

# 현장시험을 통한 Carbon fiber heating wire의 콘크리트슬래브 열전달 효과

## Field Test to Investigate Heat Transferring Effect of Carbon Fiber Heating Wire on the Concrete Slab

김 희 수<sup>1)</sup> · 반 호 기<sup>†</sup>

Hee Su Kim · Hoki Ban

Received: March 6<sup>th</sup>, 2019; Revised: March 13<sup>th</sup>, 2019; Accepted: March 27<sup>th</sup>, 2019

**ABSTRACT** : Field tests with carbon fiber heating wire (CFHW) embedded inside concrete slab were performed to present the alternative heating material capable of avoid the adverse effects of traditional de-freezing salt on the structures and environment. The CFHW was inserted into the concrete slab in the shape of ‘ $\sqsubset$ ’ to improve the heat superposition and the temperature on the surface was measured using iButton. The results showed that the temperature where the CFHW’s were faced with each other increased to above zero after 12-hour at outdoor air temperature of  $-6^{\circ}\text{C}$ . Comparatively, the temperature slightly increased where the CFHW was embedded on one side because the heat was not superimposed. Hence, it can be said that the CFHW is a suitable heating material to prevent the concrete road from being frozen.

**Keywords** : Deicing system, Carbon fiber heating wire (CFHW), Concrete slab, Heat transferring

**요 지** : 기존 도로면 결빙방지기술은 염화물로 인한 도로파손 및 환경적인 문제점들 해결하기 위해 탄소섬유발열체를 콘크리트 슬래브에 ‘ $\sqsubset$ ’자 모양으로 삽입하여 현장시험을 수행하였다. iButton을 이용하여 중첩효과를 기대할 수 있는 구간과 그렇지 않은 구간에 대하여 12시간 발열하는 동안 온도를 측정하였다. 시험결과 중첩효과가 있는 구간에는 영상의 온도를 보였으며, 그렇지 않은 구간은 영상의 온도는 아니지만 콘크리트 표면 온도의 상승을 보였다. 따라서 CFHW는 발열체로 충분히 결빙방지 재료로 사용 가능 함을 시험을 통해 검증하였다.

**주요어** : 용설시스템, 탄소섬유발열체, 콘크리트 슬래브, 열전달

## 1. 서 론

겨울철 폭설과 도로결빙으로 인한 사고는 매년 증가하고 있다. 특히 도로면 결빙은 도로표면과 차량의 마찰을 감소시킴으로써, 제동거리가 길어져 대형 사고를 유발하고 치사율이 높아지게 된다(Kim et al., 2014). 이러한 피해를 미연에 방지하고자 제설제 살포, 전열선, 지열, 태양열 등을 이용한 결빙방지기술이 연구 및 실용화 중에 있다. 하지만 Kim et al.(2015)는 도로면 결빙방지기술로 가장 많이 사용 중인 제설제의 경우 주성분인 염화물이 도로면 포장의 공용 수명을 단축시키는 요인임을 밝혔으며, Jee et al.(2014), Lee & Lee(2007) 등은 도로 주변 구조물 및 차량에 부착될 경우 산화를 촉진시켜 내구성을 저하시키는 요인이라고 보고하였다. 이외도 Shin et al.(2010), Lee et al.(2013)은 염화물이 도로주변 환경오염의 주된 원인임을 지적하였다. 염화물로

인한 피해를 방지하고자 Nydahl et al.(1987)은 Virginia주의 고속도로 상에 지열파이프를 설치하였으며, 국내의 경우 Lee et al.(2010)과 Choi & Hwang(2012)가 지열파이프를 이용한 성능분석을 통해 도로면 결빙방지기술 연구를 진행하였다. 하지만 지열을 이용한 결빙방지기술은 약설의 경우 효과적으로 결빙방지를 할 수 있었지만, 강설의 경우 2시간 이전부터 가동을 시키는 등의 낮은 열로 인해 결빙방지에 효율성이 떨어진다. 이에 반해 전열선은 결빙을 방지하는 측면에서 그 효과가 탁월하다. Suh et al.(2013)은  $600 \times 600 \times 45\text{cm}$  크기의 콘크리트 슬래브 표면 아래 각각 5, 10cm 부분에 HOT-mesh를 설치하였으며, 외기온도가  $-18 \sim -2^{\circ}\text{C}$ 일 때, 표면온도가  $0 \sim 8^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하는 효과를 보여주었다. Lim et al.(2016)가  $30 \times 10 \times 10\text{cm}$  크기의 콘크리트와 아스팔트 실험체에 Carbon-fiber sheet를 표면으로부터 2,3,4cm 아래에 매입하여 90분간 발열시킨 결과 2cm 지점의 경우 초기온도에

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)

비해 최대 25°C 상승하였음을 보여주었다. Lai et al.(2016)은 60×60×25cm 크기의 콘크리트 실험체에 Carbon fiber를 10, 15cm 간격으로 설치하였으며, 외기온도 -5°C일 때, 콘크리트 표면온도가 0°C 이상의 상온으로 상승하였음을 보고하였다. Jin et al.(2017)은 Carbon nanotube plate를 콘크리트 슬래브 하부에 부착하였으며, 콘크리트슬래브 하부 표면의 온도를 -10°C로 유지하여 약 3시간 30분 실험 결과 발열체로부터 22.5cm 떨어진 지점에서의 온도가 1°C로 보였으며 이는 열전도가 상당히 일어났음을 알 수 있다. 지금까지 살펴본 발열체에 의한 결빙방지기술은 신규도로의 건설에 적합한 공법이며 기존도로에 설치할 경우 재포장을 해야 하기 때문에 비용이 많이 든다.

따라서 본 연구에서는 기존도로의 결빙방지기술의 개발의 일환으로 저자의 선행연구들(Kim & Ban(2017)와 Kim & Ban(2019))을 통해서 콘크리트 실험체에 발열체를 삽입한 실내실험 결과와 수치해석 검증을 통해 얻은 유효발열거리를 검증하고자 300×300×10cm 크기의 콘크리트 슬래브에 전력소모가 적고 시공이 간편한 Carbon fiber heating wire (CFHW)를 ‘ㄷ’ 자 모양으로 삽입 후 12시간 동안 110°C로 발열시킴으로써 도로 강도저하에 영향을 미치지 않는 발열체 간격의 열전도효율(유효발열거리, 열 중첩 효과)을 검증하였다.

## 2. 실내실험 및 수치해석 결과

본 연구에서는 도로 결빙으로 인한 피해를 방지하고자 콘크리트 부지에 발열체를 삽입하고 발열체의 발열에 따른 열전도도 변화를 확인하였다. 이를 위한 선행연구로 실내실험을 통한 유효발열거리를 측정하였으며(Kim & Ban, 2017), 이를 수치해석을 통한 검증 및 실제 도로에 발열체 간격을

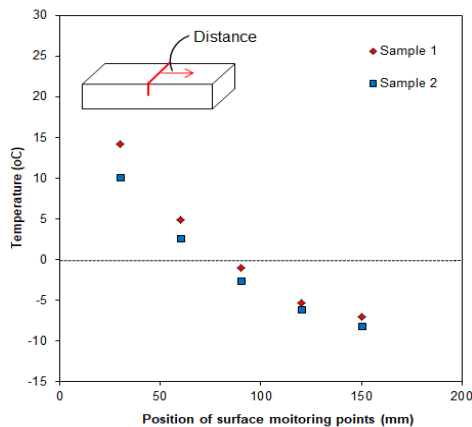
100cm로 설치 시 콘크리트 표면온도가 0°C 이상을 나타냈다(Kim & Ban, 2019). 구체적인 선행연구결과는 소절에 설명하였다.

### 2.1 실내실험 결과

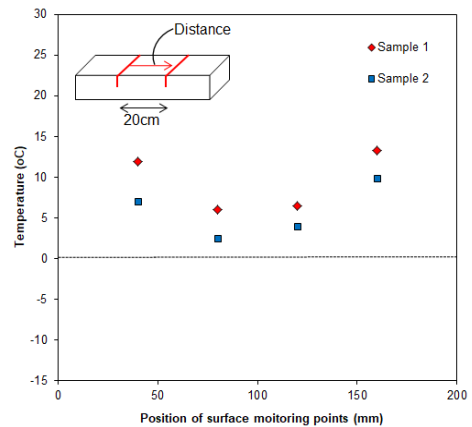
실내실험은 한국도로공사 콘크리트 포장 설계기준의 배합 비를 사용하여 실험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 실험체의 크기는 55×15×15cm로 제작을 하였으며, 실험체의 크기가 작아 흡파기 시에 파손의 우려가 있기 때문에 미리 흡 제작위해 11×11×1cm의 합판을 삽입하여 7일간의 습윤 양생을 가졌다. 합판을 제거 후 10×10×0.5cm의 발열체를 삽입하여 빈 곳을 모르타르를 채워 7일간의 습윤 양생을 가졌다. 실내실험은 냉동챔버를 이용하여 콘크리트 실험체 내부온도와 주변온도가 -10°C가 되었을 때, 발열체의 온도를 60°C로 가해 120분간 실험을 진행하였다. 실내실험 결과는 다음 Fig. 1과 같다. Fig. 1(a)는 발열체를 1개 장착한 경우로 유효발열거리(콘크리트 표면온도가 발열체로부터 0°C 이상이 되는 거리) 7.2cm로 나타났다. Fig. 1(b)는 발열체를 20cm 간격으로 2개 장착한 경우로 발열체와 발열체 사이의 표면온도가 0°C 이상으로 나타났다. 이는 발열체를 1개 장착한 경우보다 2개 장착 시 열 중첩 효과로 인한 유효발열거리가 늘어났음을 알 수 있다. 따라서 실내실험 결과 유효발열거리는 20cm였다.

### 2.2 수치해석 결과

수치해석을 통해 콘크리트 실험체와 발열체 사이의 온도 변화를 해석하고자 하였으며, 이를 위해 Fig. 2와 같이 실내 실험 결과와 매칭과정(matching process)을 통해 열전도도는  $1.1 W/(m \cdot C)$ , 비열용량은  $750 J/(kg \cdot C)$ , 필름계수는  $5.58 W/m^2/K$ 과 같은 물성치를 구했다.

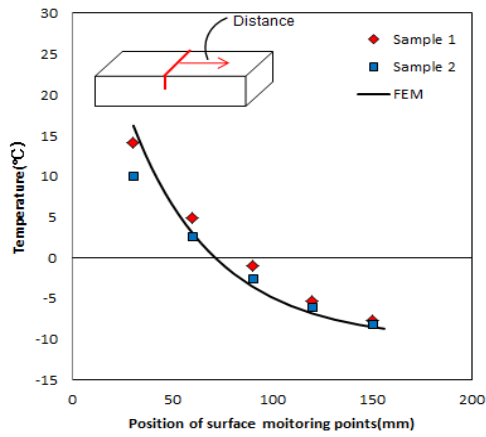


(a) Single installation of heating element

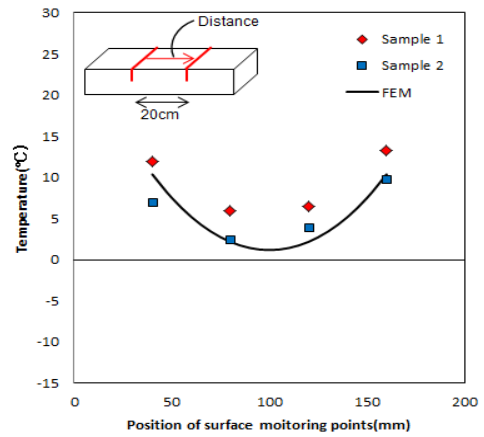


(b) Dual installation of heating element of spacing of 20cm

Fig. 1. Results of laboratory test (Kim & Ban, 2017)



(a) Single installation of heating element (FEM)



(b) Dual installation of heating element of spacing of 20cm (FEM)

Fig. 2. Results of simulation (Kim & Ban, 2019)

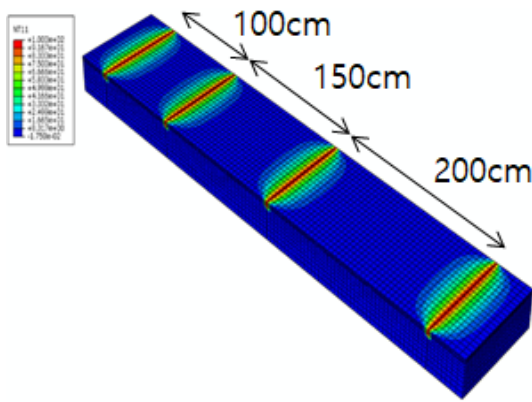
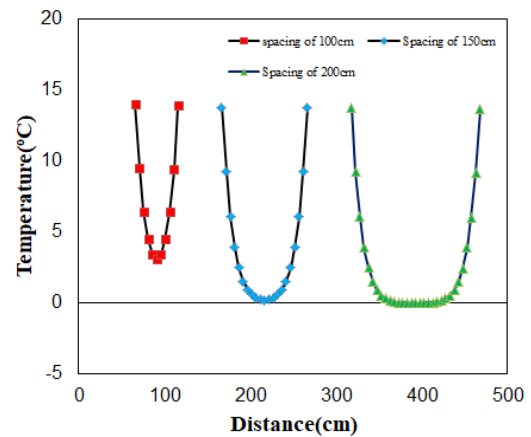


Fig. 3. Results of numerical analysis (Kim & Ban, 2019)



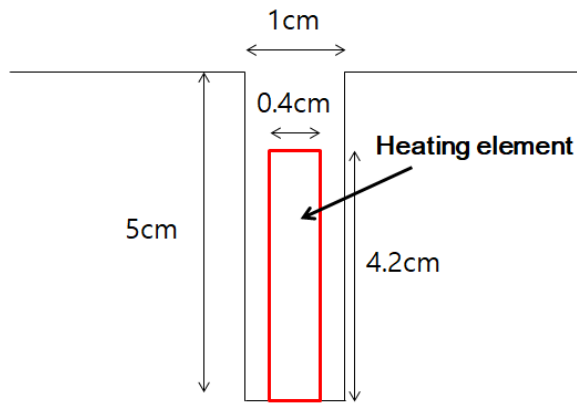
실제 공용 중인 도로에 실내실험과 수치해석 결과 얻은 유효발열거리인 20cm 간격으로 홑파기 시 도로 포장 강도 저하에 영향을 미친다. 따라서 실내실험 결과와 매칭과정을 통해 얻은 전도도  $1.1 W/(m \cdot C)$ , 비열용량  $750 J/(kg \cdot C)$ , 필름계수  $5.58 W/m^2/K$  를 이용하여 도로 포장 강도저하에 영향을 미치지 않는 최적의 발열체 간격을 찾기 위한 수치 해석을 수행하였으며, 그 결과는 다음 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 보듯이 100, 150cm 간격으로 설치 시 콘크리트 표면 온도가  $0^{\circ}C$  이상으로 나타났으나, 150cm 간격인 경우  $0^{\circ}C$  에 가깝게 나타났기 때문에 발열체를 100cm 간격으로 현장 시험을 실시하였다.

### 3. 현장시험

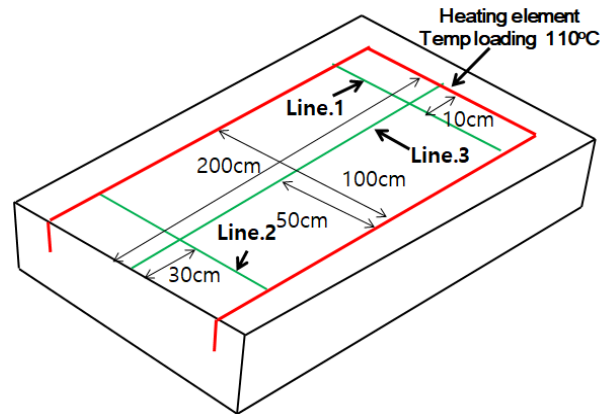
#### 3.1 현장시험

실내실험 및 수치해석을 통해 얻은 결과를 실제 현장에 적용하기 위해 현장시험을 2회에 걸쳐 실시하였다. 현장시험은

300×300×10cm 크기의 콘크리트 슬래브에 Fig. 4(a)와 같이 1×5cm 크기의 홈을 500cm 길이로 Fig. 4(b)와 같이 ‘ㄷ’자 모양의 홈파기를 실시하였다. 홈에 4.2×0.4cm 크기의 CFHW 를 500cm 길이로 삽입 후 빈 공간에 모르타르를 채워 넣어 7일간의 습윤 양생을 가졌다. 이때, 모르타르는 실내실험에서 사용된 모르타르와 같은 배합을 적용하였다. CFHW의 온도를  $110^{\circ}C$ 로 유지하여 12시간 동안 시험을 진행하였다. 콘크리트 표면 온도 측정을 위해 사용된 온도센서는 iButton을 이용하였으며, 제원은 Table 1에 나타내었다. iButton은 Fig. 4(b)와 같이 세 개의 라인(Line.1, Line.2, Line.3)에 설치되었으며, iButton의 간격은 연속성을 위해 10cm 간격으로 설치하여 온도를 측정하였다. 그림에서 보듯이 발열체의 중첩 효과가 기대되는 Line.1과 중첩이 전혀 이루어지지 않는 Line.2에서의 온도분포를 측정하였다. 마지막으로 Line.3의 경우 ‘ㄷ’자 형태 중 중심부의 온도분포를 측정하기 위해 중심선을 따라 설치하였다. Fig. 4(c)와 Fig. 4(d) 각각 iButton의 실제 설치된 모습과 발열체의 설치 및 온도변화를 측정하는 시험 전체의 모식도를 나타내고 있다.



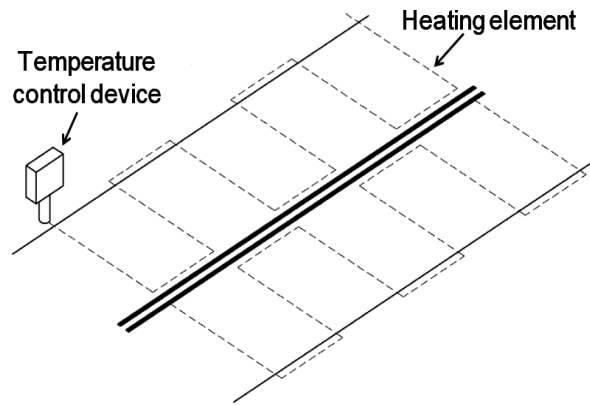
(a) Heating element insertion



(b) Location of temperature measurement



(c) iButton location



(d) Schematic drawing of deicing system

Fig. 4. Field test

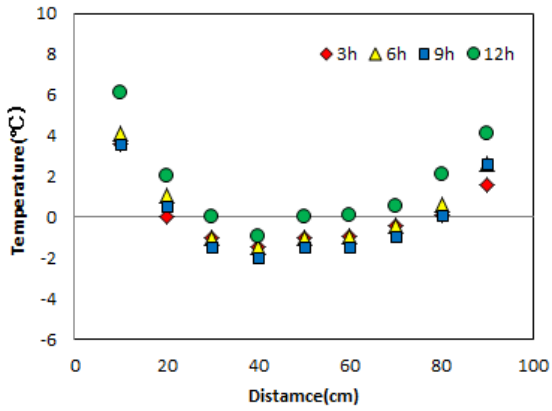
Table 1. Specific features of the iButton

Shape	Temp range	Size
	-40 ~ 85°C	1.7×1.7×0.5cm

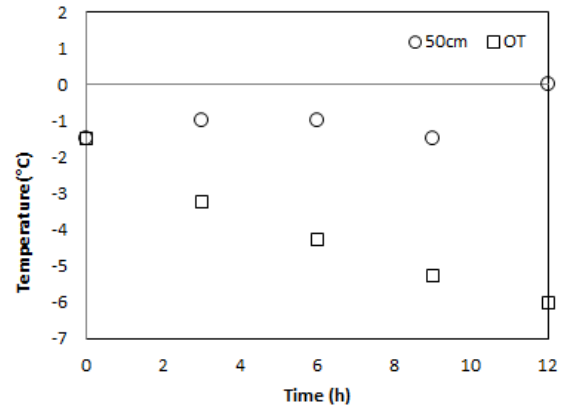
### 3.2 현장시험 결과

Fig. 5는 발열체를 ‘ㄷ’자 형태로 설치 시 발열체가 겹쳐 열 중첩 효과가 클 것으로 기대되는 Line.1에서의 콘크리트 표면온도를 측정된 결과이다. Fig. 5(a), (b), (c)는 1차 시험 결과이며, Fig. 5(a)는 시간의 경과에 따른 표면의 온도변화를 나타내고 있으며, 시간이 증가함에 따라 표면의 온도가 상승함을 알 수 있다. 발열체 가까운 부분의 온도가 중심부에 비해서 높음을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 열전달 정도가 가장 낮은 지점(발열체에서 약 50cm 떨어진 지점)에서 시간에 따른 외기온도(OT) 변화와 콘크리트 표면의

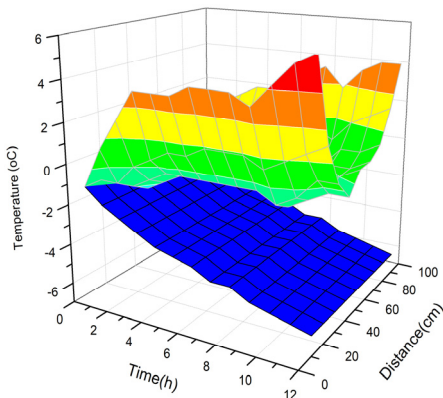
온도를 보여주고 있다. 그림에 보듯이 시간이 지날수록 외기온도가 감소함에도 불구하고 콘크리트 표면의 온도는 상승하고 있음을 보여주고 있으며, 시험시작 12시간 후에 외기온도에 비해 약 5.5°C 상승하였다. Fig. 5(c)는 Fig. 5(a)와 (b)의 결과를 종합하여 표현하기 위해 콘크리트 표면온도의 변화와 외기온도 변화를 시간과 위치의 함수로 표현하였다. 그림에서 보듯이 시간에 따른 외기온도의 감소가 급격함에도 불구하고 발열체의 영향에 따라 콘크리트의 표면의 온도는 시간의 경과에 따라 지속적으로 증가함을 보여주고 있다.



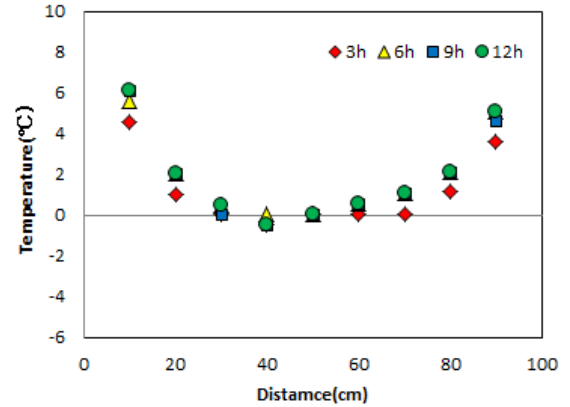
(a) Temperature at different surface location with time (field test 1)



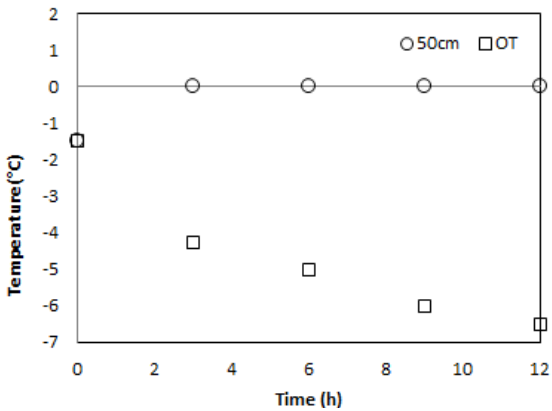
(b) Temperature at center vs. outdoor temperature (field test 1)



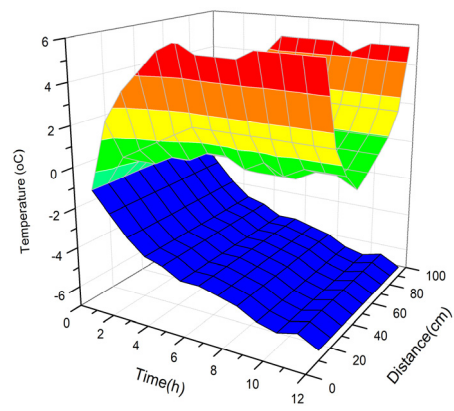
(c) Spatial temperature variation with time and distance (field test 1)



(d) Temperature at different surface location with time (field test 2)



(e) Temperature at center vs. outdoor temperature (field test 2)



(f) Spatial temperature variation with time and distance (field test 2)

Fig. 5. Results of field test for Line.1

Fig. 5(d), (e), (f)는 2차 시험 결과이며, 이는 1차 시험 결과와 유사한 결과를 보여주고 있다. 2차에 걸친 시험을 통해 발열체로부터 발생된 열이 중첩효과를 통해 표면의 온도가 외기온도의 감소에도 불구하고 증가함을 알 수 있었다. 또한 12시간 후의 결과는 0°C 이상인 상온의 온도에 도달함을 알 수 있었다.

Fig. 6은 발열체를 ‘ㄷ’자 형태로 설치 시 발열체가 겹치지 않아 열 중첩 효과가 적을 것으로 기대되는 Line.2에서의 콘크리트 표면온도를 측정된 결과이다. Fig. 6(a), (b),

(c)는 1차 시험 결과이며, Fig. 6(a)는 시간의 경과에 따른 표면의 온도변화를 나타내고 있으며, Fig. 5에서 나타낸 결과와 달리 시간이 경과함에도 불구하고 표면의 온도가 상승하지 않고 있음을 알 수 있다. 이는 발열체 간의 중첩효과가 적어 외기온도의 영향에 의한 것으로 판단된다. 이는 Fig. 6(b) 나타낸 온도가 가장 낮은 중심부에서의 시간에 따른 표면의 온도와 외기온도를 비교한 그래프를 보면 보다 명확히 알 수 있다. 외기온도의 감소와 더불어 표면의 온도도 시간에 따라 감소함을 알 수 있다. 하지만 외기온도

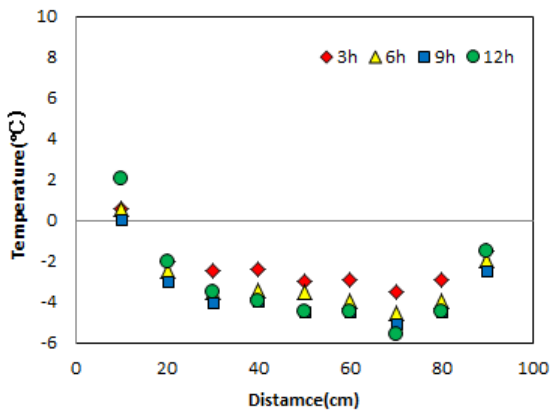


와 표면온도의 차이를 보면 시간이 지남에 따라 그 간격이 커짐을 알 수 있다. 이는 외기온도의 감소정도보다 발열체에 전달된 열의 손실이 적음을 알 수 있다. 구체적으로는 시험시작 12시간 후의 표면온도는 외기온도에 비해 약 1.1°C 상승함을 알 수 있었다. Fig. 6(c)는 Fig. 6(a)와 (b)의 결과를 종합하여 콘크리트 표면온도의 변화와 외기온도 변화를 시간과 위치의 함수로 공간적으로 표현하였다. 그림에서 보듯이 시간에 따른 외기온도의 감소가 급격함에도 불구하고 발열체의 영향에 따라 콘크리트의 표면의 온도는 시간

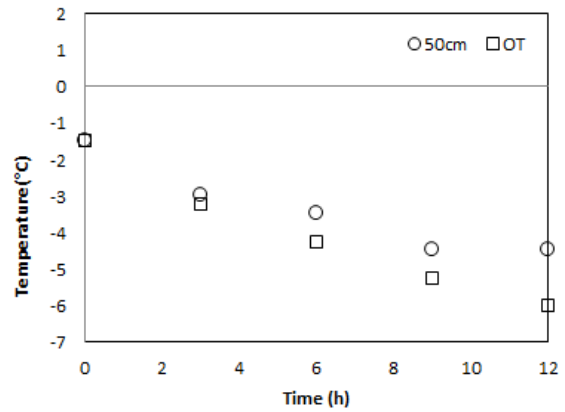
의 경과에 따라 크지는 않지만 지속적으로 증가함을 보여주고 있다.

Fig. 6(d), (e), (f)는 2차 시험 결과이며, 이는 1차 시험 결과와 유사한 결과를 보여주고 있다. 2차에 걸친 시험을 통해 발열체로부터 발생된 열로 인해 중첩효과가 있을 경우에 비해 상승의 폭은 작지만 표면의 온도는 지속적으로 상승함을 보여주고 있다.

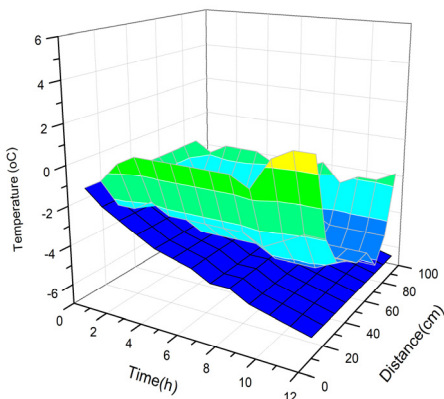
Fig. 7는 발열체를 ‘ㄷ’자 형태로 설치 시 발열체 사이의 중심지점 온도변화를 확인하기 위해 Line.3에서 콘크리트 표



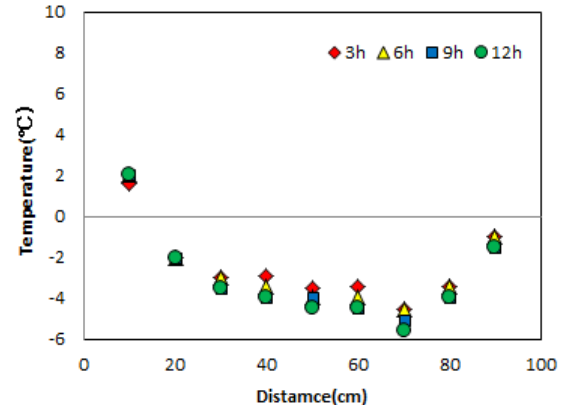
(a) Temperature at different surface location with time (field test 1)



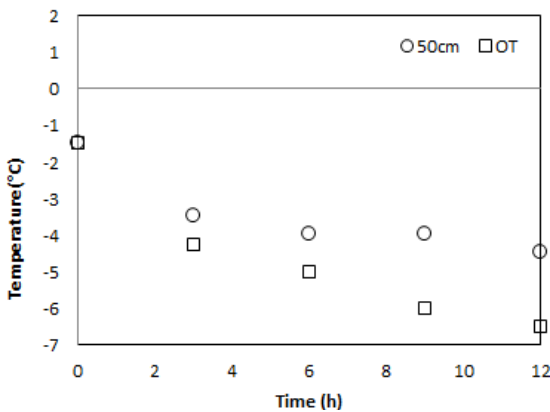
(b) Temperature at center vs. outdoor temperature (field test 1)



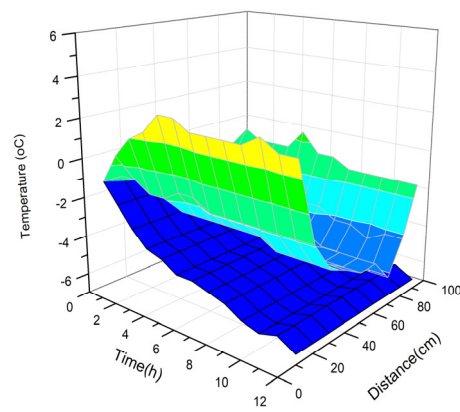
(c) Spatial temperature variation with time and distance (field test 1)



(d) Temperature at different surface location with time (field test 2)



(e) Temperature at center vs. outdoor temperature (field test 2)



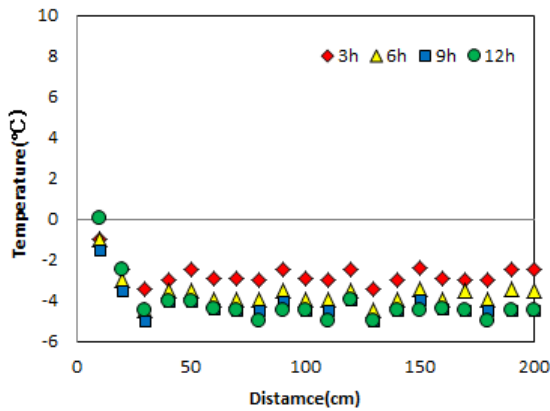
(f) Spatial temperature variation with time and distance (field test 2)

Fig. 6. Results of field test (Line,2)

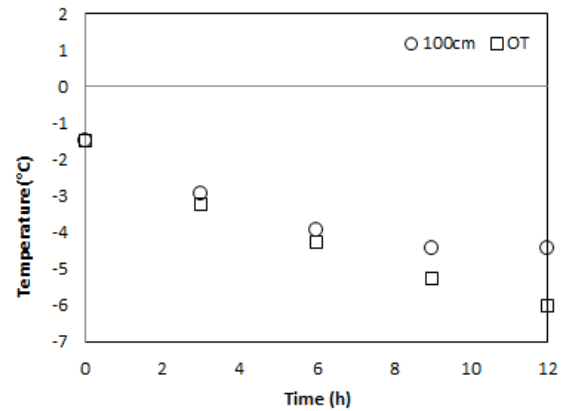
면온도를 측정된 결과이다. Fig. 7(a), (b), (c)는 1차 시험 결과이며, Fig. 7(a)에서 보듯이 시간이 증가함에 따라 표면 온도가 상승함을 알 수 있다. 시험시작 12시간 후에 발열체로부터 30cm 지점부터 200cm 지점까지 약  $-4.4^{\circ}\text{C}$ 로 온도가 유지되었다. Fig. 7(b)는 발열체 사이의 중심지점의 온도변화와 외기온도변화를 비교한 결과이다. 그림에 보듯이 시간이 지날수록 외기온도에 비해 중심부의 온도가 상승하였으며, 시험시작 12시간 후에 외기온도에 비해 약  $1.1^{\circ}\text{C}$  상승하였다. Fig. 7(c)는 콘크리트 표면온도와 외기온도의 변화를 시

간(x), 온도(y), 위치(z)로 3차원그래프로 나타낸 결과이다. 그림에 보듯이 시험시작 12시간 후에 외기온도에 비해 온도가 상승하였다.

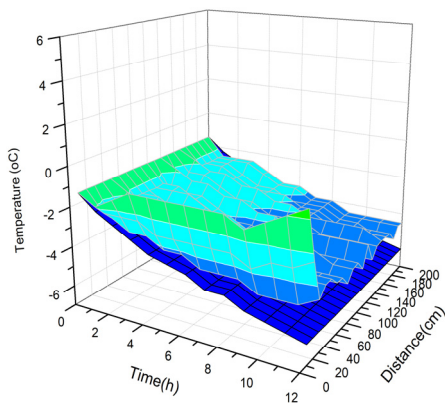
Fig. 7(d), (e), (f)는 2차 시험 결과이며, 이는 1차 시험 결과와 유사한 결과를 보여주고 있다. 2차에 걸친 시험을 통해 발열체로부터 발생된 열로 인해 중첩효과가 있을 경우에 비해 온도의 크게 상승하진 않았지만 표면의 온도는 지속적으로 상승함을 보여주고 있다.



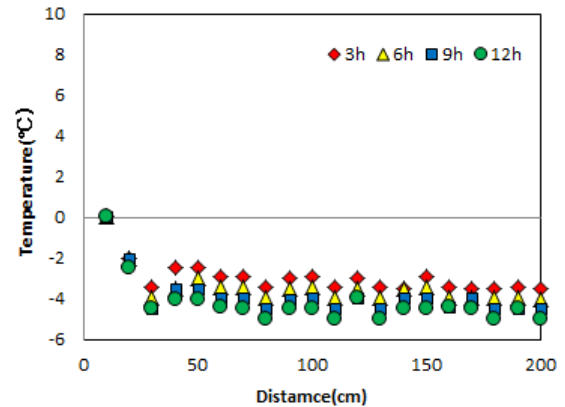
(a) Temperature at different surface location with time (field test 1)



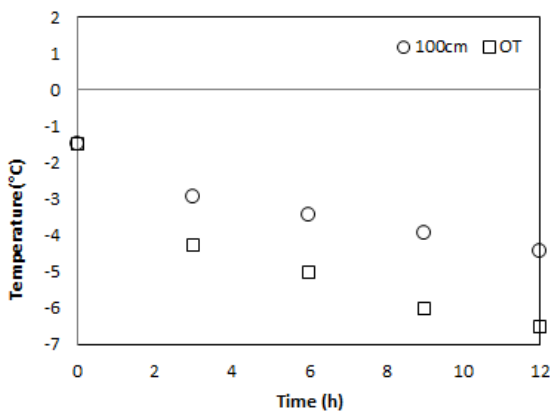
(b) Temperature at center vs. outdoor temperature (field test 1)



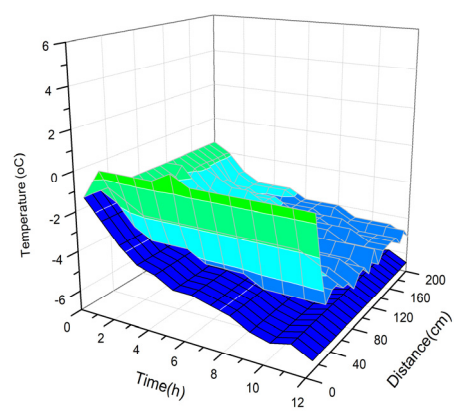
(c) Spatial temperature variation with time and distance (field test 1)



(d) Temperature at different surface location with time (field test 2)



(e) Temperature at center vs. outdoor temperature (field test 2)



(f) Spatial temperature variation with time and distance (field test 2)

Fig. 7. Results of field test (Line,3)

## 4. 결 론

도로 결빙으로 인한 피해를 방지하고자 선행연구를 통해 열전달 및 열 중첩 효과로 인한 유효발열거리를 확인하였으며, 본 연구에서는 현장시험을 통해 콘크리트 슬래브의 온도변화를 측정함으로써 발열체의 열전달 효과를 살펴보았으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 발열체를 콘크리트 슬래브에 ‘ㄷ’자 형태로 설치하였으며, 열 중첩 효과에 따라 세 영역으로 나누어 온도를 측정하였다. CFHW가 양쪽으로 마주보고 있는 (Line.1)의 경우 발열체에서 발생한 열의 중첩으로 인해 외기온도가 시간에 따라 급격히 감소함에도 불구하고 12시간 발열 후에는 중첩효과가 가장 적은(발열체와 발열체의 중간지점)곳도 영상의 온도를 나타내었다.
- (2) 이에 반해 열 중첩 효과가 적은 발열체의 열전도가 한쪽방향으로만 전달되는 구간인 Line.2의 경우 중첩효과가 있었던 Line.1의 경우보다 온도가 낮았으며, 심지어 시간의 경과에 따라 외기온도가 급격히 낮아졌을 때 표면온도도 동반 감소함을 알 수 있었다. 이는 중첩효과가 없어 외기온도에 영향을 많이 받은 것으로 판단된다. 하지만 외기온도가 감소하는 기울기에 비해 훨씬 완만한 감소를 보여주었다. 이는 발열체로 인해 상승된 표면온도가 어느 정도 유지되고 있음을 알 수 있다.
- (3) 발열체의 설치 형태상 중첩효과가 가장 작은 Line.3의 경우의 결과는 Line.2와 유사하게 외기온도의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다. 하지만 이 구간도 외기온도에 비해 온도의 상승을 보여주고 있으며, 특이한 것은 외기온도에 비해 온도의 상승은 보이지만 일정한 온도에서 수렴함을 알 수 있다.
- (4) 각 구간마다 시간과 위치에 따라 온도변화 분포가 다르게 나타나고 있지만 전체적인 결빙방지 시스템으로 봤을 경우 중첩효과가 있는 구간의 온도로 인해 해빙이 시작되면 점차적으로 해빙지역이 확대되어 전 구간으로 해빙이 될 것으로 기대할 수 있다. 따라서 본 연구의 시험에 사용된 CFHW를 ‘ㄷ’자 형태로 기존 도로에 설치하였을 때 도로면의 결빙을 방지할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(19RDRP-B066780)에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## References

1. Choi, D. I. and Hwang, K. I. (2012), An evaluation and prediction of performance of road snow-melting utilized by ground source heat pump, *Journal of Korean Solar Energy Society*, Vol. 32, No. 3, pp. 138~145.
2. Jee, S. C., Kim, B. H. and Kim, I. S. (2014), A case study on chloride corrosion for the end zone of concrete deck subjected to de-icing salts added calcium chloride, *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 62, No. 6, pp. 87~93.
3. Jin, H. W., Kim, T. S. and Hwang, Y. C. (2017), Analysis of temperature change of tunnel lining with heating element, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 18, No. 1, pp. 5~12.
4. 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 Geoenvironmental Society*, Vol. 18, No. 12, pp. 59~63.
5. Kim, H. S. and Ban, H. K. (2019), Integrated experimental-numerical approach to investigate the heat transferring effect of carbon nanotube on the concrete slab, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 20, No. 1, pp. 51~56.
6. Kim, C. W., An, S. H., Park, H. Y., Lee, J. H. and Jung, C. K. (2015), A study to analyze service life of expressway pavement according to traffic volumes and de-icing chemicals, *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 35~41.
7. Kim, S. Y., Hong, H. K., Na, H. H. and Kim, S. K. (2014), Analysis of the cause of the accident and the road surface ice decreases study, *Journal of the Korea Society of Road Engineers*, Vol. 2014, No. 3[2014], pp. 223~228.
8. Lai, Y., Liu, Y., Ma, D. X. and Xin, S. (2016), The influence of carbon fiber heating wire spacing on concrete pavement temperature, 2nd annual international conference on advanced material engineering (AME 2016), pp. 804~808.
9. Lee, K. B. and Lee, S. W. (2007), Effects of deicer on concrete pavement distress, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 1D, pp. 73~80.
10. Lee, S. J., Kim, B. C., Seo, U. J., Lee, S. H. and Lee, J. H. (2010), The thermal conductivity analysis on the pavement applying geothermal snow melting system, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 2010, pp. 221~228.
11. Lee, S. Y., Kim, W. T., Ju, J. H. and Yoon, Y. H. (2013), Effect of calcium chloride concentration on roadside ground cover plant growth, *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, Vol. 41, No. 4, pp. 17~23.
12. Lim, C. S., Park, K. P., Lee, J. J. and Lee, B. S. (2016), Fundamental study for development of an anti-icing pavement system using carbon-fiber sheet, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 18, No 3, pp. 59~65.
13. Nydahl, J. E., Pell, K. and Lee, R. (1987), Bridge deck heating with ground-coupled heat pipes, *ASHRAE Transaction*, Vol. 93.
14. Shin, S. S., Park, S. D., Kim, H. S. and Lee, K. S. (2010), Effects of calcium chloride and eco-friendly deicer on the plant growth, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 32, No. 5, pp. 487~498.
15. Suh, Y. C., Seo, B. S., Song, J. K. and Cho, N. H. (2013), A study on field applicability of underground electric heating mesh, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 19~27.