

단열재를 활용한 터널라이닝 온도변화 현장 실험

Field Test of Tunnel Lining Temperature Variation Using Insulation Material

진 현 우¹⁾ · 황 영 철[†]

Hyunwoo Jin · Youngcheol Hwang

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

ABSTRACT : The low temperature and temperature difference (variation) may cause to deteriorate the integrity of tunnel constructed in cold region. An insulation material was developed and applied to the tunnel lining surface to keep the temperature of tunnel lining constant in spite of temperature variation at outdoor. The lining surface where the insulation material applied showed the less sensitive to temperature variation than non-applied lining surface.

Keywords : Cold regions, Tunnel lining, Insulation, Lining temperature variation

요 지 : 한랭지역에 설치된 터널의 경우, 저온 및 온도차이로 인하여 터널구조물의 내구성이 저하될 수 있다. 외기온도의 변화에 따른 터널라이닝 및 배면 지반의 온도변화를 감소시키기 위하여 단열성능을 가진 도료(단열재)를 개발하였으며, 단열재를 공용 중인 터널 라이닝에 도포하였다. 단열재는 라이닝의 바닥면으로부터 1.5m 높이까지를 도포하였으며 동절기 기간동안 단열재가 도포된 구간과 도포되지 않은 구간의 라이닝 온도를 측정하여 단열재의 효과를 분석하였다. 라이닝의 온도측정은 위치별, 거리별, 외기온도가 가장 높을 때, 가장 낮을 때를 중심으로 측정하여 비교하였다. 측정결과 단열재를 도포한 구간의 라이닝 온도저하가 적은 것으로 나타났으며, 최고 및 최저온도간의 온도차이도 적은 것으로 나타나 단열재의 성능을 확인하였다.

주요어 : 한랭지역, 터널 라이닝, 단열재, 라이닝 온도변화

1. 서 론

한랭지역에 건설되는 터널구조물은 온도변화에 따른 내구성이 저하될 수 있다. 온도변화에 따른 터널구조물의 손상이나 균열발생 등 터널의 동결피해 사례를 연구한 결과, 균열, 측압발생 및 고드름, 도로노면 포장체의 동상 등이 구조물 손상의 원인이 되는 것으로 조사 되었다(Kim & Shim, 2013). 최근 한랭지역의 터널피해 저감을 위한 연구가 많이 수행되고 있으며, Jin & Hwang(2017)은 국내 도로터널 라이닝부의 동결피해 현황과 피해유형 및 발생원인 등을 분석하였으며, An et al.(2018)은 한랭지역 터널의 동결피해 사례분석과 국내·외 동해환경 평가기준을 바탕으로 콘크리트 시험체의 온도 변화에 따른 열류량(W) 분석을 실시하였다. Son et al.(2017)과 Jin et al.(2007)은 단열공법 및 발열공법 적용에 따른 도로터널의 동결저감 효과를 분석하기 위하여 겨울철 강원지역 도로터널의 지반특성과 기후특성을 고려한 해석적 연구를 수행하였다.

국외의 경우 한랭지역 터널에서 반복되는 동결-융해에 대한 강도 변화, 파손 비율을 제시(Zhang et al., 2004)하였으며, Jun et al.(2017)은 국내 한랭지역 터널 내부의 대기온도, 도로포장온도, 라이닝 표면온도 등을 측정하여 측정결과와 기상 자료를 분석하여 겨울철 외기온도에 따른 터널 라이닝의 온도변화를 제시하였다.

본 연구에서는 국내 고속도로터널 라이닝부에 단열성능을 포함시킨 도료단열재를 개발하여 시공한 후 단열재의 시공 유무에 따른 라이닝의 온도 변화를 분석함으로써 단열재에 의한 단열성능을 분석하였다.

2. 시험 계획 및 방법

2.1 단열재의 특성

본 연구를 위하여 개발된 단열재는 Aerogel 초단열 코팅제로 열전달을 막는 특수 기능 1액성 수성 도료로써 Aerogel

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)

Table 1. Thermal discharge rate test result

Item		Unit	Result
Time of ignition		s	173
Test time		s	2093
Average heat dissipation rate	During 180 seconds after ignition	kW/m^2	68.4
	During 300 seconds after ignition	kW/m^2	47.8
Maximum heat dissipation rate		kW/m^2	91.7
Total heat dissipation rate		kW/m^2	17.5
Mass of test specimen at ignition		g	132.9
Mass of test specimen after completion of test		g	127.3
Mass reduction		g/m^2	634.5
Average mass reduction rate	Between the ignition point and the end point	$g/(m^2 \cdot s)$	0.33
	Between 10% and 90% mass reduction	$g/(m^2 \cdot s)$	0.58

과 특수 제조된 수지의 배합으로 이상적인 단열 효과를 발휘하며 Table 1은 Fiti Testing & Research Institute에 의뢰하여 측정된 개발 단열재의 열방출률 시험 결과이다.

2.2 단열재의 현장 시험시공

본 연구에서는 현재 공용 중인 터널을 대상으로 시험시공을 실시하였으며, 시험터널은 XX고속도로 터널로써 총 연장길이 280m의 단 터널이며, 폭은 11.5m, 높이 8.2m, 일

일 평균 교통량은 14,639대이다. 단열재에 의한 온도변화 분석은 온도를 측정할 수 있는 센서(i-Button)를 활용하여 1시간 단위로 계측하였다. Fig. 1은 설치 개요도를 나타낸 것이며 및 계측기의 규격 및 성능은 Fig. 2 및 Table 2와 같다.

단열재의 시공은 터널입구부로부터 가로 8m, 바닥으로부터 높이 1.5m로 시공하였다. Fig. 3은 단열재의 시공 두께(약 1.1mm)를 측정하는 것이며, 현장 시험 시공 순서는 다음 Fig. 4와 같다. 라이닝의 온도변화 측정당시의 대기온도를

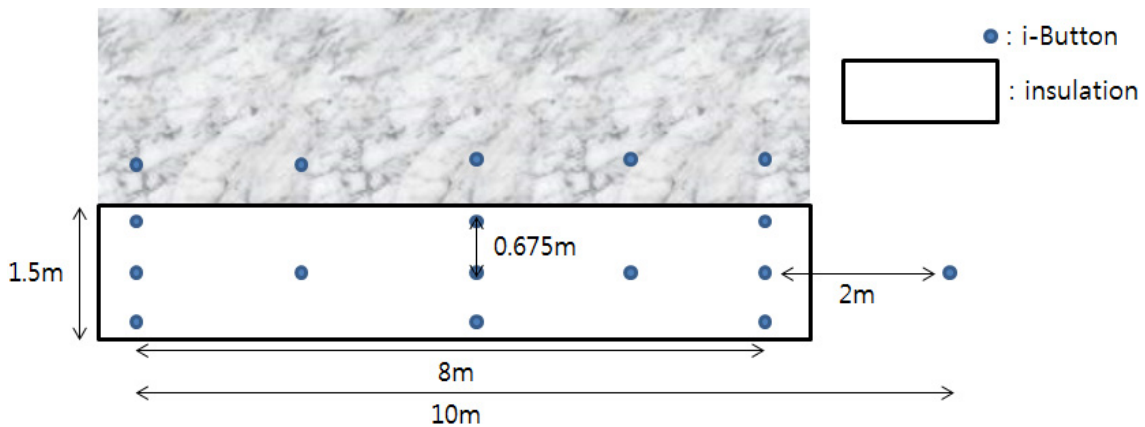


Fig. 1. i-Button installation overview plot

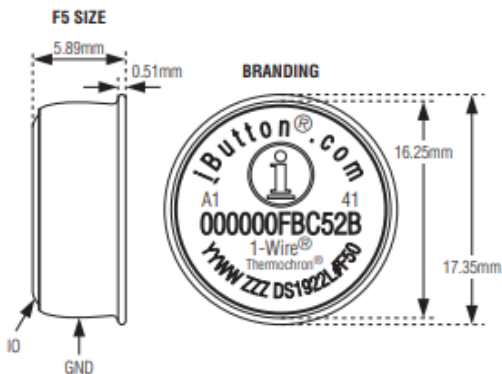


Fig. 2. i-Button

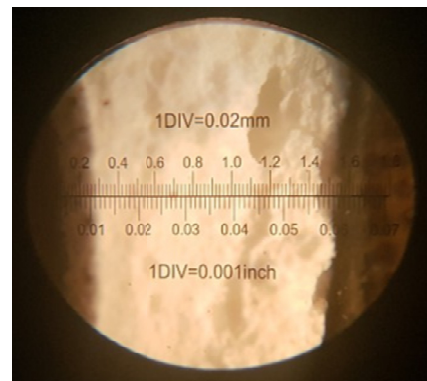


Fig. 3. Insulation thickness (1.1 mm)



(a) Surface operation



(b) Primer operation



(c) Installation Instrument



(d) Apply insulation



(e) Insulation construction completed (1)



(f) Insulation construction completed (2)

Fig. 4. Construction Phase

Table 2. I-Button characteristics (Maxim integrated Catalogue (2015))

Parameter	Units	Min	Typ	Max
Operating temperature	$^{\circ}C$	-40		+85
1-Wire pullup resistance	$k\Omega$			2.2
Input capacitance	pF		100	800
Input load current	μA		6	10
High-to-Low switching threshold	V	0.4		3.2
Input low voltage	V			0.3
Low-to-High switching threshold	V	0.7		3.4
Switching hysteresis	V	0.09		
Output low voltage	V			0.4

측정하기 위하여 터널 입구부로부터 2m 떨어진 위치에서 대기온도를 측정하였으며, 터널 라이닝 표면 온도는 터널 입구부로부터 내측방향으로 2m 간격, 총 8m 까지 설치하고, 각 위치에서 상부, 중앙부, 하부로 나누어 온도를 측정하였다. 단열재가 도포되지 않은 라이닝의 온도는 단열재 상부의 라이닝 표면을 대조군으로 하여 측정하였다.

3. 온도 계측 결과

본 연구에서는 2018년 12월 12일 오후 3시에 계측기 설

치 및 시공이 완료 되었으며, 2019년 2월 20일 오전 10시 까지 동절기 기간 약 2개월간을 계측하였으며, 이에 따른 분석 결과는 다음과 같다.

3.1 단열재 시공에 따른 온도 변화

단열재에 시공에 따른 온도변화를 알아보기 위하여 2018년 12월 19일 오전 1시부터 2018년 21일 오전 1시까지 터널 외기 온도에 따른 대조군과 단열재를 시공한 부분의 상부, 중앙부, 하부의 온도측정 결과를 비교한 결과 Fig. 5와 같은 결과를 나타내었다. 터널 입구부로부터 동일한 지점을 중심으로 외기온도 7.56°C 일 때 대조군의 온도는 7.11°C, 단열재가 시공된 중앙부는 6.08°C를 나타내었다. 외기온도가 2.04°C 일때 대조군의 온도는 2.09°C, 단열재가 시공된 중앙부의 온도는 3.07°C를 나타내었다. 대조군이 설치된 라이닝의 온도 대비 단열재가 시공된 라이닝의 온도를 비교할 경우 대조군과 중앙부의 온도변화의 편차는 2.0°C 정도로 단열재를 도포한 곳의 편차가 낮은 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 5).

3.2 터널 입구부로부터의 거리에 따른 온도 변화

터널 입구부로부터 거리별로 온도변화를 측정하였으며, 온도측정은 입구부로부터 최대 8m 까지를 측정하였다. 단

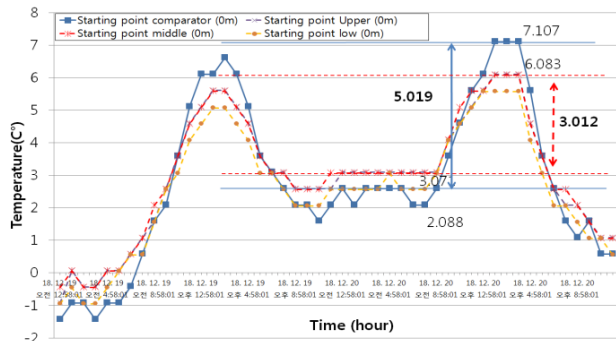


Fig. 5. Temperature at the tunnel entrance

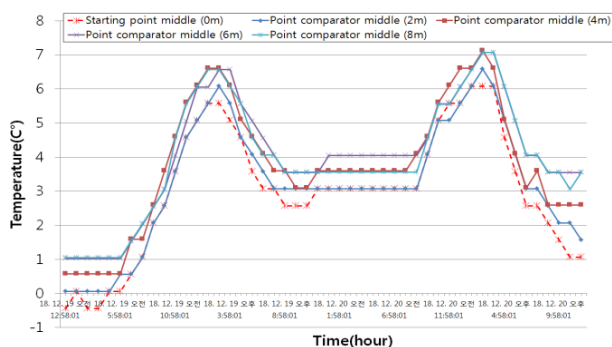


Fig. 6. Temperature variation with distance

열재 성능비교 지점을 중심으로 비교분석한 결과는 Fig. 6과 같다. 외기온도가 7.56°C일 경우, 터널 입구부의 온도는 6.08°C, 입구부로부터 2m는 6.58°C, 4m는 7.12°C, 6m 7.07°C, 8m는 7.08°C를 나타내었으며, 터널입구부와 입구부로부터 8m 떨어진 지점의 온도 차이는 0.99°C로 약 1°C 차이 나는 것을 확인할 수 있었다.

4. 단열재가 적용된 터널 라이닝 표면 온도 분석

가장 기온이 높았을 때와 가장 낮았을 때 각 지점의 라이닝 표면온도를 비교하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 계측기간 중 가장 온도가 높았을 때의 온도를 분석한 것으로 2019년 02월 06일 오후 3시를 기준(외기온도 8.56°C)으로 2019년 2월 5일 오전 1시부터 2019년 2월 7일 오후 12시 총 3일간의 계측 결과를 분석하였다.

2019년 02월 06일 오후 3시를 기준(외기온도 8.56°C)으로 분석한 결과, 터널 입구부 대조군의 온도는 8.11°C를 나타내었으며, 단열재가 도포된 지점의 상부는 7.12°C, 중앙부는 7.09°C, 하부는 6.58°C를 나타내었고, 터널입구부로부터

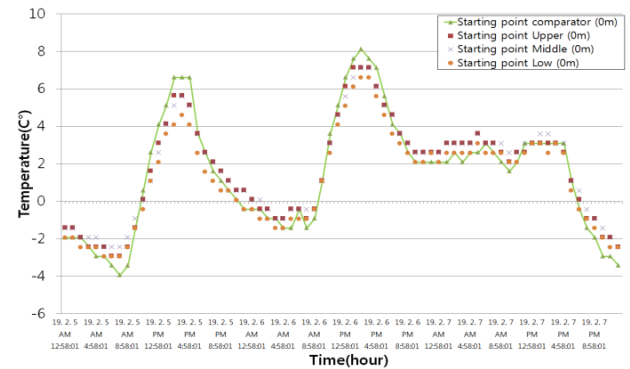


Fig. 7. Temperature at the entrance (with ambient air highest temperature)

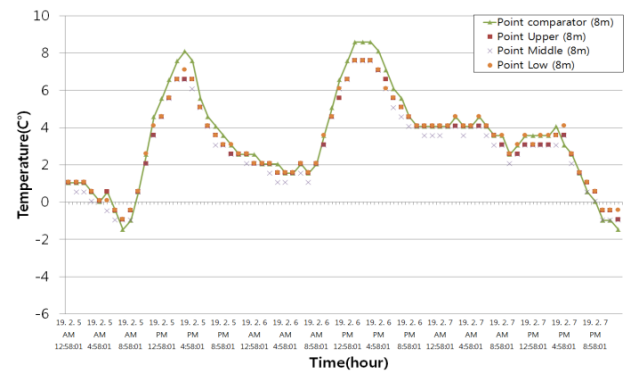


Fig. 8. Temperature at the 8 m (with ambient air highest temperature)

터 8m 떨어진 지점의 경우에는 대조군의 온도는 8.59°C를 나타내었으며, 단열재가 도포된 지점의 상부는 7.60°C, 중앙부는 7.58°C, 하부는 7.61°C를 나타내어, 단열재의 시공에 따라 약 1.1~1.5°C 정도 온도가 낮은 것으로 나타났다.

다음의 Fig. 9와 Fig. 10은 계측기간 중 가장 온도가 낮았을 때의 온도를 분석한 것으로 2018년 12월 31일 오전 7시를 중심(외기온도 -11.04°C)으로 2018년 12월 30일 오전 1시부터 2019년 1월 1일 오후 12시 총 3일간의 계측 결과를 분석하였다.

측정기간 중 외기온도가 가장 낮은 때의 온도는 2018년 12월 31일 오전 7시 때의 -11.04°C였으며, 터널 입구부에 위치한 단열재 미시공 부분의 대조군의 온도는 -9.45°C로 측정되었고, 같은 지점에서의 단열재가 도포된 지점의 상부는 -9.0°C, 중앙부는 -8.49°C, 하부는 -8.51°C를 나타내었고, 터널 입구부로부터 내측으로 8m 떨어진 지점의 경우, 대조군의 온도는 -7.02°C, 단열재가 도포된 지점의 상부부분은 -6.00°C, 중앙부는 -6.48°C, 하부는 -5.42°C로 측정되어, 단열재의 시공에 따라 약 0.5~1.6°C의 온도저하 방지 효과가 있는 것으로 나타났다.

동절기 외부의 온도에 따른 단열재의 열차단 효과를 분석한 결과 라이닝의 온도는 영하와 영상을 반복해서 받게되

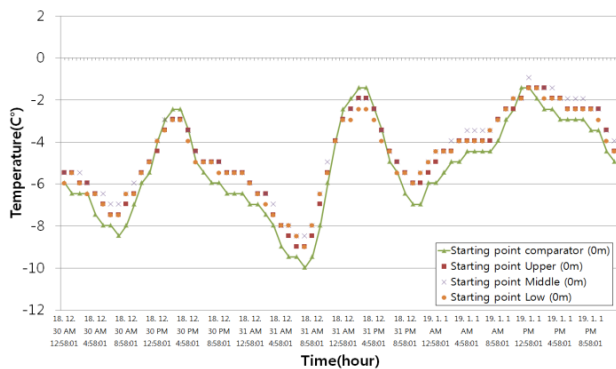


Fig. 9. Temperature at the entrance (with ambient air lowest temperature)

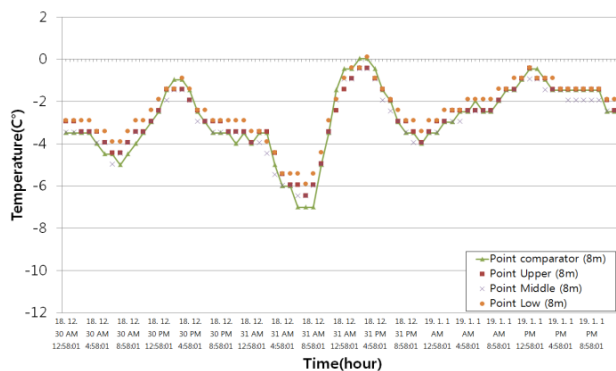


Fig. 10. Temperature at the 8 m (with ambient air lowest temperature)

어 손상이 가속화 될 수 있으나, 단열재가 시공된 구간인 경우 단열재가 시공되지 않은 구간에 비하여 약 1.5~3.0°C의 온도변화 폭을 감소시키는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 현장시험시공을 통한 외기온도에 따른 단열재가 터널라이닝의 온도에 미치는 영향을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 공용 중인 고속도로터널 라이닝의 표면에 단열재를 도포하고 동절기 기간동안 계측한 데이터를 바탕으로 분석한 결과, 단열재를 도포한 라이닝과 도포하지 않은 라이닝 온도의 최대폭(최고점, 최저점) 차이는 약 2°C 정도로 단열재를 도포한 라이닝 온도의 폭이 적게 나타났다.
- (2) 계측기간 중 가장 기온이 높았을 때와 기온이 낮았을 때의 온도를 비교한 결과, 외기온도가 영상으로 높았을 때 터널 입구부의 단열재가 도포되지 않은 라이닝(대조군)의 온도와 단열재가 도포된 부분의 라이닝 온도는 약 1.1~1.5°C 정도 온도가 낮았으며, 외기온도가 영하로 떨어졌을 때의 경우는 단열재가 도포된 부분의 라이닝 온도가 그렇지 않은 부분에 비하여 약 0.5~1.6°C 정도 높은 것으로 측정되었다.
- (3) 동절기 터널라이닝의 온도는 영상과 영하를 반복하게 되므로, 터널라이닝의 내구성 향상을 위해서는 온도변화 차이를 줄이는 것이 필요하며, 단열재가 시공된 구간인 경우 단열재가 시공되지 않은 구간에 비하여 약 1.5~3.0°C의 온도변화 폭을 감소시키는 것으로 나타나 열에 대한 편차를 줄여 줌으로써, 반복 열의 편차로 인한 터널 구조물의 손상을 저감시킬 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구결과는 터널 라이닝 중 높이 1.5m 정도의 일부 구간만을 단열재로 도포하여 측정한 것이므로 단열재의 도포범위를 증가시킬수록 그 효과는 향상될 것으로 판단된다. 또한 온도변화 차이 정도에 따른 터널 라이닝 구조물의 내구성 평가가 향후 지속적인 조사 및 분석을 통하여 진행될 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

1. 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).
2. 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).
3. 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).
4. 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.
5. Kim, N. Y. and Shim, J. W. (2013), Case studies on the tunnel frost due to the low temperature, Korea Geo-synthetic society, 2013 spring Geo-synthetics Conference, pp. 107~110 (in Korean).
6. Maxim integrated Catalogue. (2015), DS1922L/DS1922T, iButton Temperature Loggers with 8KB Datalog Memory, pp. 1~52
7. Son, H., S., Jun, K. J. and Yune, C. Y. (2017), Analysis on freezing reduction of road tunnels with heat insulation method during winter, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 33, No. 8, pp. 17~27 (In Korean).
8. 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.