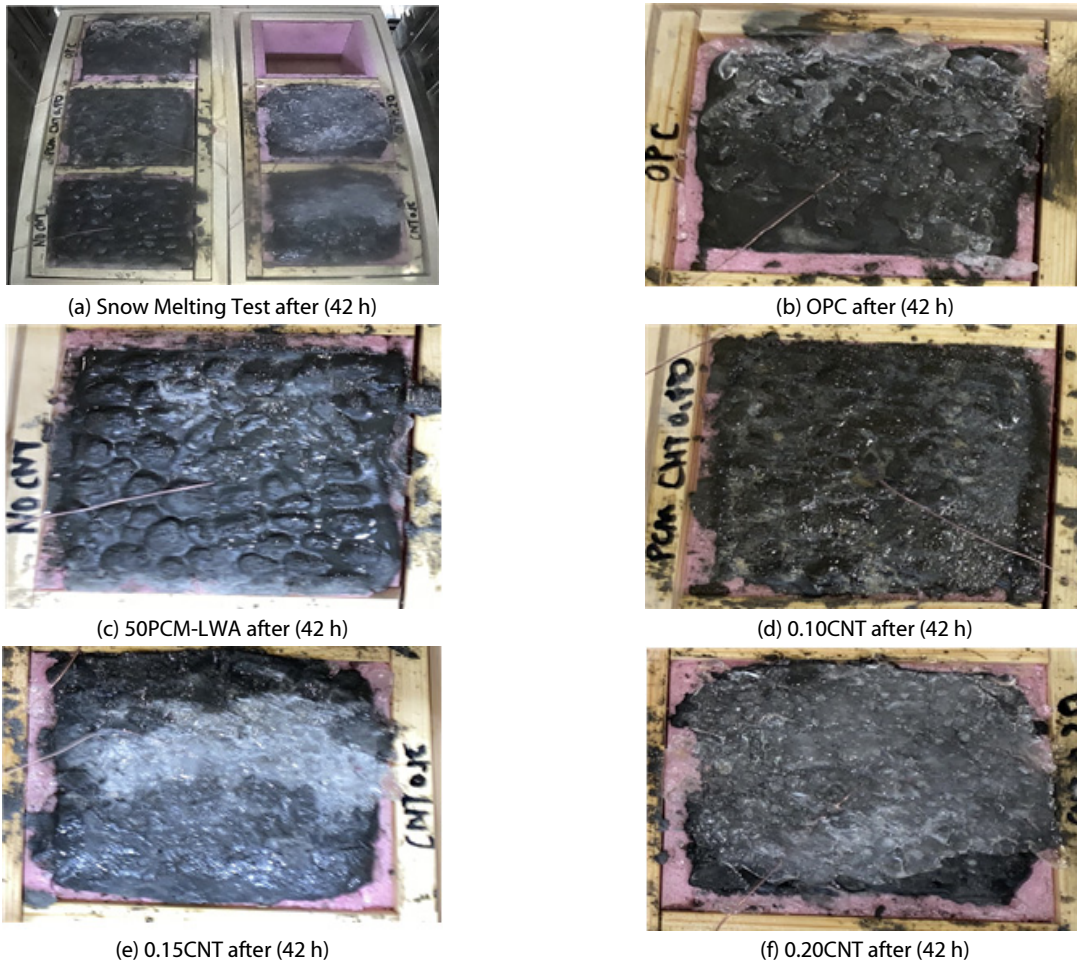


Fig. 7. Snow Melting Test after 42 hours

상승하여 외부온도가 상승 및 감온할 때, 시편의 온도 변화 시간을 지연시키는 유의미한 차이를 확인할 수 있었다. 용설 시험에서도 열사이클링 시험과 비슷한 결과를 나타내 다른 시편들에 비하여 0.10CNT 시편의 빙설이 가장 빠르게 녹은 것을 확인할 수 있었고 CNT를 0.15 %, 0.20 %를 넣었을 경우 과냉각 현상이 발생하여 열 전달의 효율이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 추후 연구에서는 용설시험을 진행할 때 조금 더 정량적인 분석을 하기 위하여 각 시편을 분리 가능하게 설계하여 실험 전후의 무게를 측정하는 등 보다 정량적인 수치로 나타낼 수 있도록 실험계획을 수정하여야 하며, PCM-LWA 콘크리트의 열적 성능을 저하시키지 않으면서 물리적 성능을 향상시킬 수 있는 배합설계의 추가적인 연구가 필요하며 주변 환경에 노출되었을 때의 거동을 예측하는 모델의 개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 국토 교통기술 사업화지원사업의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 22TBIP-C161399-02). 본 연구 지원에 깊은 감사를 드립니다.

References

- ACI Committee 211.4R-08 (2008). *Guide for selecting proportions for high-strength concrete using Portland cement and other cementitious materials*, American Concrete Institute, Michigan, USA.
- Baetens, R., Jelle, B. P. and Gustavsen, A. (2010). "Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review." *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 9, pp. 1361-1368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.026>.
- Bentz, D. P. and Turpin, R. (2007). "Potential applications of phase change materials in concrete technology." *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, No. 7, pp. 527-532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.007>.
- Farnam, Y., Wiese, A., Bentz, D., Davis, J. and Weiss, J. (2015). "Damage development in cementitious materials exposed to magnesium chloride deicing salt." *Construction and Building Materials*, Vol. 93, pp. 384-392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.004>.
- Lim, J. K. (2020). "Comparative analysis of black ice traffic accidents." *Vision zero brief, Korea Transport Institute, KOTI*, Vol. 7, No. 4, pp. 20-21 (in Korean).
- Ling, T. C. and Poon, C. S. (2013). "Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview." *Construction and Building Materials*, Vol. 46, pp. 55-62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.031>.
- Mahedi, M., Cetin, B. and Cetin, K. S. (2019). "Freeze-thaw performance of phase change material (PCM) incorporated pavement subgrade soil." *Construction and Building Materials*, Vol. 202, pp. 449-464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.210>.
- Memon, S. A., Cui, H., Lo, T. Y. and Li, Q. (2015). "Development of structural-functional integrated concrete with macro-encapsulated PCM for thermal energy storage." *Applied Energy*, Vol. 150, pp. 245-257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.137>.
- Naqi, A., Abbas, N., Zahra, N., Hussain, A. and Shabbir, S. Q. (2019). "Effect of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) on the strength development of cementitious materials." *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 1203-1211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.09.006>.
- Regin, A. F., Solanki, S. C. and Saini, J. S. (2008). "Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, No. 9, pp. 2438-2458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.009>.
- Samani, M. K., Khosravian, N., Chen, G. C. K., Shakerzadeh, M., Baillargeat, D. and Tay, B. K. (2012). "Thermal conductivity of individual multiwalled carbon nanotubes." *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 62, pp. 40-43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.03.003>.
- Shi, X., Fay, L., Peterson, M. M. and Yang, Z. (2010). "Freeze-thaw damage and chemical change of a Portland cement concrete in the presence of diluted deicers." *Materials and Structures*, Vol. 43, No. 7, pp. 933-946. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9557-0>.