

실내실험 및 수치해석을 통한 Carbon Nanotube의 콘크리트슬래브 열전달 효과 검증

Integrated Experimental-Numerical Approach to Investigate the Heat Transferring Effect of Carbon Nanotube on the Concrete Slab

김희수¹⁾ · 반호기[†]

Hee Su Kim · Hoki Ban

Received: October 21st, 2018; Revised: October 29th, 2018; Accepted: November 12th, 2018

ABSTRACT : This paper presents a method to deice concrete pavement with carbon nanotube(CNT) as an heating material so as to avoid the adverse effects of conventional deicing method such as salt on the structure, function and environment. To this end, laboratory tests integrated with numerical simulations were conducted. In the laboratory tests, the CNT was embedded inside the concrete slab and generated the heat up to the target temperature of 60°C in the freezer at temperature of -10°C. Then, the surface temperature was measured to investigate how far the heat transfers on the surface at temperature of above 0°C. Also, three different spacings of 15, 20 and 30cm between CNTs were conducted to determine the maximum allowable spacing of CNT. Along with these experimental tests, heat transferring analysis conducted to validate the test results.

Keywords : Deicing, Carbon nanotube (CNT), Concrete pavement, Finite element method

요지 : 본 연구에서는 염화물, 전열선 등을 이용한 기존 결빙방지기술의 문제점인 도로 및 주변 구조물 내구성 저하, 많은 인력과 유지비용이 필요로 하는 등을 해소하고자 Carbon nanotube(CNT)를 이용한 결빙방지기술에 대한 기초자료로 실내실험과 수치해석 방법을 제시하였다. 이를 위해 실내실험과 수치해석을 통한 검증을 수행하였다. 실내실험은 CNT를 콘크리트 실험체 중심에 1개 삽입 후 냉동 Chamber를 이용하여 주변온도 및 실험체의 내부온도를 -10°C로 유지하였으며, CNT를 60°C로 발열시켰다. 콘크리트 표면 온도를 측정하여 발열체로부터 0°C까지의 거리인 유효발열거리를 확인하였다. 또한 열 중첩에 의한 CNT 간의 간격을 결정하기 위해 CNT를 150, 200, 300mm의 간격으로 삽입하여 총 4가지의 Case로 실내실험을 진행하였다. 실내실험과 함께 콘크리트 실험체의 열전도도 분석을 위한 수치해석을 수행하였다.

주요어 : 탄소나노튜브, 발열체, 콘크리트 슬래브, 결빙방지기술

1. 서론

도로면의 결빙은 도로 표면의 마찰을 감소시켜 대형 사고를 유발시킨다. 그로 인해 결빙을 미연에 방지하고자 제설제 살포, 지열과 전열선을 이용하는 등의 도로결빙방지기술이 연구 및 실용화 중에 있다. 하지만 도로 및 주변 구조물 내구성 저하, 많은 인력과 유지비용이 필요로 하는 등의 문제점을 지니고 있다. 제설제의 경우 도로포장 및 교량의 손상(보강재부식 등), 도관 파이프의 부식 등의 문제가 발생하고 있다(Wang et al., 2006). 또한 주변 토양 생태계의 환경 파괴요인인 것이 선행 연구를 통해 밝혀졌다(Thunqvist, 2004; Kayama et al., 2005).

제설제로 인한 도로의 손상을 방지하고자 지열관(Lee et

al., 2010), 및 전기 전도성 콘크리트(Xie & Beaudoin, 1995; Tuan, 2004, 2008; Tuan & Yehia, 2004) 등을 이용한 결빙방지기술 연구가 진행되었다. Yehia & Tuan(1999)는 결빙방지기술 관련 난방시스템에 대해 시공, 유지관리 등의 비용적 측면에 대해 비교 분석하였으며, Minsk(1999)은 Nebraska, Oregon, Texas, Virginia, West Virginia에 위치한 3개의 히팅시스템이 설치된 10개의 다리에 대해 겨울철 결빙방지작업 중 건설 세부 사항, 유지비용, 작동 체계 및 결빙 성능을 비교 분석하였다. Yehia & Tuan(1999)는 지난 10년 동안 전도성 콘크리트를 사용하여 교량 슬래브 및 포장 면에 대한 연구를 수행하였다. 전도성 콘크리트는 콘크리트 배합 시 강철 shaving과 강철 섬유를 첨부하여 제작하였다. 콘크리트 슬래브 열전도 시험을 통해 전도성 콘크리트를 사용하여 원

1) Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Kangwon National University

† Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University (Corresponding Author : hban@kangwon.ac.kr)

하는 전기 전도도로 제작이 가능하였으며, 슬래브 온도를 -1.1에서 증가시키기 위해 평균 전력 밀도가 약 $520 W/m^2$ 되어야 함을 확인하였다. 전력 밀도가 약 $520 W/m^2$ 일 때, 슬래브의 온도는 30분에 $15.6^{\circ}C$ 로 증가한다고 보고하였다. Yehia et al.(2000)은 전도성 콘크리트의 주요 기준 평가를 콘크리트의 압축 강도, 전기 저항성, 시공성 등으로 하여 평가를 하였다. Tuan(2004)는 실제 공용 중인 교량 및 도로에서의 결빙검증을 위해 $1.2*3.6m$ 크기의 콘크리트 슬래브에 9cm의 전도성 콘크리트를 덧씌우기를 하였다. Tuan & Yehia (2004)는 평균 전력 밀도 약 $520 W/m^2$ 가 전도성 콘크리트에 전달되어 포장도로의 적설 및 결빙방지를 하였으며, 기존 강철 shaving를 탄소와 흑연 제품으로 대체하였다. Tuan (2008)는 Raca spur 다리에 결빙방지를 위해 1.5% 강철 섬유와 25% 탄소제품을 혼합하여 결빙방지시스템을 구현하였다. 2003년 겨울 145~237mm의 눈이 내렸으며, 이를 녹이기 위해 $6.75\sim 12.5kw/m^2$ 전력이 소비되었다. 4년간 시험 가동하였으며, 결빙방지 성능은 일정하였으며, 전기 전도도의 저하는 발견하지 못하였다. 유지비용은 눈이 내려 가동시킬 때 약 250달러가 소비되었다. Zhao et al.(2011)와 Wu et al. (2015)는 콘크리트 슬래브에 매설된 Carbon fiber heating wires(CFHW)를 현장 시험 포장 구간에서 결빙방지 시험을 진행하였다. 시험 결과는 주변온도가 $-8^{\circ}C$ 에서 $-4.9^{\circ}C$, 눈이 내린 시간은 약 5.25시간, 바람은 1~5 Beaufort, 적설량이 70mm 일 때 평균 전력이 $300\sim 1,000 W/m^2$ 으로 확인하였다.

본 연구는 기존 도로면 결빙방지를 할 수 있는 발열체인 Carbon nanotube(CNT)의 발열효과를 확인하기 위한 실내 실험 및 수치해석을 통한 검증을 하였다. 실내실험은 콘크리트 실험체 중심에 CNT를 1개 삽입하여 유효발열거리(발열체로부터 $0^{\circ}C$ 까지의 거리)를 확인하였다. 또한 열중첩 효과를 확인하기 위해 CNT를 150, 200, 300mm의 간격으로 삽입하여 총 4가지의 Case로 실내실험을 진행하였다. 실내

실험과 함께 콘크리트 실험체의 열전도도 분석을 위한 수치 해석을 수행하였다.

2. 실내실험

콘크리트 도로면 결빙방지효과를 확인하기 위해 실내실험은 다음 Fig. 1과 같이 콘크리트 실험체에 CNT를 삽입하여 CNT의 발열효과에 대한 실내실험을 진행하였다. Fig. 1(a)는 CNT를 1개 삽입하여 유효발열거리를 측정하였다. 열중첩 효과로 인한 유효발열거리 상승을 측정하기 위해 Fig. 1(b)와 같이 CNT 2개를 150, 200, 300mm 간격으로 삽입하여 유효발열거리를 측정하였다.

2.1 콘크리트 실험체 제작

실내실험에 사용된 콘크리트 실험체는 실험체 중심에 CNT가 1개 삽입된 경우, CNT 2개가 150, 200, 300mm 간격으로 삽입된 경우로 각 2개씩 총 8개의 실험체를 제작하였다. 콘크리트 배합은 한국도로공사 콘크리트 설계기준 배합비를 참고하였으며, 작업 편리를 위해 시멘트의 0.6%의 AE감수제를 배합 시 첨가하였다. 콘크리트 배합비는 다음 Table 1에 나타났다. 콘크리트 실험체 배합은 시멘트와 잔골재, 굵은 골재 순으로 투입하여 30초의 건비빔을 진행하였으며, AE감수제가 섞인 배합수를 투입하여 2분 30초의 본 비빔을 진행하였다. 이때, 공기량은 4.7%, 슬럼프 값은 160mm로 나타났다. 배합된 콘크리트는 $500*150*150mm$ 크기의 몰드를 이용하여 실험체로 제작하였으며, 콘크리트 실험체의 크기가 작아 흠파기 시 콘크리트 실험체의 파손 우려가 있기 때문에 $110*110*10mm$ 크기의 합판을 미리 삽입하여 흠을 제작하였다. 콘크리트 실험체는 7일간의 습윤 양생을 가졌으며, 습윤 양생이 끝난 실험체의 흠에 $100*100*5mm$

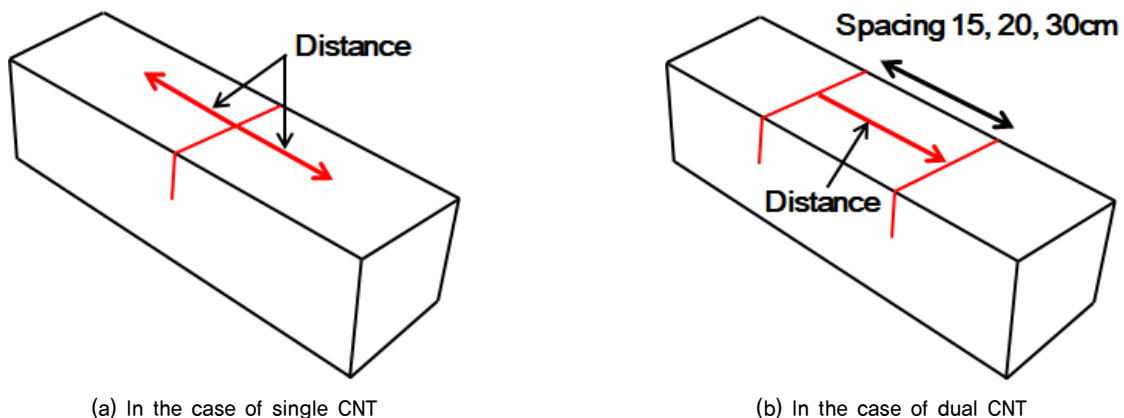


Fig. 1. Schematic drawing of CNT embedded into concrete slab

Table 1. Concrete pavement mix proportioning

Concrete pavement mix proportioning (1,000L, kg/m ³)	
Maximum size of coarse aggregate (mm)	25
W/C (%)	45
S/a (%)	37
Water (kg)	147
Cement (kg)	326
Fine aggregate (kg)	707
Coarse aggregate (kg)	1184
Air-entraining agent (kg)	1.956
Superplasticizer (kg)	1.956

Note: Specific gravity : Cement (3.15), Fine aggregate (2.66), Coarse aggregate (2.73)

크기의 CNT를 삽입 후 빈 공간을 모르타르로 채워 7일간 양생을 더 진행하여 콘크리트 실험체를 제작하였다.

2.2 실내실험 방법 및 순서

실내실험은 Fig. 2와 같이 냉동 Chamber를 사용하여 외기 온도와 콘크리트 실험체의 내부온도가 -10°C가 되었을 때,



(a) Overview of laboratory test

CNT를 60°C로 발열시켜 2시간 동안 실내실험을 진행하였다. 이때, 실내실험 중에 외기온도가 -10°C 유지되도록 하였으며, 외기온도 및 콘크리트 내부, 표면온도는 Thermocouple을 외기 및 콘크리트 실험체에 장착하여 온도 변화를 측정하였다.

2.3 실내실험 결과

Fig. 3은 CNT를 1개 삽입한 콘크리트 실험체에 대한 실내실험 결과이다. Fig. 3에서 보듯이 유효발열거리는 75, 85mm로 나타났으며, 평균 유효발열거리는 80mm이다. 또한 발열체로부터 150mm 지점의 표면온도가 초기온도 -10°C보다 상승하였음을 볼 수 있다. 이는 CNT에서 발생된 열이 미세하지만 콘크리트 실험체 전체에 전달이 됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 CNT 2개를 150mm 간격으로 삽입한 콘크리트 실험체에 대한 실내실험 결과이다. Fig. 4에서 보듯이 CNT 사이의 모든 표면온도가 0°C 이상으로 나타났다.

Fig. 5는 CNT 2개를 200mm 간격으로 삽입한 콘크리트 실험체에 대한 실내실험 결과이다. Fig. 5에서 보듯이 CNT



(b) Concrete slab

Fig. 2. Laboratory test

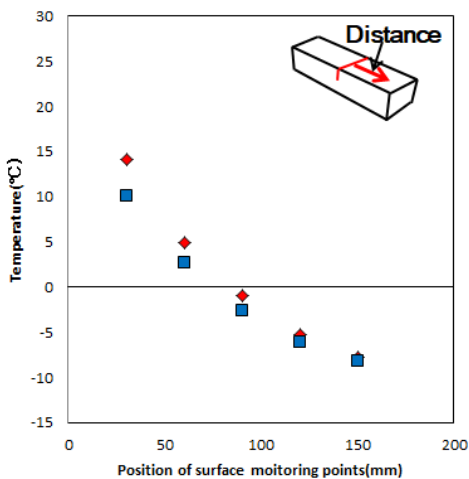


Fig. 3. Single installation of carbon nanotube

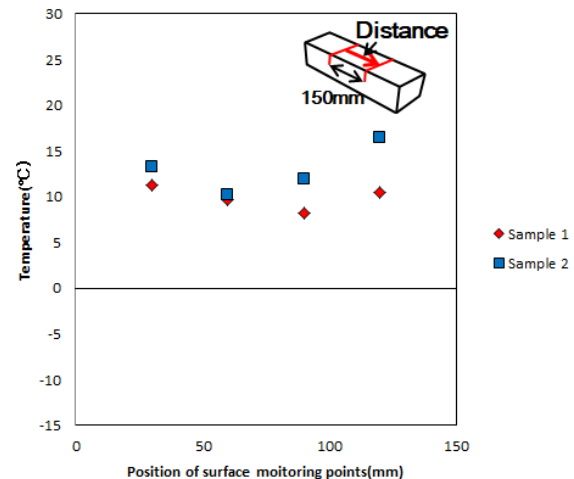


Fig. 4. Dual installation of carbon nanotube of spacing of 15 cm

사이의 모든 표면온도가 0°C 이상으로 나타났다. Fig. 4와 비교분석을 하였을 때, Fig. 4보다 전체적인 표면온도가 낮지만 표면온도가 0°C 이상으로 결빙방지에 필요한 온도인 0°C 이상으로 나타났기에 Fig. 4보다 유효발열거리가 증가하였음을 알 수 있다.

Fig. 6은 CNT 2개를 300mm 간격으로 삽입한 콘크리트 실험체에 대한 실내실험 결과이다. Fig. 6에서 보듯이 콘크리트 표면온도가 전체적으로 상승하였음을 볼 수 있었으나, CNT 사이의 표면 온도가 영상, 영하로 나타났다. 이는 CNT로 인한 전체적으로 온도가 상승하였으나, CNT의 간격이 멀어 열 중첩효과가 기대에 미치지 못하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 수행되었던 실내실험 결과를 종합해보면 콘크리트 표면의 온도가 상온(0°C) 이상을 유지할 수 있는 최대 간격은 200mm임을 알 수 있었다.

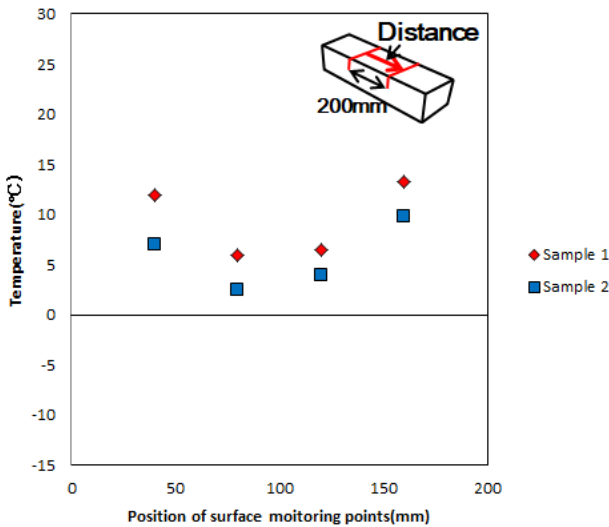


Fig. 5. Dual installation of carbon nanotube of spacing of 20 cm

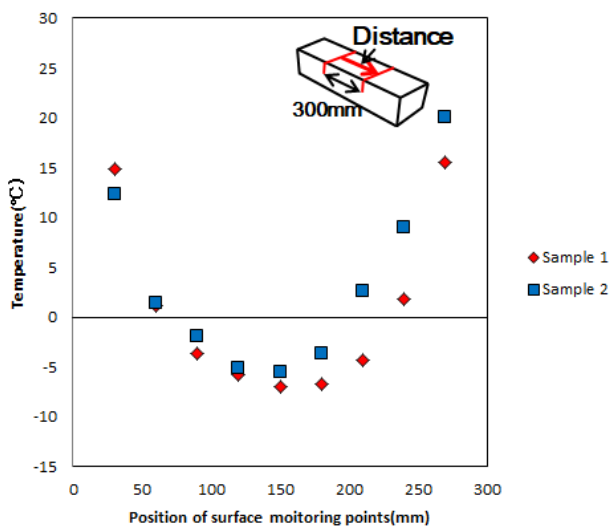


Fig. 6. Dual installation of carbon nanotube of spacing of 30 cm

3. 수치해석

3.1 열전도해석(Heat transfer analysis)

콘크리트실험체와 CNT 사이의 열전달분석은 복잡하다. 따라서 재료가 등방성이고 온도에 따라 역학적 특성이 변화하지 않으므로 수치해석 모델에 대한 가정이 필요하다. 열분석에 대한 미분방정식은 다음 Eq. (1)과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q \quad (1)$$

여기서, ρ 은 밀도, c 은 비열, k_x, k_y, k_z 는 각각 x, y, z 방향의 열 전도율, q 는 발열량이다. 열전도도는 모든 방향에서 동일하다고 가정하였다. Fig. 7은 시뮬레이션을 위한 유한요소 Mesh 및 경계조건을 나타내고 있다. Fig. 7과 같이 콘크리트 옆면과 바닥은 완전히 절연되어 표면에 자연대류(convection)가 가해졌다.

3.2 수치해석 검증

실내실험 결과를 검증하기 위해서는 열전도율, 비열, 필름계수(전달면 상위 단위면적을 통과하는 열이 이동하는 속도), 열 유속 등과 같은 열 전달 과정에 대한 시뮬레이션이 필요하다. 콘크리트 슬래브와 공기 사이의 열전달에 대한 필름계수는 다음 Eq. (2)와 같이 Jurges의 방정식에 의해 추정하였다.

$$h_a = \begin{cases} 3.95u_a + 5.58 & (u_a \leq 4.8m/s) \\ 7.14u_a^{0.78} & (u_a > 4.8m/s) \end{cases} \quad (2)$$

여기서, h_a 는 콘크리트 슬래브와 공기사이의 열전달에 대한 필름계수, u_a 는 풍속이다. 실내실험은 바람이 없는 상태에서 진행되었기 때문에, 필름계수를 $5.58 W/m^2/K$ 으로 계산을 하였다. CNT 1개의 경우와 수치해석 결과와 일치시킨

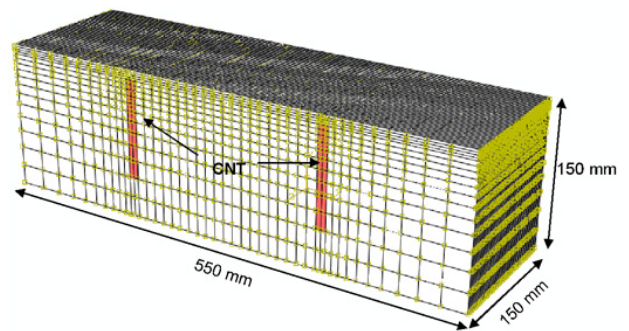


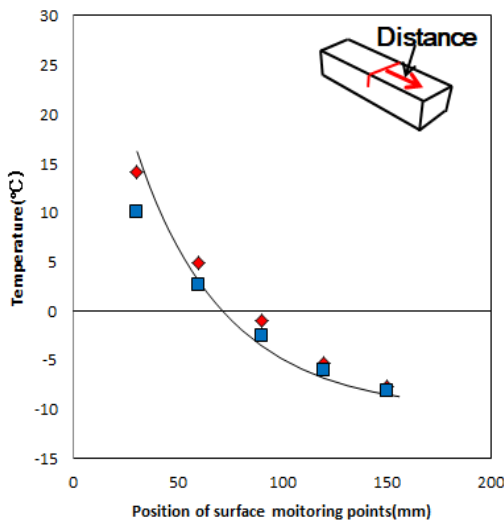
Fig. 7. Element mesh and boundary conditions for the simulations

후에 150, 200, 300mm 간격에 대해 수치해석을 진행하였다. Fig. 8(a)는 CNT가 콘크리트 실험체에 삽입되었을 때의 수치해석 결과를 나타낸다. 모델 검증에 사용된 콘크리트 슬래브의 물성치(비중, 비열, 열전도도)는 Table 2에 나타난 참고문헌들의 범위에 있는 값을 사용하였다.

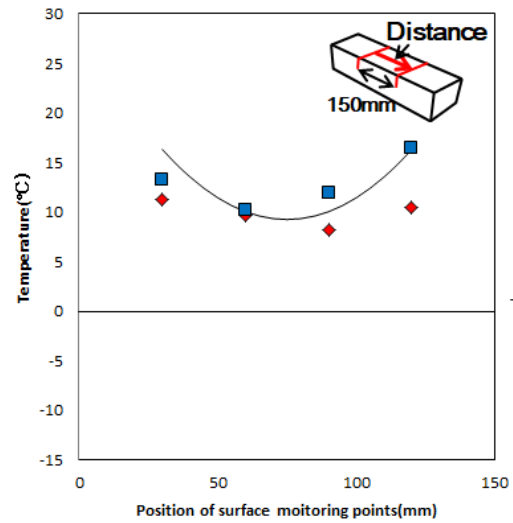
실험결과와의 매칭과정(matching process)을 통해 Fig. 8과 같은 결과를 얻으며 이때 사용된 물성치는 열전도도는 $1.1 W/(m \cdot ^\circ C)$, 비열용량은 $750 J/(kg \cdot ^\circ C)$, 필름계수는 $5.58 W/m^2/K$ 이다.

실제 공용 중인 도로에 200mm 간격으로 흠파기를 하여

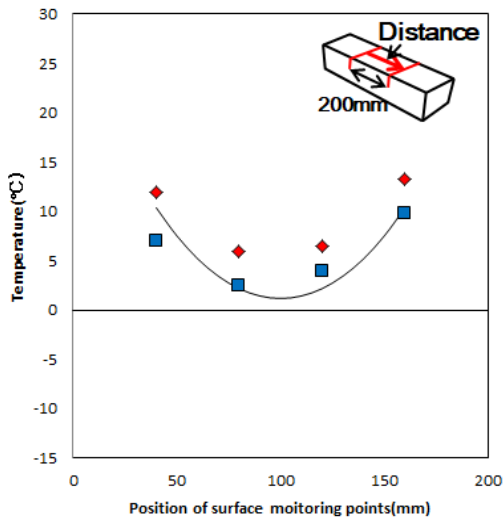
CNT를 삽입 시 도로포장 강도저하에 영향을 미치지 때문에 수치해석 결과로 얻은 물성치인 열전도도 $1.1 W/(m \cdot ^\circ C)$, 비열용량 $750 J/(kg \cdot ^\circ C)$, 필름계수 $5.5 W/m^2/K$ 를 이용하여 CNT 1,000, 1,500, 2,000mm 간격으로 설치 시 열 전도도에 대한 수치해석을 수행하였다. 실내실험의 경우 발열체의 온도를 $60^\circ C$, 발열시간을 120분으로 하여 수행한 결과였다. 실제 포장체의 수치해석은 CNT 간격을 1,000, 1,500, 2,000mm로 가정하였으며 발열온도 발열시간도 각각 $100^\circ C$ 와 600분이 적용되었다. Fig. 9에서 보듯이 상온의 표면온도를 나타낸 경우는 CNT 간격이 1,000mm와 1,500mm 두 경우였



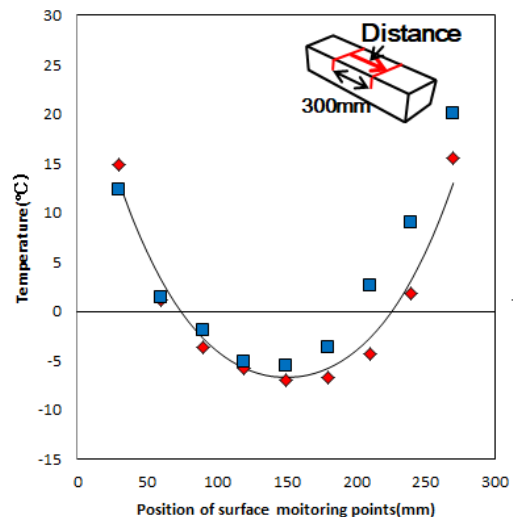
(a) Single installation of carbon nanotube (FEM)



(b) Dual installation of carbon nanotube of spacing of 150 mm (FEM)



(c) Dual installation of carbon nanotube of spacing of 200 mm (FEM)



(d) Dual installation of carbon nanotube of spacing of 300 mm (FEM)

Fig. 8. Results of simulation

Table 2. Physical properties of concrete

References	Thermal conductivity	Specific heat	Density
Zhao et al. (2011)	0.86 W/m ² C	1,046 J/kgK	2,600 kg/m ³
Wu et al. (2015)	2.42 W/m ² C	1,090 J/kg ² C	2,400 kg/m ³

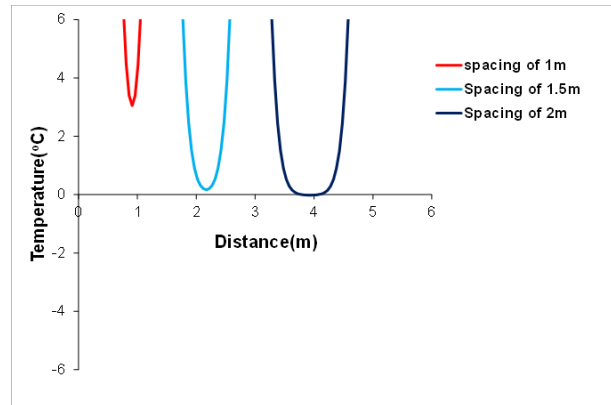
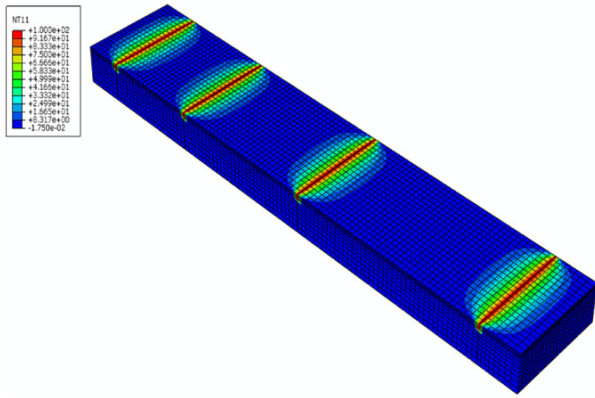


Fig. 9. Results of numerical analysis

다. 그러나 1,500mm의 경우는 표면온도가 0°C에 가깝기 때문에 향후 진행할 현장시험 적용을 위해 1,000mm에 대한 실용 및 열전도도에 대해 살펴볼 예정이다.

4. 결 론

기존 도로 결빙방지기술 개발을 위해 발열체인 CNT를 콘크리트 실험체에 삽입 후 열전달 및 열 중첩효과로 인한 온도 변화를 살펴보았으며, 이를 수치해석을 통한 검증 및 분석을 수행하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 실내실험 결과 발열체인 CNT를 1개 삽입한 경우 평균 유효발열거리가 80mm로 나타났으며, CNT 2개를 150, 200mm 간격으로 삽입하였을 경우 콘크리트 표면 온도가 0°C 이상으로 나타났음을 알 수 있었다. 이는 열 중첩효과로 인해 유효발열거리가 증가함을 알 수 있었다.
- (2) 이에 반해 300mm 간격으로 삽입하였을 경우 전체적인 표면 온도가 상승함을 볼 수 있었으나, 표면 온도가 0°C 이상과 0°C 이하로 나타났다.
- (3) 실내실험을 통해 발열체의 온도 60°C, 발열시간을 120분 하였을 때의 최적의 CNT 설치 간격은 200mm 임을 알 수 있었다.
- (4) 실내시험 결과를 바탕으로 수치해석을 통해 콘크리트 슬래브에서의 발열체의 열전도 물성치를 얻었으며, 이를 바탕으로 실제 현장실험을 위한 발열체 온도 100°C와 발열시간 600분의 수치해석 결과 1,000, 1,500mm 간격으로 발열체를 설치 시 콘크리트 표면 온도가 0°C 이상으로 나타났음을 알 수 있었다. 그러나 1,500mm인 경우 표면 온도가 0°C에 가깝기 때문에 향후 현장시험 적용을 위해 1,000mm에 대한 실용 및 열전도도에 대해 살펴볼 예정이다.

References

1. Kayama, M., Ali, M. Q., KITAHASHI, Y. and Takayoshi, K. (2005), The damage of deicing salt on two spruce tree species planted along roadsides in northern Japan, *Journal of Agricultural Meteorology*, Vol. 60, No. 6, pp. 1113~1115 (In Japanese).
2. Lee, S. H., Park, J. S., Lee, S. J. and Kim, B. C. (2010), The thermal conductivity analysis and performance evaluation on the pavement applying geothermal snow melting system, *Transactions of the Korea society of Geothermal Energy Engineers*, Vol. 6, No. 1, pp. 17~22.
3. Minsk, L. D. (1999), HEATED BRIDGE TECHNOLOGY, Heated Bridge Technology - Report on ISTECA Sec. 6005 Program.
4. Thunqvist, E. L. (2004), Regional increase of mean chloride concentration in water due to the application of deicing salt, *Science of The Total Environment*, Vol. 325, No. 1~3, pp. 29~37.
5. Tuan, C. Y. (2004), Electrical resistance heating of conductive concrete containing steel fibers and shavings, *Aci Materials Journal*, Vol. 101, No. 1, pp. 65~71.
6. Tuan, C. Y. (2008), Implementation of conductive concrete for deicing (Roca Bridge), Nebraska Department of Roads Project No.SPR-P1(04), pp. 1~565.
7. Tuan, C. Y. and Yehia, S. A. (2004), Evaluation of electrically conductive concrete containing carbon products for deicing, *Aci Materials Journal*, Vol. 101, No. 4, pp. 287~293.
8. Wang, K., Nelsen, D. E. and Nixon, W. A. (2006), Damaging effects of deicing chemicals on concrete materials, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, Issue. 2, pp. 173~188.
9. Wu, J., Yang, F. and Liu, J. (2015), Carbon fiber heating wire for pavement deicing, *Vol. 43, No. 3*, pp. 574~581.
10. Xie, P. and Beaudoin, J. J. (1995), Electrically conductive concrete and its application in deicing, *American concrete institute international concrete abstracts portal*, Vol. 154, pp. 339~418.
11. Yehia, S. A., Tuan, C. Y., Ferdon, D. and Chen, B. (2000), Conductive concrete overlay for bridge deck deicing: Mixture proportioning, optimization, and properties, *Aci Structural Journal*, Vol. 97, No. 2, pp. 172~181.
12. Yehia, S. A. and Tuan, C. Y. (1999), Conductive concrete overlay for bridge deck deicing, *ACI material journal*, Vol. 96, No. 3, pp. 382~390.
13. Zhao, H., Wu, Z., Wang, S., Zheng, J. J. and Che, G. (2011), Concrete pavement deicing with carbon fiber heating wires, *Cold regions science and technology*, Vol. 65, Issue. 3, pp. 413~420.