탄소나노재료를 혼입한 나노 보도블럭의 발열성능

Heating Performance of Nano-Sidewalk Blocks Containing Carbon Nano Material

김영환* · 유원준** · 김동휘*** · 정원석**** · 이희영*****

Kim, Younghwan*, Yu, Wonjun**, Kim, Donghwi***, Chung, Wonseok****, and Lee, Heeyoung*****

Abstract

Recently, the occurrence of freezing accidents in the winter has increased, as subzero temperatures have decreased rapidly. Several studies have been conducted on the prevention of freezing accidents in the winter. In this study, the heating and electrical performance of nano-sidewalk blocks mixed with multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs) were evaluated. The parameters were the curing duration, MWCNT concentration, and supply voltage. The size of the interlocking block specimen was 200 mm × 100 mm × 60 mm. The heating performance of the specimens increased by 12.3 times, with an increase in the MWCNT concentration and supply voltage.

Key words : Carbon Nano Material, MWCNT, Sidewalk Block, Heating Performance

요 지

최근, 영하의 온도가 급격하게 감소함에 따라 겨울철 결빙사고가 증가하고 있다. 겨울철 결빙사고를 해결하기 위한 연구는 많이 수행되고 있지만, 보도블럭의 빙판길 결빙사고를 해결하기 위한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 결빙사고 예방을 위한 기초연구로써 다중벽 탄소나노튜브(Multi-Walled Carbon Nanotube, MWCNT)를 혼입한 나노 보도블럭의 발열성능에 대해 연구하고자 한다. 매개변수는 양생일, MWCNT 혼입농도, 공급전압이며, 실험체는 크기가 200 × 100 × 60 mm³인 인터록킹 블럭형이다. 실험결과, 발열성능은 MWCNT 혼입농도와 공급전압이 증가할수록 최대 12.3배 향상되었다.

핵심용어 : 탄소나노재료, MWCNT, 보도블럭, 발열성능

1. 서 론

최근, 지구온난화와 이상기후로 겨울철 영하의 온도가 급격하게 감소함에 따라 겨울철 사고가 증가하고 있는 추세이다. 겨울철 영하의 온도에서 도로의 경우에는 도로 결빙, 블랙아이스 등으로 인한 다수의 차량사고가 발생하며, 사람이 다니는 인도의 경우에는 빙판길로 인한 결빙

사고가 발생한다. 서울 소방 재난본부의 조사에 따르면 지난해 겨울철 결빙사고로 인한 피해자는 해가 거듭될수록 증가하고 있다. 시멘트 기반 재료에 다중벽 탄소나노튜브(Multi-Walled Carbon Nanotube, MWCNT)를 혼입하는 연구는 겨울철 도로 빙판길 사고를 해결하기 위하여 수행되고 있으며 MWCNT를 혼입한 시멘트 기반 재료의 압축강도시험, Pull-out 테스트를 통한 부착강도 향상 확인 등 역학적

*정회원, 조선대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: mabula@hanmail.net)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Chosun University

**정회원, 경희대학교 사회기반시스템공학과 석사과정

Member, Master's Course, Department of civil Engineering, Kyunghee University

***정회원, 경희대학교 사회기반시스템공학과 석사과정

Member, Master's Course, Department of civil Engineering, Kyunghee University

****정회원, 경희대학교 사회기반시스템공학과 교수

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Kyunghee University

*****교신저자, 정회원, 조선대학교 토목공학과 조교수(Tel: +82-63-230-7087, Fax: +82-62-608-5216, E-mail: heeyoung0908@chosun.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Chosun University

성능 향상에 대한 연구가 많이 수행되었다(Morsy et al., 2011; Hamzaoui et al., 2012; Lee, Jeong, et al., 2020). 최근에는 탄소나노튜브(Carbon Nanotube, CNT)가 금속 재료인 구리에 비해 열전도율이 7.5배, 전기전도율이 100배 우수하기 때문에 시멘트 기반 재료와 혼합하여 전기전도성 및 발열 성능에 대한 연구가 진행 중이다. Nan et al. (2004)은 탄소나노튜브를 혼합한 시멘트 복합체의 열전도도와 CNT의 관계를 공식화하였다. Li et al. (2007)은 황산과 질산을 함께 혼합한 시멘트 기반 CNT-복합체의 전기 저항에 대해 연구하였다. 연구 결과, 전자 현미경을 통하여 황산과 질산을 함께 혼합한 CNT-복합체와 혼합하지 않은 CNT-복합체 모두 CNT가 균일하게 분산된 것을 확인하였다. Zhang and Li (2011)는 MWCNT를 혼입한 시멘트 복합체의 도로 용빙 시스템에 대해 연구하였다. 영하의 온도에서 얼음을 녹이는 실험을 진행하였고 MWCNT가 3.0 wt% 혼입하면 2.83 W/m²·K의 열전도율을 생성하여 도로 용빙 시스템이 가능한 것으로 분석되었다. Kim et al. (2014)은 실리카폼과 CNT를 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 압축강 감도에 대해 연구하였다. 0.1 wt%의 CNT와 CNF를 혼합한 복합체에서 가장 높은 압축강 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 mm³이다. 연구 결과, 2.0 wt% 복합체는 10 V 전압을 공급하면 67.8 °C의 발열량이 나타났고 CNT의 혼합 농도가 증가할수록 발열 성능은 개선되었다. Lee et al. (2017)은 서로 다른 종류의 CNT를 혼입한 시멘트 복합체의 발열성능에 대하여 연구하였다. CNT 종류는 Single-walled Carbon Nanotube (SWCNT)와 MWCNT이다. 연구 결과, SWCNT를 혼입한 시멘트 복합체의 발열량이 최대 64.2 °C로, 동일한 조건에서 MWCNT를 혼입한 시멘트 복합체에 비해 3.3배 우수하였다. García-Macías et al. (2017)은 MWCNT를 혼입한 다양한 시멘트 복합체의 전기전도성에 대해 연구하였다. 시멘트 복합체의 종류는 시멘트 페이스트, 모르타르, 콘크리트이고, MWCNT 혼합 농도는 시멘트 중량 대비 1.0 wt%이다. 실험 결과, 동일한 농도를 혼합하는 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%이다. 실험 결과, 발열 성능은 모래에 코팅하는 방법이 수용액으로 혼합하는 것보다 2배 우수하였고 MWCNT 농도가 증가할수록 다수의 CNT-network가 형성되었기 때문에 증가한 것으로 분석되었다. Park 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 mm³이고 매개변수는 전압 공급 위치이다. 실험 결과, 동일한 접안을 공급하면 전압 공급 위치를 분산하고 간격이 좁을수록 발열 효율에 유리한 것으로 분석된다. Lee et al. (2019)은 CNT의 열적 및 전기적 특성을 이용한 그라우트의 충전을 측정에 대해 연구하였다. 연구 결과, CNT의 percolation threshold는 0.2 wt% 이상이며, 내부 그라우트의 온도 변화에 따른 열화상 분석이 가능한 것으로 판단된다. Kim et al. (2020)은 CNT를 이용한 제빙의 효율성을 조사하기 위해 실내 실험, 수치 해석 및 현장 실험을 수행하였다. 연구 결과, 유효 발열 거리 사이에서 녹아 제빙 가능성을 확인하였다.

앞서 설명했듯이 탄소나노재료를 혼합한 시멘트 기반 복합체의 발열성능에 대한 연구는 진행되고 있다. 하지만 시멘트 기반 복합체는 구조물에서 활용되는 페이스트와 모르타르, 콘크리트에 대한 연구만 수행되었다. 또한 시멘트 재료인 보도블럭에 대한 연구는 투수성 및 강도 등의 연구만 특정되어 진행되고 있는 추세이다. 따라서 본 연구에서는 빙판길에 사용되는 보도블럭에 나노재료를 혼입함으로써 자체 발열성능을 지니게 되는 나노 보도블럭에 대해 연구하고자 한다. 열화상카메라를 이용하여 발열시 시편의 온도를 측정하여 이미지화 하고자 하며 보도블럭의 공급대비 소비 전력을 분석하여 공급전압과 소비전력의 상관관계를 연구하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 실험 매개변수

보도블럭 실험체는 Fig. 1과 같이 크기가 200 × 100 × 60 mm³인 인터록킹 블록 I 형으로 선정하였다. 실험체의 두께는 국내 KS F 4419 (2016) 기준인 “보차도용 콘크리트 인터록킹 블록”에 의거하여 보도용의 두께 60 mm로 선정하였다. 나노 보도블럭 실험체는 30 cm 높이를 기준으로 두 개의 층으로 나누어진다. 첫 번째 층은 나노재료가 혼합된 층이고 두 번째 층은 나노재료가 혼합되지 않은 층이다. 나노 보도블럭의 매개변수는 MWCNT 혼합 농도와 양생일, 공급 전압으로 선정하였다. MWCNT 혼합 농도는 시멘트 중량대비 0.0 wt%, 0.5 wt%, 1.0 wt%이고 양생일은 초기 양생 7일과 압축강도 기준인 28일, 공급전압은 10 V, 30 V이다. 매개변수에 따른 나노발열 보도블럭 실험체는 Table 1에 정리하였다.

Fig. 1. Specimen of Nano Sidewalk Block

Table 1. Parameter of Nano Sidewalk Block

Specimen name	Curing days	MWCNT concentration (%)	Voltage (V)
B-7D-0.0	7D	0.0	10 V/30 V
B-7D-0.5		0.5	
B-7D-1.0		1.0	
B-28D-0.0	28D	0.0	
B-28D-0.5		0.5	
B-28D-1.0		1.0	

2.2 사용 재료

나노 보도블럭 실험체는 탄소나노재료, 시멘트, 모래를 사용하여 제작한다. 본 연구에서는 다양한 탄소나노재료 중에서 전기적·열적 성능이 우수한 MWCNT를 혼입하여 수행한다. 실험에 사용되는 MWCNT는 순도 99%로 기능화된 수용액 상태로 시멘트 재료에서 분산성을 확보하는데 유리한 것으로 나타났다(Sobolkina et al., 2012; Al-Dahawi et al., 2016). MWCNT 수용액은 22 kHz 초음파를 활용하여 폴리아크릴산(Polyacrylic acid)에서 2시간 동안 분산되었다(Lee, Yu, et al., 2020).

Table 2는 본 연구에서 사용된 MWCNT의 특성이다. 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/cm 이고 열전도도는 3,000 W/m · K이다. MWCNT는 구리에 비해 전기전도도는 약 100배 이상, 열전도도는 7.5배 우수하다. MWCNT는 디토테크놀로지에서 구매하였으며 MWCNT 수용액은 2시간 동안 22 kHz 초음파를 활용하여 분산하였다. 나노 보도블럭에 사용된 시멘트는 일반적인 포틀랜드 시멘트이며(KCS 14 20 10, 2016; KS L 5201, 2016), 사용된 모래는 KS L ISO 679 (2011) 표준 규격의 비중이 2.6~2.67, 균등 계수는 1.0~1.93인 표준사이다.

Table 2. Properties of MWCNT

Material	Structure	Modulus of Elasticity	Electrical conductivity	Thermal conductivity	Purity
MWCNT	Diameter: 1 nm~10 nm length: 100 nm~1 cm	0.27~0.95 TPa	$0.17 \sim 2 \times 10^5$ S/cm	3,000 W/m · K	99%

2.3 실험체 제작

본 연구는 나노 보도블럭에 전압을 공급하기 위하여 MWCNT가 혼입된 첫 번째 층에 Stainless steel mesh를 100 mm 간격으로 설치하였다. 두 번째 층은 기존에 설치된 Mesh를 보호하기 위해 $20 \times 40 \times 30$ mm³ 크기의 캡을 설치하였다.

Thermalcouple은 공급 전압에 의해 발생하는 나노 보도블럭의 중심부 온도를 측정하기 위하여 MWCNT가 혼입된 첫 번째 층에 삽입하였고, 나노 보도블럭의 열확산도를 확인하기 위하여 두 번째 층에도 삽입하였다.

나노 보도블럭의 배합비는 물/시멘트비를 50%로 선정하고, 표준사는 시멘트 중량 대비 2.5배를 혼합하였다. 나노 보도블럭의 배합비는 Table 3과 같다.

Table 3. Mixing Ratio of Nano-Sidewalk Block

W/C (%)	MWCNT Solution (g)	Cement (g)	Sand (g)
50	384	768	1,920

Fig. 2는 나노 보도블럭의 제작과정이다. 나노 보도블럭은 배합비에 맞게 재료를 계량한 후에 수용액으로 분산된 MWCNT를 3분간 배합하였다. 배합이 완료되면 높이 30 cm가 되도록 몰드에 3회 나누어서 타설하며 1회당 약 30회 다짐을 실시한 후에 Stainless steel mesh와 Thermalcouple을 삽입하였다. MWCNT가 혼합된 첫 번째 층 타설이 완료되면 상온에서 1일 양생 후에 두 번째 층 타설을 진행하였다. 두 번째 층 타설은 앞서 언급한 순서와 동일하게 수행하였고 일반 모르타르로 타설하였다.

2.4 발열 성능 실험

나노 보도블럭 실험체의 발열 성능 실험은 전압을 공급함으로써 진행된다. 전압 공급은 Fig 3과 같이 직류 전압 공급기(DC Power supply, EX-200)를 나노 보도블럭에 삽입된 Stainless steel mesh에 (+), (-)전극을 연결함으로써 수행된다. 전압을 공급한 시간은 모두 동일하게 60분이다. 공급 전압에 의해 발생하는 나노 발열 보도블럭의 온도 변화는 중심부에 설치된 Thermalcouple를 정적데이터로거(TDS-303)에 연결하여 측정되고 공급되는 전류가 외부로 흐르는 것을 방지하기 위해서 절연 고무판 위에서 진행하였다. 또한 실험체의 표면온도를 육안으로 확인하기 위해 열화상 카메라(Testo 882)를 사용하여 측정하였다.

Fig. 2. Specimen Fabrication Progress

Fig. 3. Thermal Conductivity Test Set-up

3. 실험 결과

3.1 발열 실험 분석

Fig. 4는 양생 7일 나노 보도블럭의 매개변수에 따른 시간-온도 그래프이다. 10 V 전압을 공급하는 경우, 혼합농도에 따른 온도변화량은 0.0 wt%가 4.2 °C, 0.5 wt%는 5.2 °C, 1.0 wt%는 6.6 °C 상승하였다. 30 V 전압을 공급하는 경우에는 0.0 wt%가 21.3 °C로 Mesh 간격이 조밀하게 설치되어 있기 때문에 열선과 같은 원리로 온도변화량이 증가한 것으로 분석된다. 0.5 wt%는 28.2 °C로 0.0 wt% 보다 6.9 °C 상승하였고, 1.0 wt%는 45.1 °C로 가장 높은 온도변화량이 발생하였다. 하지만 1.0 wt%는 높은 발열량으로 인한 나노 발열 보도블럭 내부에 균열이 발생하고 CNT-network가 높은 온도인하여 파괴되었기 때문에 최고 발열량이 발생한

이후에는 다시 감소하는 현상이 나타난 것으로 분석되었다 (Lee et al., 2019). 나노 보도블럭의 발열성능은 MWCNT 혼합농도가 증가할수록 다수의 CNT-network가 형성되어 발열성능이 향상된 것으로 판단된다.

Fig. 4. Temperature Change of MWCNT Layer at 7 Days

Fig 5는 양생 7일 나노 보도블럭의 두 번째 층에서 발생한 시간에 따른 온도변화량이다. 나노 보도블럭에 10 V 전압을 공급하는 경우, 두 번째 층의 온도변화량은 0.0 wt%가 1.9 °C, 0.5 wt%는 2.1 °C, 1.0 wt%는 2.3 °C 증가하였다. 30 V 전압을 공급하는 경우에는 0.0 wt%가 8.9 °C로 0.5 wt%는 12.4 °C로 0.0 wt% 보다 3.5 °C 증가하였다. 1.0 wt%는 16.4 °C로 양생 7일 나노 보도블럭 중에서 가장 높게 나타났다. 나노 보도블럭의 두 번째 층 온도변화량은 첫 번째 층의 MWCNT 혼합농도가 증가할수록 상승하였다. 본 연구는 나노 보도블럭 내부에 분포된 MWCNT의 양이 증가하기

때문에, 첫 번째 층의 열확산도가 증가하여 두 번째 층에서도 온도변화량이 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 5. Temperature Change of OPC Layer at 7 Days

매개변수에 따른 양생 28일 나노 보도블럭의 온도변화량은 Fig. 6에 나타나있다. 혼합농도에 따른 발열량은 0.0 wt%가 1.3 °C, 0.5 wt%가 2.2 °C, 1.0 wt%가 2.6 °C 발생하였다. 10 V 전압을 공급하는 경우에는 발열량이 전체적으로 5 °C를 넘지 않았고 양생 7일보다 최대 4.0 °C 감소하였다. 30 V 전압을 공급한 나노 보도블럭은 0.0 wt%가 16.3 °C로 양생 7일보다 5.0 °C 감소하였다. 0.5 wt%는 20.0 °C로 0.0 wt%보다 3.7 °C 증가하였지만, 동일한 농도로 혼합한 양생 7일보다 8.2 °C 감소하였다. 1.0 wt%는 32.2 °C로 양생 28일 나노 보도블럭 중에서 가장 우수하게 발생하였지만 동일한 농도의 양생 7일 실험체보다 12.9 °C 감소하였다. 그러나 양생 28일 된 나노 보도블럭은 양생 7일에서 발생한 최고 온도 발열량 이후 다시 감소하는 현상은 발생하지 않고 일정하게 유지하였다. 이는 나노 보도블럭 내부에서 균열이 발생하지 않았기 때문에 일정하게 유지되는 것으로 분석되었다.

Fig. 6. Temperature Change of MWCNT Layer at 28 Days

10 V 전압을 공급하는 경우, 양생 28일 나노 보도블럭의

두 번째 층에서 발생한 온도변화량은 Fig. 7이다. 혼합 농도에 따른 온도변화량은 0.0 wt%가 0.8 °C, 0.5 wt%가 1.2 °C, 1.0 wt%가 1.5 °C로 나타났다. 전체적으로 3 °C 이하로 발생하였다. 10 V 전압을 공급 시, 양생 28일 나노 보도블럭의 두 번째 층 온도변화량은 전체적으로 3 °C 이하로 발생하였다. 30 V 전압을 공급한 나노보도블럭의 두 번째층 온도변화량은 0.0 wt%가 5.1 °C로 양생 7일보다 3.4 °C 감소하였다. 0.5 wt%는 8.7 °C로 0.0 wt%보다 3.6 °C 증가하였지만, 동일한 농도의 양생 7일보다는 3.7 °C 감소하였다. 1.0 wt%는 12.8 °C로 양생 28일 실험체에서 가장 우수하게 발생했지만 동일한 혼합농도의 양생 7일보다 3.6 °C 감소하였다. 양생 28일 나노 보도블럭의 두 번째 층 온도변화량은 전체적으로 양생 7일 실험체보다 감소하였다. 이 결과는 양생 28일 나노 보도블럭의 발열성능과 열확산도가 수분의 영향으로 감소하였기 때문에 두 번째 층의 온도변화량도 감소한 것으로 판단된다.

Fig. 7. Temperature Change of OPC Layer at 28 Days

Table 4는 매개변수에 따른 나노 보도블럭의 최대 온도변화량을 정리한 것이다. 양생 7일 나노 보도블럭은 'B-7D-1.0'의 45.1 °C가 가장 높은 온도변화량으로 측정되었고 양생 28일은 'B-28D-1.0'의 32.2 °C가 가장 우수하였다. 나노 보도블럭의 발열성능은 공급전압과 MWCNT 혼합농도가 증가할수록 개선되었다. 이는 전기전도성과 온도가 비례관계이기 때문에 전기전도성과 관계가 있는 것으로 판단된다. 따라서 공급전압과 MWCNT 혼합농도가 증가함에 따라 나노 보도블럭의 전기전도성이 상승하였기 때문에 발열성능이 개선된 것으로 분석된다. 또한 나노 보도블럭은 양생일이 증가할수록 발열량은 감소하였다. 이 결과는 나노 발열 보도블럭 실험체에 존재하는 수분의 영향이 감소하여 양생 28일의 발열성능이 모두 감소한 것으로 판단된다(El-Enein et al., 1995; McCarter et al., 2000).

Fig. 8은 30 V 전압을 공급할 때 촬영한 매개변수에 따른 나노 보도블럭의 열화상 이미지이다. 열화상 촬영은 육안으로 발열성능을 확인하기 위해 수행하였다. 열화상 이미지는

Table 4. Maximum Temperature at MWCNT Layer by Voltage

Specimen name	Curing days	MWCNT concentration (%)	Temperature (°C)	
			10 V	30 V
B-7D-0.0	7D	0.0	4.2	21.3
B-7D-0.5		0.5	5.2	28.2
B-7D-1.0		1.0	6.6	45.1
B-28D-0.0	28D	0.0	1.3	16.3
B-28D-0.5		0.5	2.2	20.0
B-28D-1.0		1.0	2.6	32.2

Fig. 8. Thermal Image of Nano-Sidewalk Block (30 V)

열화상 카메라(Testo 882)로 최대온도가 발생한 보도블럭의 표면을 촬영하였다. 표면 온도는 전압을 공급하기 전 보도블럭의 중심온도에서 공급 전압에 의해 발생하는 온도변화량을 더하여 측정된다. 공급하기 전의 보도블럭의 온도는 평균적으로 16~18 °C로 측정되었다.

양생 7일된 나노 보도블럭의 MWCNT 혼합농도에 따른 열화상이미지는 Figs. 8(a)~(c)이다. 0.0 wt%의 표면온도는 37.3 °C로 mesh가 설치된 위치부터 발열성능이 발생하여 주변으로 열이 확산되는 것으로 나타났다. 0.5 wt%의 표면온도는 44.2 °C로 측정되었고 동일한 전압의 0.0 wt% 보다 발열이 넓게 확산되어 열 분포도가 증가한 것으로 나타났다. 1.0 wt%의 표면온도는 61.3 °C로 양생 7일 나노 보도블럭 중에서 가장 우수하였다. 1.0 wt% 혼입된 실험체는 실험체 전체적으로 넓게 발열량이 발생한 것으로 나타났기 때문에 열 분포도가 가장 우수한 것으로 판단된다. 나노 보도블럭의 발열성능은 MWCNT 혼합농도가 증가할수록 향상되는 것을 열화상 이미지를 통해 육안으로 확인하였고 발열성능에 의해 넓은 열분포도가 발생했기 때문에 두 번째 층에서의

온도변화량이 증가하는 것을 확인하였다.

Figs. 8(d)~(f)는 양생 28일된 나노 보도블럭의 열화상 이미지 결과이다. 0.0 wt%의 표면온도는 32.3 °C로 동일한 농도의 양생 7일보다 온도 변화량이 감소한 것을 열화상 이미지를 통해 육안으로 알 수 있었다. 0.5 wt%의 표면온도는 36.1 °C로 측정되었고 1.0 wt%의 표면온도는 48.4 °C로 전압을 공급하기 전의 온도보다 3.0배 증가하였다. 양생 28일된 나노 보도블럭 중에서 1.0 wt%의 발열량과 열분포도가 가장 우수하였지만 동일한 농도의 양생 7일 보다는 1.4배 감소하였다.

열화상 이미지를 통해 나노 보도블럭의 MWCNT 혼합농도가 증가할수록 발열성능과 열분포도가 증가한다는 것을 육안으로 확인하였다. 열화상 이미지는 나노 보도블럭의 발열성능이 증가할수록 뚜렷하고 선명하게 나타났으며 mesh가 설치된 중심부로부터 온도변화가 발생하였다. 나노 보도블럭은 양생일이 증가할수록 수분의 영향으로 열분포도와 발열성능이 감소하는 것을 확인하였다.

Figs. 9(a)와 (b)는 ‘B-28D-0.0’과 ‘B-28D-1.0’의 FE-SEM

(a) B-28D-0.0

(b) B-28D-1.0

Fig. 9. FE-SEM Images

촬영 이미지이다. 촬영 결과, 나노 보도블럭 내부에 MWCNT가 고르게 분산되어 있고 MWCNT가 수화물 사이를 연결하여 네트워크를 형성하였음을 확인하였다. 네트워크의 형상으로 나노 보도블럭의 발열 성능 및 전기 저항 성능이 향상된 것으로 판단된다.

3.2 소비 전력 분석

나노 보도블럭의 소비전력은 다음과 같이 3개의 식에 의해서 산정된다. Eq. (1)은 소비전력을 계산하는 공식으로, 소비전력은 공급전압과 전류를 곱함으로써 계산된다. 여기서, P 는 소비전력, V 는 공급전압, I 는 전류를 의미한다. 또한 1시간 동안 소비된 전력은 Eq. (2)와 같이 1 Wh로 정의가 되고 소비전력에 3,600초를 나누어 주면 Eq. (3)과 같이 1시간당 소비되는 전력을 산정할 수 있다(Lee, Park, et al., 2020).

$$P = V \times I \quad (1)$$

$$3,600 W(J) = 1 Wh \quad (2)$$

$$Wh = V \times I / 3,600 \quad (3)$$

Table 5는 10 V 전압을 공급한 나노 보도블럭의 1시간당 소비전력을 정리한 것이다. 10 V 전압을 공급한 나노 보도블럭이 소비전력은 ‘B-7D-1.0’의 2.47×10^{-4} Wh가 가장 우수하였고 가장 낮은 소비전력은 ‘B-28D-0.0’의 0.33×10^{-4} Wh이다. 동일한 전압을 공급하는 경우, 나노 보도블럭의 전류량은 MWCNT의 혼입농도가 증가할수록 증가하였다. 따라서 MWCNT 혼입농도가 증가할수록 나노 보도블럭에 흐르는 전류량이 증가하기 때문에 발열량도 증가하고 소비전력도 증가한 것으로 판단된다. 하지만, 나노 보도블럭의 전류량은 양생일이 증가할수록 감소하였다. 전류량의

감소는 나노 보도블럭의 발열성능도 감소시키고 소비전력도 감소시키는 것으로 판단된다.

Table 5. Power Consumption of Specimen (10 V)

Specimen name	Curing days	Current (I)	Electrical Power (Wh)
B-7D-0.0	7D	0.047	1.31×10^{-4}
B-7D-0.5		0.071	1.97×10^{-4}
B-7D-1.0		0.089	2.47×10^{-4}
B-28D-0.0	28D	0.012	0.33×10^{-4}
B-28D-0.5		0.025	0.69×10^{-4}
B-28D-1.0		0.029	0.81×10^{-4}

Table 6은 30 V 전압을 공급한 나노 보도블럭의 소비전력을 정리한 것이다. 양생 7일 나노 보도블럭의 소비전력은 ‘B-7D-1.0’의 2.10×10^{-3} Wh가 가장 우수하고 양생 28일은 ‘B-28D-1.0’의 1.87×10^{-3} Wh이다. 30 V 전압을 공급한 나노 보도블럭의 소비전력은 10 V 전압보다 최대 8.5배 증가하였다. 이 결과는 소비전력이 공급전압에 비례하기 때문에 전압이 증가할수록 상승한 것으로 분석되었다.

Table 6. Power Consumption of Specimen (30 V)

Specimen name	Curing days	Current (I)	Electrical Power (Wh)
B-7D-0.0	7D	0.154	1.28×10^{-3}
B-7D-0.5		0.184	1.43×10^{-3}
B-7D-1.0		0.252	2.10×10^{-3}
B-28D-0.0	28D	0.142	1.18×10^{-3}
B-28D-0.5		0.151	1.26×10^{-3}
B-28D-1.0		0.224	1.87×10^{-3}

4. 결 론

매개변수에 따른 나노 보도블럭의 발열실험 결과를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫 번째는 MWCNT 혼입 농도가 증가할수록 나노 보도블럭의 발열성능이 향상되었다. 나노 보도블럭의 가장 우수한 발열량은 'B-7D-1.0-30 V'의 45.1 °C로 0.0 wt%보다 최대 6.8배, 0.5 wt% 보다 최대 2.63배 증가하였다. 이 결과는 나노 보도블럭 내부에 전기 전도성과 열전도성을 가진 다수의 MWCNT가 분포되어있기 때문에 발열성능이 향상된 것으로 판단된다.

두 번째는 첫 번째 층의 MWCNT 혼입농도가 증가할수록 MWCNT가 혼입되지 않은 두 번째 층의 온도변화량도 증가하였다. 두 번째 층의 온도변화량은 'B-7D-1.0-30 V'가 16.4 °C로 가장 우수하였고 0.0 wt% 보다 최대 7.5배, 0.5 wt% 보다 최대 2.5배 증가하였다. 두 번째 층의 온도변화량은 MWCNT 혼입농도가 증가할수록 첫 번째 층의 발열성능이 향상되고 다수의 MWCNT로 인한 나노 보도블럭의 열전도성이 증가했기 때문에 상승한 것으로 분석된다.

세 번째는 나노 보도블럭의 매개변수에 따른 발열성능은 열화상 이미지를 통해 확인할 수 있다. 나노 보도블럭은 공급 전압과 MWCNT 혼입농도가 증가할수록 증가하였고 이를 열화상 이미지를 통해 육안으로 확인할 수 있었다. 열화상 이미지는 나노 발열 보도블럭의 발열성능이 증가할수록 선명해지고 뚜렷해졌기 때문에 육안으로 발열성능을 판단할 수 있다.

네 번째는 양생일이 증가할수록 나노 보도블럭의 발열성능은 감소하였다. 온도변화량이 가장 크게 감소한 나노 보도블럭은 'B-7D-1.0-30 V'의 45.1 °C에서 'B-28D-1.0-30 V'의 32.2 °C로 12.9 °C가 감소하였다. 양생일이 증가할수록 나노 발열 보도블럭의 발열 성능이 감소한 원인은 보도블럭 내부에 존재하는 수분의 영향이 감소하였기 때문이다.

다섯 번째는 나노 보도블럭의 소비전력은 공급전압과 MWCNT 혼입농도가 증가할수록 증가하였지만 양생일이 증가할수록 감소하였다. 가장 우수한 소비전력은 'B-7D-1.0-30 V'의 2.10×10^{-3} Wh로 동일한 전압을 공급한 0.0 wt% 보다 최대 1.64배, 0.5 wt% 보다 최대 1.46배 우수하였다. 소비전력은 공급전압과 전류량의 곱으로 산정되기 때문에 전류량이 증가하면 소비전력도 증가하게 된다. 나노 발열 보도블럭의 전류량은 MWCNT 혼입농도가 증가할수록 증가하였고 이에 따라 소비전력과 발열성능도 증가한 것으로 분석된다. 하지만 나노 발열 보도블럭의 전류량은 양생일이 증가할수록 수분의 영향이 감소했기 때문에 감소한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원

으로 수행되었습니다(과제번호 20CTAP-C157602-01).

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.
- El-Enein, S.A., Kotkata, M.F., Hanna, G.B., Saad, M., and El Razeq, M.A. (1995). Electrical conductivity of concrete containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 8, pp. 1615-1620.
- García-Macias, E., D'Alessandro, A., Castro-Triguero, R., Pérez-Mira, D., and Ubertini, F. (2017). Micro-mechanics 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. *Advanced Materials Research*, Vol. 587, pp. 107-110.
- KCS 14 20 10. (2016). *Concrete*. Korean Construction Specification.
- 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.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, H.S., Ban, H., and Park, W.J. (2020). Deicing concrete pavements and roads with carbon nanotubes (CNTs) as heating elements. *Materials*, Vol. 13, No. 11, 2504. doi:10.3390/ma13112504
- 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.
- KS F 4419. (2016). *Concrete interlocking block for sidewalk and road*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS L 5201. (2016). *Portland cement*. Korean Agency for

Technology and Standards.

- KS L ISO 679. (2011). *Methods of testing cements - Determination of strength*. Korean Agency for Technology and Standards.
- Lee, H., Jeong, S., Cho, S., and Chung, W. (2020). Enhanced bonding behavior of multi-walled carbon nanotube cement composites and reinforcing bars. *Composite Structures*, Vol. 243, 112201. doi:10.1016/j.compstruct.2020.112201
- Lee, H., Kang, D., Kim, J., Choi, K., and Chung, W. (2019). Void detection of cementitious grout composite using single-walled and multi-walled carbon nanotubes. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 95, pp. 237-246.
- 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, Article ID 3691509. doi:10.1155/2017/3691509
- 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. doi:10.1016/j.compstruct.2020.111977
- 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. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118838
- Li, G.Y., Wang, P.M., and Zhao, X. (2007). Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube

reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, No. 5, pp. 377-382.

- McCarter, W.J., Starrs, G., and Chrisp, T.M. (2000). Electrical conductivity, diffusion, and permeability of Portland cement-based mortars. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 9, pp. 1395-1400.
- Morsy, M.S., Alsayed, S.H., and Aql, 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. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 6, pp. 221-228.
- Sobolkin, A., Mechtcherine, V., Khavrus, V., Maier, D., Mende, M., Ritschel, M., et al. (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.

Received	September 10, 2020
Revised	September 11, 2020
Accepted	September 24, 2020