

# 발열체가 적용된 터널 라이닝 내부 및 배면의 온도변화 분석

## Analysis of Temperature Change of Tunnel Lining with Heating Element

진 현 우<sup>1)</sup> · 김 태 식<sup>1)</sup> · 황 영 철<sup>†</sup>

Hyunwoo Jin · Teasik Kim · Youngcheol Hwang

Received: January 20<sup>th</sup>, 2016; Revised: February 1<sup>st</sup>, 2016; Accepted: November 30<sup>th</sup>, 2016

**ABSTRACT** : The damage of the tunnel lining on the cold regions can be represented by cracks and leaks caused by freezing of ground water. However, domestically, the relevant construction guidelines are not provided so far. Thus, in this research, the mechanical behavior and thermal conductivity of designated tunnel area are measured using instrumentation system installed in the lining concrete inside tunnels in order to analysis their behavior with regard to temperature variations. Previous research mainly focused on the effect of temperature on the tunnel lining based on the air and initial ground temperature at urban regions. Thus, this study analyzes effects of air temperature and initial ground temperature of designated tunnel area at the cold regions. The temperature of the groundwater at the backfill of the tunnel lining are analyzed to evaluate the heating element. Numerical analyses are performed to evaluate the heating element with regard to the various initial ground temperatures.

**Keywords** : Cold region, Tunnel lining temperature, Winter season, Insulator, Heating element

**요 지** : 한랭지역에 건설된 터널 라이닝은 터널 주변 지하수의 결빙 등으로 인한 균열, 누수 및 백태 등이 빈번하게 발생하게 된다. 이러한 터널의 동결피해는 동절기 외기온도에 의해 터널 내부 라이닝 및 배면의 지반온도의 하강으로 발생하게 되므로 시공 시 단열재를 설치하여 동결로 인한 피해를 저감하거나 기 시공된 터널에서는 단열재를 설치하거나 발열체를 설치하여 동결로 인한 피해를 저감할 수 있다. 본 연구에서는 대기온도의 변화에 의한 라이닝 배면의 지반온도 변화와 발열체가 설치되었을 경우 라이닝 및 배면 지반의 온도변화를 분석함으로써 동결피해 저감을 위한 대응방안 시 나타나는 효과를 분석하였다.

**주요어** : 한랭지역, 터널라이닝 온도, 동절기, 단열재, 발열체

## 1. 서 론

최근 한랭지(강원지역)의 도로터널의 경우 겨울철 동결 현상으로 인하여 라이닝, 갱구부 등에 균열 및 누수, 고드름 발생 등의 유지 관리상 많은 문제점이 증가하고 있는 실정이다. 하지만 이에 따른 국내의 동결피해 대상 구조물과 관련한 별도의 시공지침은 마련되어 있지 않으며, 동결피해와 관련해서는 도로 포장을 위한 동결지수 및 동상방지층 관련 연구가 주를 이루고 있다.

한랭지에 건설된 터널의 경우 결빙이나 터널 주변지반 지하수의 동결은 동절기 터널 배수 장애의 원인이 되며 라이닝 배면의 원지반 동결에 의하여 라이닝을 내공 측으로 압출시키는 변상원인으로 작용하기도 한다(Kim et al., 2011).

터널 라이닝에 관한 연구는 Kim et al.(2011)이 터널 온도계측 데이터를 통한 라이닝 단열 설계에 배면의 동결지수 기준을 제안하였으며, Yoo et al.(2014)는 도심지 지하철 터

널의 콘크리트 라이닝에 계측센서를 설치, 터널 내부의 온도 변화에 따른 콘크리트 라이닝의 거동을 분석하였고, Lee et al.(2012)는 터널 내부의 온도변화에 따른 터널의 거동을 계측 분석하였다. 한국도로공사 도로교통연구원(2013)에서는 동결발생사례를 분석하고 국내외 터널 동결방지를 위한 조사 분석 및 동결장비를 위한 기준수립의 기초자료를 분석하였다.

콘크리트 라이닝의 열전도에 관한 연구는 Kim et al.(2014)이 단열성능향상 재료인 마이크로기포제(Micro Form Admixture, 이하 MFA), 규조토 미분말(Calcined Diatomite Powder, 이하 CDP) 그리고 경량골재(Lightweight Aggregate, 이하 LA)를 혼합 사용한 콘크리트의 물리·역학 및 열전도 특성을 분석하여 단열성능 향상 콘크리트의 개발의 기초자료를 제시하였으며, Park et al.(2013)은 구조용으로 사용 가능한 콘크리트를 개발하기 위한 기초자료를 제시하였다. Kim et al.(2001)은 수화열에 의한 온도해석의 정확도를 제고하기 위해 국내

1) Department of Civil Engineering, Sang Ji University

† Department of Civil Engineering, Sang Ji University (Corresponding Author : ychwang@sangji.ac.kr)

에서 사용되는 골재와 주로 5종 시멘트를 이용한 콘크리트의 열전도율에 영향을 미치는 각종 요인에 대하여 실험 및 연구결과를 비교하여 열전도율의 변화에 대한 모델식을 제안하였다.

Li et al.(2015)는 현장 터널 라이닝의 표면 온도를 모니터링 한 결과, 연간 온도변화, 터널 내부 공기 흐름, 온도 변화에 의한 터널 라이닝 표면의 열전달 최대 유속은 36.08 W/m<sup>2</sup>이라 제시하였으며, Sutoh et al.(2013)는 콘크리트 라이닝의 손상데이터를 활용하여 손상 확률 데이터의 모델을 제안하였고, Maruyama et al.(2013)은 한랭지역에서의 콘크리트 라이닝에 대한 열화 프로세스 확률 모델을 제안하였다. 하지만 국내에서는 한랭지역에서의 콘크리트 라이닝 해석이 정례화되어 있지 않은 상태이므로 동결피해를 저감시키기 위한 라이닝의 열전도율 및 분포도 등에 대한 연구가 필요하다.

기존의 연구에서는 주로 도심지에서의 콘크리트 라이닝 거동 해석, 열전도율의 변화를 제시하고 있으나, 한랭지역에 시공된 도로터널 라이닝에 대한 단열재 및 발열체에 의한 거동해석은 연구되지 않은 상태이다. 따라서, 본 연구에서는 터널 라이닝 외부에서의 단열시공이나 라이닝의 온도를 상승시키기 위한 발열체를 활용할 경우 외기온도의 변화에 따른 라이닝 및 라이닝 배면부 온도저하 억제 정도를 분석하여 향후 동결피해 저감을 위한 자료로 활용하고자 하였다.

## 2. 열전달 해석

열전달 해석은 온도차에 의한 열흐름과 이에 따른 온도 분포 및 변화를 해석하는 것으로, 본 연구에서는 발열체의 발열에 따른 라이닝과 라이닝 배면지반의 온도변화를 해석하고자 하였다.

다음 Fig. 1은 직사각 체적요소를 통한 3차원 열전도를

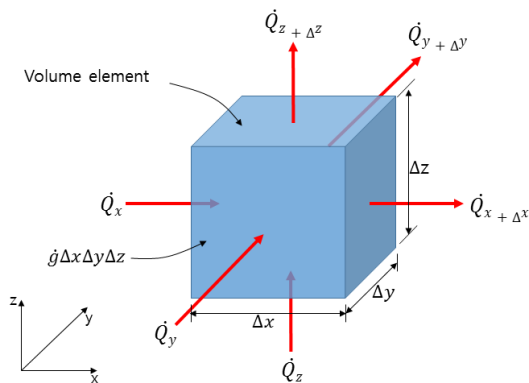


Fig. 1. General heat conduction in cartesian coordinates

나타낸 것이며, 크기가 각각  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ 인 직육면체에서  $\Delta t$  동안의 에너지 균형은 다음 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 직육면체의 체적  $V_{element} = \Delta x \Delta y \Delta z$ 에서의 에너지 변화와 열발생률은 다음 Eq. (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_x + \dot{Q}_y + \dot{Q}_z - \dot{Q}_{x+\Delta x} - \dot{Q}_{y+\Delta y} - \dot{Q}_{z+\Delta z} + E_{gen,element} \\ = \frac{\Delta E_{element}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta E_{element} &= E_{t+\Delta t} - E_t = mc(T_{t+\Delta t} - T_t) \\ &= \rho c \Delta x \Delta y \Delta z (T_{t+\Delta t} - T_t) \end{aligned}$$

$$E_{gen,element} = e_{gen} V_{element} = e_{gen} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2)$$

위의 식을 정리하면 다음 Eq. (3)과 같은 일반적인 열전도 방정식을 얻으며, 일정 열전도도를 가정할 때 정상상태에서의 열전도 방정식은 다음 Eq. (4)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{gen} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{e}_{gen}}{k} = 0 \quad (4)$$

위의 식에서, k는 열전도도, T는 온도,  $\dot{e}_{gen}$ 은 단위체적당 열발생률,  $\rho$ 는 밀도, c는 비열용량을 나타낸다. 본 연구의 경우는 외부 열원으로부터 시간의 경과에 따라 지속적으로 열을 공급시키므로 외부 열원(발열체)에 의한 콘크리트 라이닝의 열전달해석을 통한 콘크리트 라이닝 및 배면의 지반 온도 분석을 수행하였다.

## 3. 수치해석 조건

Hwang(2013)은 최근 40여 년간의 국내 터널, 비탈면, 옹벽 등과 같은 지반구조물의 보수보강 이력을 분석한 결과 강원도 등과 같은 저온지역에 설치된 구조물의 보수보강 비율이 다른지역에 비하여 높다고 하였다. 동결지역에 설치되어 운용 중인 터널구조물의 터널 라이닝의 동결피해는 콘크리트 라이닝 배면 지반 및 간극수 혹은 지하수의 결빙에 의한 영향이 크므로 이에 대응하는 방법을 적용하여 터널의 보수보강비율을 줄일 수 있을 것이다.

따라서, 본 연구에서는 터널 라이닝 외부에서의 단열시공이나 라이닝 온도를 상승시키기 위한 발열체를 활용할 경우 외기온도의 변화에 따른 라이닝 배면부 온도저하 억제

정도를 분석하고자 하였으며, 이를 통하여 터널의 동결피해 저감을 위한 접근방안에 대한 기술적 데이터를 제공하고자 하였다.

외기 온도변화 및 발열체에 의한 터널라이닝 및 배면지반의 온도변화를 평가하기 위하여 수치해석기법을 이용하였으며, ABAQUS 프로그램을 사용하여 외기온도, 발열체의 온도, 지반 점착력, 단위중량, 열전도율을 고려하고자 하였다. 수치해석을 통하여 외기 온도변화에 따른 터널 라이닝의 온도변화 및 라이닝 배면 수분의 온도변화를 분석하였다. 해석에 적용한 터널 라이닝의 두께는 ‘콘크리트 라이닝’(한국철도시설공단, 2014)에서 제시하고 있는 표준두께 300mm의 기준을 참고하였으며, 수분은 20mm, 지반은 440mm로 모델링하여 분석하였다(Fig. 2).

적용 물성치는 (a) Soil, (b) Water (c) Concrete(with heating)의 경우 ‘콘크리트표준시방서 해설’(한국콘크리트학회, 2009)

과 ‘Heat Transfer’(SciTech, 2013)에서 제시한 물성치를 참고하였으며, 두께산정에 있어서는 ‘콘크리트 라이닝’(한국철도시설공단, 2014)을 참고하였다. (d) Heat insulating material의 물성치 및 두께의 경우 Kim et al.(2011)의 적정단열두께 산정을 위한 해석에서 역해석을 통한 물성치 및 두께를 적용하였다. 발열체 적용 온도는 374K(100°C), 초기온도는 284K(10.85°C), 대기 온도의 경우 263K, 253K, 243K를 적용하였다. 적용 물성데이터는 다음 Table 1과 같다.

#### 4. 터널 라이닝 배면 온도변화 분석

터널 라이닝 배면의 온도변화는 터널 내부의 대기온도에 영향을 받으며, 터널 내 온도는 터널 입출구부에서의 거리에 따라서도 영향을 받게 된다. 따라서, 터널 라이닝의 동결

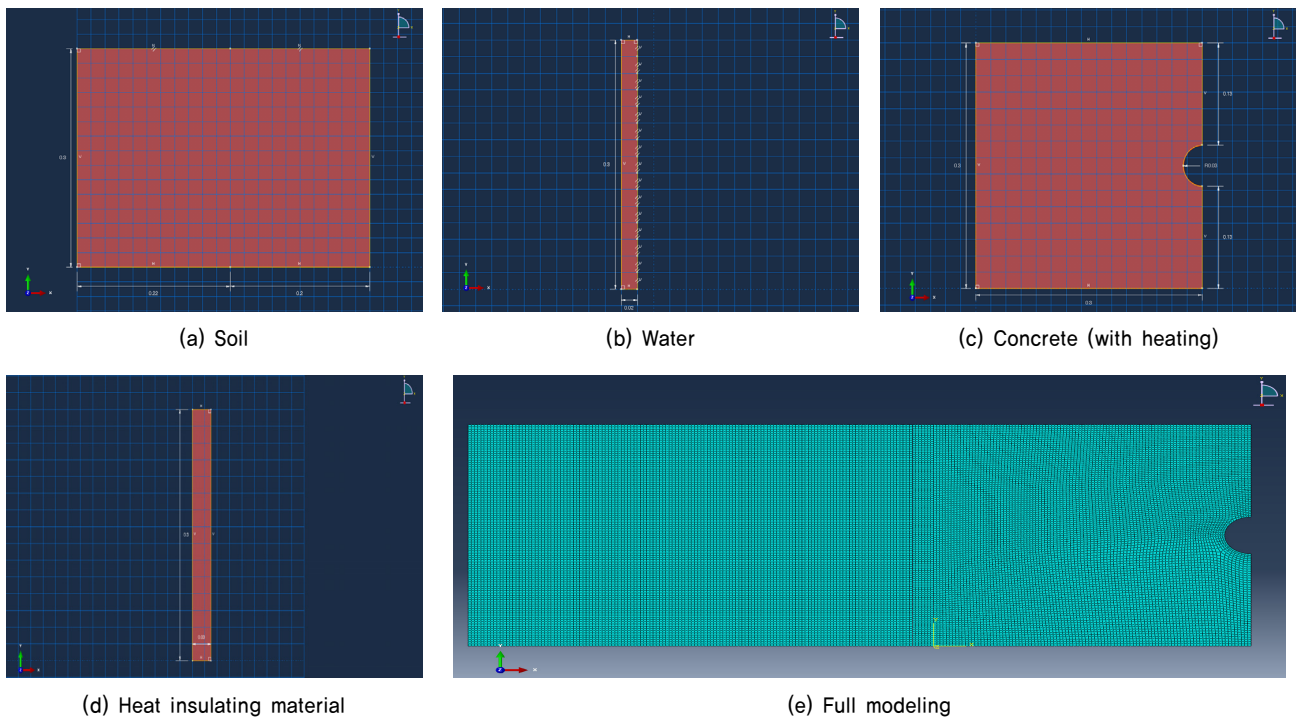


Fig. 2. Numerical modelling for heat transfer analysis

Table 1. Input data for analysis

	(a) Soil	(b) Water	(c) Concrete	(d) Heat insulating material
Length (m)	0.44	0.02	0.30	0.03
Height (m)	0.30	0.30	0.30	0.30
Density ( $kg/m^3$ )	2,050	1,000	2,300	33
Conductivity ( $W/m \cdot K$ )	0.52	19.60	1.40	0.035
Specific heat ( $J/kg \cdot K$ )	1,840	4,179	800	837.4
Heat temperature (K)	374K (100.85°C)			
Predefined field temperature (K)	284K (10.85°C)			
Air temperature (K)	263K (-10.15°C), 253K (-20.15°C), 243K (-30.15°C)			

로 인한 손상은 기온의 계절적 변화 및 일일변화 그리고 터널 입출구부로 부터의 거리를 고려할 필요가 있다.

본 연구에서는 외부 온도저하에 따라 터널 라이닝 배면의 온도가 영하로 내려가는 데에 걸리는 시간을 분석하고, 라이닝 외부에 발열체를 설치할 경우 발열체에 의해 라이닝 배면의 온도 상승효과 및 시간 등을 분석하였다. 또한 실제 강원도 홍천지역의 동절기 온도변화 자료를 적용하여 터널 라이닝 배면의 온도변화를 예측하고자 하였다.

#### 4.1 대기온도에 따른 터널 라이닝 배면의 온도 변화

터널 라이닝 외부 기온에 따른 배면의 온도변화를 분석하기 위하여 두께 300mm의 라이닝 표면에 일정온도를 유지시키고 시간변화에 따른 라이닝 배면의 수분온도를 해석하였다. 대기온도는 각각 263K(-10°C), 253K(-20°C), 253K(-30°C)로 하였으며 시간에 따른 배면의 온도변화는 다음 Table 2와 같다.

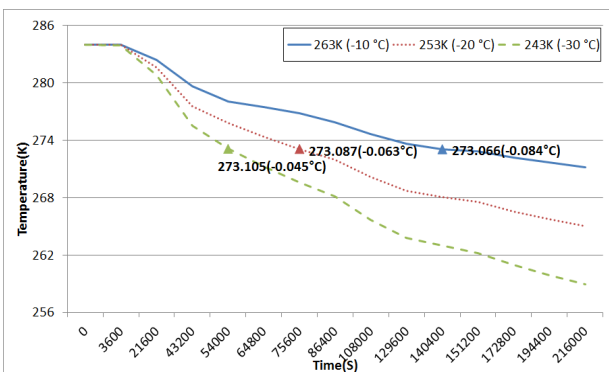


Fig. 3. Result of temperature change at rear side tunnel lining by air temperature

Table 2. Temperature change at rear side tunnel lining by air temperature

Time (sec)	263K (-10.15°C)	253K (-20.15°C)	243K (-30.15°C)
0	284.000 (10.85°C)	284.000 (10.85°C)	284.000 (10.85°C)
3,600	283.985 (10.835°C)	283.956 (10.806°C)	283.914 (10.764°C)
21,600	282.380 (9.23°C)	281.578 (8.428°C)	280.797 (7.647°C)
43,200	279.626 (6.476°C)	277.562 (4.412°C)	275.486 (2.336°C)
54,000	278.023 (4.873°C)	275.838 (2.688°C)	<b>273.105 (-0.045°C)</b>
64,800	277.474 (4.324°C)	274.372 (1.222°C)	271.267 (-1.883°C)
75,600	276.834 (3.684°C)	<b>273.087 (-0.063°C)</b>	269.566(-3.584°C)
86,400	275.864 (2.714°C)	271.986 (-1.164°C)	268.110 (-5.04°C)
108,000	274.627 (1.477°C)	270.156 (-2.994°C)	265.690 (-7.46°C)
129,600	273.649 (0.499°C)	268.711 (-4.439°C)	264.071 (-9.079°C)
140,400	<b>273.066 (-0.084°C)</b>	268.093 (-5.057°C)	262.962 (-10.188°C)
151,200	272.856 (-0.294°C)	267.540 (-5.61°C)	262.230 (-10.92°C)
172,800	272.199 (-0.951°C)	266.571 (-6.579°C)	260.949 (-12.201°C)
194,400	271.646 (-1.504°C)	265.755 (-7.395°C)	259.869 (-13.281°C)
216,000	271.173 (-1.977°C)	265.057 (-8.093°C)	258.946 (-14.204°C)

계산된 값으로부터 콘크리트 라이닝 배면의 온도가 영하로 내려가는 데에 소요되는 시간은 외기온도가 263K시 약 140,400s(39hr) 시간, 253K인 경우는 약 75,600s(21hr), 243K인 경우는 약 54,000s(15hr) 시간이 소요되는 것으로 계산되었다(Fig. 3).

#### 4.2 발열체에 의한 터널 라이닝 배면의 온도 변화

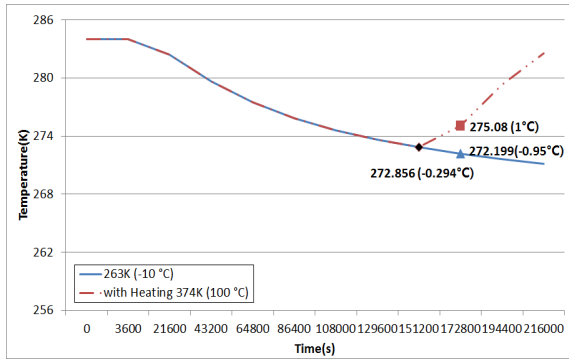
발열체는 터널 라이닝 배면의 결빙을 방지할 목적으로 라이닝 표면에 설치하는 경우를 가정하고, 터널 배면의 수분 온도가 영하로 떨어지는 시점에 발열체 온도를 374K(100°C)로 유지할 경우 라이닝 배면의 수분온도가 다시 영상으로 돌아오는데 소요되는 시간을 해석하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다.

Fig. 4에서 보는 것과 같이, 외부 대기온도가 263K일 경우 라이닝 배면의 수분이 영하로 떨어진 시점에서 374K의 발열체를 라이닝 표면에서 가할 경우 약 6시간이 경과된 후에 배면 수분의 온도가 영상으로 변화되었다. 외기 온도가 253K에서도 배면 수분이 영상으로 변하는데 소요되는 시간은 약 6시간이었으며, 외기 온도 243K에서는 약 24시간이 지난 후에 배면의 온도가 영상을 유지하는 것으로 검토되었다.

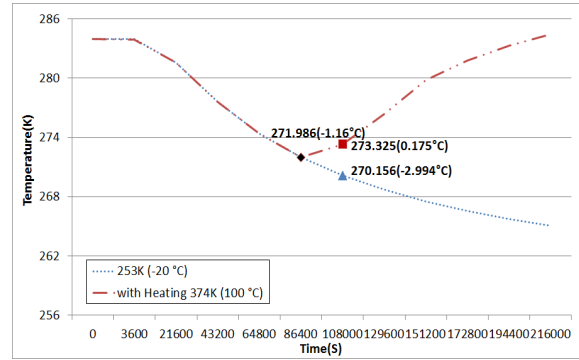
이러한 결과로부터 외기온도에 따라 콘크리트 라이닝 배면의 결빙을 억제하는 데 소요되는 시간이 다름을 확인하였으며 이러한 분석방법으로부터 터널 라이닝에 설치되는 발열체의 가동시점과 가동시간, 가열온도 등을 조정할 수 있을 것이며 터널 라이닝의 동결피해를 보다 경제적으로 관리할 수 있을 것이다.

Table 3. Temperature change at rear side tunnel lining by heating material

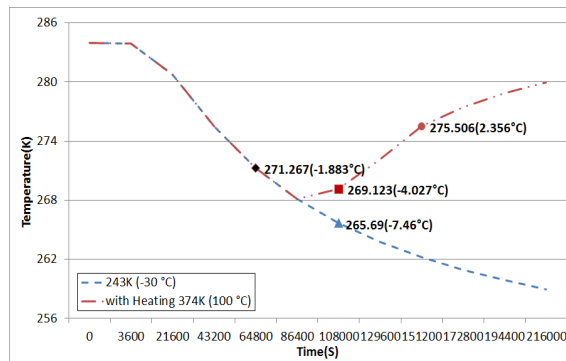
Time (sec)	263K (-10.15°C)	Heating 374K (100.85°C)	253K (-20.15°C)	Heating 374K (100.85°C)	243K (-30.15°C)	Heating 374K (100.85°C)
0	284.000(10.85°C)	284.000(10.85°C)	284.000(10.85°C)	284.000(10.85°C)	284.000(10.85°C)	284.000(10.85°C)
3,600	283.985(10.835°C)	283.985(10.835°C)	283.956(10.806°C)	283.956(10.806°C)	283.914(10.764°C)	283.914(10.764°C)
21,600	282.380(9.23°C)	282.380(9.23°C)	281.578(8.428°C)	281.578(8.428°C)	280.797(7.647°C)	280.797(7.647°C)
43,200	279.626(6.476°C)	279.626(6.476°C)	277.562(4.412°C)	277.562(4.412°C)	275.486(2.336°C)	275.486(2.336°C)
64,800	277.474(4.324°C)	277.474(4.324°C)	274.372(1.222°C)	274.372(1.222°C)	<b>271.267(-1.883°C)</b>	271.267(-1.883°C)
86,400	275.864(2.714°C)	275.864(2.714°C)	<b>271.986(-1.164°C)</b>	271.986(-1.164°C)	268.110(-5.04°C)	268.110(-5.04°C)
108,000	274.627(1.477°C)	274.627(1.477°C)	270.156(-2.994°C)	<b>273.325(0.175°C)</b>	265.690(-7.46°C)	269.123(-4.027°C)
129,600	273.649(0.499°C)	273.649(0.499°C)	268.711(-4.439°C)	276.384(3.234°C)	264.071(-9.079°C)	272.145(-1.005°C)
151,200	<b>272.856(-0.294°C)</b>	272.856(-0.294°C)	267.540(-5.61°C)	279.794(6.644°C)	262.230(-10.92°C)	<b>275.506(2.356°C)</b>
172,800	272.199(-0.951°C)	<b>275.079(1.929°C)</b>	266.571(-6.579°C)	281.825(8.675°C)	260.949(-12.201°C)	277.474(4.324°C)
194,400	271.646(-1.504°C)	279.325(6.175°C)	265.755(-7.395°C)	283.311(10.161°C)	259.869(-13.281°C)	278.888(5.738°C)
216,000	271.173(-1.977°C)	282.538(9.388°C)	265.057(-8.093°C)	284.431(11.281°C)	258.946(-14.204°C)	279.935(6.785°C)



(a) Temperature change for 263K (-10.15°C)



(b) Temperature change for 253K (-20.15°C)



(c) Temperature change for 243K (-30.15°C)

Fig. 4. Temperature change by heating (374K (100.85°C))

### 4.3 단열재의 적용에 따른 온도 변화

Kim et al.(2011)의 적정단열두께 산정을 위한 해석에서 역해석을 통한 물성치 및 두께를 토대로 단열재가 적용된 라이닝과 적용되지 않은 라이닝 배면의 온도를 비교하였으며, 그 결과는 다음 Table 4와 같다.

단열재가 적용되지 않은 라이닝 배면의 수분이 영하로 내려가는 동시간대의 온도를 비교해본 결과, 단열재가 적용

된 263K(-10°C)에서는 280.76(7.61°C)를 나타내었으며, 253K (-20°C)에서는 281.208K(8.058°C), 243K(-30°C)의 경우 281.405 (8.255°C)를 나타내었다. Fig. 5는 단열재가 적용된 라이닝의 시간에 따른 온도변화곡선을 나타낸 것이며 단열재가 적용되지 않았을 경우와 동일한 시간대에서의 수분온도지점을 표시한 것이다.



Table 4. Temperature change at rear side tunnel lining by insulating material

Time (sec)	263K (-10.15°C)	Heat insulating material	253K (-20.15°C)	Heat insulating material	243K (-30.15°C)	Heat insulating material
0	284.000	284	284.000	284	284.000	284
3,600	283.985	283.999	283.956	283.994	283.914	283.994
21,600	282.380	283.512	281.578	283.447	280.797	283.379
43,200	279.626	282.881	277.562	282.627	275.486	282.372
64,800	277.474	282.367	274.372	281.887	<b>271.267</b>	<b>281.405</b>
86,400	275.864	281.914	<b>271.986</b>	<b>281.208</b>	268.110	280.502
108,000	274.627	281.5	270.156	280.581	265.690	279.662
129,600	273.649	281.118	268.711	279.998	264.071	278.879
151,200	<b>272.856</b>	<b>280.76</b>	267.540	279.454	262.230	278.148
172,800	272.199	280.426	266.571	278.945	260.949	277.464
194,400	271.646	280.111	265.755	278.467	259.869	276.822
216,000	271.173	279.814	265.057	278.016	258.946	276.217

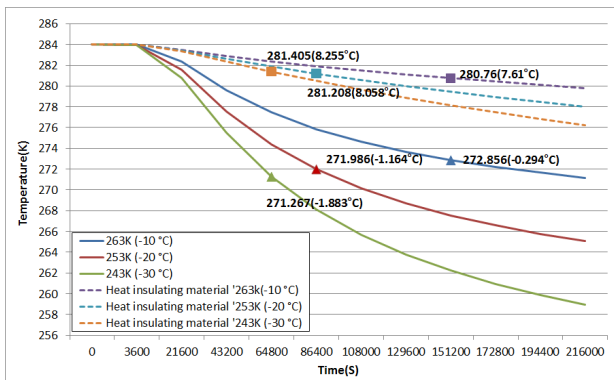


Fig. 5. Temperature comparison of rear side tunnel lining by insulating material

#### 4.4 흥천지역 대기 온도에 따른 터널 라이닝 배면의 온도 변화 분석 결과

강원지역 강릉, 영월, 흥천의 평균기온을 기상청 통계자료(10년) 11월~02월(동결기간) 까지 평균온도를 조사한 결과는 Fig. 6과 같다. 이 중 가장 기온이 낮은 흥천지역을 중심으로 대기온도에 대한 터널 라이닝 배면의 온도변화를 분석하였다. 지표면의 온도는 흥천지역의 30년 빈도 온도 중 1월 기준인 273.25K(0.1°C)를 적용하였으며, 대기온도는 강원도 흥천군 흥천읍 연봉리의 15년 01월 03일 00:00부터 15.01.08 00:00 5일간의 온도변화 자료를 적용하여 분석하였다. 적용한 대기온도는 다음 Table 5와 같다.

흥천지역의 대기온도를 적용하여 해석한 경우, 콘크리트 터널 라이닝 배면의 온도가 가장 낮을 때는 2015년 1월 7일 15시에 269.606K(-3.544°C)가 되는 것으로 해석되었다. 이때의 대기온도는 271.75K(-1.4°C)이나, 이전 시간대에 영하의 온도가 지속되었기 때문인 것으로 파악된다. 또한 가장 기온이 높았을 때는 2015년 1월 6일 13시로 272.986(-0.164°C)

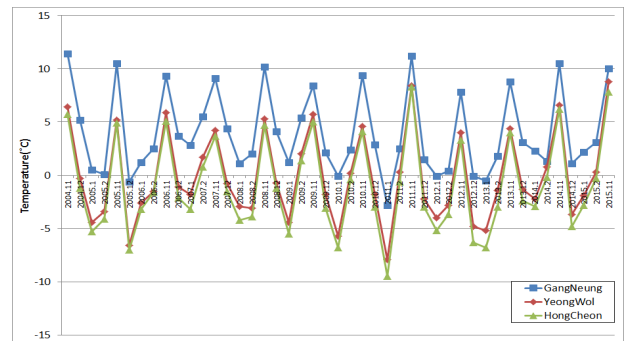


Fig. 6. Average temperature variation (GangNeung, YeongWol, HongCheon)

를 나타내었다(Fig. 7).

Fig. 8은 동일한 지역을 대상으로 콘크리트 터널 라이닝 배면에 발열체를 적용하여 해석한 결과이다. 지중온도(지표면 하 300mm)의 1월 기준인 273.25K(0.1°C)를 적용한 결과, 배면 수분의 온도가 상승되는 것을 확인할 수 있었다. 발열체를 고려하지 않았을 경우의 온도와 발열체를 적용하였을 때의 온도 차는 발열체 가열 후 14,400s(4hr)가 지난 후부터 나타났으며 이러한 열전도해석으로부터 콘크리트 라이닝의 손상을 제어할 수 있는 방안을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

## 5. 결론

도로터널 라이닝의 동결피해 저감을 위하여 외기온도에 따른 콘크리트 라이닝 및 라이닝 배면의 온도변화를 분석하고 콘크리트 라이닝 표면에 단열재 및 발열체를 적용하였을 경우의 영향에 대하여 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

Table 5. Air temperature of HongCheon (15.01.03 00:00 ~ 15.01.08 00:00)

Time (hr)	15.01.03 Temperature (K)	15.01.04 Temperature (K)	15.01.05 Temperature (K)	15.01.06 Temperature (K)	15.01.07 Temperature (K)	15.01.08 Temperature (K)
00:00	262.05(-11.1°C)	270.45(-2.7°C)	269.35(-3.8°C)	274.25(1.1°C)	265.05(-8.1°C)	262.15(-11°C)
01:00	261.25(-11.9°C)	270.65(-2.5°C)	269.15(-4°C)	274.25(1.1°C)	264.35(-8.8°C)	
02:00	260.45(-12.7°C)	270.65(-2.5°C)	269.85(-3.3°C)	274.05(0.9°C)	264.05(-9.1°C)	
03:00	259.85(-13.3°C)	270.75(-2.4°C)	269.65(-3.5°C)	273.85(0.7°C)	263.05(-10.1°C)	
04:00	259.45(-13.7°C)	270.75(-2.4°C)	269.35(-3.8°C)	273.85(0.7°C)	262.25(-10.9°C)	
05:00	259.15(-14°C)	270.75(-2.4°C)	269.45(-3.7°C)	273.85(0.7°C)	261.75(-11.4°C)	
06:00	258.65(-14.5°C)	270.85(-2.3°C)	269.35(-3.8°C)	274.05(0.9°C)	260.65(-12.5°C)	
07:00	258.35(-14.8°C)	270.45(-2.7°C)	268.95(-4.2°C)	274.45(1.3°C)	260.35(-12.8°C)	
08:00	257.85(-15.3°C)	270.85(-2.3°C)	268.55(-4.6°C)	273.95(0.8°C)	260.05(-13.1°C)	
09:00	258.55(-14.6°C)	271.45(-1.9°C)	268.15(-5°C)	273.85(0.7°C)	260.05(-13.1°C)	
10:00	260.55(-12.6°C)	272.15(-1°C)	269.55(-3.6°C)	272.85(-0.3°C)	262.05(-11.1°C)	
11:00	265.15(-8°C)	272.45(-0.7°C)	271.45(-1.7°C)	273.25(0.1°C)	266.45(-6.7°C)	
12:00	268.95(-4.2°C)	273.65(0.5°C)	273.75(0.6°C)	273.25(0.1°C)	268.75(-4.4°C)	
13:00	272.55(-0.6°C)	275.35(2.2°C)	275.95(2.8°C)	273.45(0.3°C)	270.45(-2.7°C)	
14:00	273.45(0.3°C)	276.95(3.8°C)	277.65(4.5°C)	273.55(0.4°C)	270.75(-2.4°C)	
15:00	274.75(1.6°C)	277.25(4.1°C)	278.75(5.6°C)	273.65(0.5°C)	271.75(-1.4°C)	
16:00	273.55(0.4°C)	277.05(3.9°C)	277.95(4.8°C)	272.65(-0.5°C)	270.95(-2.2°C)	
17:00	272.05(-1.1°C)	275.85(2.7°C)	277.05(3.9°C)	271.85(-1.3°C)	270.05(-3.1°C)	
18:00	270.75(-2.4°C)	274.25(1.1°C)	276.15(3°C)	270.65(-2.5°C)	268.45(-4.7°C)	
19:00	270.25(-2.9°C)	273.05(-0.1°C)	275.75(2.6°C)	269.75(-3.4°C)	267.15(-6°C)	
20:00	269.65(-3.5°C)	272.45(-0.7°C)	275.45(2.3°C)	268.85(-4.3°C)	265.85(-7.3°C)	
21:00	270.05(-3.1°C)	271.25(-1.9°C)	275.15(2°C)	267.85(-5.3°C)	264.65(-8.5°C)	
22:00	269.95(-3.2°C)	270.55(-2.6°C)	274.55(1.4°C)	266.45(-6.7°C)	263.95(-9.2°C)	
23:00	270.35(-2.8°C)	269.95(-3.2°C)	274.45(1.3°C)	266.15(-7°C)	262.85(-10.3°C)	

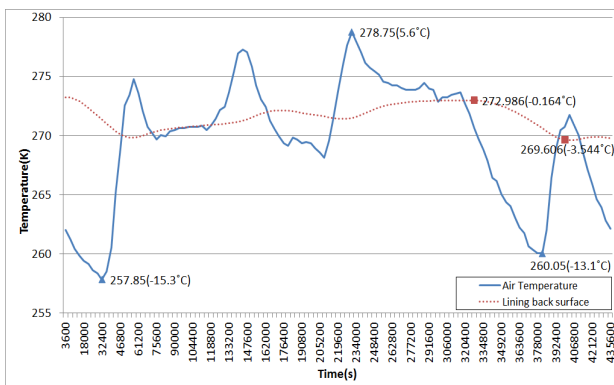


Fig. 7. Temperature change of rear side tunnel lining by air temperature (HongCheon)

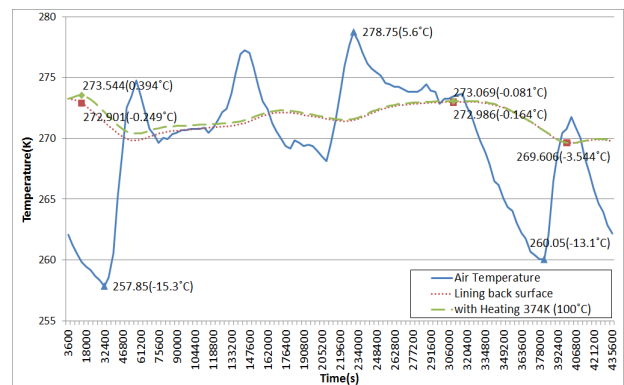


Fig. 8. Temperature change of rear side tunnel lining by heating material (HongCheon)

(1) 한랭지역에서 운용 중인 도로터널의 동결피해 분석을 위하여 터널 라이닝 및 배면지반에 대한 열전달해석을 수행하였다. 열전달해석은 대기온도를 263K(-10°C), 253K(-20°C), 243K(-30°C)로 가정하여 수행하였으며, 실제 도로터널에서의 라이닝 배면지반 온도변화 분석을 위하여 강원도 홍천지역의 기온자료를 입력자료로 활용하였다. 또한 터널 라이닝의 동결피해 저감을 위하여

발열체가 부착된 경우를 모델링하고 각각의 경우에 대하여 콘크리트 라이닝과 라이닝 배면지반의 온도변화를 비교·분석하였다.

(2) 대기온도에 따른 터널 라이닝 배면의 수분 온도를 분석한 결과, 초기온도 284K(10.85°C) 상태에서 대기온도를 263K(-10°C)로 적용하였을 경우에는 140,400s(39hr)가 지난 시점에서 배면의 수분이 영하를 나타내었으며, 대기

온도를 253K(-20°C)로 적용 시에는 75,600s(21hr), 243K(-30°C)로 적용하였을 경우에는 54,000s(15hr) 경과 후 수분이 영하로 내려가는 것으로 해석되었다. 배면의 온도가 영하로 되는 시점에서나 발열체 온도를 374K(100°C)로 가하여 적용한 결과 대기온도가 263K(-10°C)의 경우에는 바로 온도가 상승하였고, 253K(-20°C)의 경우에는 대기온도를 263K(-10°C)로 적용하였을 경우보다 배면 수분온도의 상승이 완만한 것으로 나타났다. 또한 243K(-30°C)를 적용한 경우에는 온도전도로 인하여 다른 조건들과 달리 좀 더 온도가 하강한 이후 상승하였다.

- (3) 단열재가 적용된 경우, 라이닝 배면의 수분 온도가 영하로 내려가는 시점을 비교하였다. 대기온도를 263K(-10°C)로 적용하였을 경우, 단열재를 적용하지 않은 경우는 272.856(-0.294°C)를 나타내었고, 단열재를 적용하였을 경우에는 280.76(7.61°C), 온도의 저하 정도가 뚜렷하게 나타났다. 또한 대기온도가 253K(-20°C)의 경우에는 271.986K(-1.164°C)에서 281.208K(8.058°C)가 되었으며, 대기온도가 243K(-30°C)의 경우에는 271.267K(-1.883°C)에서 281.405(8.255°C)로 되어 단열재 적용 시 온도저하의 억제효과가 뚜렷한 것으로 분석되었다.
- (4) 강원도 홍천지역의 기온 데이터를 활용하여 터널 라이닝 배면의 온도를 분석한 결과, 발열체에 의한 온도상승은 분명하게 발생하나 본 해석조건에서의 온도상승 정도는 그리 크지 않은 것으로 판단된다. 이는 발열체 온도와 발열체의 접촉면적의 크기 등에 영향을 받을 수 있으므로 발열체를 활용하여 라이닝 및 배면의 온도저하를 억제하기 위해서는 발열체의 위치 및 크기 등에 대한 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(15RDRP-B066780)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. 도로교통연구원 (2013), 실용화소과제연구보고서, A Study on the antifreeze of concrete lining according to the temperature drop in the tunnel, Korea Expressway Corporation, pp. 1~80 (in Korean).
2. 한국콘크리트학회 (2009), 2009년 개정 콘크리트 표준시방서 해설, 한국콘크리트학회, pp. 360~365 (in Korean).
3. 한국철도시설공단 (2014), 콘크리트 라이닝, 한국철도시설공단, pp. 3-29 (in Korean).
4. Kim, D. Y., Lee, H. S. and Sim, B. K. (2011), A Study on the design of tunnel lining insulation based on measurement of temperature in tunnel, Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 13, No. 4, pp. 319~345 (in Korean).
5. Kim, J. H., Park, Y. S., Kim, S. H. and Jeon, H. K. (2014), Study on the thermal conduction of concrete using insulation performance improvement materials, The Korean Institute of Building Construction, Vol. 14, No. 1, pp. 280~281 (in Korean).
6. Kim, K. H., Jeon, S. E., Bang, G. S. and Kim, J. K. (2001), Experimental study on thermal conductivity of concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 13, No. 4, pp. 305~313 (in Korean).
7. Hwang, Y. C. (2013), Maintenance characteristics of geotechnical structures in cold region for freeze damage analysis, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Korean Geo-Environmental Society, Vol. 14, No. 3, pp. 35~40 (In Korean).
8. Lee, S. W., Yoo, J. H., Kim, D. S. and Kang, M. G. (2012), Behavior measurement according to the temperature variation inside the urban subway tunnel, Korean Society for Railway, pp. 1096~1101 (in Korean).
9. Li, W., Wu, Y., Fu, H. and Zhang, J. (2015), Long-term continuous in-situ monitoring of tunnel lining surface temperature in cold region and its application, International Journal of Heat and Technology, Vol. 33, No. 2, pp. 39~44 (in Chinese).
10. Maruyama, O., Sutoh, A., Tanaka, H., Sato, T. and Nishi, H. (2013), A stochastic model for deterioration process of tunnel lining concrete in cold regions, 11<sup>th</sup> International conference on structural safety and reliability, pp. 5115~5119 (in Japanese).
11. Park, Y. S., Kim, J. H., Kang, S. H., Kim, S. H. and Ryu, D. W. (2013), Study on the thermal characteristics of concrete using insulation performance improve material complex, The Korean Institute of Building Construction, Vol. 13, No. 2, pp. 40~41 (in Korean).
12. SciTech (2013), Heat transfer in practice, pp. 2~500 (in Korean)
13. Sutoh, A., Maruyama, O., Tanaka, H. and Sato, T. (2013), Probabilistic model for damage accumulation in concrete tunnel lining using inspection data, Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers, pp. 1~4 (in Japanese).
14. Yoo, J. H., Lee, S. W. and Kim, D. S. (2014), Concrete lining behaviors of subway tunnels according to temperature variations, Korean Society for Railway, Vol. 17, No. 6, pp. 410~414 (in Korean).