도로결빙방지를 위한 발열 나노 시멘트 복합재의 전원 공급 효율에 대한 실험적 연구

Experimental Study on Voltage Supply Efficiency of Nano Cement Composite for Prevention of Road Icing

박성훈* · 이희영** · 정원석***

Park, Sunghoon*, Lee, Heeyoung**, and Chung, Wonseok***

Abstract

Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) show excellent electrical and thermal performances. A method for efficiently supplying voltage to an MWCNT cement composite was investigated through a heating test. In this study, parameters were set by applying a total voltage of 300 V to the MWCNT cement composite cured for 7 days. In Case 1, a voltage of 100 V was supplied from three voltage supply electrodes. In Case 2, a voltage of 150 V was supplied from two electrodes. It was observed from the test results that the maximum temperature change of Case 1 is lower than that of Case 2. However, the surface temperature of Case 1 is higher than that of Case 2 as observed through a thermal camera.

Key words : MWCNT, Cement Composite, Heating Performance, Prevention of Road Icing

요 지

다중벽 탄소나노튜브(Multi-Walled Carbon Nanotube, MWCNT)는 전기적, 열적 성능이 우수한 재료이다. 본 연구에서는 MWCNT를 혼입한 시멘트 복합체의 효율적인 전압 공급 방법을 연구하여 도로결빙 방지를 위한 발열가능 건설재료의 기초연구를 수행하였다. 전압 공급방법은 7일 재령의 MWCNT 시멘트 복합체에 동일한 전압과 상이한 전극 위치를 고려하여 발열 특성을 분석하였다. Case 1은 100V의 전압을 3개의 전극에 공급하였고, case 2는 150 V의 전압을 2개의 전극에 공급하고 온도센서 및 열화상 카메라를 이용하여 온도 전달 및 분포를 분석하였다. 실험결과, case 1이 case 2에 비해 최대 온도변화량은 작았지만 시편 전체의 발열성능 확보에는 유리한 것으로 분석되었다.

핵심용어 : MWCNT, 시멘트 복합체, 발열성능, 도로결빙방지

1. 서 론

최근 지구온난화가 가속화되어 겨울철 기간이 짧아지고 있다. 하지만 국지성 폭설 등 이상기후의 빈도는 점점 증가하고 있는 추세이다. 특히 폭설시 차량하중에 의해 압축된 눈은 낮은 기온과 바람에 의해 도로 결빙, 블랙아이스를 유발한다. 터널의 출입구, 지열의 영향이 없는 교량의 경우

도로 결빙 상황이 더욱 빈번하게 발생한다. 운전자는 도로 주행상황에서 블랙 아이스를 인식하기 어려워 심각한 인적 피해를 유발할 수 있으며 이를 방지하기 위해 도로 결빙상황을 사전에 예측 또는 방지하기 위한 안전관리 시스템의 필요성이 증가하고 있다(Sin et al., 2011; Kim et al., 2015). 염소계열 제설제 자동분사시스템은 현재 일부 상습결빙 구간에서 현장 설치 빈도가 증가하고 있다. 도로가 결빙되기

*정회원, 경희대학교 사회기반시스템공학과 석사과정(E-mail: 9254sunghoon@khu.ac.kr)

Member, Master Course, Department of Civil Engineering, Kyunghee University

**정회원, ¹ 경희대학교 사회기반시스템공학과 연구박사

² University of Colorado Denver, Research Scholar (E-mail: heeyoung0908@khu.ac.kr)

Member, ¹ Post-doctoral Associate, Department of Civil Engineering, Kyunghee University

² Research scholar, University of Colorado Denver

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

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Kyunghee University

전에 제설제를 분사하여 피해를 미리 방지할 수 있는 장점이 있다. 하지만 펌프의 노후화 등 사후 유지관리가 용이하지 못한 단점이 있다. 염소계열 제설제는 구조물의 균열부에 침투하여 철근의 부식 등 구조물의 노후화를 유발하고 지반으로 유입되어 지하수를 오염시키는 것으로 연구되었다(Willams et al., 2000). 이러한 단점을 이유로 기존의 염소계열 제설제 사용을 대체하기 위한 용빙 시스템이 개발되고 있다. 특히 콘크리트 포장에 발열 층을 포설하거나, 전기전도성이 있는 금속 미분말, 흑연 등을 혼입한 발열 가능한 콘크리트에 대한 연구도 활발히 진행 중이다. 연구결과, 실제로 부도체인 콘크리트에 전기전도성 재료를 혼입할 경우, 전기저항을 낮출 수 있는 것으로 연구되었다(Sengul and Gjorv, 2009; Song et al., 2016).

최근에는 시멘트 계열 재료의 전기저항을 낮추기 위해 열적, 전기적 성질이 우수한 탄소계열 나노 재료를 혼합하는 실험적 연구가 진행 중이다. Chung(2004)은 시멘트의 전기저항에 의한 열에너지를 증가시킬 수 있는 폴리머에 대해 연구하였다. 연구에서 선정한 전도성 물질은 Carbon Fiber Cement, Carbon Fiber Mat, Flexible Graphite 등이었다. 발열 실험 결과, Carbon Fiber Mat시멘트 폴리머는 134℃의 발열 효과가 있었다. Chang et al. (2009)은 탄소 나노 섬유(Carbon Nano Fiber) 발열체를 활용한 발열 콘크리트에 대해 연구하였다. 실험 시편은 50×100×100mm³ 크기의 시멘트 모르타르에 Carbon Nano Fiber Heating Element를 하면에 설치하여 제작하였다. 이 연구에서는 -12℃의 영하환경에서 DC Power Supply로 20V의 전압을 공급하였다. 실험 결과 실험체의 평균 표면온도가 약 5℃까지 발열 효과를 확인하였다. Zhao et al. (2011)은 콘크리트 포장체에 전기전도성이 우수한 탄소섬유열선(Carbon Fiber Heating Wire, CFHW)을 매립하여 발열 성능 실험을 수행하였다. 실험 방법은 -25℃의 외기 온도에서 400×200×50mm(W×D×H)크기의 실험체에 1.8A의 전류를 5시간 동안 공급하였다. 실험결과, 실험체의 표면온도는 6~8.6℃까지 상승하였다. Chu et al. (2014)은 단일벽 탄소나노튜브 페이퍼(Carbon Nanotube Paper, CNP)를 기반으로 Glassfiber와 Epoxy를 혼합한 복합체(CGE)를 제작하여 발열 용빙 실험을 수행하였다. 발열 복합체는 120×100×1.5mm³의 크기로 제작되었다. 실험 조건은 풍속 14m/s, -22℃의 외기온도에서 3mm두께(36g)의 얼음을 녹이는 것이었다. 실험 결과, 11033W/m²의 전기에너지 공급 시 얼음을 녹이는데 249초가 소요되어, CGE복합체가 효율적인 열원으로 사용가능함을 확인하였다. Liu et al. (2015)은 Carbon Fiber Grille 보강 복합체를 활용하여 공항 활주로의 용설 가능성을 연구하였다. 실험 방법은 4℃의 외기 온도에서 5×5×0.4m³의 콘크리트 포장체에 300W/m²의 전기에너지를 공급하였다. Carbon Fiber Grille은 콘크리트 포장체 표면에서 아래로 5cm, 10cm 위치의 두 경우로 설치되었다. 실험결과 Carbon Fiber Grille이 도로 표면 아래 5cm위치에 설치된

경우 2.6cm의 눈을 4시간에 녹이는 것을 확인하였다. Gomis et al. (2015)은 100×100×10mm³ 크기의 나노 소재 시멘트 복합체 시편에 은 도금 전극을 삽입하여 발열성능실험을 수행하였다. 나노 소재는 Carbon Nanofiber, Carbon Nanotube, Carbon Fiber Powder, Graphite Powder등이 사용되었다. 실험결과 CNT를 혼입한 시편은 1,500초 동안 90V전압 공급하여 110g의 얼음을 제빙할 수 있었다. Kim and Ban (2017)은 100×100×5mm³의 CNT Plate를 500×150×150mm³ 크기의 시멘트 콘크리트에 삽입하여 -10℃의 온도조건에서 발열성능을 검증하였다. 매개변수는 CNT Plate의 매립 간격을 150, 200, 300mm로 하여 단일 매립의 시편과의 온도를 비교하였다. CNT Plate를 단일 매립한 경우 시편 온도가 -7.5℃이었다. CNT Plate의 간격을 150mm, 200mm로 2개 설치한 시편의 경우 최대 10℃이상의 온도를 유지하였다. Lee et al. (2017)은 단일벽 탄소나노튜브(Single-walled Carbon Nanotube, SWCNT)와 다중벽 탄소나노튜브(Multi-walled Carbon Nanotube, MWCNT)를 혼입한 시멘트 복합체의 발열성능을 연구하였다. 매개변수는 재령일, 공급전압, CNT의 혼입 농도를 선정하여 발열성능 실험을 수행하였다. 실험 방법은 전극을 삽입한 50×50×50mm³크기의 실험체에 직류전압을 50V와 100V로 공급하여 온도변화량을 분석하였다. CNT는 두 종류 모두 시멘트 무게 대비 0.0625wt%, 0.125wt%혼입되었다. 실험결과, 발열성능은 SWCNT를 혼입한 시멘트 복합체가 최대 64.2℃상승하여 동일 조건에서 19.6℃가 발열된 MWCNT 혼입 시멘트 복합체에 비해 우수하였다. 또한 공급전압은 발열성능과 비례하는 것으로 나타났다. Lee et al. (2018)은 MWCNT의 혼합방법을 수용액과 잔골재에 코팅하는 방법을 매개변수로 시멘트 복합체의 발열성능 실험을 수행하였다. 매개변수는 MWCNT의 혼합형태, 혼합 농도, 재령일, 공급전압으로 선정하였다. 실험결과 MWCNT를 시멘트 무게대비 0.25wt% 잔골재에 코팅한 시멘트 복합체는 최대 55.6℃까지 발열 가능하였다. 수용액 형태로 혼입한 시멘트 복합체는 동일 조건에서 43.2℃까지 온도가 상승하였다. SEM분석결과, MWCNT는 잔골재에 코팅된 경우가 수용액으로 혼합된 경우보다 분산성 확보에 유리한 것으로 나타났다.

앞서 설명했듯이 탄소계열 나노재료를 혼합하여 시멘트 계 복합재료의 발열성능을 향상 시키는 기초적인 연구가 진행되고 있다. 하지만 실용화 단계에 적용하기 위한 효율적인 전기에너지 공급방안에 대한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 MWCNT의 우수한 열적성능을 활용하여 MWCNT시멘트 복합체의 발열성능 실험을 수행하였다. MWCNT시멘트 복합체는 전압 공급부와 전압 미공급부로 구분하여 제작하였고, 부분적인 발열효과가 시편 전체에 발열효과에 미치는 영향을 확인하고자 한다. MWCNT시멘트 복합체의 온도변화량분석을 통해 효율적인 전압 공급방안을 제시하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 실험 매개변수

본 연구에서는 $40 \times 40 \times 200 \text{ mm}^3$ 크기의 MWCNT 시멘트 복합체에 300V의 전압을 공급하였다. 이때 전압 공급 방법은 Fig. 1과 같이 2가지 경우로 구분되어 공급되었다. Case 1은 설치된 3개의 전극에 100V씩 전압을 공급하였고, Case 2는 실험체의 양 끝 두 개의 전극에 각각 150V를 공급하였다. Case 1의 전압 공급부분의 부피는 총 $40 \times 40 \times 120 \text{ mm}^3$ 이고, 전압을 공급 하지 않은 부분의 부피는 $40 \times 40 \times 80 \text{ mm}^3$ 이다. Case 2는 전압 공급 부분의 부피가 $40 \times 40 \times 80 \text{ mm}^3$ 이고, 전압을 공급 하지 않은 부분의 부피는 $40 \times 40 \times 120 \text{ mm}^3$ 이다. 실험의 매개변수는 Table 1로 정리하였다.

Fig. 1. Cases of Voltage Supply in Heating Test

Table 1. Parameters of Heating Test

Group	Supplying Voltage (V)	Volume of Voltage Supply (mm^3)	Volume of Non-voltage Supply (mm^3)
Case 1	100	$40 \times 40 \times 120$	$40 \times 40 \times 80$
Case 2	150	$40 \times 40 \times 80$	$40 \times 40 \times 120$

Table 2. Electrical and Thermal Characteristics of Conductivity Materials

Material	MWCNT	Au	Cu	Fe
Electrical Conductivity(S/m)	6.0×10^3	4.26×10^5	5.98×10^5	1.03×10^5
Thermal Conductivity(W/m·k)	Max. 3,000	318	400	80

2.2 사용 재료

본 연구에서는 포틀랜드 1종 보통 시멘트를 사용하였다. 일반적인 포틀랜드 시멘트의 열전도율은 약 $0.26 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ 이다. 배합 시 사용한 모래는 KS L ISO 679 (2006) 규격의 표준사를 사용하였다. 실험체 제작에 사용된 MWCNT 입자의 직경은 5~100nm이고 길이는 100nm~1 μm 이다. MWCNT 입자의 전기전도도는 6,000S/cm이고 열전도율은 최대 $3000 \text{ W/m} \cdot \text{k}$ 이다. MWCNT는 수용액 형태로 시멘트 무게 대비 0.1wt% 혼합하였다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 MWCNT수용액과 분산 전의 MWCNT입자이다. MWCNT수용액은 기능화된 제품으로써 폴리아크릴산(Polyacrylic acid) 공중합물에 의한 화학적 처리와 22kHz 출력의 초음파처리를 통해 99% 이상의 순도로 제작되었다.

Fig. 2. MWCNT Dispersion Process

수용액 형태의 혼입은 Van der Waals 힘에 의한 응집을 방지하기 때문에 시멘트 복합체 내에서의 분산성을 확보하는데 유리한 것으로 밝혀졌다(Musso et al., 2009).

Table 2는 주요 전도성 재료의 전기전도율과 열전도율 값을 나타낸 표이다. 전기전도율은 전류를 흐르게 할 수 있는 정도의 지표로 사용되고, 비저항의 역수로 계산된다. MWCNT는 전선의 주재료인 구리에 비해 약 100배 전기전도율이 우수하다. 열전도율은 구리에 비해 7.5배 우수하다. 따라서 MWCNT는 시멘트복합체에 혼합될 경우 다른 전도성 재료에 비해 소량으로도 전기적, 열적 성능의 개선이 가능할 것으로 판단된다.

2.3 실험체 제작

MWCNT시멘트 복합체는 Fig. 3과 같이 전압 공급이 가능한 전극을 40mm간격으로 3곳에 설치하여 40×40×200mm크기로 제작되었다. 배합비는 물/시멘트 비를 50%로 선정하고, 표준사는 시멘트 무게대비 2.5배 혼합하였다. 실험체 제작을 위한 배합비는 Table 3과 같다.

Fig. 3. Specimen Diagram

Table 3. Mixing Ratio of MWCNT Cement Composite Specimen

MWCNT (g)	W/C (%)	Water (g)	Cement (g)	Sand (g)
0.24	50	120	240	600

Thermocouple은 시편 중심부의 온도 측정을 위해 40mm간격으로 5개의 측정점 A부터 E까지 Fig. 3과 같이 설치되었다. 시편의 세부적인 제작과정은 Fig. 4로 정리하였다.

Fig. 4. Specimen Production Progress

2.4 발열성능 실험

7일 양생된 MWCNT시멘트 복합체는 공급 전류가 외부로 흐르는 것을 차단하기 위해 Fig. 5와 같이 절연판 위에 설치되었다. 전극은 직류 전압 공급 장치(EX-200)에 연결되어 MWCNT 시멘트 복합체에 일정 전압을 공급한다. 시편 내부 온도는 정적 데이터로거(TDS-303)에 연결된 Thermocouple를 통해 1초 간격으로 측정되었다. 또한 시편의 표면온도는 열화상 카메라(Testo 882)를 사용해 측정하였다.

Fig. 5. Test Setup

3. 실험 결과

3.1 온도 분석

Fig. 6은 Case 1의 온도변화량의 시간이력 그래프이다. Case 1은 100V의 전압을 공급한 A, C, E의 평균 온도변화량이 각각 76.0, 82.5, 79.6℃까지 상승하였다. 측정점C는 A와 E에서 발생한 열에너지의 전도현상으로 인해 발열 온도가 더 높게 측정된 것으로 판단된다. 전압을 공급하지 않은 부분인 B, D는 각각 59.1, 61.3℃가 상승하였다.

Fig. 6. Temperature Change of Case 1

Case 2는 Fig. 7과 같이 전압을 공급한 A, E에서 부분적으로 온도변화량이 최대 81.2, 84.2℃가 상승하였다. 실험체의

중앙지점인 C는 20.0℃가 상승하였다. 측정점 B, D는 각각 25.5, 28.9℃가 상승하였다.

Fig. 7. Temperature Change of Case 2

Case 2는 150V전압이 공급되어 100V가 공급된 Case 1과 비교하여 공급 전압이 1.5배 많았고, 최대 온도변화량 평균값은 105.6% 많았다. 하지만 전압이 공급되지 않은 부분의 온도변화량을 비교하면, Case 1이 60.2℃로 24.3℃가 상승한 Case 2에 비해 247.7% 큰 것으로 분석된다.

Table 4. ΔTemperature at Measurement Point

Point	A	B	C	D	E
Case 1 (°C)	76.0	59.1	82.5	61.3	79.6
Case 2 (°C)	81.2	25.5	20.0	28.9	84.2
Case 1/Case 2 (%)	93.6	231.8	412.5	212.1	94.5

MWCNT 시멘트 복합체의 온도변화량은 시간이 지남에 따라 시편 내 온도가 증가하다가 감소하는 것으로 나타났다. 원인은 초기 재령의 시멘트 복합체 내에서 수분에 의한 영향으로 판단된다. 실제 초기 재령의 시멘트 복합체는 수분의 존재에 의해 전기전도성이 개선되는 것으로 밝혀졌다(El-Enain et al., 1995; McCarter et al., 2000). MWCNT시멘트 복합체는 내부의 수분이 증발함에 따라 시멘트 복합체의 온도가 감소하는 것으로 판단된다. 또한 전기전도성은 온도와 비례관계에 있다. MWCNT시멘트 복합체의 온도 저하에 따라 전기전도성 감소의 영향도 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8은 Case 1과 Case 2의 측정점 최대 온도변화량이고 Table 4는 최대 온도변화량 측정값이다. 측정점 A와 E는 Case 2가 Case 1에 비해 온도변화량이 최대 5.2℃ 높게 측정되었다. 그 원인은 측정점 A와 E에서 Case2가 150V로 Case 1보다 많은 전압이 공급되었기 때문이다. 측정점 B와 대칭 측정점인 D는 Case 1이 최대 온도변화량이 각각 33.6℃, 32.4℃

크게 나타났다. Case 1은 측정점 C의 발열효과로 인해 Case 2보다 측정점 B, D에서의 발열성능이 우수한 것으로 분석된다. 시편의 중앙부인 측정점 C는 Case 1이 Case 2보다 62.5℃ 발열성능이 우수하였다. 이는 측정점 C에서 공급된 전압과 측정점 A, E에서 발생한 열의 전도효과 때문이다.

Fig. 8. Maximum Temperature Change at Measuring Point

종합적으로 Case 2는 측정점 A와 E에서 집중적인 발열효과가 있었지만, 전압이 공급되지 않은 부분에서의 발열효과는 Case 1에 비해 떨어지는 것을 확인하였다. Case 1은 Case 2에 비해 실험체 내에서 온도변화량의 편차가 적었다. 전압 공급부의 간격은 Case 1이 8cm, Case 2의 경우 16cm로 Case 1이 Case 2에 비해 열의 전도거리가 1/2배이다. 결과적으로 열의 전도효과가 Case 1이 더 우수하여 Case 2에 비해 발열성능이 효과적이었다. MWCNT시멘트 복합체는 전압 공급 위치를 증가시키고 공급부 간격을 줄이는 것이 효율적인 발열성능 확보에 유리할 것이다.

3.2 전기저항 분석 결과

MWCNT 0.1wt% 시멘트 복합체의 고유 전기 저항률(Electrical Resistivity, ρ)은 약 $42.6\Omega\cdot m$ 이었다. 대표적인 도체인 구리는 $1.7\times 10^{-8}\Omega\cdot m$, 철은 $9.7\times 10^{-8}\Omega\cdot m$ 이다. 반도체의 주재료인 규소는 전기저항률이 $2.3\times 10^3\Omega\cdot m$ 이다. 여러 재료의 전기저항률을 비교하였을 때 MWCNT 시멘트 복합체는 전기전도성 개선을 기대할 수 있다(Table 5).

Table 5. Electrical Resistivity of MWCNT Cement Composite and Other Materials

Material	Electrical Resistivity ($\Omega\cdot m$)
MWCNT 0.1wt% Cement Composite	4.26×10
Cu	1.7×10^{-8}
Fe	9.7×10^{-8}
Si	2.3×10^3

Table 6은 MWCNT 시멘트 복합체의 전압, 전류량, 시간당 소비 전력 값이다. Case1은 전압공급부 A, C, E에서 35.2, 41.2, 39.2W/sec의 전력이 소비하여 실험체 측정점에서 최대 82.5℃(측점C), 최저 59.1℃(측점B)가 발열 가능하였다. Case 2는 전압공급부 A, E에서 79.8, 83.7W/sec의 전력이 소비되었다. MWCNT시멘트 복합체는 Case 2에서 최대 84.2℃(측점E), 최저 20.0℃(측점C)까지 발열 가능하였다.

Case 1은 단위시간당 총 115.6W/sec의 전력이 소비되었고, Case 2는 총 163.5W/sec의 전력이 소비되었다. MWCNT시멘트 복합체는 Case 2의 경우가 더 많은 전력이 소비되었지만, 실험체 내의 최고, 최저온도의 차이가 64.2℃ 였다. Case 1은 최고, 최저온도차이가 23.4℃ 로 Case 2에 비해 적었다. Case 1은 Case 2에 비해 더 적은 전력을 소모하였지만 전압을 공급하지 않은 부분에서의 발열 성능이 우수하였다.

3.3 열화상 이미지 결과

MWCNT 시멘트 복합체의 최대 온도 상승 시 온도 분포 및 전도 양상을 확인하기 위해 시편 표면부의 열화상 이미지를 촬영하였다. Fig. 9는 Case 1의 최고 발열온도 지점에서의 열화상 이미지이다. Case 1의 경우 전압 공급 부에서 표면 온도가 최대 88.5℃상승 가능하였다. 전압 공급 부를 중심으로 전압을 공급하지 않은 부분까지 온도가 확산되는 것을 확인하였다.

Fig. 10은 측정점 A, E에서 각각 150V의 전압을 공급한

Case 2의 열화상 이미지이다. 측정점 A, E 부근에서 표면온도가 90.6℃로 집중적으로 상승하였고, 시편의 중앙부인 측정점 C로 열이 확산되는 것을 확인하였다. 최대 표면 온도변화량은 Case 2가 높지만 Case 1이 시편 전체의 균일한 발열 성능 확보에 더 유리한 것으로 나타났다.

4. 결 론

MWCNT 시멘트 복합체의 열전도 특성 및 효율을 분석하기 위한 발열 성능실험에서 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) MWCNT 시멘트 복합체는 동일 총 전압을 공급 할 시에 작은 전압을 공급한 경우보다 큰 전압을 공급한 경우 최대 온도변화량이 많은 것으로 나타났다. MWCNT 시멘트 복합체의 발열성능은 전압 공급부에서 공급 전압에 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 실험 결과, MWCNT 시멘트 복합체는 300V의 전압을 3곳에서 100V씩 공급한 Case 1이 2곳에서 150V를 공급한 Case 2에 비해 전압을 공급하지 않은 부분에서의 발열성능이 우수하였다. MWCNT 시멘트 복합체는 공급 전압의 총 합이 일정할 경우 전압 공급부를 분산하고, 간격이 좁을수록 발열 효율에 유리한 것으로 분석된다.

Table 6. Electrical Properties of MWCNT Cement Composite

Group	Electrical Properties	Measurement Point					
		A	B	C	D	E	Total
Case 1	Supplied Voltage(V)	100	0	100	0	100	300
	Quantity of Electricity(C)	3379.2	0	3955.2	0	3763.2	11097.6
	Electrical Power(W/sec)	35.2	0	41.2	0	39.2	115.6
Case 2	Supplied Voltage(V)	150	0	0	0	150	300
	Quantity of Electricity(C)	5107.5	0	0	0	5356.8	10464.0
	Electrical Power(W/sec)	79.8	0	0	0	83.7	163.5

Fig. 9. Thermal Image of MWCNT Cement Composite, Case 1

Fig. 10. Thermal Image of MWCNT Cement Composite, Case 2

- (3) 전기저항 분석결과, Case 1은 115.6W/sec의 전력을 소비하여 163.5W/sec의 전력을 소비한 Case 2에 비해 발열 효율이 우수하였다. 전압공급방법은 MWCNT 시멘트 복합체에 상대적으로 낮은 전압을 분산하여 공급하는 것이 전력 효율 측면에서 유리한 것으로 판단된다.
- (4) 열화상이미지 분석결과, MWCNT 시멘트 복합체는 전압 공급부 간격이 2배인 경우 최고 온도와 최저 온도의 차이는 2.7배 큰 것으로 나타났다. MWCNT 시멘트 복합체는 전압공급부의 간격이 좁을수록 시편 내의 발열성능이 균일한 것으로 분석되었다.
- (5) 향후 연구에서 MWCNT 시멘트 복합체의 발열 성능 실험은 실제 도로의 하부구조, 영하의 외기 온도 모사하여 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(17CTAP-C129720-01, 극한환경(-30℃)에서 발열양생 및 용설/용빙(30℃/10min)이 가능한 나노 콘크리트 기술 개발).

References

- Chang, C., Ho, M., Song, G., Mo, Y.L., and Li, H. (2009). A feasibility study of self-heating concrete utilizing carbon nanofiber heating elements. *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 12, Article No. 127001.
- Chu, H., Zhang, Z., Liu, Y., and Leng, J. (2014). Self-heating fiber reinforced polymer composite using meso/macropore carbon nanotube paper and its application in deicing. *Carbon*, Vol. 66, pp. 154-163.
- Chung, D.D.L. (2004). Self-heating structural materials. *Smart materials and structures*, Vol. 13, No. 3, pp. 562-565.
- El-Enein, S.A., Kotkata, M.F., Hanna, G.B., Saad, M., and El Razek, M.A. (1995). Electrical conductivity of concrete containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 8, pp. 1615-1620.
- Gomis, J., Galao, O., Gomis, V., Zornoza, E., and Garcés, P. (2015). Self-heating and deicing conductive cement. Experimental study and modeling. *Construction and Building Materials*, Vol. 75, pp. 442-449.
- Kim, H.S., and Ban, H.K. (2017). An experimental approach to investigate the heat transferring effect of carbon nanotube on the concrete slab. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 18, No. 12, pp. 59-63.
- Kim, S.Y., Jang, Y.S., Kim, S.K., Min, D.C., Na, H.H., and Choi, J.S. (2015). A study on the effects of factors of traffic accidents caused by frozen urban road surfaces in the winter. *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 79-87.
- KS L ISO 679. (2006). *Methods of Testing Cements - Determination of Strength*. Korean Standards Association.
- Lee, H.Y., Kang, D.H., Song, Y.M., and Chung, W.S. (2017). Heating experiment of CNT cementitious composites with single-walled and multiwalled carbon nanotubes. *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2017, Article ID 3691509.
- Lee, H.Y., Song, Y.M., Loh, K.J., and Chung, W.S. (2018). Thermal response characterization and comparison of carbon nanotube-enhanced cementitious composites. *Composite Structures*, Vol. 202, pp. 1042-1050.
- Liu, Y., Lai, Y., and Ma, D.X. (2015). Research of carbon fibre grille reinforced composites in airport pavement snowmelt. *Materials Research Innovations*, Vol. 19, No. Sup10, pp. 49-54.
- 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.
- Musso, S., Tulliani, J.M., Ferro, G., and Tagliaferro, A. (2009). Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites. *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 11-12, pp. 1985-1990.
- Sengul, O., and Gjörv, O.E. (2009). Effect of embedded steel on electrical resistivity measurements on concrete structures. *ACI Materials Journal*, Vol. 106, No. 1, pp. 11-18.
- Sin, G.H., Song, Y.J., and You, Y.G. (2011). Bridge road surface frost prediction and monitoring system. *Journal of the Korea Contents Association*, Vol. 11, No. 11, pp. 42-48.
- Song, D.G., Cho, H.K., and Lee, H.S. (2016). Evaluation of the exothermic properties and reproducibility of concrete containing electro-conductive materials. *Journal of Korea Institute of Building Construction*, Vol. 16, No. 1, pp. 25-34.
- Williams, D.D., Williams, N.E., and Cao, Y. (2000). Road

salt contamination of groundwater in a major metropolitan area and development of a biological index to monitor its impact. *Water Research*, Vol. 34, No.1, pp. 127-138.

Zhao, H., Wu, Z., Wang, S., Zheng, J., and Che, G. (2011). Concrete pavement deicing with carbon fiber heating

wires. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 65, No. 3, pp. 413-420.

<i>Received</i>	■ July 24, 2018
<i>Revised</i>	■ July 27, 2018
<i>Accepted</i>	■ August 10, 2018