

수치해석을 통한 상변화물질(PCM) 혼입 콘크리트 포장의 도로살얼음 예방 효과 분석

Evaluation of the Black Ice Prevention Effect of PCM-Mixed Concrete Pavement Through Numerical Simulation

이 종 기¹ Lee, Jongki

고 규 현² Go, Gyu-Hyun

Abstract

Black ice—a thin, transparent layer of ice that forms on road surfaces and reduces visibility—is a major cause of winter road accidents. Through numerical analysis, this study evaluated the feasibility of using concrete infused with phase change materials (PCMs) as a road pavement material to reduce black ice formation. PCM-modified concrete specimens were fabricated, and temperature changes in PCM-modified concrete pavement under freezing conditions were measured. The thermal buffering effect was analyzed using the latent heat characteristics of the PCM-modified concrete specimens. Subsequently, a numerical model simulating the phase change behavior of PCMs was developed, and its predictive reliability was verified. Using the verified model, the temperature distribution and freezing area of concrete pavement were analyzed and compared for different PCM mixing ratios. The results indicated that PCM incorporation can substantially delay or reduce road ice formation. These findings suggest that the application of PCM-modified concrete is an effective alternative for reducing black ice formation on winter roads.

요 지

도로살얼음은 도로 표면에 얇고 투명하게 형성되는 얼음층으로 시인성이 낮아 겨울철 대표적인 도로 안전사고의 원인으로 지목되고 있다. 본 연구에서는 도로살얼음 발생을 저감하기 위한 방안으로, PCM(상변화물질)이 혼입된 콘크리트의 도로 포장재 적용 가능성을 수치해석을 통해 평가하였다. PCM 콘크리트 공시체를 제작하고, 동결 조건에서 PCM 혼입 콘크리트 포장체의 온도 변화를 측정하여 PCM의 잠열 특성을 활용한 열적 완충 효과를 분석하였다. 이후 PCM의 상변화 거동이 반영된 수치해석 모델을 구축하고, 해당 모델의 예측 신뢰성을 검증하였다. 검증된 모델을 활용하여 PCM 혼입율에 따른 콘크리트 포장체의 온도 분포 및 동결 영역을 비교 분석하여 도로살얼음의 발생이 유의미하게 지연되거나 저감되는 효과를 확인하였다. 이러한 결과는 PCM 혼입 콘크리트의 적용이 겨울철 도로의 도로살얼음 발생을 저감하는 효과적인 대안이 될 수 있음을 시사한다.

Keywords : Black ice, Experiment, Numerical simulation, PCM-Infused concrete

1 비회원, 국립금오공과대학교 건축토목환경공학부 박사과정생 (PhD Student, School of Architecture, Civil and Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Tech.)

2 정회원, 국립금오공과대학교 건축토목환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Architecture, Civil and Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Tech., Tel: +82-54-478-7620, gyuhyungo@kumoh.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2026년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2026 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 들어 노면결빙으로 인한 동절기 교통사고가 증가하고 있다. 특히, 기온 급강하에 따라 노면에 발생하는 도로살얼은 기온이 하루 중 가장 낮은 새벽시간대(5-7시)에 주로 발생되며, 운전자가 이를 시각적으로 인지하지 못한 채 주행함으로써 치명적인 사고로 이어진다(Kim et al., 2021; 한국도로공사도로교통연구원, 2017; 한국아스팔트학회, 2022). 또한, 노면결빙으로 인한 도로살얼 발생은 노면의 마찰저항 감소로 차량의 제동거리를 증가(마른 노면에 비하여 승용차 4.4배, 화물차 7.4배, 버스 7.7배 이상)시켜 사고위험이 크게 증가한다고 보고되고 있다(한국교통안전공단, 2017; 한국도로공사도로교통연구원, 2016). 도로살얼을 예방하기 위해 자동염수 분사시설을 운영하거나 노면결빙진 염화물을 미리 살포하는 예방적 조치를 취하고 있으나, 기습적 기온강하로 인한 도로살얼 발생 초기대응에 한계가 있고, 일반적인 제설 작업이나 도로 열선 시스템만으로는 충분히 대응하기 어려운 특성이 있다. 이에 도로 포장재 자체의 열적 성능을 향상시켜 결빙을 사전에 완화하려는 다양한 기술적 시도가 이루어지고 있으며, 특히 PCM(Phase Change Material)을 혼입한 콘크리트는 잠열 특성을 이용해 노면 온도 하강을 지연시킬 수 있는 결빙 저감형 포장재로 주목받고 있다. PCM은 상변화 과정에서 잠열 에너지를 흡수 또는 방출함으로써 재료의 온도 변화를 완충하는 역할을 하기 때문에, 그간의 선행연구에서 PCM을 토목 구조물, 도로 포장재 등에 적용한 연구들이 수행되어 왔다(Lee and Kim, 2012; Hawlader et al., 2003; Tyagi and Buddhi, 2007; Liu et al., 2022; Ng et al., 2024; Phan

et al., 2020). 하지만, 콘크리트에 혼입된 PCM 재료가 도로살얼을 발생 저감에 미치는 영향을 평가한 연구사례는 상대적으로 부족하다.

본 연구에서는 도로살얼을 발생을 저감하기 위한 방안으로 PCM이 혼입된 콘크리트의 도로 포장재 적용 가능성을 수치해석을 통해 평가하였다. 우선 PCM 혼입 콘크리트 공시체를 제작하여 동결 조건에서 PCM 혼입 콘크리트 포장체의 온도 변화를 계측함으로써 PCM의 잠열 특성을 활용한 열적 완충 효과를 분석하고자 하였다. 이후 실험 결과를 바탕으로 PCM의 상변화 거동이 반영된 수치해석 모델을 구축한 후, PCM 혼입 콘크리트 포장체의 도로살얼을 저감 효과를 규명하였다.

2. PCM 혼입 콘크리트 공시체 동결실험

본 연구에서는 PCM이 혼입된 콘크리트 포장체의 도로 살얼을 저감 효과를 평가하고자, PCM 혼입 농도 별 콘크리트 실험체를 제작하였다. 사용된 PCM은 파라핀계인 Tetradecane이며 액상 상태에서의 누출 방지와 모르타르 내 균일한 혼입을 위해 Melamine으로 PCM을 캡슐 형태로 사용하였다. PCM 캡슐의 핵심성분인 Tetradecane와 외피인 Melamine의 열 물성은 Table 1에 제시하였다. 선행연구에서, 사용된 PCM 캡슐을 주사전자현미경(SEM)으로 분석한 결과(Fig. 1), Tetradecane가 PCM의 약 80%를 차지하며, 나머지 20%는 외피가 구성하고 있는 것으로 확인되었다(Woo et al., 2025). 콘크리트 공시체 조성에 적용된 시멘트는 국가표준 규격인 KS L 5201을 충족하는 포틀랜드 시멘트이다.

실험에서 제작된 공시체는 PCM의 혼입률을 각각 0%,

Table 1. Physical properties of Tetra decane

Substance name	Molecular formula	Transition temperature [°C]	Thermal conductivity [W/(m · K)]	Density [kg/m ³]	Specific heat [J/(kg · K)]	Latent heat of fusion [kJ/kg]
Tetradecane	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ CH ₃	3.0	0.24	770	1800	170
Melamine	C ₃ H ₆ N ₆	345	0.4	1500	1200	-

Table 2. PCM mixing ratio for each specimen

Specimen Number	Mix design (kg/m ³)				
	PCM mixing ratio	PCM	Cement	Sand	Water
No.1	0%	0	560	1119	392
No.2	12.6%	113	427	1010	350
No.3	20.8%	188	349	945	325
No.4	30.1%	271	245	859	275

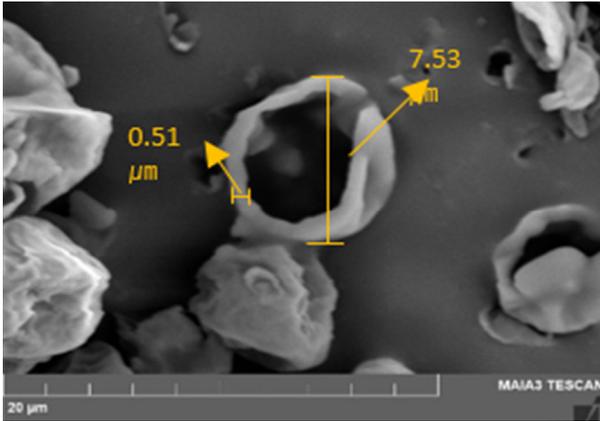


Fig. 1. Cross-sectional SEM image of a PCM capsule (Woo et al., 2025)

12.6%, 20.8%, 30.1%로 달리 조성하였다. Fig. 2(a)와 같이 공시체 몰드는 육면체 형상으로 제작되었으며, 이 중 상부표면을 제외한 나머지 면에 두께 50mm의 단열재를 설치하여 표면에서 아래방향으로 일방향 동결이 일어나도록 하였다. Fig. 2(b)는 공시체 제작 과정에서의 타설

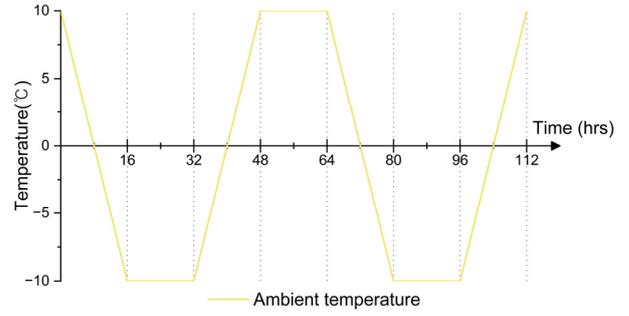
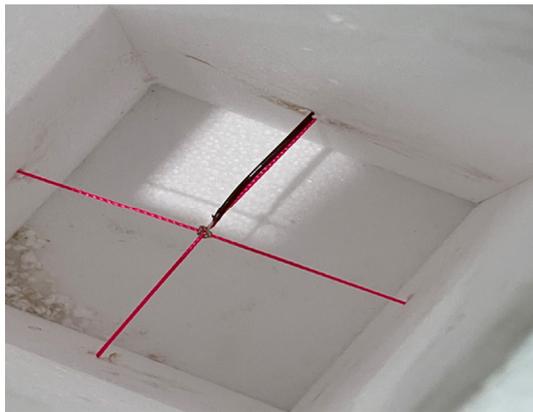


Fig. 3. Freezing chamber ambient temperature conditions to simulate road freezing environment

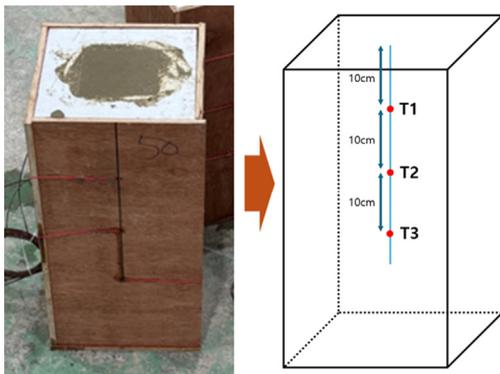
단계를 나타내며, 각 공시체 타설 후, 24시간 뒤에는 20°C의 수중에서 양생을 진행하였다. 또한 내부 온도 관측을 위해, 타설 중 포장체 바깥면으로부터 10cm 간격으로 열전대(Thermo couple)를 설치하였다(Fig. 2(c)). 공시체 제작 후, 온도 조절이 가능한 동결 챔버에 공시체를 비치한 후(Fig. 2(d)), Fig. 3과 같은 외기 온도 제어 프로파일을 기반으로 동결과 융해 과정을 반복하는 실험



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2. Manufacturing process of PCM-mixed cement specimens (a) temperature sensor installation inside the mold, (b) casting stage in the test specimen manufacturing process, (c) installing temperature sensor inside specimen, (d) setting temperature environment after placing in freezing chamber

을 수행하면서 공시체 내부 온도변화를 계측하였다. 이 때, 외기 온도는 동결-유지-융해 과정을 반복하는 열이력 조건을 재현하였고, 공시체 내부 중심부까지 충분한 온도 전달과 내부 온도구배 안정화를 확보하기 위해 각 과정을 16시간 간격으로 통제하였다.

3. 수치해석

3.1 PCM 혼입 콘크리트의 열전달해석

본 연구에서는 PCM 혼입 콘크리트의 열전달 해석을 위해 시멘트 모르타르와 PCM의 혼합물로 간주하였으며, 각 물질의 구성은 다음과 같이 정의하였다.

$$\theta_{pcm,pre} + \theta_{pcm,post} + \theta_{mortar} = 1 \quad (1)$$

$$\theta_{pcm,pre} + \theta_{pcm,post} = n \quad (2)$$

$$\theta_{pcm,pre} = \omega * \frac{\rho_{mortar}}{\rho_{pcm,pre}} * (1 - n) \quad (3)$$

여기서, $\theta_{pcm,pre}$ 는 상변화 이전의 PCM의 체적률을 나타내며, $\theta_{pcm,post}$ 는 상변화 이후의 PCM의 체적률이다. n 은 PCM 혼입률, ρ_{mortar} 는 시멘트 모르타르의 밀도, $\rho_{pcm,pre}$ 는 상변화 이전의 PCM의 밀도, ω 는 상변화 구간에서 온도에 따른 상변화율을 나타내는 함수로서 물질의 상변화시 발생하는 비열 및 잠열량에 관여한다. 한편, PCM 혼입 콘크리트 공시체 내부에서의 열전달을 모사하기 위해 식 (4)와 같은 에너지보존방정식이 사용되었으며, 이

식에는 PCM 재료의 잠열 특성이 고려되는 겉보기 비열 C_a (Apparent heat capacity)이 적용되었다.

$$C_a \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_{pcm_mortar} \nabla T) \quad (4)$$

$$C_a = C - L_{pcm} \rho_{pcm,post} \frac{\partial \theta_{pcm,post}}{\partial T} \quad (5)$$

3.2 해석모델 검증

수치해석 모델의 검증을 위해 해석결과를 PCM 혼입 콘크리트 공시체의 동결실험 결과와 비교하였다. 동결실험은 PCM 혼입률에 따라 총 네 가지 조건으로 수행되었으며, 각 실험조건에 대해 동일한 조건으로 수치해석을 수행하였다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, 실험과 수치해석 모두에서 PCM 혼입률이 높아질수록 공시체의 온도 응답이 감소하면서 온도 변화 속도가 완만해지는 경향이 확인되었고, 수치해석은 실험에 관측된 온도 변화 경향을 전반적으로 잘 예측하였다. PCM 함유율(0%, 12.6%, 20.8%, 30.1%) 조건별로 실험과 수치해석 간 RMSE(Root Mean Square Error, 평균제곱근오차)는 각각 1.2°C, 0.9°C, 0.7°C, 0.8°C로 나타나 수치해석 결과가 실험 결과를 양호하게 재현함을 확인하였다. 이러한 결과는 사용된 수치해석모델이 PCM 혼입 콘크리트의 열전달 거동을 합리적으로 예측할 수 있음을 시사한다. 이에, 해당 모델은 PCM 혼입 콘크리트 포장체의 도로살얼음 저감 효과를 규명하는 도구로 활용 가능할 것으로 판단되었다.

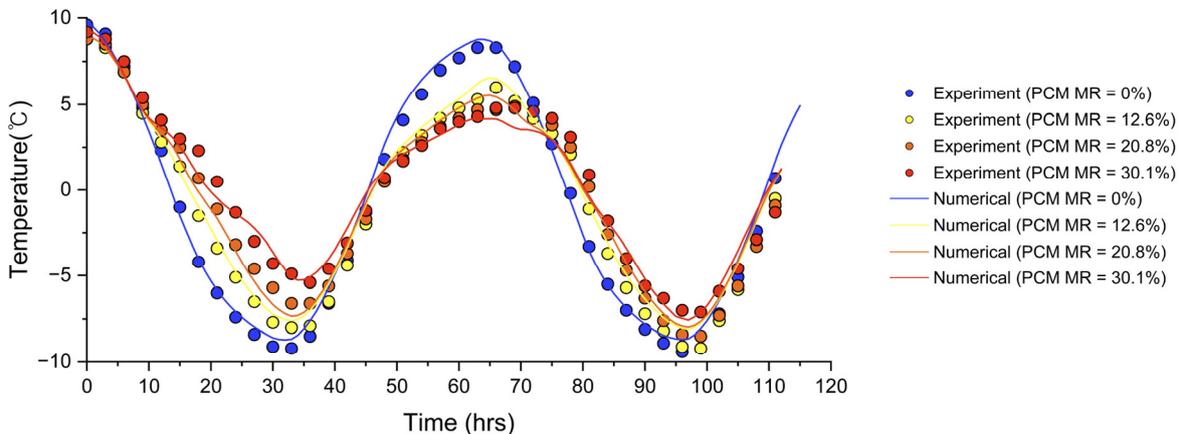


Fig. 4. Comparison results of 1D freezing test between experimental data and numerical model (MR: Mixing Ratio)

4. 도로살얼음 예방 효과

4.1 PCM 혼입 콘크리트 포장체 모델링

Fig. 5는 PCM 혼입 콘크리트 포장체의 도로살얼음 발생 저감 효과를 규명하기 위한 3차원 해석모형을 보여 준다. 해석영역은 콘크리트 포장층과 상부 노상(subgrade)로 구성하였고 콘크리트 포장층 두께는 200mm로 가정하였다. 국내 도로포장 설계요령에서는 콘크리트 포장 설계 두께 범위를 약 200~300mm로 제시하고 있다(국토교통부, 2025). 총 해석시간은 24시간으로 설정하였고, 초기온도는 4°C로 가정하였다. 또한, 포장체 표면에는 동결기 외기온도를 가정한 가상의 온도를 경계조건으로 적용하였다. 아울러, 주간시간대(7시-18시)에는 태양 복사열이 작용하도록 지표에 시간 의존 함수 형태의 열량을 부여하였다. 포장체는 각각의 PCM 혼입률 별(MR=0%, MR=12.6%, MR=20.8%, MR=30.1%)로 영역을 1, 2, 3, 4분면으로 분할하여 구성하였다. 이러한 사분면 분할 모델은 동일한 외기 조건, 태양 복사 조건 및 하부 지반 조건하에서 PCM 혼입률 변화에 따른 온도 응답을 동시간대에서 서로 비교할 수 있다는 장점을 가지며, 혼입률 별 독립 해석을 반복 수행하는 방식에 비해 상대 비교가 용이하다. 또한, 실제 도로 포장면은 미세 거칠기를 가지며, 이는 대류 및 복사 열교환 조건에 영향을 줄 수 있으므로 보다 현실적인 경계조건 구현이 필요하다. 이에, 해석모델의 포장체 최상부 경계에 Comsol Multiphysics에 내장된 Random Surface Flat 기능을 적용하여 포장 표면의 실제 거칠기 형상을 단순 평면이 아닌 불규칙 표면으로 구현하여 표면적 증가 및 국부적 열교환 차이를 반영하고자 하였다.

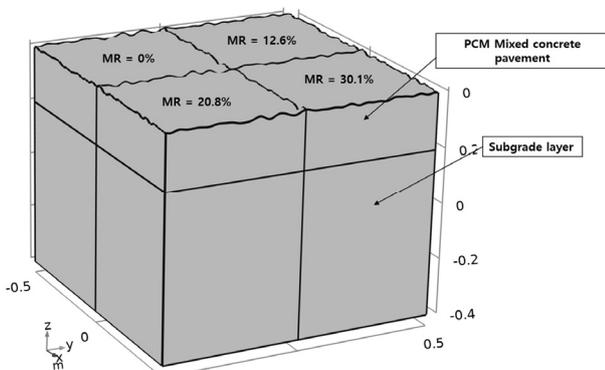


Fig. 5. Domain for the performance analysis of PCM mixed concrete pavement

4.2 PCM 혼입율에 따른 도로살얼음 방지 효과

해석 결과, 동일 온도 조건하에서 PCM이 혼입된 포장체는 PCM이 혼입되지 않은 포장체 대비 뚜렷한 온도 완충(thermal buffering) 효과를 보여주었다. 특히 Fig. 6의 PCM 혼입 콘크리트의 포장체의 표면 온도에서 알 수 있듯이, 동일한 외기 온도 환경 조건에서 PCM의 잠열 특성에 의한 동결 지연 효과가 확연히 확인되었다. PCM이 없는 경우와 PCM 혼입률이 20%인 경우 동일 시간대에서의 표면온도는 최대 1°C 이상의 차이가 발생하였다.

또한, PCM 혼입 콘크리트는 PCM 혼입률이 증가함에 따라 포장체 표면 뿐 아니라 포장체 내부로의 동결 진행도 점진적으로 느려지는 경향이 나타났는데(Fig. 7), 이는 PCM의 상변화 특성에 기인한다. PCM은 상변화 과정에서 잠열을 흡수하며, 이로 인해 유효 비열이 증가하여 온도 변화(냉각) 속도가 완화된다. 특히 PCM 혼입률이 증가할수록 단위 체적당 잠열 저장량이 증가하여 외부로부터 유입되는 냉열이 상변화 과정에 우선적으로 소

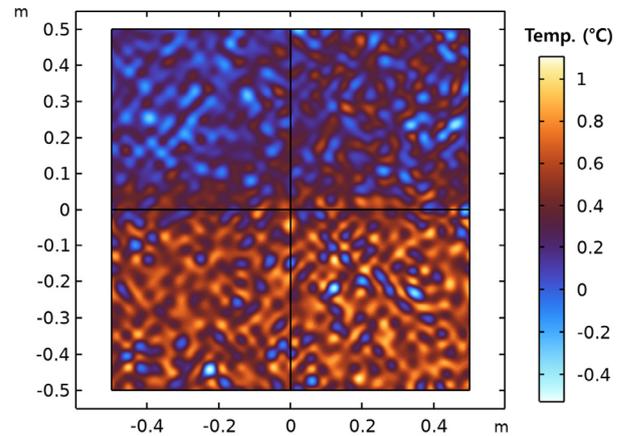


Fig. 6. Comparison of surface temperatures of concrete pavements with different PCM mixing ratios

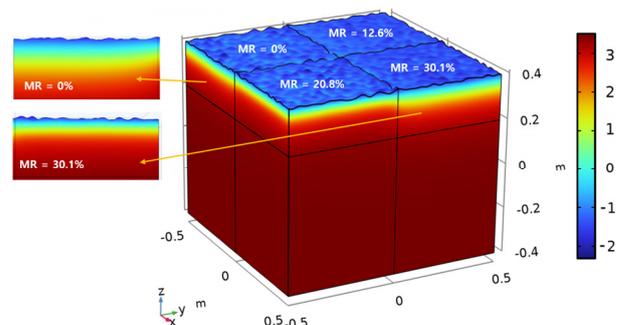


Fig. 7. Freezing progress inside PCM-mixed concrete pavement

비되며, 그 결과 포장체 내부로의 동결 진행이 지연된다. 이러한 영향을 반영하고자 Fig. 8과 같이 시각 PCM 혼입을 별로 콘크리트 포장층 지표부터 심도 5cm까지의 영역 내의 평균 온도변화를 확인하였다. PCM 혼입률이 낮은 경우에는 완충 효과가 제한적인 반면 혼입률 높은 포장층에서는 온도 응답의 비선형적 온도 완충효과가 관찰되었다. 얇은 포장체 평균온도가 0 °C에 도달하는 시점을 기준으로 분석한 결과, 혼입률 12.6% 포장체에서도 30분 이상의 동결 지연 효과가 제한적으로 나타났고, 중·고혼입률 조건에서는 동결 개시 시점이 매우 유의미하게 지연되거나 예방되는 것이 확인되었다. 이는 PCM 혼입률 증가에 따라 단위 체적당 비열이 잠열에 의해 크게 증가하면서, 포장체가 외부로부터 유입되는 냉기에 효과적으로 온도 응답을 지연시킨 결과로 해석된다.

또한, Fig. 8에서 도로살얼을 발생 위험이 높은 온도 구간인 -1°C ~ 0°C에 대한 체류 시간을 비교해보면, PCM 혼입 포장체는 해당 온도 범위에 머무는 시간이 현저히 감소하는 경향을 보인다. 일반 포장체의 경우 외기 온도 하강 시 포장 표면 온도가 해당 구간 장시간 노출되는 반면 PCM 혼입 포장체에서는 상변화에 따른 열 방출로 인해 온도 하강 곡선의 기울기가 완만해지면서 위험 온도 구간 체류 시간이 단축되었다. 특히 PCM 혼입률이 증가할수록 도로살얼을 발생 가능성이 높은 온도 구간에서의 체류 시간 감소 효과가 더욱 뚜렷하게 나타났으며,

이는 단순한 동결 지연을 넘어 실질적인 결빙 저감 효과로 이어질 수 있다. 이러한 결과는 PCM 혼입 콘크리트 포장체가 겨울철 도로결빙 예방에 기여할 수 있음을 시사한다.

4.3 한계점

본 연구는 수치해석을 기반으로 PCM 혼입 콘크리트 포장체의 도로 살얼을 예방 효과를 검토하였으나, 실제 도로에서는 습도 환경, 강설, 수분 이동, 제설염 존재 여부 등 복합적인 요인이 추가적으로 작용할 수 있다. 본 연구에서는 외기온도 조건에 따른 동결-융해 거동 분석에 주안점을 두었으며, 습도 환경 등의 기타 변인은 고려하지 못하였다. 또한, PCM 혼입이 높아질수록 온도 완충 효과는 높아지지만 콘크리트 포장체의 구조적 내구성은 저하될 우려가 있는데 본 연구에서는 포장체의 구조적 내구성에 대한 고찰을 배제한 채 열적 성능에만 초점을 맞추었다는 점에서 한계를 지닌다. 따라서, 향후 연구에서는 습도 환경 등을 포함한 복합 환경 조건에서의 도로살얼을 형성 메커니즘 구형과 PCM 혼입에 따른 포장체의 내구성까지 함께 평가하는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고, 본 연구 결과는 PCM 혼입 콘크리트 포장체가 동절기 도로살얼을 발생 가능성을 저감할 수 있는 유효한 대안임을 보여주었다는 점에서 학술적 의의를 가진다.

5. 결론

본 연구에서는 PCM이 혼입된 콘크리트를 고속도로 포장체에 적용한 가상 시나리오를 구성하였고, PCM 혼입 콘크리트의 도로살얼을 예방 효과를 수치해석을 통해 분석하였다. 이를 위해 다양한 PCM 혼입률에 따른 콘크리트 포장체의 열적 완충 및 도로살얼을 지연 효과를 정량적으로 분석하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 동일한 동결 조건하에서 PCM이 혼입된 콘크리트 포장체는 PCM이 혼입되지 않은 일반 콘크리트 포장체 대비 뚜렷한 온도 완충 효과를 보여주었다. 특히 PCM 혼입 콘크리트의 포장체의 표면에서도 PCM의 잠열 특성에 의한 동결 지연 효과가 확인되었다.
- (2) PCM 혼입률이 높을수록 도로살얼을 발생 가능성이

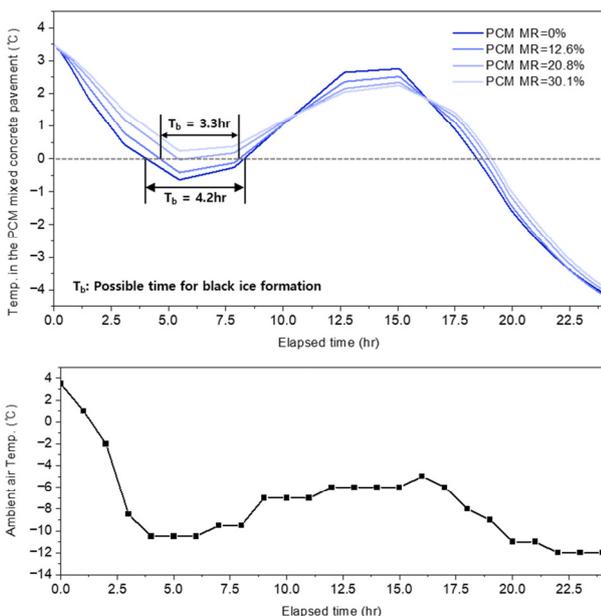


Fig. 8. Comparisons of average temperature change in shallow concrete pavement layers (volume from the surface to a depth of 5 cm)

높은 온도 구간(-1°C ~ 0°C)에서의 체류 시간 감소 효과가 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 이는 단순한 동결 지연을 넘어 실질적인 결빙 저감 효과로 이어졌다. 이러한 결과는 PCM 혼입 콘크리트 포장체가 겨울철 도로결빙 안전성 향상에 기여할 수 있는 잠재력이 있음을 시사한다.

- (3) 본 연구에서 고려한 PCM 혼입율은 포장체의 내구성과 경제성보다는 온도완충 성능에 초점을 맞춘 것이기에, 향후 이러한 지표를 함께 고려하는 연구로 확장된다면 더욱 유의미한 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2022R1C1C1006507, RS-2025-03192968).

참고문헌 (References)

1. 국토교통부, 도로포장 설계 요령, 2025.
2. 한국교통안전공단 (2017), 결빙도로 제동거리 실험 결과 발표자료, 한국교통안전공단 보도자료, 2017년 12월. Available at: <https://www.cstimes.com/news/articleView.html?idxno=324711> [Accessed June 30, 2025].
3. 한국도로공사도로교통연구원, 동절기 도로안전을 위한 노면관리 방안, 연구보고서, 2016.
4. 한국도로공사도로교통연구원, 동절기 어는비 예보모델 고도화, 실용화소과제연구보고서, 2017.

5. 한국아스팔트학회, 결빙방지포장의 장기효과 분석 및 내구성 평가 연구 용역 보고서, 2022.
6. Hawlader, M. N. A., Uddin, M. S., and Khin, M. M. (2003), "Microencapsulated PCM Thermal-Energy Storage System", *Appl. Energy*, Vol.74, No.1-2, pp.195-202, [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(02\)00146-0](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(02)00146-0).
7. Kim, S.-J., Yoon, W.-S., and Kim, Y.-K. (2021), "Characteristics of Black Ice Using Thermal Imaging Camera", *J. Korean Soc. Ind. Conver.*, Vol.24, No.6, pp.873-882, <https://doi.org/10.21289/KSIC.2021.24.6.873>.
8. Lee, H.-S. and Kim, J.-S. (2012), "Energy Saving PCM Cement and Concrete Technology", Technical Report, pp.56-63.
9. Liu, D., Li, J., and Wang, Y. (2022), "Numerical Simulation on Anti-freezing Performance of PCM-Clay in Core Wall during Winter Construction", *Appl. Therm. Eng.*, Vol.215, pp.118951, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118951>.
10. Phan, M. T., Park, D.-W., and Kim, H.-S. (2020), "Simulation on Heat Transfer of Phase Change Material Modified Asphalt Concrete for Delaying Black Ice Formation", *Int. J. Highw. Eng.*, Vol.22, No.6, pp.35-43. <https://doi.org/10.7855/IJHE.2020.22.6.035>.
11. Ng, C. W. W., Kravchenko, E., Li, Z., et al. (2024), "Volumetric Behaviour of Soil Mixed with Phase Change Materials", *Acta Geotech.*, Vol.19, pp.2715-2730, <https://doi.org/10.1007/s11440-023-02064-3>.
12. Tyagi, V. V. and Buddhi, D. P. C. M. (2007), "PCM Thermal Storage in Buildings: A State of Art", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol.11, No.6, pp.1146-1166, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.10.002>.
13. Woo, H.-J., Go, G.-H., Lee, J.-M., and Kim, S.-K. (2025), "Numerical Analysis Study on the Reduction of Frost Penetration Behind Retaining Walls Using PCM-infused Mortar Panels", *J. Kor. Geotech. Soc.*, Vol.41, No.4, pp.31-39, <https://doi.org/10.7843/kgs.2025.41.4.31>.

Received : February 5th, 2026
 Revised : February 23rd, 2026
 Accepted : February 23rd, 2026