

터널라이닝 표면에 부착된 발열체로 인한 라이닝의 온도변화 현장실험

Field Test of Tunnel Lining Temperature Variation due to Heating Element Attached to Tunnel Lining Surface

진 현 우¹⁾ · 황 영 철[†]

Hyunwoo Jin · Youngcheol Hwang

Received: February 28th, 2019; Revised: March 4th, 2019; Accepted: March 29th, 2019

ABSTRACT : In the cold region, the frozen damages in highway tunnels and regular road tunnels have widely been investigated and reported, but the measurement has not been sufficient made. The average temperature in cold region is below the zero, resulting in that the damage due to freezing at the entrance/exit of tunnel is more severe than in the middle of tunnel. In this study, a heating element was developed to prevent the tunnel lining from being frozen by enforcing to increase the temperature of tunnel lining. Then field tests using the developed heating element were performed and it was ensured that the temperature of tunnel lining increased after a certain time.

Keywords : Cold regions, Tunnel lining, Heating element, Lning damage degradation, Lining temperature change

요 지 : 국내 한랭지역의 경우 고속도로터널 및 일반도로터널에서 발생하는 동결피해 사례는 조사 및 보고되고 있지만, 이에 대한 방안대책은 미흡한 상황이다. 한랭지역의 경우 영상권을 유지하는 다른 지역들과는 달리 평균온도가 영하로 떨어지는 지역이며, 동일지역 터널 내에서도 기온이 낮은 입출구에서 손상이 좀 더 발생하는 것으로 조사 되었다. 터널 라이닝의 온도저하를 방지하기 위하여 동절기에 라이닝의 온도를 강제로 상승시킬 수 있는 발열체를 제작하였다. 발열체는 실규모 터널의 라이닝에 부착하여 발열체의 열에 의한 터널 라이닝 주변의 온도변화를 측정하였다. 연구결과 발열체의 발열에 의해 라이닝의 온도상승 정도를 확인하였으며, 일정시간이 경과하면 라이닝의 온도상승이 수렴하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 활용하여 동절기 터널라이닝 및 배면의 동결피해를 줄일 수 있음을 확인하였다.

주요어 : 한랭지역, 터널 라이닝, 발열체, 라이닝 손상 저하, 라이닝 온도변화

1. 서 론

한랭지역의 도로터널에서 발생하는 동결피해 사례가 나타나고 있으나, 운용 중 터널에 대한 대책방안은 고려되지 못하고 있다. 도로터널 라이닝에서의 손상 여부 및 손상위치를 조사한 결과, 대기온도가 낮은 한랭지역(강원권)에서 피해가 더 발생하는 것으로 분석되었으며, 동일지역에 있는 터널에서도 기온이 낮은 입출구에서의 손상이 좀더 많이 발생하는 것으로 나타났다(Jin & Hwang, 2017).

최근 한랭지역에서의 터널구조물의 손상을 방지하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. An et al.(2018)은 국내의 기후특성을 고려하여 동결-융해 반복일(F)에 대한 조건을 제안하였으며, 동결지역에서의 동결피해에 대비하여 효율적인 설계 및 유지관리에 활용할 수 있도록 국내 한랭지역을 분류하였다. Jin et al.(2017)은 발열공법 적용에 따른 도

로터널의 동결저감 효과를 분석하기 위하여 겨울철 강원지역 도로터널의 지반특성과 기후특성을 고려한 해석적 연구를 수행하였다. Kim(2018)은 한랭지역에서 운영 중인 터널 구조물의 결빙에 의한 손상을 저감시키기 위하여 동절기에도 적절하게 누수를 유도배수할 수 있는 유도배수시스템을 개발하고 성능을 평가하였다. 또한 Zhang et al.(2004)은 한랭지역 터널에서의 동결-융해 반복에 따른 암반의 강도변화 및 파손 비율을 제시하였으며, Jun et al.(2017)은 국내 한랭지역104개 터널 내부의 대기온도, 도로포장온도, 라이닝 표면온도 등을 측정하여 겨울철 외기온도에 따른 터널 라이닝의 온도변화를 분석하였다.

이러한 연구는 한랭지역 터널의 손상가능성 평가, 손상에 따른 2차피해 저감을 위한 방안의 개발 등 수동적인 해결방안이므로, 공용 중 터널에서는 사전예방을 위한 적극적인 대응방안이 필요하다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는

1) Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Sang Ji University

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

동절기 영상과 영하의 반복적 기온변화에 따른 터널라이닝의 손상가속화 정도를 저감시키기 위하여 라이닝의 온도변화 폭을 감소시키는 것이 필요하다고 판단하였으며, 이를 위하여 발열체를 개발하고 발열체의 발열에 따른 라이닝의 온도변화를 측정하고 분석하였다. 온도변화 측정은 동절기 기간동안 발열체를 실규모 터널시험장에 설치 후 주변기온 및 발열체 주변 라이닝의 온도를 측정하였다.

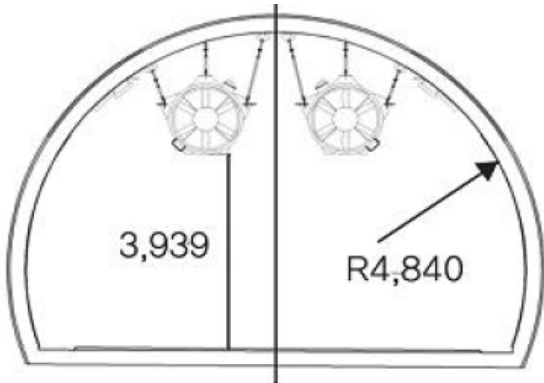
2. 시험 계획 및 방법

2.1 발열체의 특성

본 연구에 사용된 발열체는 탄소나노튜브(CNT, Carbon Nano Tube)를 이용하였으며, 높은 인장강도와 유연성 및 반영구적인 수명을 가지고 있다. 또한, 실내온도의 공기 중에

Table 1. 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



서 화학적으로 극히 안정되고 강하며, 전기회로 외에도 초강력 섬유나 열, 마찰에 잘 견디는 표면재료로도 쓸 수가 있다. 열전도도가 실리콘보다 훨씬 높아 열을 잘 방출하는 특성을 가지고 있다(Table 1)(조경진, 2012).

2.2 시험 방법 및 조건

발열체의 발열에 따른 라이닝의 온도를 측정하기 위하여 시험터널을 대상으로 실물시험을 실시하였으며, 대상 터널은 터널 방재종합시험장(Tunnel safety Test & Training center)으로 한국도로공사에서 관리하고 있다. 터널 방재종합시험장은 시험개발에 필요한 기반시설의 설치 외 터널에서 발생 가능한 여러 가지 위험 상황을 구현할 수 있도록 구성되어 있다. 터널 제원은 연장 475m, 폭/높이는 9.1m/6.4m, 단면적 52.5m², 차로수는 2차로이며, 선형은 직선으로 이루어져 있다(Fig. 1).

시험터널의 라이닝에는 타일이 설치되어 있었으며, 본 연구에서는 타일부분 위에 발열체를 부착하였다. 발열체의 발열에 따른 이격거리별 온도를 측정하기 위하여 발열체의 온도는 일정온도를 유지하도록 하였다. 터널 라이닝 각 지점의 온도측정 단면은 터널입구부로부터 종방향 내측으로 0m, 1.5m, 3m 지점을 대상으로 하였고, 각 단면별로 발열체와



Fig. 1. Tunnel specifications

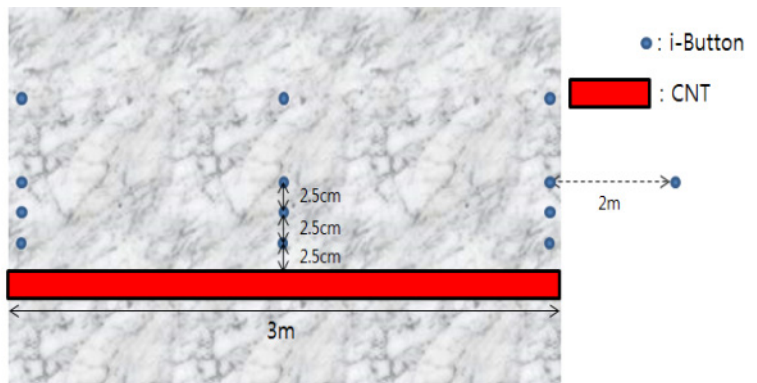


Fig. 2. Concept diagram

작된 시간은 2.5cm의 경우 20분, 5cm는 50분, 7.5cm는 100분이 소요되었다. 각 지점을 기준으로 단면별 온도변화는 라이닝의 온도변화가 1°C 이상 변화된 시점을 비교하였다.

발열체로부터 2.5cm 떨어진 지점은 발열시작 후 20분이 경과했을 때, 1°C 이상 온도가 상승하였으며, 이때의 대조군의 온도는 6.05°C, 각 단면별(0m, 1.5m, 3.0m) 라이닝의 온도는 각각 7.59°C, 8.04°C, 8.60°C로 측정되었다(Fig. 6).

발열체로부터 5cm 떨어진 지점은 발열시작 후 50분이 경

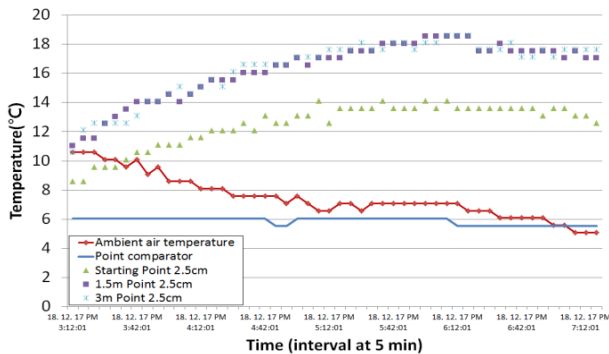


Fig. 6. Temperature variation with distance (sensor 2.5 cm)

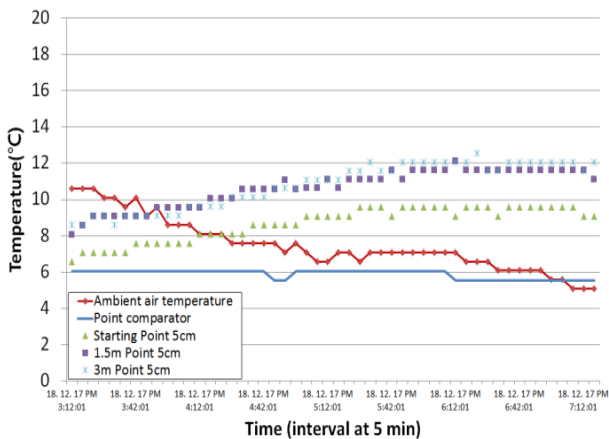


Fig. 7. Temperature variation with distance (sensor 5 cm)

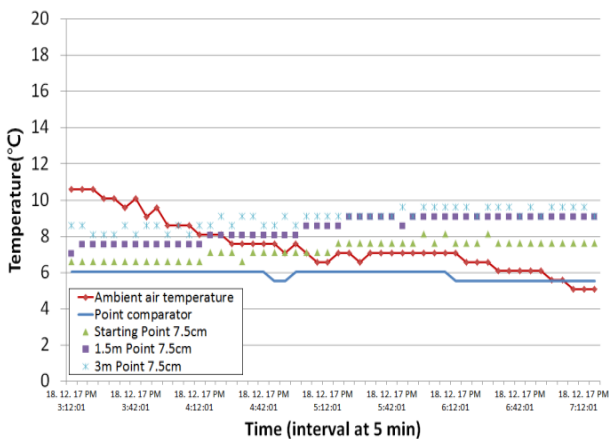


Fig. 8. Temperature variation with distance (sensor 7.5 cm)

과했을 때를 비교하였으며, 이때의 외기온도는 10.60°C, 대조군 온도 6.05°C, 터널 내측으로의 각 단면별 온도는 7.08°C, 11.55°C, 12.62°C를 나타내었다(Fig. 7). 7.5cm 떨어진 지점은 100분 경과 후를 비교하였으며, 이때 외기온도 8.09°C, 대조군 온도 6.05°C, 터널 내측 단면별로 각각 7.11°C, 8.06°C, 8.60°C를 나타내었다(Fig. 8).

발열체로부터의 거리가 가까울수록 온도의 상승폭이 크게 나타났으며, 발열체로부터 7.5cm가 떨어진 지점에서는 온도의 상승 후 수렴은 진행되나, 상승폭의 크기가 약 1.0~1.55°C 정도로 나타났다. 이는 외기온도에 노출된 상태에서의 표면온도를 측정된 자료이고, 터널라이닝 내측으로는 지열상태와 외기온도의 영향을 덜 받게 되므로 측정된 온도보다는 더 상승할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 실험용 규모의 실험을 통하여 동절기 기간동안 발열체 발열 온도가 터널라이닝의 온도에 미치는 영향을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 발열체의 온도변화에 따른 터널라이닝의 위치별 온도 변화 실험은 실험시험으로 진행하였으며, 대상 터널은 터널방재종합시험장에서 수행하였다. 발열체는 전원공급을 통하여 발열 온도를 80°C로 일정하게 유지하도록 하였으며, 온도측정은 터널내측 위치별, 발열체로부터의 이격거리별로 측정하였다.
- (2) 시험당시 방재종합시험장의 외기온도는 5.08~12.10°C였으며, 온도를 측정하는 동안 외기온도는 지속적으로 저하되는 상태였으나, 외기온도의 변화정도에 비하여 발열체와 관련없는 지점의 라이닝의 온도변화는 거의 일정한 값을 유지하였다. 발열에 따른 발열체 주변의 온도는 외기온도가 낮아, 터널 라이닝의 온도가 낮은 상태일 수록 발열체에 의한 온도상승폭이 적은 것으로 나타났다.
- (3) 발열에 따라 온도는 지속적으로 증가하였으며, 발열체의 발열온도 상승에 따라 터널라이닝 표면의 온도가 1.0°C 상승한 시간은 발열체로부터 5cm 떨어진 지점의 경우 20분이 경과한 후였으며, 5cm는 50분, 7.5cm는 100분이 소요되어 발열체로부터 이격거리가 증가할수록 온도상승 시간이 길어지는 것으로 나타났다.
- (4) 발열체로부터의 거리가 가까울수록 온도의 상승폭이 크게 나타났으며, 발열체로부터 7.5cm가 떨어진 지점에서는 온도의 상승 후 수렴은 진행되나, 상승폭의 크기가

약 1.0~1.55°C정도로 나타났다. 이는 외기온도에 노출된 상태에서의 표면온도를 측정된 자료이고, 터널라이닝 내측으로는 지열상태와 외기온도의 영향을 덜 받게 되므로 측정된 온도보다는 더 상승할 것으로 판단된다.

- (5) 발열체가 열을 가한지 약 200분 후부터는 발열체로부터 2.5cm, 5cm, 7.5cm 떨어진 지점의 온도변화가 ± 0.5°C 반복적으로 나타나 발열시작 후 일정시간이 경과하면 라이닝의 온도는 더 이상 상승하지 않고, 일정한 값을 유지하게 되며 이러한 시간은 외기온도 및 터널라이닝의 온도에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다.
- (6) 터널라이닝에 부착된 발열체의 발열에 따라 라이닝의 온도상승 효과를 확인하였으며, 이러한 결과로부터 발열체의 부착위치, 발열온도, 발열시간 등을 효율적으로 활용하면 동절기 라이닝 및 배면의 온도저하로 인한 내구성피해를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(19RDRP-B066780)에 의해 수행되었습니다.

References

1. 조경진 (2012), 탄소나노튜브의 용도별 활용현황 및 신소재화 가능성, KDB산업은행 미래전략연구소, pp. 49~61 (In Korean).
2. An, J. W., Seo, J. E., Jung, M. H. and Seong, J. H. (2018), Classification of cold regions and analysis of the freeze-thaw repetition cycle based on heat transfer quantity by freezing test, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 20, No. 6, pp. 957~972 (In Korean).
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 Geo-Environmental Society, Vol. 18, No. 1, pp. 5~12 (In Korean).
4. Jin, H. W. and Hwang, Y. C. (2017), A study on current extent of damage of road tunnel lining in cold regions (Gangwon-do), Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Korean Geo-Environmental Society, Vol. 18, No. 1, pp. 49~58 (In Korean).
5. Jun, K. J., Hwang, Y. C. and Yune, C. Y. (2017), Field measurement of temperature inside tunnel in winter in Gangwon Korea, Journal of the Cold Regions Science and Technology, Vol. 143, pp. 32~42.
6. Kim, D. G. (2018), Long-term performance of drainage system for leakage treatment of tunnel operating in cold region, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 20, No. 6, pp. 1177~1192 (In Korean).
7. 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.