



# MWCNT를 혼입한 발열체의 크기에 따른 발열 효율 분석

## Heating Performance of MWCNT Module according to Size Effect

박소현\* · 안승주\*\* · 이희영\*\*\* · 김동휘\*\*\*\* · 정원석\*\*\*\*\*

Park, Sohyeon\*, An, Sungju\*\*, Lee, Heeyoung\*\*\*, Kim, Donghwi\*\*\*\*, and Chung, Wonseok\*\*\*\*\*

### Abstract

Black ice is a road-freezing phenomenon that occurs on the surfaces of roads and is caused by sub-zero temperatures. Black ice is dangerous to vehicular traffic because it is difficult for a driver to detect its presence on roads. Further, it causes vehicles to lose traction on roads, thus causing accidents. Therefore, this study aims to solve this problem by utilizing a heating module with multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) and analyzing the heating efficiency according to the size effect of the heating module. The heating modules were divided into cubes ( $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ ) and cuboids ( $100 \times 300 \times 60 \text{ mm}^3$ ). The parameters considered were the size of the heating module, number of curing days, and supply voltage. The maximum temperature change of the cubes was  $75.7 \text{ }^\circ\text{C}$ , and the maximum temperature change of the cuboids was 78% of the cube. The thermal images demonstrated that the cuboids exhibited better thermal dispersibility than that exhibited by the cubes. Therefore, the heating efficiency of the cuboids was inferred to be excellent. Thus, the cuboid heating module can be used to reduce the risk of accidents occurring caused by black ice.

**Key words :** Multi-Walled Carbon Nanotube, Black Ice, Heating Module, Heating Performance, Module Size

### 요 지

도로살얼은 겨울철 급격한 기온 변화에 따라 도로 표면에 발생하는 도로 결빙 현상이다. 이러한 도로살얼은 차량 통행에 위협이 되며 사고 발생위험을 증가시킨다. 기존에는 노면 온도가  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  이하일 경우 주로 제설제를 살포하였으나, 제설제는 도로의 노후화를 촉진시킨다. 따라서 본 연구는 Multi-Walled Carbon Nanotube (MWCNT)가 혼입된 발열체를 활용하여 문제를 해결하고자 하며, 발열체의 크기에 따른 발열 효율을 분석하고자 한다. 발열체는 크기가  $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ 인 큐브형과  $100 \times 300 \times 60 \text{ mm}^3$ 인 큐보이드형으로 구분하였다. 매개변수는 발열체의 크기, 양생일, 공급 전압으로 선정하였다. 큐브형의 최대 발열량은  $75.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 이고 큐보이드형은 큐브형의 78%까지 최대 발열량이 발생하였다. 열화상 이미지를 분석한 결과, 큐보이드형은 큐브형보다 열 분산성이 더 우수함을 확인하였다. 따라서 큐보이드형의 발열 효율은 우수한 것으로 분석되며, 큐보이드형 발열체는 도로살얼으로 인한 피해를 감소시키는데 효과적인 것으로 판단된다.

**핵심용어 :** Multi-Walled Carbon Nanotube, 도로살얼, 발열체, 발열 성능, 발열체크기

## 1. 서 론

도로살얼은 도로에서 발생하는 결빙 현상을 의미하며, 육안으로 감지하기가 어렵기에 심각한 차량 사고를 유발할

수 있다. 기존에는 도로살얼 문제 해결을 위하여 열선을 설치하거나 제설제를 분사하는 방법들이 제시되어왔다. 하지만 열선 설치의 경우에는 초기 비용이 많이 소요되며, 도로살얼을 예방하기 위해서 과도한 양의 전기를 사용하

\*정회원, 경희대학교 사회기반시스템공학과 석사과정(E-mail: sohynpark@khu.ac.kr)

Member, Master's Course, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University

\*\*동일기술공사 전무(E-mail: badasajada@naver.com)

Managing Director, Dong Il Engineering Consultants

\*\*\*정회원, 조선대학교 토목공학과 교수(E-mail: heeyoung0908@chosun.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chosun University

\*\*\*\*정회원, 경희대학교 사회기반시스템공학과 석사(E-mail: 0727donghwi@khu.ac.kr)

Member, Master, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University

\*\*\*\*\*교신저자, 정회원, 경희대학교 사회기반시스템공학과 교수(Tel: +82-31-201-3897, Fax: +82-31-202-8854, E-mail: wschung@khu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University

여야 한다. 제설제는 염화칼슘 성분이 도로의 노후화를 촉진하여 도로의 생애주기가 짧아지고 유지보수 비용이 많이 소요된다. 이러한 이유로 최근에는 도로살얼을 문제를 해결하기 위한 대안책을 마련하고자 다양한 실험을 수행하고 있다. Kwon et al. (2020)은 나노재료 기반의 도로코팅제를 제작하고 Joule heating을 이용하여 코팅 자체 발열 기능을 가진 다기능성 도로 코팅제를 개발하였다. 또한 Kim et al. (2020)은 블랙아이스 식별을 위한 이미지 센서와 LED 광원을 합친 응용기술을 기존 기술과 결부하여 연구를 수행하였다.

최근에는 앞서 설명한 방법 이외의 겨울철 도로 결빙 현상 해결을 위하여 나노 재료인 Multi-Walled Carbon Nanotube (MWCNT)와 시멘트 기반 재료를 혼합하여 콘크리트 구조물에서 자체적으로 발열을 발생시키고, 역학적 성능을 향상시키는 연구가 수행되고 있다(Morsy et al., 2011; Hamzaoui et al., 2012). Nan et al. (2004)은 탄소나노튜브를 혼합한 시멘트 복합체의 열전도도와 CNT의 관계를 공식화하였다. Zhang and Li (2011)은 MWCNT를 혼입한 시멘트 복합체의 도로 용빙 시스템에 대해 연구를 수행하였다. 이 연구는 영하의 온도에서 얼음을 녹이는 실험을 진행하였고 MWCNT가 3.0 wt% 혼입하면 2.83 W/m·K의 열전도층을 생성하여 도로 용빙 시스템이 가능한 것으로 분석되었다. Kim et al. (2014)은 CNT와 실리카폼을 혼합한 시멘트 복합체의 전기적 특성에 대해 연구하였다. 실험 결과, 소량의 실리카폼은 응집된 CNT와 혼합하여 기계적으로 작은 크기로 분해하기 때문에 CNT-시멘트 복합체의 전기적 성능을 향상시켰다. Konsta-Gdoutos and Aza (2014)는 CNT와 Carbon Nano Fiber (CNF)를 혼합한 시멘트 복합체의 전기적 특성과 압저항 감도에 대해 연구하였다. 0.1 wt%의 CNT와 CNF를 혼합한 복합체에서 가장 높은 압저항 감도가 나타났다. CNT와 CNF를 첨가하는 것에서 전기적 특성이 개선되었다. Kim et al. (2016)은 CNT의 혼합 농도를 매개변수로 선정하여 시멘트 복합체의 발열 성능에 대해 연구하였다. CNT의 혼합 농도는 시멘트 무게 대비 1.0 wt%, 2.0 wt%이고 시멘트 복합체의 크기는 50 × 50 × 50 mm<sup>3</sup>이다. 연구 결과, 2.0 wt% 복합체는 10 V 전압을 공급하면 67.8 °C의 발열량이 나타났고 CNT의 혼합 농도가 증가할수록 발열 성능은 개선되었다. Kim and Ban (2017)은 100 × 100 × 5 mm<sup>3</sup>의 CNT Plate를 500 × 150 × 150 mm<sup>3</sup> 크기의 시멘트 콘크리트에 삽입하여 -10 °C의 온도 조건에서 발열 성능을 검증하였다. 매개변수는 CNT Plate의 매립 간격을 150, 200, 300 mm로 하여 단일 매립의 시편과의 온도를 비교하였다. CNT Plate를 단일 매립한 경우 시편 온도가 -7.5 °C이었다. CNT Plate의 간격을 150 mm, 200 mm로 2개 설치한 시편의 경우 최대 10 °C 이상의 온도를 유지하였다. García-Macías et al. (2017)은 MWCNT를 혼입한 다양한 시멘트 복합체의 전기전도성에 대하여 연구하였다. 시멘트 복합체의 종류는 시멘트 페이스

트, 모르타르, 콘크리트로 선정하였고, MWCNT 혼합 농도는 시멘트 중량 대비 1.0 wt%로 동일하였다. 실험 결과, 동일한 농도를 혼합한 경우에는 시멘트 페이스트, 모르타르 콘크리트 순으로 전기전도성이 우수하였다. Lee et al. (2018)은 MWCNT를 활용한 시멘트 복합체의 열적 특성에 대해 연구하였다. 매개변수는 MWCNT 혼합 방법, MWCNT 농도를 선정하였다. MWCNT 혼합 방법은 모래에 코팅하는 방법과 수용액으로 혼합하는 방법이고, MWCNT 농도는 시멘트 무게 대비 0.125 wt%, 0.25 wt%로 진행하였다. 실험결과, 발열 성능은 모래에 코팅하는 방법이 수용액으로 혼합하는 것보다 2배 우수하였고 MWCNT 농도가 증가할수록 다수의 CNT-network가 형성되었기 때문에 증가한 것으로 분석되었다. Park, Lee et al. (2018)은 MWCNT를 혼입한 시멘트 복합체의 효율적인 전압 공급 방법에 대해 연구하여 도로결빙 방지를 위한 발열 가능 건설재료의 기초연구를 수행하였다. 실험체의 크기는 200 × 40 × 40 mm<sup>3</sup>이고 매개변수는 전압 공급 위치이다. 실험 결과, 동일한 전압을 공급하면 전압 공급 위치를 분산하고 간격이 좁을수록 발열 효율에 유리한 것으로 분석되었다.

앞서 설명했듯이 MWCNT를 혼입한 나노 시멘트 복합체의 전기전도성 및 발열 성능에 대한 연구는 진행되고 있지만, 나노 시멘트 복합체의 크기에 따른 발열 성능에 관한 연구는 미비한 실정이다. 이러한 이유로 본 연구는 MWCNT를 혼입한 발열체의 크기에 따른 발열 성능을 연구하고자 한다. 발열체는 크기에 따라 큐브형과 큐보이드형으로 제작하였고, 매개변수는 양생일과 공급 전압으로 선정하였다. 제작한 발열체는 양생일과 크기에 따라 발열체의 종류를 구분하여 전압을 공급한다. 공급 전압에 따른 최대 발열량은 설치한 열전대를 정적 데이터로거에 연결을 통하여 계측한다. 또한 발열체의 온도는 열화상 카메라로 촬영하여 측정하였고, 열화상 이미지 분석을 수행하여 열 분산성과 발열 면적을 파악하고자 하며, 발열 효율은 양생일과 발열체 크기에 따라 분석한다.

## 2. 실험 방법

나노재료를 혼입한 발열체는 크기에 따른 발열 효율을 분석하기 위하여 큐브형과 큐보이드형으로 구분하였다. 큐브형 발열체는 Fig. 1(a)와 같이 크기를 50 × 50 × 50 mm<sup>3</sup>로 선정하였다. 발열체의 크기는 선행연구 Seong et al. (2018)과 Park, Park et al. (2018)에서 사용한 ASTM C 109에 의거하여 동일하게 설정하였다(ASTM C109/C109M-20b, 2020). 큐보이드형 발열체는 Fig. 1(b)와 같이 크기를 100 × 300 × 60 mm<sup>3</sup>로 설정하였다. 큐브형과 큐보이드형 발열체의 매개변수는 양생일과 공급 전압으로 설정하였다. 양생일은 7일과 28일로 선정하고 전기양생으로 진행하였다. 전압은 큐브형의 경우 10 V, 20 V, 30 V, 40 V, 큐보이드형의 경우 30 V, 50 V,

100 V, 150 V, 200 V 을 공급하였다. 전압 공급 시간은 동일시 간대에서의 전압 간 발열량을 비교하기 위하여 60분으로 고정하였다. MWCNT 혼합 농도는 시멘트 중량대비 1.0 wt% 로 통일하였다. 선행연구 Seong (2020)에 따르면 MWCNT를 혼입하지 않은 시편과 MWCNT를 혼입한 시편의 발열 성능

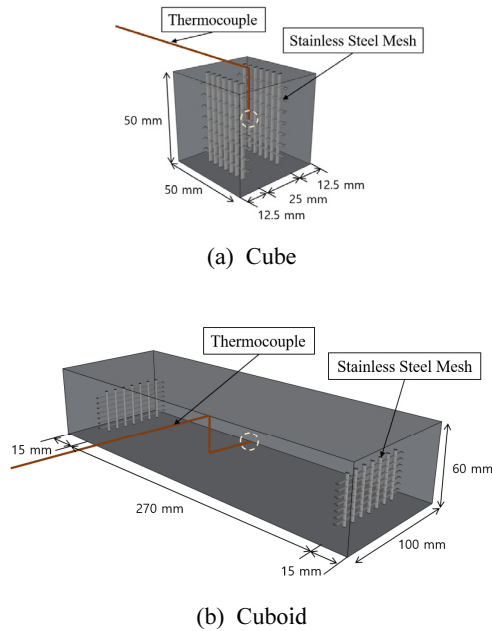


Fig. 1. Specimen

Table 1. Test Parameters

Specimen name	Module type	Curing days (day)	Voltage (V)	
Cube-7D-10V	Cube	7	10	
Cube-7D-20V			20	
Cube-7D-30V			30	
Cube-7D-40V			40	
Cube-28D-10V		28	28	10
Cube-28D-20V				20
Cube-28D-30V				30
Cube-28D-40V				40
Cuboid-7D-30V	Cuboid	7	30	
Cuboid-7D-50V			50	
Cuboid-7D-100V			100	
Cuboid-7D-150V			150	
Cuboid-7D-200V			200	
Cuboid-28D-30V			28	28
Cuboid-28D-50V		50		
Cuboid-28D-100V		100		
Cuboid-28D-150V		150		
Cuboid-28D-200V		200		

차이를 분석한 결과, MWCNT를 혼입한 시편의 최대 온도증가량은 MWCNT를 혼입하지 않은 Control 시편에 비하여 최대 108배 높게 나타났다. 따라서 MWCNT를 혼입하지 않은 콘크리트는 발열이 발생하지 않는 것으로 선행연구에서 보고되어 본 연구에서는 Control 시편 제작 및 발열 분석을 진행하지 않고 MWCNT를 혼입한 시편으로만 연구를 진행하였다. 매개변수에 따른 발열체는 Table 1에 정리하였다.

본 연구는 발열체를 제작할 시 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 모래는 KSL ISO 679 (2011) 표준 규격의 비중이 2.6~2.67, 균등 계수는 1.0~1.93인 표준사를 활용하였다(KSL 5201, 2016). 실험에 사용한 나노 재료는 전기적·열적 성능이 우수한 MWCNT를 사용하였다. MWCNT의 평균 직경은 1 nm~10 nm이고, 길이는 100 nm~1 cm이다. MWCNT의 밀도는 1.33 g/cm로 전기 전도도가  $0.17\sim 2 \times 10^5$  S/cm이고 열전도도는 3,000 W/m·K이다. MWCNT는 구리에 비해 전기전도도는 약 100배 이상, 열전도도는 7.5배 우수하다. Sobolkina et al. (2012)과 Al-Dahawi et al. (2016)에 따르면 MWCNT는 순도 99%로 기능화 된 수용액 상태일 때 시멘트 재료에서 분산성 확보가 유리하였다. 따라서 MWCNT 수용액은 선행연구(Lee et al., 2017; Lee, Park et al., 2020; Lee, Yu et al., 2020)를 함께 참고하여 22 kHz 초음파를 활용하여 폴리아크릴산(Polyacrylic acid)에서 2시간 동안 분산시킨 후 사용하였다.

본 연구는 Fig. 1과 같이 각 발열체에 전압을 공급하기 위하여 큐브형과 큐보이드형 각각에 스테인레스 스틸 메쉬

를 삽입하였다. 큐브형의 경우 mesh 사이의 간격이 25 mm가 되도록 중앙에 설치하였다. 큐보이드형의 경우 300 mm 변의 양 끝으로부터 각 15 mm 떨어진 위치에 삽입하였다. 열전대는 전압을 공급함에 따라 상승하는 발열체의 온도를 측정하기 위하여 설치하였다. 설치 위치는 열전대의 단부가 큐브형과 큐보이드형 발열체의 정중앙으로 선정하였다(Fig. 1). 발열체의 제작 배합비는 물/시멘트비를 50%로 선정하고, 표준사는 시멘트 중량 대비 2.5배를 혼합하였다. 발열체의 배합비는 물 0.5, 시멘트 1, 모래 2.5 그리고 MWCNT는 0.01로 설정하였다.

Fig. 2는 발열체의 제작과정이다. 발열체는 선정된 배합비에 따라 재료를 계량한 후 2분간 건비빔을 진행하였다. 이후 수용액 형태로 분산된 MWCNT를 추가로 넣어 3분간 배합하였다. 배합이 완료된 후에는 큐브형의 경우 높이가 약 150~200 mm가 되도록 몰드에 3회 나누어서 타설하며 한 층에서 각 다짐봉 면적당 약 40회 다짐을 실시한 후 스테인레스 스틸 메쉬와 열전대를 삽입하였다. 큐보이드형의 경우 높이가 약 200 mm가 되도록 몰드에 5회 나누어 타설하며 마찬가지로 한 층에서 각 다짐봉 면적당 약 40회씩 다짐을 실시한 후 스테인레스 스틸 메쉬와 열전대를 삽입하였다.

발열 실험은 큐브형과 큐보이드형 발열체에 전압을 공급하여 발열 성능을 확인하였다. 전압 공급은 Fig. 3의 직류 전압 공급기(DC Power Supply, EX-200)를 이용하며, 큐브형과 큐보이드형 발열체 각각에 삽입된 스테인레스 스틸 메쉬

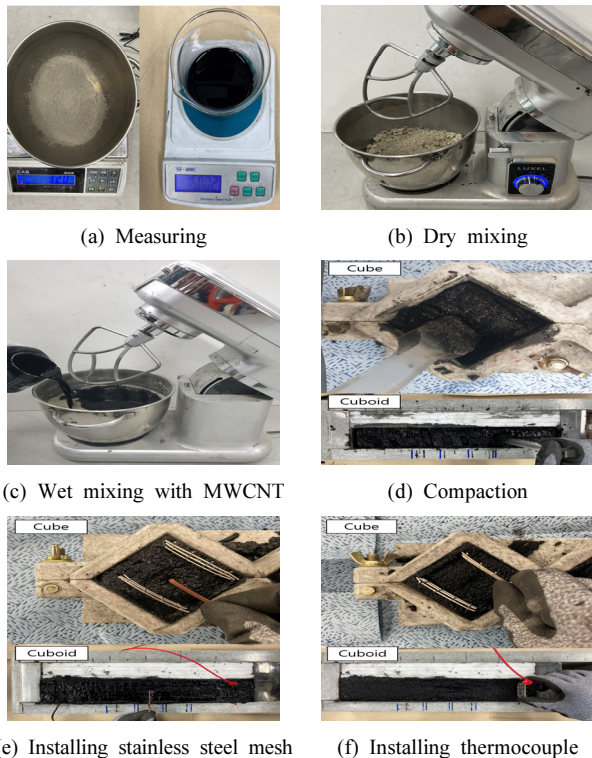


Fig. 2. Fabrication Process of Specimens

에 물린 악어클립에 (+)전극과 (-)전극을 연결하였다. 전압 공급 시간은 60분으로 통일하였다. 전압 공급에 따른 발열체의 온도 변화는 중심부에 설치된 열전대를 정적 데이터 로거(Static Data Logger, TDS-303)에 연결하여 측정하였다. 모든 실험은 공급되는 전류가 외부로 흐르는 것을 방지하기 위해서 절연 고무판 위에서 진행하였다. 또한 발열체의 표면 온도와 온도 분포는 열화상 카메라(Thermal Imaging Camera, Testo 882)를 사용하여 분석하였다. 본 연구에서는 시간-온도 그래프는 전압 공급 시 초기 외기 온도를 고려하여 최종 발열 값에서 초기 외기 온도 값을 뺀 상대 온도 변화량( $\Delta T$ )으로 제시하였으며, 열화상 이미지 분석은 초기 외기 온도를 그대로 반영한 절대 온도를 분석하였다. 또한 본 논문은 동일 실험을 각 3회씩 진행했을 시 측정값들이 평균점을 기준으로  $\pm 6\%$  이내에 분포하는 것으로 확인되었기에 평균 값을 그래프로 나타내었다.

### 3. 실험 결과

Fig. 4는 양생 7일과 28일의 큐브형 발열체의 시간-온도 그래프이다. 양생일이 7일인 큐브형 발열체(Fig. 4(a))은 전

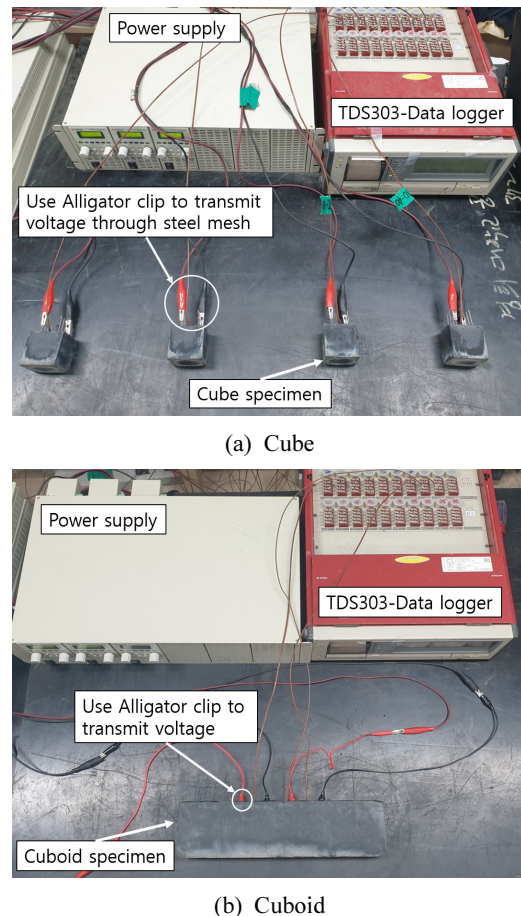


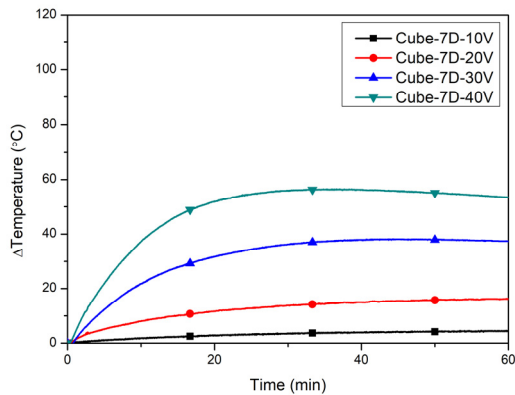
Fig. 3. Heating Test Set-Up

압 10 V를 공급했을 때 5.6 °C, 20 V를 공급했을 때 16.9 °C, 30 V를 공급했을 때 38.2 °C, 40 V를 공급했을 때 56.5 °C의 최대 발열량이 발생하였다. 실험 결과, 큐브형 발열체의 최대 발열량은 공급 전압이 커질수록 증가하는 것으로 분석되었다. 10 V와 20 V를 공급하는 경우에는 균열이 발생하지 않고, 안정적으로 온도가 유지되었다. 30 V를 공급했을 경우에는 온도구배가 상승하였고, 약 40분부터는 큐브형 발열체에 균열이 발생하였다. 40 V를 공급했을 경우에는 약 35분부터 균열이 발생하였다. 양생일이 7일인 큐브형 발열체는 30 V와 40 V를 공급할 시 온도 변화량이 급격하게 증가하여 균열이 발생한 것으로 판단된다. 양생 28일 큐브형 발열체(Fig. 4(b))에 10 V 전압을 공급했을 경우에는 최대 발열량이 11.2 °C, 20 V에서는 24.2 °C, 30 V에서는 48.6 °C, 40 V에서는 75.7 °C가 발생하였다. 큐브형 발열체의 양생 7일과 28일을 비교한 결과, 20 V 이하에서는 온도 상승이 저조하나 30 V 이상에서는 상대적으로 급격한 온도 변화를 보이며 상승함을 확인하였다. 또한 공급 전압이 증가함에 따라 큐브형에서의 온도 상승률은 10 V 대비 20 V로 전압상승 시 최대 2배 이상 증가하였다.

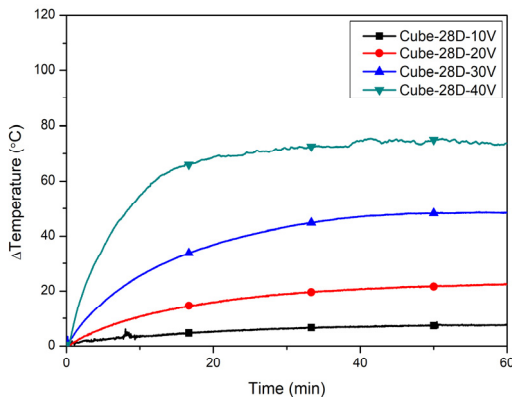
Fig. 5는 큐보이드형 발열체에 대한 실험 결과이다. 양생

7일 큐보이드형 발열체(Fig. 5(a))는 30 V 전압을 공급했을 때 1.2 °C, 50 V의 전압을 공급했을 때 3.2 °C, 100 V의 전압을 공급했을 때 12.3 °C, 150 V의 전압을 공급했을 때 31.9 °C, 200 V의 전압을 공급했을 때 53.6 °C가 상승하였다. 양생 28일 큐보이드형 발열체(Fig. 5(b))는 30 V 전압을 공급했을 때 1.1 °C, 50 V의 전압을 공급했을 때 3.8 °C, 100 V의 전압을 공급했을 때 12.7 °C, 150 V의 전압을 공급했을 때 32.2 °C, 200 V의 전압을 공급했을 때 59.8 °C 상승하였다. 큐보이드형 발열체의 발열 성능은 큐브형과 마찬가지로, 7일 양생한 발열체보다 28일 양생한 발열체의 발열 성능이 더 뛰어남을 확인하였다. 또한 공급 전압에 따른 온도 변화량은 7일 양생한 큐보이드형에서 50 V와 100 V의 상승률로 비교했을 때 최대 2.8배 상승함을 확인하였다.

발열 효율 측면에서는, 큐보이드형 발열체에 일반적으로 일상에서 사용하는 220 V 이하의 전압인 200 V를 공급했을 시 28일 양생 시편 기준 59.8 °C의 발열을 보이며 도로살얼을 방지를 위한 충분한 발열 성능을 갖추었음을 확인하였다. 큐브형과 큐보이드형에 동일하게 30 V를 공급했을 경우에는 큐브형이 큐보이드형에 비하여 발열 성능이 28일 양생 기준으로 약 47 °C로 7일 양생 기준보다 약 10 °C 더 높게

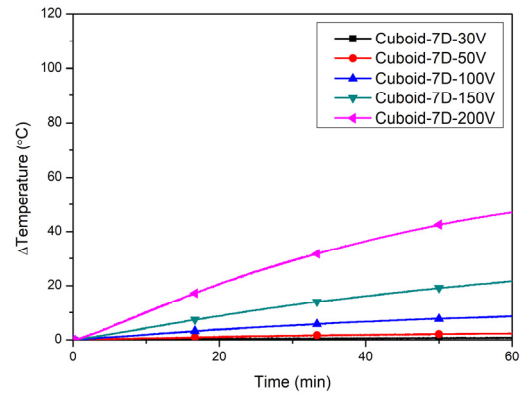


(a) Curing 7 days

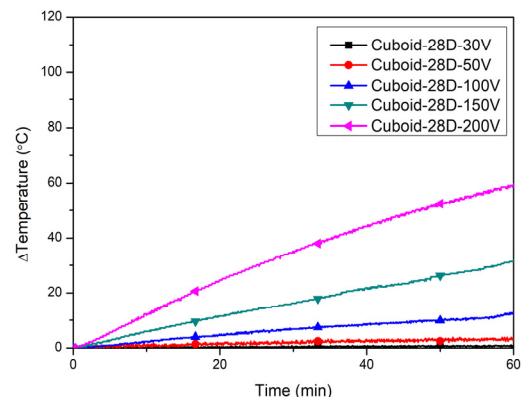


(b) Curing 28 days

Fig. 4. Results of Cube Heating Test

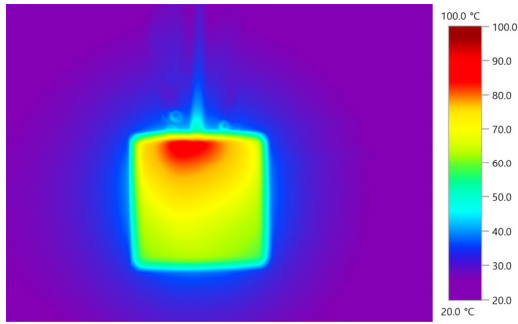


(a) Curing 7 days

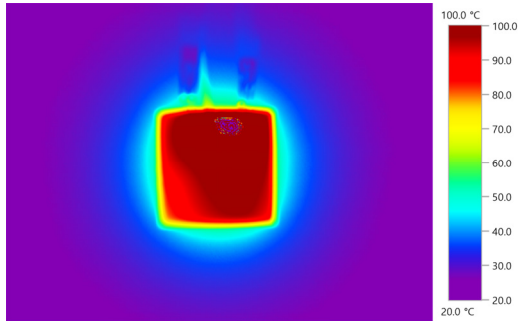


(b) Curing 28 days

Fig. 5. Results of Cuboid Heating Test



(a) Curing 7 days



(b) Curing 28 days

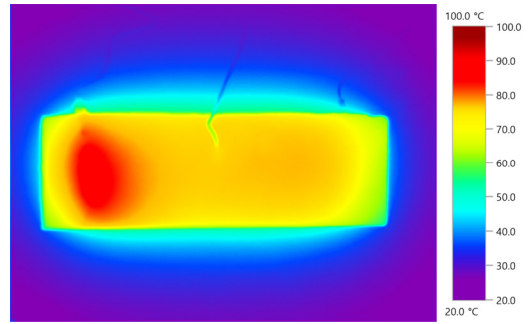
**Fig. 6.** The Thermal Image of the Cube Heating Module

나타났다. 시간이력에 따른 온도 상승 양상을 분석한 결과, 큐브형에서는 초기 약 10분간의 온도 변화량이 가파르게 나타났고, 그 이후로는 점차 완만하게 수렴하는 형태임을 확인하였다. 큐보이드형에서는 큐브형에 비하여 초기 온도 변화량이 완만하며, 전압을 공급하는 60분 동안 꾸준히 온도가 상승하는 직선에 가까운 형태를 보였다. 큐브형은 발열체의 부피가 작기에 발열체 전체로 열을 전달하는 데 짧은 시간이 필요하여 초기 온도가 빠르게 상승하였다. 큐보이드형은 발열체의 부피가 상대적으로 크기에 발열체 전체로 열을 전달하는데 상대적으로 시간이 오래 걸린 것으로 분석되었다. 발열체의 부피가 클수록 온도 전달에 걸리는 시간이 필요하므로, 초기 온도구배가 더 완만한 것으로 판단된다.

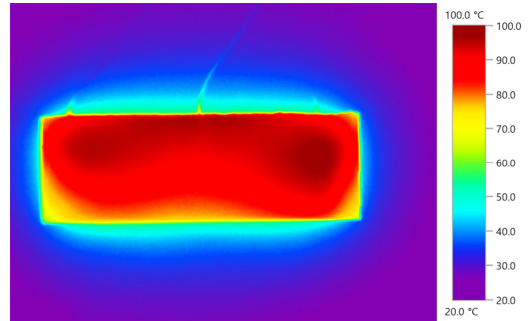
Figs. 6과 7은 양생 7일과 28일의 큐브형과 큐보이드형 발열체의 발열실험 중 촬영한 열화상 이미지이다. 열화상 이미지를 통해 발열체의 양생일 증가에 따른 열의 분포 형태와 표면 온도를 육안으로 확인하였다.

발열 형태는 큐브형과 큐보이드형 발열체 모두 스틸 메쉬가 설치된 지점부터 발열이 시작되며 주변으로 열이 확산되는 형태를 보였다. 양생일에 따른 발열 형태 비교 결과는 7일 양생한 큐브형과 큐보이드형 발열체가 28일 양생한 발열체에 비해 발열 면적이 좁음을 확인하였다. 28일 양생한 큐브형과 큐보이드형 발열체는 발열 면적이 양생 7일보다 더 넓음을 확인하였다.

크기에 따른 발열 형태 비교 결과는 큐브형 발열체의 발열 성능이 큐보이드형 발열체에 비하여 우수하고 열의

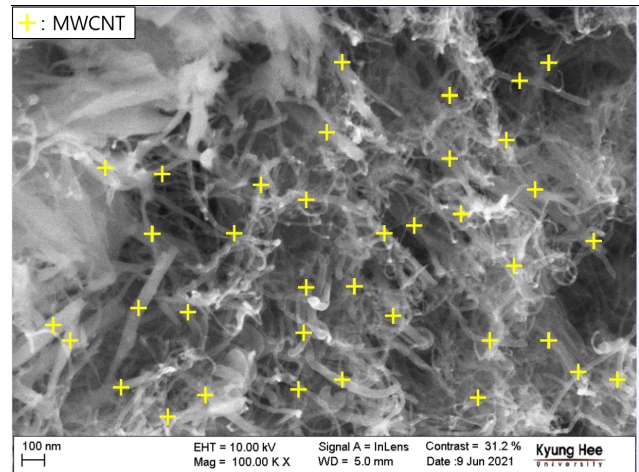


(a) Curing 7 days



(b) Curing 28 days

**Fig. 7.** The Thermal Image of the Cuboid Heating Module



**Fig. 8.** FE-SEM Image

분포도 더 응집되어 나타남을 확인하였다. 또한 큐보이드형은 큐브형에 비하여 스틸 메쉬 전극 사이 거리가 멀어짐에 따라 더 넓은 발열 면적을 가지게 되기 때문에, 열 분산성이 증가한 형태를 보였다. 도로살얼음 문제는 좁은 면적에서 높은 온도의 발열 성능을 가지는 것보다, 넓은 면적의 결빙구간을 영상 온도로 유지하는 것이 해결하기에 효율적이다. 따라서 발열체는 넓은 발열 면적과 열 분산성을 가지며 용빙이 가능한 온도의 발열 성능을 유지하여야 한다. 이러한 관점에서 큐보이드형 발열체는 전압 공급 시 넓은 발열

면적을 가지게 됨에 따라 충분한 발열 효율을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 FE-SEM 촬영 이미지를 확인한 결과, MWCNT가 배합과정에서 응집현상 없이 분산이 우수하게 형성된 것을 확인하였다(Fig. 8).

#### 4. 결론

본 연구는 나노재료를 혼입한 발열체의 크기에 따른 발열 효율 분석을 위한 발열 실험을 수행하였다. 발열 실험 수행 결과, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- (1) MWCNT를 혼입한 발열체는 7일 양생 시편보다 28일 양생한 시편의 발열 성능이 더 우수하였다. 28일 양생 시편이 7일 양생 시편 대비 큐브형에서 최대전압 40 V 공급 시 최대 34%, 큐보이드형에서 최대전압 200 V 공급 시 최대 12% 증가하였다. 따라서 양생 초기의 발열체는 전압 공급 시 수분 영향으로 인하여 온도 변화량이 낮게 발생한 것으로 판단된다.
- (2) 큐브형과 큐보이드형의 크기는 전압 공급 시 온도 상승량에 영향을 미치는 요소임을 확인하였다. 크기가 다른 각 시편에 동일한 30 V 전압을 공급했을 때, 큐브형은 온도 변화량이 최대 48.6 °C까지 나타나며 큐보이드형 보다 44배 높은 온도 변화량이 발생하였다. 이러한 이유는 전압을 공급할 시 발열체 크기 차이로 인하여 큐보이드형 발열체에서 더 많은 에너지가 소모되기 때문으로 분석되었다.
- (3) 열화상 이미지 분석 결과, 큐브형의 경우에는 발열 면적이 협소하기 때문에 열 분산성이 낮고, 큐보이드형의 경우에는 열 분산성이 높았다. 따라서 큐보이드형은 넓은 발열 면적으로 인하여 열 분산성이 우수한 것으로 분석되었다.
- (4) 큐브형과 큐보이드형 발열체는 일정 수준 이상의 발열 성능을 확보하였으나, 발열 면적을 분석하였을 시 큐보이드형의 열 분산성이 우수한 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구는 큐보이드형 발열체가 도로살얼음을 해결하기에 효과적인 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(No.21CTAP-C157603-02).

#### References

Al-Dahawi, A., Öztürk, O., Emami, F., Yıldırım, G., and Şahmaran, M. (2016). Effect of mixing methods on the electrical properties of cementitious composites incorporating different carbon-based materials. *Construction*

*and Building Materials*, Vol. 104, pp. 160-168.

ASTM C109/C109M-20b. (2020). *Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] cube specimens)*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

García-Macías, E., D'Alessandro, A., Castro-Triguero, R., Pérez-Mira, D., and Ubertini, F. (2017). Micromechanics modeling of the electrical conductivity of carbon nanotube cement-matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 108, pp. 451-469.

Hamzaoui, R., Bennabi, A., Guessasma, S., Khelifa, R., and Leklou, N. (2012). Optimal carbon nanotubes concentration incorporated in mortar and concrete. In *Advanced Materials Research* (Vol. 587, pp. 107-110). Trans Tech Publications Ltd.

Kim, G.M., Naeem, F., Kim, H.K., and Lee, H.K. (2016). Heating and heat-dependent mechanical characteristics of CNT-embedded cementitious composites. *Composite Structures*, Vol. 136, pp. 162-170.

Kim, H., and Ban, H. (2017). An experimental approach to investigate the heat transferring effect of carbon nanotube on the concrete slab. *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 18, No. 12, pp. 59-63.

Kim, H.K., Nam, I.W., and Lee, H.K. (2014). Enhanced effect of carbon nanotube on mechanical and electrical properties of cement composites by incorporation of silica fume. *Composite Structures*, Vol. 107, pp. 60-69.

Kim, J.Y., Lee, H.J., and Paik, J.R. (2020). Survey of distinction of black ice using sensors. *Proceedings of the Korean Society of Computer Information Conference*, Vol. 28, No. 1, pp. 79-81.

Konsta-Gdoutos, M.S., and Aza, C.A. (2014). Self sensing carbon nanotube (CNT) and nanofiber (CNF) cementitious composites for real time damage assessment in smart structures. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 53, pp. 162-169.

KSL 5201. (2016). *Portland cement*. Korean Standards Association.

KSL ISO 679. (2011). *Methods of testing cements determination of strength*. Korean Standards Association.

Kwon, W.R., Lee, S.J., and Jang, S.H. (2020). Development of Self-heating Transport Road Coating for De-icing. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, pp. 71-72.

Lee, H., Kang, D., Song, Y.M., and Chung, W. (2017). Heating experiment of CNT cementitious composites with single-walled and multiwalled carbon nanotubes.

- Journal of Nanomaterials*, Vol. 2017, pp. 12 pages.
- Lee, H., Park, S., Cho, S., and Chung, W. (2020). Correlation analysis of heating performance and electrical energy of multi-walled carbon nanotubes cementitious composites at sub-zero temperatures. *Composite Structures*, Vol. 238, 111977.
- Lee, H., Song, Y.M., Loh, K.J., and Chung, W. (2018). Thermal response characterization and comparison of carbon nanotube-enhanced cementitious composites. *Composite Structures*, Vol. 202, pp. 1042-1050.
- Lee, H., Yu, W., Loh, K.J., and Chung, W. (2020). Self-heating and electrical performance of carbon nanotube-enhanced cement composites. *Construction and Building Materials*, Vol. 250, 118838.
- Morsy, M.S., Alsayed, S.H., and Aqel, M. (2011). Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 1, pp. 145-149.
- Nan, C.W., Liu, G., Lin, Y., and Li, M. (2004). Interface effect on thermal conductivity of carbon nanotube composites. *Applied Physics Letters*, Vol. 85, No. 16, pp. 3549-3551.
- Park, S., Lee, H., and Chung, W. (2018). Experimental Study on Voltage Supply Efficiency of Nano Cement Composite for Prevention of Road Icing. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 6, pp. 221-228.
- Park, S., Park, S., Cho, S., Lee, H., and Chung, W. (2018). Experimental Study on Heating Performance of MWCNT Cementitious Composites by Supplied Voltage. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 30, No. 2, pp. 593-594.
- Seong, J., Park, S., Lee, H., and Chung, W. (2018). A study on heating performance of MWCNT cementitious composites by curing days. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 30, No. 2, pp. 477-478.
- Seong, J.K. (2020). *Thermal response and strength properties of CNT cement composites according to curing conditions*. Master's thesis, KyungHee University.
- Sobolkin, A., Mechtcherine, V., Khavrus, V., Maier, D., Mende, M., Ritschel, M., and Leonhardt, A. (2012). Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, No. 10, pp. 1104-1113.
- Zhang, Q., and Li, H. (2011). Experimental investigation on the ice/snow melting performance of CNFP & MWCNT/cement-based deicing system. *Proceedings of the 6th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology*, Dalian, China, pp. 25-26.

---

<b>Received</b>	August 17, 2021
<b>Revised</b>	August 19, 2021
<b>Accepted</b>	August 30, 2021