

터널 라이닝 표면에 부착된 발열체로 인한 내부 온도 변화의 실험적 연구

Experimental Study on Internal Temperature Change Induced by Heating Element Attached to Tunnel Lining Surface

진 현 우¹⁾ · 황 영 철[†]

Hyunwoo Jin · Youngcheol Hwang

Received: September 21st, 2017; Revised: September 25th, 2017; Accepted: October 24th, 2017

ABSTRACT : The rearside of concrete lining of tunnels constructed in cold region might experience on freezing due to the low temperature. This causes damage of concrete lining resulting in adverse affect on the durability as well as integrity of tunnel structure by causing damage to the concrete lining. In order to prevent the rearside of tunnel lining from freeing, the temperature change inside the concrete lining was measured by attaching a heating element to the tunnel lining surface and generating heat for a certain period of time. A special freezing chamber was developed to conduct the experiments considering in-situ environment. The carbone nanotube (CNT) was used as a heating element in this study. The temperature distribution of the concrete lining was measured by applying the heat to the heating element. The effect of the outside temperature and heating duration were analyzed.

Keywords : Freezing chamber, Heating unit, Tunnel concrete lining, Cold region

요 지 : 한랭지역에 건설된 터널은 낮은 기온으로 인하여 콘크리트 라이닝 배면의 동결이 발생하게 되며, 콘크리트 라이닝의 손상을 발생시켜 터널구조물의 내구성을 감소시킨다. 터널 라이닝 배면 지반의 동결을 억제시키기 위하여 터널 라이닝 표면에 발열체를 부착하고 일정시간 동안 발열시켜 콘크리트 라이닝 내부의 온도변화를 측정하였다. 냉동챔버를 제작하여 현장현황을 모사하고 발열체는 탄소나노튜브(CNT, Carbon Nano Tube) 재료를 플레이트로 제작하여 표면에 부착하고 전기공급을 통해 발열시켰다. 발열체를 발열시킴에 따라 콘크리트 라이닝의 내부 위치별 온도변화 분포를 측정하였으며, 외기온도 및 발열온도의 유지시간에 따른 영향을 분석하였다.

주요어 : 냉동챔버, 발열체, 터널 콘크리트 라이닝, 한랭지역

1. 서 론

우리나라 경기북부 및 강원권 지역과 같이 동절기 기온이 낮은 지역에 위치한 터널구조물은 낮은 연평균 기온 및 주변지반과의 온도 차이로 인하여 내구성이 저하된다(Hwang, 2013). 동절기 낮은 기온으로 인하여 터널 라이닝 배면의 온도가 낮아질 경우, 배면지반 및 간극수의 동결로 인하여 터널 콘크리트 라이닝의 손상이 발생할 수 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(Jin & Hwang, 2017a).

따라서, 본 연구에서는 터널의 콘크리트 라이닝 표면 온도 및 유지시간에 따른 콘크리트 라이닝 내부의 온도변화를 측정함으로써 배면 지반으로의 열전달 과정을 분석하고자

하였다. 콘크리트 라이닝 시험체를 제작하고 동결챔버를 이용하여 실내에서 시험을 실시하였으며, 결빙으로 인한 콘크리트 라이닝의 손상을 억제하기 위하여 콘크리트 라이닝 표면에 발열체를 부착한 상태에서의 내부 온도변화를 분석함으로써, 효율성을 평가하고자 하였다.

2. 동절기 터널 라이닝 배면 온도 변화

국내 강원권의 도로터널 중 70개의 도로터널을 대상으로 도로터널 라이닝부의 피해현황을 분석한 결과에 따르면, 터널 내 위치별로는 터널 내 입출구부에서 균열이 가장 많이 발생하고, 동절기 기온이 낮은 지역에서의 터널 라이닝 피해 빈도가 더 높은 것으로 조사되었다(Jin & Hwang, 2017a). 국내의 경우 동결피해가 많은 지역에 대한 별도의 손상대응 설

1) Department of Civil Engineering, Sang Ji University

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

계기준이 마련되어 있지 않아 기존 공용 중인 터널은 대부분 온난한 지역에 비하여 더 많은 피해를 받고 있는 실정이다.

Kim & Shim(2013)은 터널에서의 동결피해사례를 연구하여 동결로 인한 구조물의 손상원인을 조사하였으며, Zhang et al.(2004)은 한랭지역 터널배면 암반의 강도변화를 제시하였다. Jun et al.(2017) 및 Kim et al.(2011)은 터널 내부의 온도를 측정하여 터널 내부의 온도변화 특성이나 라이닝 단열설계를 위한 기준을 제안하였다. 또한 Kim et al.(2014)은 단열성능 향상재료를 이용하여 콘크리트 라이닝의 열전도에 대한 연구를 수행하였다. Li et al.(2015)는 현장 터널 라이닝의 표면 온도를 모니터링 한 결과, 연간 온도변화, 터널 내부 공기 흐름, 온도변화에 의한 터널 라이닝 표면의 열전달 최대 유속은 36.08W/m^2 이라 제시하였다.

본 연구에 대한 선행연구로서 터널 라이닝 내부 및 배면의 온도변화에 대한 연구는 강원도 홍천지역의 기온자료를 활용하여 동절기 외기온도 변화 및 발열체에 의한 터널 라이닝 배면의 온도변화 특성을 수치해석적으로 분석하였다(Jin et al., 2017). 수치해석 결과 발열체에 의한 콘크리트 라이닝 배면의 온도상승이 발생하였고 대기의 온도나 발열체와 콘크리트 라이닝의 접촉면적의 크기 등에 영향을 받게 되는 것으로 나타났다. 또한 콘크리트 라이닝 표면에 단열재가 도포된 경우 실내시험을 통하여 단열재별 단열특성을 시험하여 효과를 분석하였다(Jin & Hwang, 2017b). 단열재가 적용된 경우 다양한 단열재료에 대한 비교시험도 수행되었으며, 단열재에 의한 온도저하 억제 효과가 확인되었다.

3. 발열체의 발열에 의한 열전달 실험

본 연구에서는 터널 콘크리트 라이닝에 발열체를 부착하고 발열체의 발열에 따른 터널 라이닝 내부의 시간에 따른 온도변화를 측정하여 터널 라이닝 배면에서의 온도저하에 따른 동결피해를 저감시키고자 하였다. 이를 위한 선행시험으로 터널 라이닝 표면에 다양한 단열재를 도포하고 이에 따른 효과를 비교분석 하였으며(Jin & Hwang, 2017b), 본 연구에서는 기존시험에서의 단열재를 대신하여 발열체를 부착하고 영하의 외기온도 상에서 적정한 온도와 시간 동안 콘크리트 라이닝의 표면 일부를 발열시킴으로써 그 효과를 분석하고자 하였다. 따라서, 기존에 사용된 시험체와 동일한

규격을 제작하여 사용하였다.

시험결과를 이용하여 발열체에 의한 콘크리트 라이닝의 열전달량을 계산하였다. 일정한 두께 x 를 통한 열전도율 Q 는 위치(벽) 간의 온도 차 T 와 열전달 방향에 수직인 면적 A 에 비례하고, 벽의 두께에 반비례한다. 그러므로 열전도율은 다음과 같은 Eq. (1)로 나타낼 수 있다.

$$Q_{cond} = k_t A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W) \quad (1)$$

여기서 비례상수 k_t 는 재료의 열전도계수(Thermal conductivity)로써 재료의 열전도 능력을 나타내는 크기이다.

3.1 콘크리트 라이닝 시험체

발열체에 의한 터널 라이닝 내부 온도변화 분석을 위하여 선행연구로 진행된 단열재가 적용된 터널 라이닝의 열전달량 시험과 동일한 시험체를 활용하였다. 실내시험용 콘크리트 시험체의 28일 강도는 36.4MPa 이며, 슬럼프는 190mm 이다(Table 1).

터널 라이닝은 터널 내부의 외기에 노출되어 있으며, 배면의 경우 지반에 접해있다. 따라서 터널 내부의 외기온도 변화에 따라 터널 라이닝을 통하여 배면 지반까지 온도가 전달되어 동결피해를 유발하게 된다. 시험체 전체를 냉동챔버 내에서 시험할 경우 터널 라이닝 외부와 배면에서의 온도상태를 모사하기 어려우므로 냉동챔버를 일부분 절단하여 시험체의 한쪽 표면만이 결빙될 수 있도록 하고 나머지 면은 상온을 유지할 수 있도록 하였다. 이를 위하여 시험체

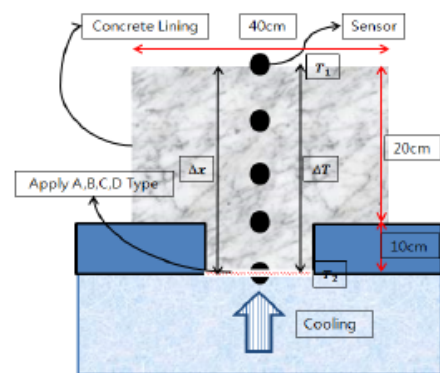
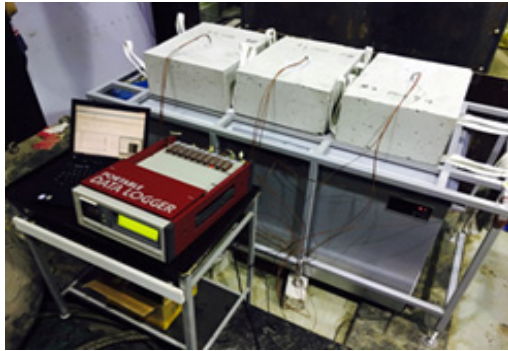


Fig. 1 Laboratory test diagram

Table 1. Mixture proportion of concrete

W/C (%)	Unit weight (kg/m^3)					Slump (mm)	Air content (%)	Compressive strength (MPa)		
	C	W	S	G	ad			3 days	7 days	21 days
48	354	170	819	941	2.66	190	6.5	20.1	32.7	36.4



(a) Specimens and freezing chamber



(b) T-type thermocouple

Fig. 2. Temperature measurement using T-type thermocouple

는 육면체에서 중앙부가 돌출되도록 제작하고 냉동챔버의 상부에 시험체의 돌출된 부분이 삽입되도록 하여 냉동챔버 내로 삽입된 돌출부분의 한쪽면만 냉동챔버의 온도영향을 받도록 하였다(Fig. 1, Fig. 2).

시험에 사용되는 시험체는 일반적으로 터널 라이닝에 적용되는 두께인 300mm로 제작하였으며, 콘크리트 라이닝 내부의 온도변화 분석을 위하여 시험체 제작 시 시험체 표면과 표면으로부터 각각 75mm 간격으로 온도측정센서를 설치하여 총 5개의 센서(하부로부터 표면(0mm), 75mm, 150mm, 225mm, 300mm(상부표면))가 위치하도록 하고 양생하여 제작하였다(Fig. 1). 제작된 시험체의 가로 및 세로길이는 각각 400mm이며, 두께는 300mm이다.

3.2 탄소나노튜브 발열체의 특성

본 연구에 사용된 발열체는 탄소나노튜브(CNT, Carbon

Table 2. Characteristic of Carbon Nano Tube

Property	Range
The modulus of elasticity	1~2 TPa
Tensile strength	30~180 GPa
Electroconductivity	6,000 S/cm
Heat conductivity	6,000 W/m.k

Nano Tube)를 이용하여 플레이트 형태로 제작한 재료를 사용하였다(Fig. 3). 탄소나노튜브는 특정물성이 뛰어나 신소재로 주목받고 있으며 높은 인장강도와 유연성을 갖고 있다. 또한 높은 열전도성을 통해 발열체와 방열체의 소재로 사용되며 우수한 전기전도성을 통해 전자파 및 정전기 해소 소재로 사용되고 있다(Table 2).

3.3 시험방법 및 조건

CNT(Carbon Nano Tube) 재질로 제작된 플레이트 형태의 발열체를 콘크리트 라이닝 시험체에 부착한 후 냉동챔버 내에서 전기를 이용하여 발열시키고 발열조절장치를 이용하여 일정온도를 유지하도록 하였다. 냉동챔버는 시험체 3개를 동시에 측정할 수 있도록 제작하여 CNT 발열체를 부착한 것과 부착하지 않은 것을 비교할 수 있도록 하였다.

시험은 동절기인 12월에 실내에서 시험하였으며 실내온도가 영상인 상태에서 발열체의 발열에 의한 시험을 실시하고(case 1), 터널 라이닝 외기 온도가 -10℃를 유지할 경우를 모사하여 시험하였다(case 2). 현장에서의 상황과 유사하게 시험하기 위하여 냉동챔버의 상부를 별도로 제작하여 시험하였으므로 냉동챔버 내부의 기온변화가 있을 것으로 예상되어, 냉동챔버 내부의 온도를 측정하는 센서를 별도로



Fig. 3. Carbon Nano tube plate



Fig. 4. Heating control equipment

설치하여 온도가 유지되도록 조절하였다.

발열체는 발열체 자체의 온도를 60°C를 4시간 정도 유지한 후 전원공급을 차단하여 콘크리트 라이닝 시험체 내부의 온도변화를 측정하였다.

4. 발열체의 발열에 따른 콘크리트 라이닝 온도 변화

4.1 외기온도에 따른 콘크리트 라이닝 온도 변화 영향

외기온도가 영상의 저온을 유지할 경우와 영하의 온도를 유지할 경우, 발열체의 발열에 의한 콘크리트 라이닝 온도변화를 측정하였다. 영상의 저온을 유지할 경우는 동결기 실험실 실내에서 영상 4.9~8.4°C의 온도가 유지된 상태에서 실험하였고(case 1), 영하의 온도는 -10°C를 유지하도록 냉동챔버를 이용하여 실험하였다. 실내의 온도는 바닥면으로부터 약 15cm 상부에서 측정한 값이다.

4.1.1 4.9~8.4°C의 외기온도 상태

시험체의 초기상태는 외기온도 6.6°C, 지면온도 6°C, 시험체의 표면온도 6.2°C이며 시험체 내부의 온도는 시험체 하부로부터 7.5cm는 5.9°C, 15cm의 경우 6°C, 22.5cm는 6°C, 상부의 온도는 6°C를 나타내었다.

Fig. 5는 준비된 시험체 표면에 발열체(CNT 소재)를 부착하고 일정시간 동안 발열하였을 경우 콘크리트 시험체 내의 온도변화를 나타낸 것이다. 발열체의 발열 후, 발열체의 부착면으로부터 서서히 온도변화가 발생하기 시작하였으며 각 계측 센서의 1도 이상 온도 변화가 시작된 시간은 표면의 경우 5분이 소요되었으며, 7.5cm의 경우 25분, 15cm는 65분, 22.5cm는 135분, 상부의 경우 165분이 소요되었다.

콘크리트 시험체 표면의 온도가 발열체의 발열유지온도와 같은 60°C에 도달한 시기는 시험 시작 후 510분이 소요

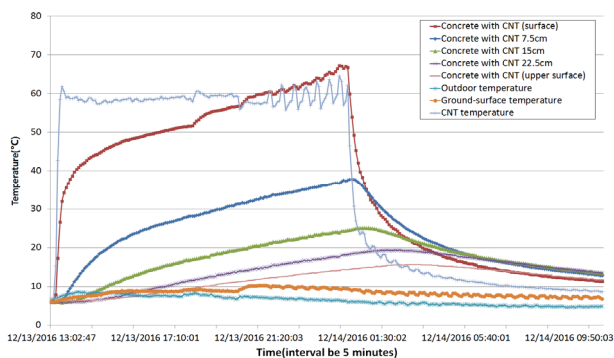


Fig. 5. Temperature change of concrete lining specimen

된 후이다. 이때 각 시험체 내부의 온도는 하부로부터 7.5cm 위치의 경우 33.1°C, 15cm는 20.8°C, 22.5cm는 15°C, 상부의 경우 12.1°C를 나타내었다. 또한, 열전도율 공식을 이용한 열전달량은 18.984W이다.

4.1.2 -10°C의 외기온도 상태

-10°C의 외기온도 상태에서의 시험은 시험체 중 발열체가 부착된 부분을 동결챔버에 삽입하여 일정온도를 유지시킨 상태에서 시험하였다. -10°C 하에서 시험체의 온도를 수렴시키기 위하여 장시간 외기온도를 유지하도록 하였다. Fig. 6은 냉동챔버 내의 온도에 따른 콘크리트 라이닝 시험체의 위치별 온도변화를 나타낸 것이다. 이때 실험실의 온도는 영상 5°C(±1.5°C) 정도로 측정되었다.

Fig. 7은 발열체가 부착된 시험체의 발열에 따른 온도변화를 나타낸 것이다. 온도가 수렴하였을 때의 시험체의 온도는 발열체가 부착된 표면의 경우 -9°C, 7.5cm의 경우 -6.1°C, 15cm는 -4.5°C, 22.5cm의 경우 -3.4°C, 상부의 경우 -1.4°C를 나타내었다. 시험체의 상부로 갈수록 온도가 높아지는 것은 시험체 전체가 동결챔버 내에 있지 않고 발열체가 부착된 부분만 챔버 내에 삽입되어 있으며, 상부는 실험실 대

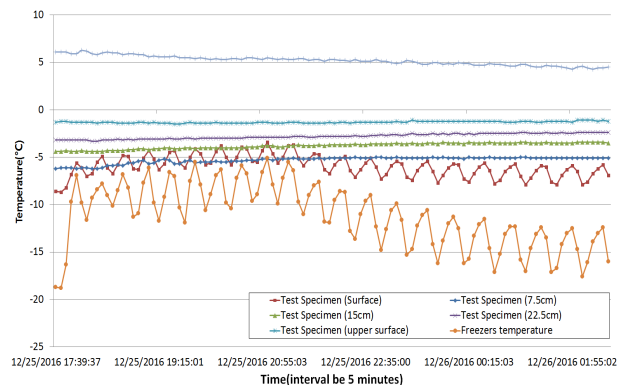


Fig. 6. Temperature change of concrete lining specimen by frozen chamber temperature variation

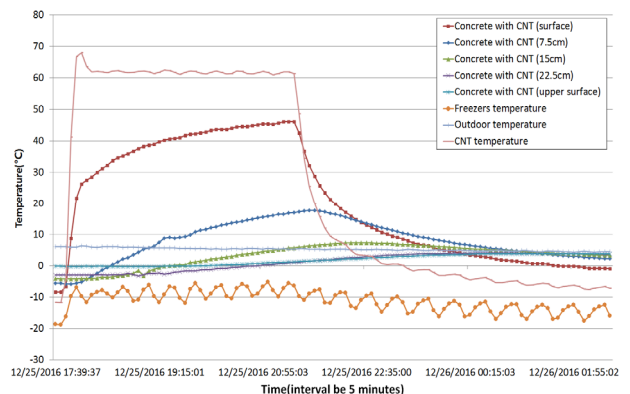


Fig. 7. Temperature change of concrete lining specimen by heating element

기 중에 노출되어 있기 때문이다. 이 상태에서 발열체를 가열하여 온도변화를 측정하였다.

발열체의 발열을 시작한 후 시험체 각 위치에서 1도 이상 온도 변화가 시작된 시간은 표면의 경우 5분이 소요되었으며, 7.5cm의 경우 25분, 15cm는 60분, 22.5cm는 120분, 상부의 경우 150분이 소요되었다. 시험기간 동안 실험실 내부의 대기온도는 $+1.3 \sim +7^{\circ}\text{C}$ 이다.

콘크리트 라이닝 시험체에 삽입된 계측기 중, 최상부에 위치한 계측지점인 하부로부터 22.5cm에 위치한 지점의 온도가 최초로 1°C 를 나타냈을 때는 시험 시작 후 230분(3시간 50분)이 소요된 후며, 이때 각 계측센서의 온도는 하부 표면의 경우 46°C , 7.5cm의 경우 17°C , 15cm는 5.7°C , 22.5cm는 1°C , 상부의 경우 1.2°C 를 나타내었다. 또한, 열전도율 공식을 이용한 열전달량은 발열체가 설치된 경우는 25.2W이고 일반 시험체의 경우는 3.304W이다.

발열체를 적용한 경우, 콘크리트 라이닝의 온도상승이 뚜렷하게 나타났으며, 시험체 내부의 온도변화를 고려하여 발열체의 온도를 지속적으로 유지시킴으로써 실제 콘크리트 라이닝 배면에서 발생하고 있는 지반의 결빙을 효과적으로 억제할 수 있을 것으로 판단된다. 일반시험체와 발열체를 적용한 시험체의 열전달율은 일반시험체의 경우 3.3w, 발열체를 적용한 시험체는 25.2w를 나타내었다. 두 시험체의 편차는 21.8w로 열 전달율의 차이는 663% 정도가 증가되었다.

5. 결 론

콘크리트 라이닝에 발열체를 부착하여 냉동챔버를 이용하여 영하의 기온에서 표면 발열에 따른 콘크리트 라이닝 내부의 온도변화를 측정하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 발열체는 탄소나노튜브(CNT, Carbon Nano Tube) 재료를 플레이트 형태로 제작하여 전원을 공급함으로써 인위적으로 발열시켰으며, 발열 시의 온도는 60°C 를 유지하도록 하였다.
- (2) 실험실 내의 온도가 $4.9 \sim 8.4^{\circ}\text{C}$ 의 외기온도 상태일 경우, 발열체의 발열에 의한 온도변화 측정결과 발열에 따라 시험체 내부의 온도가 지속적으로 증가하였으며, 시험체 표면의 온도가 발열체의 발열유지온도와 같은 60°C 에 도달한 시기는 시험 시작 후 510분이 소요된 후이다. 이때 각 시험체 내부의 온도는 하부로부터 7.5cm 위치의 경우 33.1°C , 15cm는 20.8°C , 22.5cm는 15°C , 상부의 경우 12.1°C 를 나타내었다. 또한, 열전도율 공식을

이용한 열전달량은 18.984W이다.

- (3) 시험체의 한쪽 표면이 -10°C 인 상태를 모사하고자 냉동 챔버를 이용하여 시험하였으며, 시험체 내부의 온도가 안정적인 상태로 유지되도록 하기 위하여 일정시간 동안 방치 한 후 발열체의 발열을 시작하였다. 이 경우 콘크리트 라이닝 시험체에 삽입된 계측기 중, 최상부에 위치한 계측지점인 하부로부터 22.5cm에 위치한 지점의 온도가 최초로 1°C 를 나타냈을 때는 시험 시작 후 230분(3시간 50분)이 소요된 후며, 이때 각 계측센서의 온도는 하부표면의 경우 46°C , 7.5cm의 경우 17°C , 15cm는 5.7°C , 22.5cm는 1°C , 상부의 경우 1.2°C 를 나타내었다. 또한, 열전도율 공식을 이용한 열전달량은 발열체가 설치된 경우는 25.2W이고 일반 시험체의 경우는 3.304W이다.
- (4) 이러한 시험결과로부터 발열체를 이용한 결빙방지 공법은 한랭지에서 운용되고 있는 터널구조물의 동결피해 저감을 위한 대응방안이 될 수 있을 것이며, 기후조건에 대응하여 온도변화를 적절히 제어함으로써 실제 현장적용이 가능할 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(17RDRP-B066780)에 의해 수행되었습니다.

References

1. 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).
2. 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).
3. Kim, N. Y. and Shim, J. W. (2013), Case studies on the tunnel frost due to the low temperature, Korea Gedsynthetic society, 2013 spring Geosynthetics Conference, pp. 107~110 (in Korean).
4. Jin, H. W. and Hwang, Y. C. (2017a), "A Study on Current Extent of Damage of Road Tunnel Lining in Cold Region (Gangwon-do)", Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 18(1) pp. 49~58.
5. Jin, H. W. and Hwang, Y. C. (2017b), "Heat Transfer Test of Tunnel Lining with Heat Insulation", Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 18(7) pp. 5~12.
6. 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 Geo-Environmental Society*, 18(1) pp. 5~12.
7. Jun, K. J., Hwang, Y. C and Yune, C. Y. (2017), “Field measurement of temperature inside tunnel in winter in Gangwon, Korea”, *Cold Regions Science and Technology*, 143(2017) pp. 32~42.
 8. Hwang, Y. C. (2013), “Maintenance Characteristics of Geotechnical Structures in Cold Region for Freeze Damage Analysis”, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 14(23) pp. 35~40.
 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.
 10. Zhang, S., Lai, Y., Zhang, X., Pu, Y. and Yu, W. (2004), Study on the damage propagation of surrounding rock from a cold-region tunnel under freeze-thaw cycle condition, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 19, pp. 295~302.