동절기 철도 터널의 온도 분포에 관한 연구

Temperature Distribution of Railway Tunnels in Winter

박윤식* · 이세희** · 조국환***

Park, YoonSik*, Lee, SeHee**, and Cho, KookHwan***

Abstract

The freezing water around the tunnel lining, which is caused by the external temperature during winter, damages portions of tunnel structures, such as the lining and concrete slab track. To investigate the influence of freezing temperature, a total of 50 temperature gauges were installed from the tunnel entrance to 3,270 m. The total length of the tunnel was 8,293 m. The variation in temperature along the tunnel was measured during winter. The correlation between the variation in temperature and the influence of train operation at a speed of 130-150 km/h was analyzed. The duration of the increasing freezing temperature range influenced by train operation was also analyzed and displayed in the results. The results demonstrated that the variation in temperature according to the train operation could be recovered in 30 min. Therefore, when considering the freezing range of a tunnel where trains are travelling at intervals of approximately 30 min, it was judged that the influence factor will be negligible owing to the train operation.

Key words : Tunnel Freezing, Long Tunnel, Internal Temperature, Duration Time

요 지

동절기 기후시 외기온도 저하에 따라 구조물에 내재된 수분을 동결시켜 터널 라이닝 및 콘크리트 도상과 같은 터널 구조물을 손상시키게 된다. 따라서 동절기 터널 내 영하온도 분포범위를 파악하고자 총 연장 8,293 m 강릉선 ○○장대터널을 대상으로 터널 입구(0 m)에서 3,270 m 거리까지 50개의 온도계측기를 설치하였으며 시간별 내부온도 변화를 계측하였다. 해당 구간의 경우 시속 130-150 km/h 대역 내 열차가 양방향으로 운행함에 따라 철도 운행과 터널 내부온도의 상관관계를 검토하고자 열차주행시 내부온도의 변화 및 지속시간 등의 결과를 분석하였다. 분석결과, 터널 내부온도는 주로 외기온도와 터널 지표면간의 차이로 발생하며, 열차로 인한 내부온도 변화는 30분 내외로 회복되는 것으로 나타났다. 따라서 동결범위 산정시 열차주행간격이 30분 내외인 터널구간에서는 열차 주행에 대한 영향요인은 배제하여도 무관할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 터널동결, 장대터널, 내부온도, 지속시간

1. 서 론

터널의 구조물 특성상 주변에서 발생하는 지중열에 의해 터널 내부는 일정온도를 유지하게 된다. 그러나 동절기 기후시 영하의 외기온도가 터널 입출구부에 유입되면서 강제대류가 발생하고, 내부에 유지되고 있는 터널 중심부 온도

간에 열전달이 발생하게 되는데, 이때 열차가 통과할 경우 대류 열전달계수를 일시적으로 증가시켜 동결 영향범위가 보다 확산된다. 이와 같은 동절기 피해현상은 국내 강원 및 경기도 북부 지역에서 주로 발생하며, 해당 지역의 일반 및 고속선 등 철도시설물 운영의 저해로 인해 열차속도 저감 및 궤도 유지보수 등의 비용이 상당히 소요되고 있다.

*정회원, 서울과학기술대학교 철도건설공학과 박사과정(E-mail: parkys0710@kr.or.kr)

Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Railway Construction Engineering, Seoul National University of Science & Technology

**정회원, 서울과학기술대학교 철도건설공학과 박사과정

Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Railway Construction Engineering, Seoul National University of Science & Technology

***교신저자, 정회원, 서울과학기술대학교 철도건설공학과 교수(Tel: +82-2-970-6584, Fax: +82-2-973-5866, E-mail: khcho@seoultech.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Dept. of Railway Construction Engineering, Graduate School of Railway, Seoul National University of Science & Technology

따라서 본 연구에서는 열차운행시 동절기 철도터널 내부온도의 변화를 검토하고자 강릉선 철도시설물 내 동절기 피해가 발생한 ○○장대터널을 대상으로 온도변화를 계측하였으며, 열차운행 전후를 비교하여 터널 내부온도 변화 및 지속시간 등을 검토하였다.

2. 이론적 고찰 및 연구동향 검토

2.1 관 내부의 유동현상

동절기 터널의 내부온도는 지중에서 발생하는 열로 인해 영상의 온도로 유지되며, 입구에서부터 영하의 외기온도가 일정한 풍속을 가지고 유입되므로 터널 관 내부에서는 강제대류로 인한 열전달이 발생하게 된다. 따라서 터널 내부는 지중열로 인해 표면온도(T_s)가 일정하다는 가정하에 Newton 냉각법칙으로 관 내부의 열전달율을 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다. 여기서, 열전달율($\dot{Q}$)은 면적(A)과, 온도차(ΔT_{ave})에 따라 비례하여 증감되므로 터널의 단면과 외기온도별에 따라 터널 내부온도의 양상은 다르게 나타나게 된다.

Eq. (1)에서 h 는 평균 대류 열전달계수, ΔT_{ave} 는 유체와 표면사이의 평균온도차, T_m 는 관 내부 평균온도이다(Cengel, 2009).

$$\dot{Q} = hA\Delta T_{ave} = hA(T_s - T_m)_{ave} \quad (1)$$

등온 경계조건일 경우 관의 길이(L) 방향으로 관 입구온도(T_i)가 출구온도(T_e)로 변하게 되는데, Fig. 1과 같이 일정한 표면온도(T_s)로 인해 평균 유체온도(T_m)의 변화는 비선형적으로 증가하여 표면온도와 가깝게 도달하게 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 1. The Variation of the Mean Fluid Temperature Along the Tube for the Case of Constant Temperature

동절기 터널 내부온도의 변화는 Newton 냉각법칙에 의해 입출구부에 유입되는 외기온도와 지표면온도 차이로 발생하게 되며, 철도터널의 경우 온도차 외에 열차 운행에 따른 열전달계수를 증가시켜 내부온도분포가 다르게 나타난다.

2.2 연구동향 검토

국내 기후 특성상 강원도 및 경기 북부지역에 위치한 터널을 중심으로 피해가 발생하였으며, 도로터널을 중심으로 연구가 진행되었다. 따라서 외기온도간 터널 입구에서부터 동결 영향거리 및 영향요인 등을 검토하였다.

Kim et al. (2013) 자료에 따르면 일평균 기온이 약 -7°C 이하로 2~3일간 지속될 경우 배수관이 동결되는 현상이 관찰되었으며, 동결구간은 터널입구에서 200 m 범위 이내 배수관 및 조인트 누수 등이 발생되었다. 특히 수정 동결지수 700 이상, 터널 방향이 $\text{N}50^{\circ}\text{E} \sim \text{N}45^{\circ}\text{W}$ 에서 동결영향을 주는 것으로 분석되었다.

Son et al. (2017)은 강원지역에 위치한 도로터널 4개소를 12월부터 2월까지 3개월간 지속적인 터널내부온도 계측을 수행하였으며, 1 km 연장 내외 터널에 30~100 m 간격으로 온도분포 경향을 검토한 결과, 내부온도 분포 경향은 월별과 관계없이 일정하며, 30 m 이내에 온도차가 큰 것으로 계측되었다.

Jun (2019)은 강원지역의 도로터널 총 105개소에 대해서 현장 온도측정방법으로 내부온도를 조사하였으며 양방향 터널의 경우 1 km 이하 연장에서는 총연장의 21%, 1~3 km 연장에서는 총연장의 15% 범위에서 입출구부의 온도변화가 큰 것으로 나타났다. 외기온도의 영향범위는 연장이 길어질수록 증가하며, 총 연장의 20% 범위를 넘지 않는 것으로 분석되었다.

국내 터널 동결관련 연구사례는 도로분야에 국한되어있다. 반면 철도터널의 경우 전차선 및 차량크기 고려 등으로 인해 설계 단면적과 터널연장이 일반적으로 도로분야 보다 크며, 철도 특성상 열차운행 등으로 평균풍속의 일시적인 증가 등의 영향을 받음으로 터널 내부온도 분포의 경향은 다르게 나타난다. 따라서 강릉선 동결피해 철도 장대터널을 중심으로 온도 계측을 수행함에 따라 내부 온도분포를 검토하고, 열차 운행방향에 따라 내부온도 변화 및 지속시간 등을 분석하고자 한다.

3. 강릉선 철도터널 내부온도 변화 계측

강릉선 ○○터널의 경우 2017년 12월에 개통되었으며, 동절기 강원지역 외기온도가 -12.8°C 이하로 저하됨에 따라 일부구간 동결피해가 발생하였다. 터널 구조 특성상 갱구부에서부터 일정거리까지 동결로 인한 빙판 및 배수구 등이 동결피해가 발생하였다. 이와 같이 동결 피해원인을 세부적으로 검토하고자 해당 피해터널을 중심으로 철도터널 연장거리별 온도계측기를 설치하였으며 무선 시스템을 구축하

여 2019년 2월 ~ 2020년 3월까지 약 13개월간 두 번의 동절기를 거쳐 데이터 수집 및 분석을 수행하였다.

3.1 현장계측 개요

본 터널은 폭 11 m, 너비 7.8 m로 복선구간이며, 총 연장은 8,293 m인 장대터널로 설계되었다. 단면특성상 마제형 구조로 좌우가 대칭되는 형태로 구성됨에 따라 길이방향으로 터널입구부터 중심지점인 3,270 m까지 계측기 설치범위를 설정하였으며, 센서-데이터로거가 함께 구성된 박스를 공동구 상판 덮개로부터 약 1 m 높이 위치한 터널 측면부에 50개, 각 센서들을 송수신할 수 있는 중계기 1개 각 설치하였다.

센서-데이터 로거 박스 설치간격은 Fig. 2(c)와 같이 터널 갱구부를 시작으로 0 ~ 210 m 범위 내에서는 30 m 간격으로 온도계측기를 설치하였으며, 이후 50 m, 70 m, 90 m 간격을 확장해가면서 총 50개의 계측기를 측면부에 길이방향으로 3,270 m까지 설치하였다. 중계기는 센서-데이터로거 박스들의 중간지점인 터널입구에서 1,500 m 지점에 설치하였으며, 데이터 송수신 방식은 무선시스템방식으로 자체 프로그램을 사용하여 동절기 기간 동안 시간별 현장 온도 데이터를 구축하였다.

3.2 외기온도별 터널 내부온도 변화

터널 내부온도는 Newton 냉각법칙으로 고려하였을 때 입구에서 유입되는 수력학적 직경(D_h), 풍향, 풍속 등의 영향을 받게 된다. 따라서 해당 지역 터널의 영향요인들을 다음과 같이 검토한 결과, 터널 단면적을 고려한 수력학적

직경은 8.71 m로 계상되었으며, 풍향 및 풍속은 터널이 위치한 지역의 풍배도를 국내 기상청 자료를 통해 검토한 결과, Fig. 3과 같이 전체 풍향의 21.9%는 0.5 m/s 이하로 풍속에 대한 영향이 적은 지역으로 나타났다.

Fig. 3. Wind Rose: OO Region in Gangwon-do

해당 터널의 입구방향과 동일한 남남서(SSW)쪽 풍향은 전체 풍향의 약 8.5%를 차지하였으며, Table 1과 같이 주요 풍속은 0.5 ~ 3.3 m/s 이내로 나타났다. 따라서 해당 장대터널의 경우 도로터널보다 수력학적 직경이 크게 설계되므로 열전달을 또한 증가하며, 터널입구와 동일한 방향인 남남서(SSW)쪽의 풍향은 대부분 3.3 m/s 이하로 터널 내부온도의 영향은 적을 것으로 분석된다.

Fig. 2. Thermometer Instrument Installation Schematic

Table 1. The Wind Speed Trend with the Tunnel Entrance Direction

Wind velocity (m/s)	Wind Direction: SSW
< 0.4	-
0.5 ~ 3.3	8.2%
3.4 ~ 7.9	0.3%
Total	8.5%

외기온도에 따른 장대터널 내부온도의 변화를 검토한 결과, Fig. 4와 같이 외기온도에 따라 터널 내부온도 또한 변화하였으며, Newton 냉각법칙에 따라 터널입구에서 중심부에 가까워질수록 장대터널 내부온도가 비선형적으로 점차 상승하는 경향으로 나타났다. 터널입구에서부터 410 m, 811 m, 1,511 m, 2,010 m 지점에서 외기온도가 비선형적으로 일정하게 상승하지 않고 급격한 온도 상승 및 하강 등의 내부온도 변화가 불규칙적으로 발생된 것을 알 수 있는데 해당 지점은 수직구 및 기지갱이 설치되어 있는 지점으로 온도간의 간섭으로 변화가 나타난 것으로 분석된다.

Fig. 4. Temperature Distribution in the Tunnel

장대터널 내 영하온도 분포의 경우, 외기온도가 -2.0°C 일 때 터널입구에서 570 m 거리까지 내부온도가 영하로 떨어졌으며, 온도가 1°C 저하될 때마다 평균적으로 약 91 m씩 영하온도 분포거리가 증가하여 외기온도가 -12.0°C 일 때 최대 1,480 m까지 도달하는 것으로 나타났다. 따라서 외기온도가 낮아질수록 터널 내부온도 또한 저하됨에 따라 터널 주변 내재된 수분 및 지하수가 동결을 발생시켜 동결피해구간이 증가될 것으로 예상된다.

4. 열차운행에 따른 내부온도 및 지속시간 변화 검토

본 터널은 복선구간으로 설계됨에 따라 열차는 양방향(상

하선)으로 운행하며, 시속은 약 130 ~ 150 km/h로 터널을 통과하게 된다. 주로 터널 내부온도 분포는 외기온도와 터널 지표면 온도간에 형성되며, 열차가 하선방향(터널입구→터널중심)으로 운행시 외기온도를 터널 내부로 유입되고, 상선방향(터널중심→터널입구) 운행시 터널 내부온도를 외부로 유출되는 형태로 열차 운행방향에 따라 내부온도가 변화할 것으로 판단된다. 이에 하선방향을 중심으로 단방향 열차운행시 변화와 상선방향 통과 후 하선방향으로 운행하였을 때 양방향 열차운행시 변화를 나누어 각각의 내부온도 변화 및 지속시간 여부를 검토하고자 한다.

4.1 열차운행시 내부온도 변화

4.1.1 단방향 열차운행시

단방향 열차운행시 내부온도 변화를 검토하기 위해 본 구간의 경우 하선방향(터널입구→터널중심)으로 6시 31분에 터널입구를 통과함에 따라 열차운행 전후 온도분포 경향을 Fig. 5와 같이 나타내었으며, 외기온도가 -4.6°C , -12.8°C 일 때 온도분포를 각각 검토하였다. 외기온도가 -4.6°C 일 때 Fig. 5(a)와 같이 열차운행 전 영하온도 분포범위는 터널입구에서부터 960 m까지 발생하였으며, 열차 통과 이후 열전달이 지속적으로 발생하여 최대 1,190 m까지 영하 온도가 증가되었으나 일정시간 경과 후 열차 운행 전 내부온도 분포로 회복되는 경향이 나타났다. 외기온도가 -12.8°C 인 경우 Fig. 5(b)와 같이 터널입구에서부터 1,480 m까지 분포된 영하온도 범위가 열차통과 후 최대 1,660 m까지 증가하는 경향이 나타났으나 일정시간이 지난 후 영하온도 분포가 1,480 m로 회복되었다.

단방향 열차운행시 두 데이터는 동일한 경향으로 영하온도 범위가 최대 200 m ~ 220 m까지 증가하였다가 일정시간 경과 후 열차 운행 전 내부온도와 같이 외기온도와 터널 지표면 온도간의 내부온도 변화로 회복하는 경향 추이로 나타났다.

4.1.2 양방향 열차운행시

양방향 열차운행시 내부온도 변화를 검토하기 위해 본 구간의 경우 상선방향(터널중심→터널입구)으로 22시 58분에 열차가 운행한 후 하선방향(터널입구→터널중심)으로 23시 21분에 통과함에 따라 열차운행 전후 온도분포 경향을 Fig. 6과 같이 나타내었으며, 외기온도가 -4.9°C , -9.1°C 일 때 온도분포를 각각 검토하였다. 외기온도가 -4.9°C 일 때 Fig. 6(a)와 같이 열차운행 전 영하온도 분포는 터널입구에서부터 1,000 m까지 발생하였으며, 상선방향(터널중심→터널입구) 운행 후 영하온도가 270 m 정도 감소되었으며, 하선방향(터널입구→터널중심) 운행 후 열차 운행 전 내부온도 분포로 회복되는 경향이 나타났다. 외기온도가 -9.1°C 인 경우 Fig. 6(b)와 같이 열차운행 전 영하온도 분포범위는 터널입구에서

(a) External temperature: -4.6 °C

(b) External temperature: -12.8 °C

Fig. 5. The variation Temperature in Tunnel (one-direction train operation)

(a) External temperature: -4.9 °C

(b) External temperature: -9.1 °C

Fig. 6. The Variation Temperature in Tunnel (two-direction train operation)

부터 1,390 m까지 발생하였으며, 상선방향(터널중심→터널 입구) 운행 후 영하온도가 310 m 정도 감소되었으며, 하선방향(터널입구→터널중심) 운행 후 열차 운행 전 내부온도 분포로 회복되는 경향이 나타났다.

양방향 열차운행의 경우 두 데이터는 동일한 경향으로 상선방향 열차운행시 터널 내부에 분포된 영하온도 범위는 최대 270 ~ 310 m까지 감소되었다가 하선방향으로 열차가 운행 후 내부온도는 열차 운행 전 내부온도와 같이 회복하는 경향으로 나타났다.

4.2 열차운행시 내부온도 변화 지속시간

4.2.1 단방향 열차운행시

단방향 열차운행시 내부온도 변화는 터널입구에서부터 분포된 영하온도 범위가 증가하지만 일정시간이 지나면 다시 원상태로 회복하게 되는데, 이때 증가된 영하온도 범위 내 지속시간이 길어질수록 열차운행에 따른 터널 내 동결범

위 또한 증가하게 된다. 따라서 열차운행에 따라 증가된 영하온도의 범위와 지속시간의 관계를 검토하기 위해 Fig. 7과 같이 10분 간격별 영하온도 범위 변화를 나타내었다. 그 결과, 하선방향(터널입구→터널중심)으로 열차가 6시 31분경에 터널입구를 통과함에 따라 약 20분 경과 후 열차운행에 따른 대류열전달계수가 점차 증가되어 영하온도 분포가 최대 220 m까지 증가하였으며, 약 30분 경과 후 영하온도 분포는 외기온도와 터널 지표면 온도간의 관계로 다시 회복되는 결과를 나타내었다. 따라서 단방향 열차가 장대터널 내 약 130~150 km/h 속도로 운행하며, 30분 이상 간격으로 운행할 경우 동절기 터널 내부온도는 열차운행으로 인한 영향이 미비할 것으로 판단된다.

4.2.2 양방향 열차운행시

양방향 열차운행시 터널입구에서부터 분포된 영하온도 범위가 상선방향(터널중심→터널입구)일 경우 감소되고, 하선방향(터널입구→터널중심)일 경우 증가되는 현상을 나타

Fig. 7. The Variation Distance of Temperature Below Zero (one-direction train operation)

나게 된다. 이때 상선방향으로 운행한 후 하선방향으로 양방향 운행을 하였을 때 영하온도 범위의 증감여부 및 지속기간 등을 검토하고자 Fig. 8과 같이 10분 간격별 영하온도 범위 변화를 나타내었다. 그 결과 상선방향(터널중심→터널입구)으로 열차가 22시 58분에 터널입구를 통과함에 따라 약 10분 경과 후 영하온도 범위는 급격하게 감소되었으나, 약 20분 경과 후 점차 원상태로 증가하는 추세를 보이다가, 하선방향(터널입구→터널중심)으로 열차가 23시 21분에 터널입구를 통과한 후 10분 내 외기온도에 따른 내부온도로 완전히 회복되었다. 따라서 열차운행에 따라 열전달계수가 증감되는 소요시간은 약 10 ~ 20분 내외 발생하며, 양방향 같은 속도로 상하선 열차가 반복하여 운행할 경우 외기온도에 따른 내부온도분포 회복시간은 최소 10분 정도 소요되었다. 이는 양방향으로 운행할 경우 단방향 보다 내부온도로 회복되는 시간은 짧을 것으로 판단되며 열전달계수가 증감되는 소요시간을 고려한다면 약 10 ~ 20분 내외로 외기온도와 터널 지표면 사이 온도차로 인해 온도분포 경향으로 회복될 것으로 판단된다.

5. 결론

도로터널의 경우 차량의 운행빈도가 높고 열차에 비하여 상대적으로 소형차량 위주의 운행시 발생하는 영향을 검토하였다면 철도와 같이 대형의 차량이 운행하여 외기온도를 유입하거나 내부온도를 유출시키는 경우에 대한 영향검토는 현재까지 이루어지지 않았다. 따라서 본 논문에서는 열차 운행시 발생하는 온도변화에 대한 영향을 검토하고자 실측을 통하여 열차운행과 온도변화 관계를 분석하였다.

- (1) 외기온도에 따른 장대터널 내부온도의 변화를 검토한

Fig. 8. The Variation Distance of Temperature Below Zero (two-direction train operation)

결과, 외기온도에 따라 터널 내부온도가 변화하였으며, 터널입구에서 중심부에 가까워질수록 장대터널 내부온도가 비선형적으로 점차 상승하는 경향으로 나타났다.

- (2) 철도터널의 경우 열차운행이 터널 내부온도를 변화시키므로 열차주행방향을 단방향과 양방향을 나누어 계측데이터를 검토하였다. 열차가 130 ~ 150 km/h의 속도로 주행할 때 터널 내 영하온도 분포범위는 주행방향에 따라 200 m ~ 310 m까지 증감하였으며, 단방향인 경우 30분, 양방향인 경우 10 ~ 20분 이내 열차운행 이전 터널 내부온도로 회복되었다.
- (3) 본 연구를 통해 터널 내부온도는 주로 외기온도와 터널 지표면간의 차이로 발생하며, 열차로 인한 내부온도 변화는 30분 내외로 회복되는 것을 알 수 있다. 따라서 동결피해범위 산정시 열차주행간격이 30분 내외인 터널구간에서는 열차주행에 대한 영향요인은 배제하여도 무관할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업비 지원(위탁과제번호:PK2004A1-1)에 의해 수행되었습니다.

References

- Cengel, Y.A. (2009). *Introduction to thermodynamics and heat transfer* (2nd ed.). New York, NY, USA: McGraw-Hill, pp. 574-613.
- Jun, K.J. (2019). *Analysis of factors affecting the internal temperature in road tunnels located in cold regions*

and development of an estimation model. Ph.D. dissertation, Gangneung Wonju National University.

Kim, N.Y., et al. (2013). *A study on the antifreeze of concrete lining according to the temperature drop in the tunnel*. 2013 Commercialization Project Research Report, Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI).

Son, H.S., Jun, K.J., and Yune, C.Y. (2017). Analysis of inside temperature measurement results of road

tunnel in Gangwon pduring Winter season. 2017 *Conference of Korean Society of Civil Engineers*. Korean Society of Civil Engineers, pp. 531-532.

Received	■	November 6, 2020
Revised	■	November 6, 2020
Accepted	■	November 13, 2020