



터널 온도계측을 통한 라이닝 단열 설계에 관한 연구

김대영^{1*}, 이홍성², 심보경³

A study on the design of tunnel lining insulation based on measurement of temperature in tunnel

Dea-Young Kim, Hong-Sung Lee, Bo-Kyoung Sim

ABSTRACT In case of tunnels in cold regions, a freeze of groundwater around tunnel may act as a barrier of tunnel drainage in winter, or may cause the inner extrusion of lining. In spite of that, a design of insulation for preventing the frost damage of tunnel lining has not been introduced in Korea, while foreign countries such as Norway and so on have a standard on insulation. In this study, a few freezing cases of road tunnels have been reviewed, and the results show that the freezing protection is necessary. In order to characterize the thermal distribution in the tunnel, following measurements have been performed at Hwa-ak tunnel; the temperature distribution by longitudinal lengths, the internal temperature of lining and the temperature distribution of the ground under pavement. From these measurements, the characteristics of the tunnel's internal temperature distribution due to temperature change in the air has been analyzed. Based on the measurement results on the temperature distribution at Hwa-ak tunnel, thermal flow tests on the rock specimen with and without insulation have been performed in the artificial climate chamber to investigate the performance of the insulation. Also, a number of 3D numerical analyses have been performed to propose appropriate insulation and insulation thicknesses for different conditions, which could prevent the frost damage of tunnel lining. As a result of the numerical analysis, air freezing index of $291^{\circ}\text{C} \cdot \text{Hr}$ has been suggested as the threshold value for freezing criteria of groundwater behind the tunnel lining.

Keywords: Frost damage of tunnel lining, thermal insulating material, thermal flow analysis, thermal flow test, insulation design in tunnel, air freezing index

요약 한랭지에 건설된 터널의 경우 터널 주변지반 지하수의 동결은 동절기 터널 배수 장애의 원인이 되며 라이닝을 내공 측으로 압출시키는 원인으로 작용하기도 한다. 노르웨이 등 해외에서는 이미 한랭지에 건설되는 터널의 동해방지를 위한 단열기준을 가지고 있으나 국내에서는 아직까지 터널 라이닝 동해방지를 위한 단열설계가 도입되어 있지 않은 실정이다. 본 연구에서는 국내 도로터널의 동결 사례를 고찰하여 터널 라이닝 동해방지 대책이 필요함을 파악하였다. 또한 터널 주위의 온도분포를 파악하기 위해 화악터널에서 터널 종단길이에 따른 온도분포, 라이닝 내부의 온도, 포장면 하부지반의 온도 분포를 계측하였으며 이로부터 외기 온도변화에 따른 터널 내부 온도 분포 특성을 분석하였다. 화악터널의 온도분포 계측 결과를 바탕으로 단열재의 성능시험을 위해 인공기후실에서 단열재 설치 유무에 따른 암석시편의 열유동 실험을 수행하였다. 또한 터널 라이닝 동해를 방지할 수 있는 적정 단열재 두께를 제안하기 위해 3차원 수치해석을 실시하였다. 수치해석 결과로부터 터널배면 지하수 동결기준으로 동결지수를 약 $291^{\circ}\text{C} \cdot \text{Hr}$ 로 제안하였다.

주요어: 터널 라이닝 동해, 단열재, 열류해석, 열유동 시험, 터널단열설계, 동결지수

접수일(2011.7.6), 수정일(2011.7.15), 게재확정일(2011.7.22)

¹정회원, 현대건설 연구개발본부, 수석연구원

²정회원, 현대건설 연구개발본부, 책임연구원

³비회원, 현대건설 연구개발본부, 연구원

*교신저자: 김대영(E-mail: dykim@hdec.co.kr)

1. 서 론

한랭지에 건설된 터널의 경우 결빙이나 터널 주변지반 지하수의 동결은 동절기 터널 배수 장애의 원인이 되며 라이닝 배면의 원지반 동결에 의하여 라이닝을 내공축으로 압출시키는 변상원인으로 작용하기도 한다.

동절기가 길고 기온이 낮은 노르웨이에서는 터널의 방수 및 라이닝 동해방지를 위한 연구가 오래 전부터 수행되어 왔다. 최근에는 표 1과 같이 터널 라이닝 동해방지를 위해 PE 폼(polyethylene foam)의 사용이 시방에 규정되어 있으며 동결지수 $625^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ 까지의 단열에 PE폼 45 mm 두께가 가장 적절한 것으로 보고되고 있다(Broch 등, 2002).

이와 같이 해외에서는 이미 한랭지에 건설되는 터널의 동해방지를 위한 단열기준을 가지고 시공에 적용하고 있으나 국내에서는 아직까지 터널 라이닝 동해방지를 위한 단열설계가 도입되어 있지 않은 실정이다. 그림 1의 전국 동결지수선도(건설교통부, 2007)로부터 노르웨이에서 45 mm 두께의 PE폼이 적용되는 최대동결지수($625^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$) 이상을 나타내는 지역이 강원 산간지역에 넓게 분포하고 있다는 것을 알 수 있다. 실제로 2002년 대관령 1터널 개통직후 터널 입구에서부터 약 500 m 지점까지 온도가 -6°C 정도까지 강하하여 터널 측벽 하부 종배수관의 동결이 발생하여 배수에 지장을 초래한 사건이 발생한 바 있다. 따라서 국내에도 한랭지에 터널을 시공하는 경우, 지하수의 유무와 터널내 온도에 따라 동해방지 대책의 수립이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 국내 도로터널의 동해 사례를 고찰하였으며, 한랭지 터널의 단열대책을 수립하기 위하여 경기도 가평의 화악터널에서 터널 종단길이에 따른 온도분포, 라이닝 내부의 온도, 포장면 하부지반의 온도분포를 계측하였다. 또한 2년간 계측한 화악터널의 온도분포 결과를 이용하여 터널의 지반고, 외기분포, 터널 종방향 거리에 따른 변수 적용이 가능하도록 3차원 수치해석을 실시하여 터널 라이닝 동해를 방지할 수 있는 적정 단열재와 단열재 두께를 제안하였다. 그리고 본 연구에서 계측된 온도분포도를 이용하여 인공기후실에서 암석시편 및 단열재 설치 전후의 실내 열유동 실험을 실시하여 단열재 성능 테스트를 실시하였으며 연구 결과를 바탕으로 새로운 터널 단열설계기준을 제시하였다.

2. 국내 도로터널의 동결사례

국내 도로터널의 경우 동결에 의한 피해 및 대책 등에 대하여 무관심한 상태였으나 대관령 1 터널의 피해사례 발생에 따라 문제가 제기되었다. 대관령 1 터널은 2001년 11월 개통된 이후 대관

표 1. 노르웨이에 터널의 방수 및 지하수 동결방지 기준(Broch 등, 2002)

Method of W&FPS :	Tunnel class(AADT)				
	A (<2500)	B (2500 ~ 5000)	C (5000 ~ 10000)	D (10000 ~ 15000)	E (>15000, two tubes)
WG-Tunnel fabric, not insulated	○ ¹				
Miljohvelv, insulated (metal sheet W&FPS)	●	●	○ ²		
PE-foam w/60 mm sprayed concrete, steel fibres	●	●			
PE-foam w/60 mm sprayed concrete, mesh reinforced	●	●	●*	●*	●*
Concrete Elements	●	●	●	●	●
Cast concrete with membrane	●	●	●	●	●

○¹=may be used up to AADT 1000(Annual Average Daily Traffic) and below a given frost limit($F_{10T} < 20000$ h°C).

○²=concept is modified for tunnel class C.

●*=concrete wall elements must normally be used



그림 1. 전국 동결지수선도(건설교통부, 2007)

령 지역의 일평균 기온이 약 -7°C 이하로 2~3일간 지속되면 배수관이 동결되는 현상이 관찰되었으며, 시공 이음부의 측벽바닥에서 천정부까지 올라가면서 고드름이 발생한 후 외기가 0°C 이상이 되면 고드름이 녹아내리는 현상이 반복적으로 발생하였다(그림 2 참조). 이러한 현상의 원인은 시공 이음부에서 여름철 집중호우 시 어떠한 누수흔적이나 현상이 발생하지 않는 것으로 보아 방수시트의 손상에 의한 것은 아닌 것으로 증명되었다. 즉, 배수관이 동결되면서 배수되지 못한 지하수가

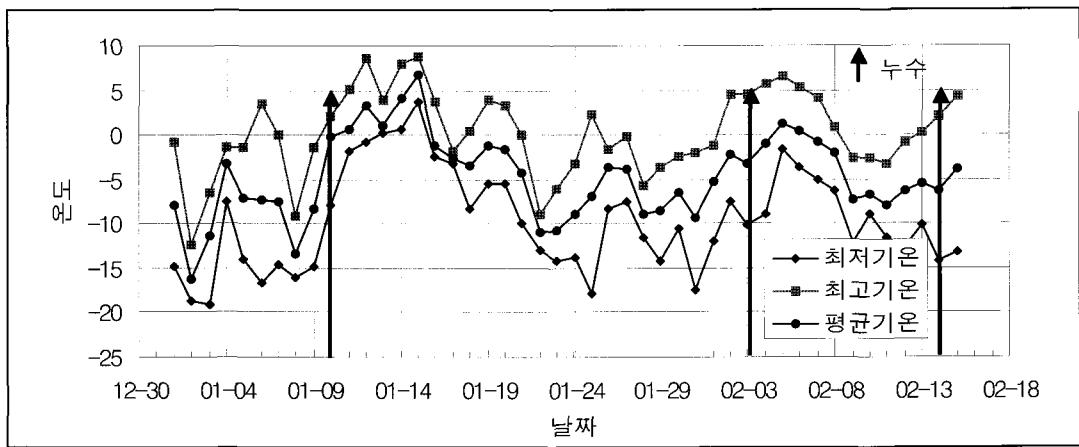


그림 2. 대관령 1터널 시공이음부 고드름 융해에 의한 낙수발생 일자(김대영, 2008)

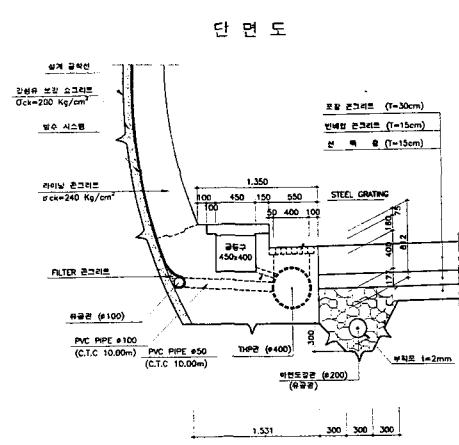


그림 3. 터널 배수관 단면도(김대영, 2008)

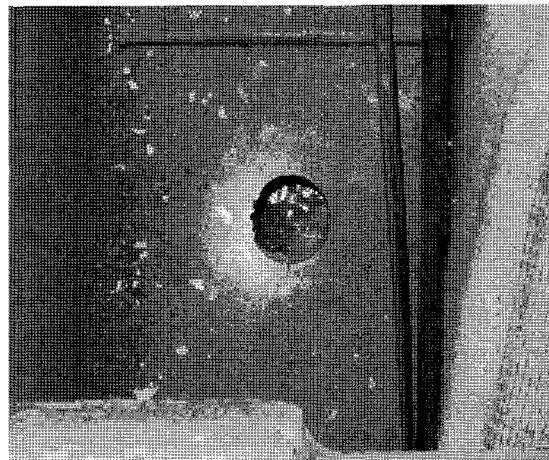


그림 4. 횡배수관 결빙상태 확인(천공)(김대영, 2008)

라이닝과 방수막 사이의 미세한 틈으로 흐르고 이 물이 터널 종방향으로 이동되어 시공 이음부로 도달하여 수압에 의해 시공 이음부 상부로 올라가면서 훌러나와 고드름이 형성되는 현상으로 밝혀졌다. 이 현상은 터널 입구로부터 약 200 m~300 m 구간에서 발생하였다(김대영, 2005a, 김대영, 2005b, 김대영, 2008).

그림 3과 같이 터널 종단방향으로 매 10 m 간격으로 설치된 횡배수관의 동결상태를 공동구 하부를 천공하여 파악한 결과, 그림 4와 같이 횡배수관 내부가 동결되어 있음을 알 수 있었다. 한국도로공사 도로교통연구원(2005)에서 고속국도 50호선에 대하여 조사한 바에 의하면 표 2와 같이 대관령 1터널 이외에도 둔내, 봉평터널에서도 동결문제가 발생한 것으로 나타났다.

표 2. 고속국도 50호선 터널 조사결과(한국도로공사 도로교통연구원, 2005)

터널명		동결 지수 (°C · day)	동결 기간 (일)	수정 동결지수 (°C · day)	터널 방향	결빙상태
둔 내	시점	536.45	94	821.8	N43W	
	종점	529.57	94	791.5	S43E	입구~200 m 배구관 막힘
봉 평	시점	511.38	94	716.4	S43W	
	종점	508.51	94	719.7	N47E	입구~300 m 배구관 막힘
대관령1	시점	374.04	127	787.6	N41W	입구~200 m 배구관 막힘, Joint부 누수발생
	종점	366.36	127	757.3	N86E	

3. 터널 현장 온도분포 측정

터널 종단길이에 대한 터널 벽면의 온도를 측정하기 위하여 경기도 가평군과 강원도 화천군을 잇는 화악~도계간 확포장공사(지방도 341호선) 구간의 화악터널(해발 880 m, 연장 680 m)을 대상으로 터널측벽 7개소와 라이닝 내부 2개소, 터널 바닥면 심도별 지중온도 측정을 실시하였다. 이 지역은 겨울철 온도가 매우 낮은 것으로 알려져 확장공사 당시 종배수관 및 횡배수관에 결빙방지를 위한 열선 배치 및 단열처리를 수행한 바 있다(석진호 외, 2006). 이 터널에 설치한 온도센서 및 계측 시스템은 그림 5와 같으며, 계측기 설치 모습은 그림 6과 같다. 라이닝 배면 지하수의 온도변화를 정확하게 측정하기 위해서는 설치된 라이닝 두께인 30 cm 내부에 계측기를 설치해야 하지만 라이닝 배면에 설치된 방수 시트의 손상을 방지하기 위해 라이닝 내부 20 cm 위치에 계측기를 설치하고 온도변화를 측정하였다. 계측은 데이터로거를 통하여 자동 계측 저장되며 사무실에서 실시간으로 계측자료의 열람 및 저장이 가능하도록 무선통신 시스템을 구축하였다. 2006년 12월에 계측기를 설치하여 2008년까지 온도계측을 실시하였으며 측정 빈도는 매시간 1회 측정을 실시하였다.

측정한 온도계측 결과 중 최저온도를 기록한 2008년도 1월중의 화천방향 터널 개구부에서의 온도분포는 그림 7과 같다. 영상을 기록한 기간은 한달 중 1시간에 불과하며 계속적으로 영하의 기온을 나타내는 가운데 7~10일 간격으로 온도가 상승과 하강을 반복하는 패턴을 보였다. 최저온도를 기록한 1월 24일의 터널 입구에서부터 거리별 온도를 2시간 간격으로 나타내면 그림 8과 같다. 그림 8의 계측 결과로부터 터널 입구의 온도가 가장 낮고 터널 안쪽으로 갈수록 온도가 상승되며 터널 입구에서 100 m 지점까지의 온도상승폭이 크고 그 이후로는 상승폭이 작다는 것을 알 수

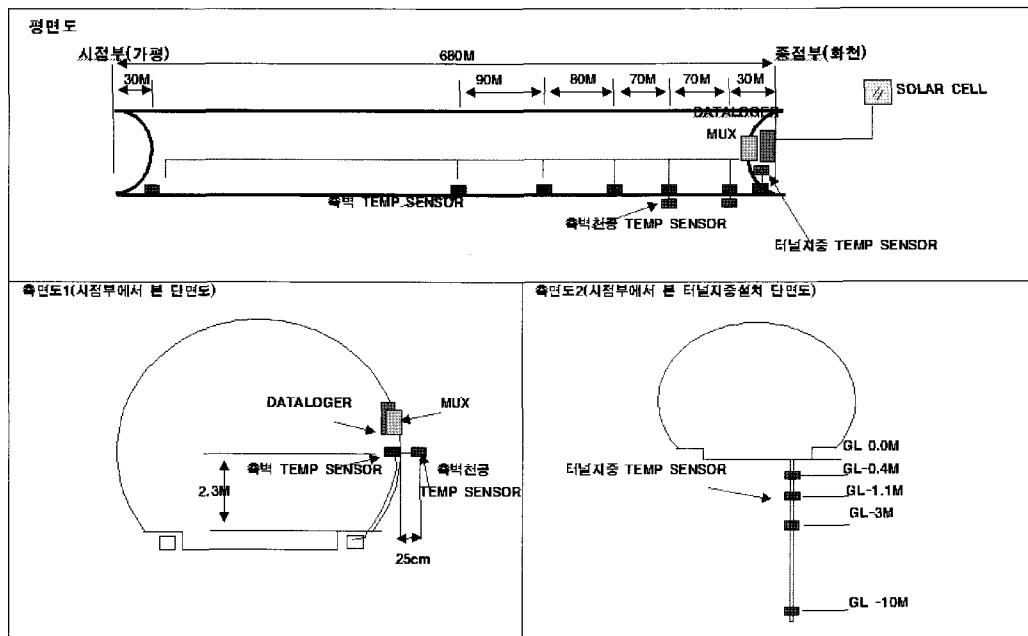


그림 5. 화악터널 온도계측 개요도



그림 6. 계측기 설치장면

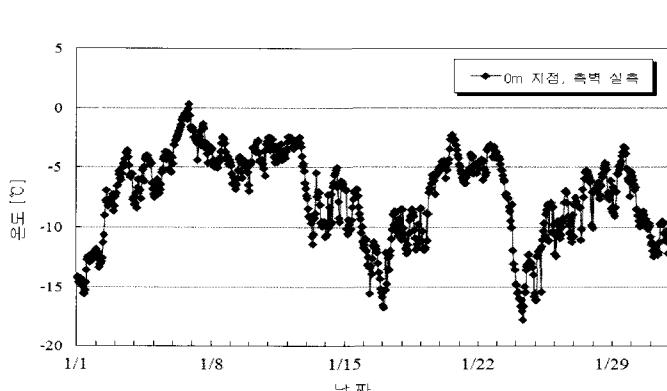


그림 7. 화악터널 입구부(화천방향)의 2008년 1월 온도분포

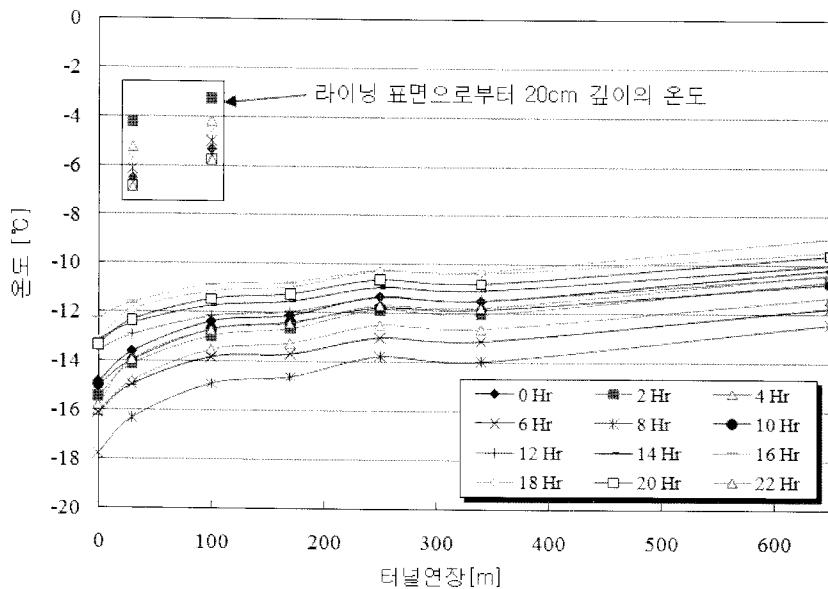


그림 8. 화악터널 입구부(화천방향)에서 깊이별, 시간대별 온도 프로파일(2008. 1. 24)

있다. 또한 외기의 온도는 $-12^{\circ}\text{C} \sim -18^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 변동되었으며 이에 따라 터널 내부의 온도도 비례하여 변동되었다. 화천방향(북쪽) 입구의 온도와 가평방향(남쪽)의 입구 30 m 안쪽지점의 온도 차는 약 5°C 정도 가평방향 쪽이 높게 나타났으나 터널 전체에 걸쳐 0°C 이하의 기온이 지속되었다. 화천방향 터널입구에서 안쪽으로 30 m 그리고 100 m 지점에는 라이닝을 20 cm 깊이로 천공하여 온도센서를 설치하였다. 라이닝 내부에서 계측된 값은 30 m 지점에서 $-4.2^{\circ}\text{C} \sim -6.9^{\circ}\text{C}$ 의 범위를 나타내었고 100 m 지점에서는 $-3.3^{\circ}\text{C} \sim -5.8^{\circ}\text{C}$ 를 나타내어 라이닝 내부의 온도가 영하로 내려감을 알 수 있으며, 동결선이 라이닝 배면 방수시트 안쪽까지 깊게 침투될 것이 예상된다. 그림 9에 나타낸 터널 입구로부터 30 m 지점의 공기온도와 라이닝 내부 20 cm 지점의 온도 프로파일에서, 터널 입구의 최저온도를 나타낸 시각이 08시인 반면에 라이닝 내부온도의 최저점은 16시에 기록되는 것으로 보아 라이닝으로의 열전달 소요 시간이 8시간 정도 소요되는 것을 알 수 있다.

터널 입구 바닥면을 천공하여 GL-0.4 m, GL-3.0 m, GL-10.0 m에 설치한 온도계에서 측정된 지중온도분포는 그림 10과 같다. 기온변화에 따라 지중온도는 크게 변화하지 않으며, GL-0.4 m에서는 -5°C 정도를 나타내며 GL-1.0 m 지점까지 동결선이 내려오는 것으로 관측되었으며 GL-10.0 m 지점의 온도는 약 9.0°C 를 유지하는 것으로 나타났다.

그림 11은 2007년도 겨울에 측정된 화악터널 내부 30 m 지점과 100 m 지점의 기온과 각 지점의 라이닝 내부(20 cm 깊이)의 온도를 1시간 간격으로 측정한 결과를 나타낸 것이다. 터널내 온도가

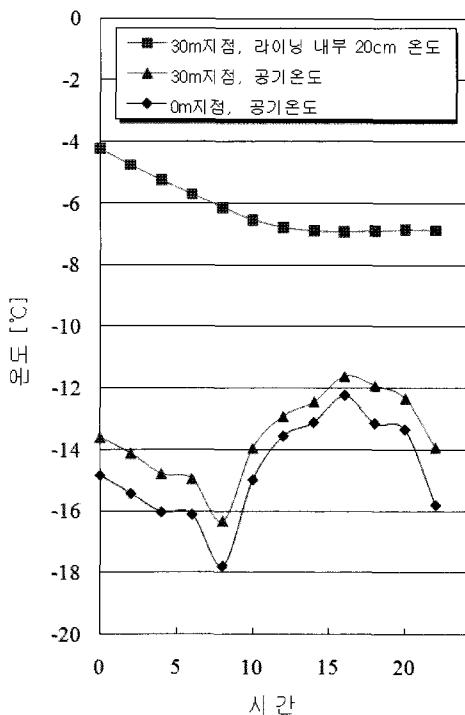


그림 9. 외기에 따른 라이닝 내부온도 프로파일
(2008. 1. 24)

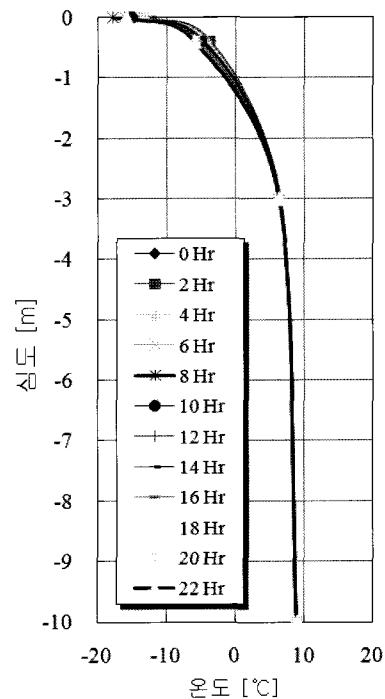


그림 10. 터널 바닥면 지중온도분포(2008. 1. 24)

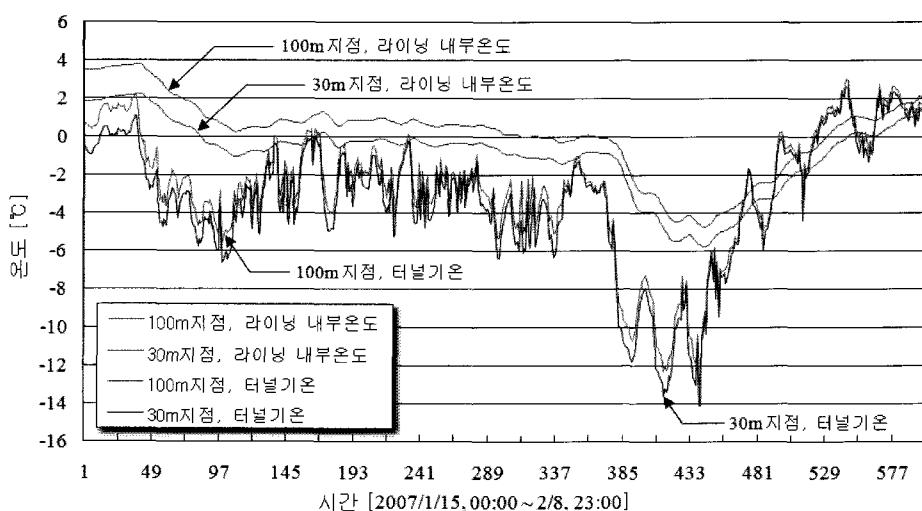


그림 11. 화약터널 내부 기온과 라이닝 내부 온도(2007년)

0°C에서 2일 동안 -5.7°C 까지 하강하여 3일째에 -6.4°C 에 도달한 후 서서히 상승하면 라이닝 내부의 온도는 2.2°C 에서 0°C 로 강하하여 3일째에 -0.6°C 가 되며 그 이후 약 8시간 후에 저점인 -1.1°C

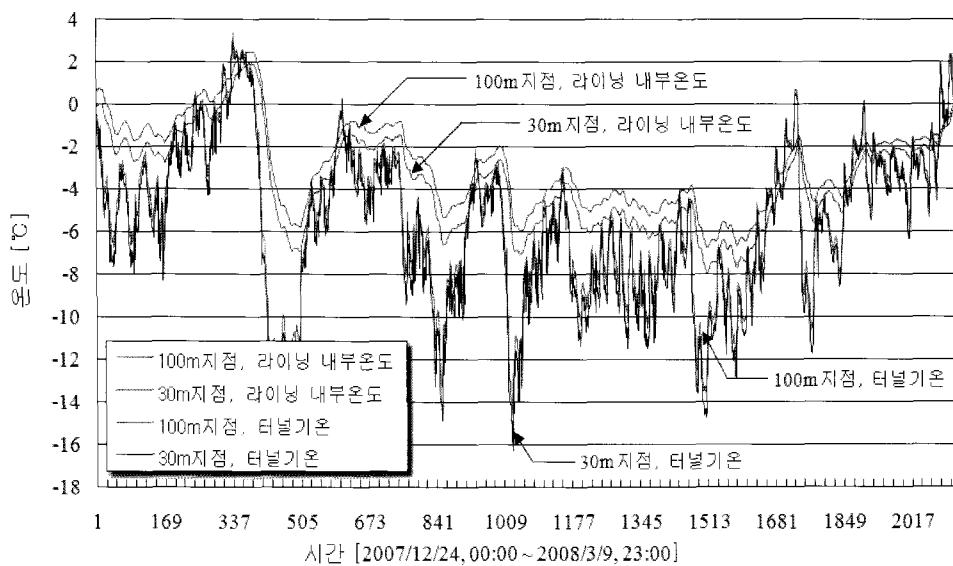


그림 12. 화악터널 내부 기온과 라이닝 내부 온도(2007~2008년)

에 도달하였다가 상승한다. 그림 12에는 2007년도 말부터 2008년도 3월 9일까지 그림 11의 위치와 같은 곳에서 측정한 온도계측결과를 나타내었다. 터널 입구로부터 30 m 지점의 계측결과에서 라이닝 내부 온도가 영하기온의 지속에 따라 $-2^{\circ}\text{C} \sim -8^{\circ}\text{C}$ 까지 온도가 변하고 있음을 알 수 있다.

4. 열류해석이론 및 수치해석 조건

앞서 언급한 바와 같이 라이닝 배면에 설치된 방수 시트의 손상을 방지하기 위해 라이닝 내부 20 cm 위치에 계측기를 설치하였다. 따라서 외기 온도 변화에 따라 라이닝 배면(라이닝 내부 30 cm 지점) 지하수의 온도 변화를 예측하기 위해 수치해석을 수행하였다. 본 연구의 열류해석에 사용한 Physibel 프로그램(Physibel, 2002)은 건물 전체 및 일부분의 열류 흐름, 열전도 상태, 습도 상태 등의 건축 환경 관련 요소를 도표와 그래픽 영상으로 가시화하여 건물의 열환경을 평가하는 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램이다. Physibel 프로그램의 옵션 중 재료의 축열 능력과 시간경과에 따른 온도 변화를 고려하여 축열체 내에서의 열전달 및 에너지 저장 상태까지 계산하는 VOLTRA 모듈을 이용하여 3차원 비정상 열류해석을 실시하였다.

수치해석 프로그램에서 사용되는 열전달 이론식을 간략히 소개하면 다음과 같다.

4.1 열전달 방정식

4.1.1 비환기 공간층의 열전달

외부에 면해있지 않으며, 모든 면이 여타 재료에 의하여 둘러싸여 있거나 2 mm 미만의 작은 틈만이 연결되어 있는 공간층의 경우에는 비환기 공간층으로 정의되며, 이 경우 다음의 수식이 적용된다. 이때 그림 13과 같이 정방형의 공기층이 아닌 T형 또는 L형의 공간층인 경우 공간층의 형태를 같은 면적과 형태비율을 가진 정방형으로 전환하여 공간층을 통한 열전달이 계산된다. 터널 내에서 이러한 공간은 공동구와 그레이팅 커버 하부 배수관이 이에 해당한다(Physibel, 2002).

$$\lambda_{eq} = (h_c + h_r) \cdot d \quad (1)$$

여기서, λ_{eq} = equivalent thermal conductivity [W/(m.K)]

h_c = convective heat transfer coefficient [W/(m².K)]

h_r = radiative heat transfer coefficient [W/(m².K)]

d = characteristic depth of cavity [m]

식 (1)에서 대류에 의한 열전달 특성인 대류열전달계수(h_c)는 식 (2)에 의하여 계산된다.

$$h_c = \max \left\{ \frac{C_1}{d}, \frac{C_2 \cdot (\Delta\theta_s \cdot d^3)^{c_3}}{d} \right\} \quad (2)$$

여기서, h_c = convective heat transfer coefficient [W/(m².K)]

d = characteristic depth of cavity [m]

$\Delta\theta_s$ = temperature difference between the surface temperature in the air cavity [°C]

C_1, C_2, C_3 = convective parameters defined by the user

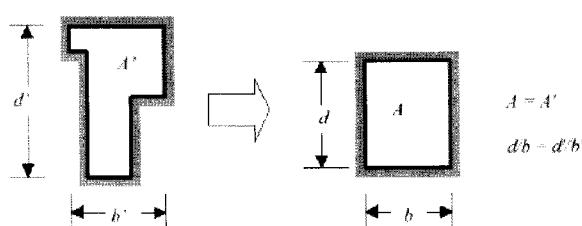


그림 13. 공간층의 형태 전환

또한 복사에 의한 열전달 특성인 복사열전달계수(h_r)는 식 (3)에 의하여 계산된다.

$$h_r = \frac{1}{\frac{1}{\xi_1} + \frac{1}{\xi_2} - 1} \cdot 2 \cdot \sigma \cdot (\theta_m + 273.16)^3 \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{b}\right)^2} - \frac{d}{b} \right) \quad (3)$$

여기서, ξ_1 , ξ_2 = emissivities at both sides of the cavity(in the direction of the heat flow)

σ = Stefan-Boltzmann constant = 5.67×10^{-8} W/(m²K⁴)

θ_m = mean temperature in the cavity [°C]

d = characteristic depth of cavity [m]

b = characteristic width of cavity [m]

이때 ξ_1 , ξ_2 를 0.90으로 가정(대부분의 재료가 0.9 내외의 값을 가짐)하면 식 (3)은 식 (4)와 같아 정리할 수 있다.

$$h_r = 9.2782 \cdot 10^{-8} \cdot (\theta_m + 273.16)^3 \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{b}\right)^2} - \frac{d}{b} \right) \quad (4)$$

4.1.2 환기 공간총 열전달

공간의 폭 또는 깊이가 10 mm를 초과하지 않게 외부에 면해있거나, 2 mm 이상의 틈으로 연결되어 있는 공간총의 경우에는 환기 공간총으로 정의되며, 이 경우 식 (5)가 적용된다.

$$\lambda_{eq} = 2 \cdot (h_c + h_r) \cdot d \quad (5)$$

이때 대류 및 복사열전달계수는 비환기 공간총에 적용된 식을 동일하게 적용하여 계산한다.

4.2 해석조건

4.2.1 외기온도 조건의 설정

본 분석에서는 혹한지역에 시공된 실제 터널의 동계 최한월 실측 데이터인 그림 12의 온도 데이터 중 기온이 최저가 되는 최한일을 기준으로 8일간(2008년 1월 22일~29일)의 데이터를 사용하였다. 그림 14에 터널 내부 30 m, 100 m, 170 m, 250 m 지점의 공기온도와 30 m 지점과 100 m 지점의 라이닝 내부 20 cm 깊이의 온도를 나타내었다. 250 m 지점의 온도는 30 m 지점의 온도보다

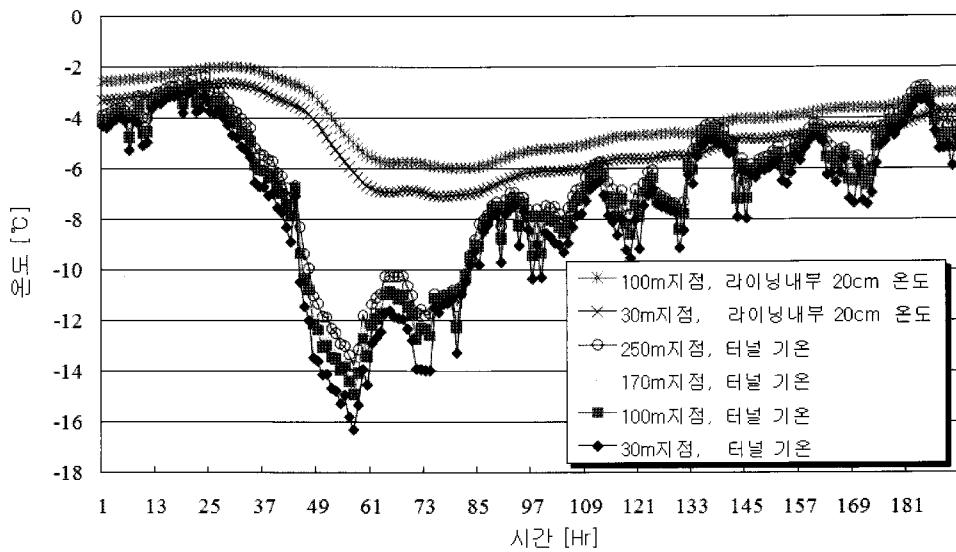


그림 14. 터널 각지점의 온도분포

약 3°C 높은 것으로 나타났다. 터널 내의 온도는 외기에 직접적으로 반응하며 안으로 깊어질수록 온도가 상승하므로 터널 입구부에서 30 m 안쪽에서 측정한 8일간의 온도 데이터를 기본데이터(온도패턴-1)로 하여 +3°C(온도패턴-2)와 +6°C(온도패턴-3)를 더하여 터널의 내부 더 깊은 상황에 대해서도 해석을 실시하였다. 이러한 온도 프로파일은 터널 깊이에 따른 적용뿐 아니라 터널이 위치한 지역 및 지반고에 따른 온도분포에 대한 적용 또한 가능할 것이다.

4.2.2 지중온도 조건의 설정

본 분석에 적용된 지중온도 분포는 측정된 자료가 없어 본 연구에서는 지중온도 산출에 대한 기존 연구(정수일, 2003) 결과에서 도출된 지중온도 산출식을 이용하여 혹한지역의 지중온도를 도출하였다.

지중온도 예측공식은 여러 방법이 있으나 지하를 반 무한 고체로 보고 주기함수를 이용하여 풀이하는 것이 정확하고 해석도 간단하다. 지중온도 예측을 위해서는 비정상상태의 온도방정식을 식(6)과 같이 둔다(정수일, 2003).

$$-\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} - \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

복소수 함수로서 식 (6)의 해를 구하면 식 (7)과 같다.

$$T = T_{AV} + T_{AM} \cdot \text{EXP}\left(-x\sqrt{-\frac{\omega}{2\alpha}}\right) \cdot \cos\left(\omega t - x\sqrt{-\frac{\omega}{2\alpha}} + NC\right) \quad (7)$$

여기서, T : 임의 깊이의 지중온도, [°C]

T_{AV} : 지중 불변 층의 온도, [°C]

T_{AM} : 지중 온도의 진폭, [°C]

x : 지중 임의의 깊이, [m]

ω : 각 속도($2\pi/365$), [Radian]

t : 일(365일중)

α : 열 확산계수, [m^2/h]

NC : 위상 보상 계수, [Radian]

T_{AV} 는 임의 지점의 지중 불변 온도로서 대략 지중 10 m정도에서 나타나고 있으며, 각 깊이에서 년 평균으로서 구할 수가 있다.

T_{AM} 은 지표면 최대온도와 최소온도 차이의 절반으로 구한 지중 온도진폭이다.

$$T_{AM} \cdot \text{EXP}\left(-x\sqrt{-\frac{\omega}{2\alpha}}\right) = \text{지중온도 진폭} \quad (8)$$

식 (8)의 T_{AM} 은 지표면온도의 최대, 최소 값으로 구할 수 있으며, x 는 임의의 깊이를 대입하고, ω 는 $2\pi/365$, α 는 미지수로 한 후, 우변의 값은 좌변의 x 깊이에서의 지중 최고온도와 최소온도차 이의 2분의 1을 대입하면 미지수 α 를 구할 수 있다. 그러나 식 (8)에서 $\sqrt{-\frac{\omega}{2\alpha}}$ 를 직접 구할 수 있고 식 (7)에서 EXP 나 cos항에 $\sqrt{-\frac{\omega}{2\alpha}}$ 를 직접 대입할 수 있으므로 이 값을 AL로 하여 사용하기로 한다. 따라서 식 (7)은 식 (9)와 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$T = T_{AV} + T_{AM} \cdot \text{EXP}(-x \cdot AL) \cdot \cos(\omega t - x \cdot AL + NC) \quad (9)$$

NC 는 cos항의 위상 보정 계수로 cos항의 최대 값이 나타나는 시점에서 지중 온도가 최대가 되도록 cos항의 Radian 값을 보정해 주는 수치로서 지역마다 다른 값을 가지고 있다.

표 3. 태백지역별 지중심도에 따른 지중온도 산출결과

심도 \ 월	10 m	9 m	8 m	7 m	6 m	5 m	4 m	3 m	2 m	1 m	지표
1월	9.6	9.6	9.6	9.8	10.2	10.6	11.0	10.7	9.1	5.0	-2.5
2월	9.6	9.6	9.7	10.0	10.2	10.4	10.3	9.4	6.9	2.4	-3.7
3월	9.7	9.7	9.8	10.0	10.1	10.0	9.4	7.9	5.2	1.6	-1.7
4월	9.7	9.7	9.8	9.9	9.8	9.5	8.6	6.9	4.8	2.9	3.4
5월	9.7	9.7	9.8	9.7	9.5	9.0	8.0	6.7	5.6	6.0	10.2
6월	9.7	9.7	9.7	9.5	9.2	8.6	7.9	7.2	7.5	10.1	16.9
7월	9.6	9.6	9.6	9.4	9.0	8.6	8.2	8.4	10.0	14.1	21.5
8월	9.6	9.6	9.5	9.2	9.0	8.8	8.9	9.9	12.4	16.9	23.0
9월	9.5	9.5	9.4	9.2	9.1	9.2	9.8	11.3	14.0	17.6	20.8
10월	9.5	9.5	9.4	9.3	9.4	9.7	10.7	12.3	14.4	16.2	15.6
11월	9.5	9.5	9.4	9.5	9.7	10.3	11.2	12.5	13.6	13.1	8.7
12월	9.5	9.5	9.5	9.7	10.0	10.6	11.3	11.9	11.6	8.9	2.2

표 4. 수치해석을 위한 구성물의 물성조건

구분	열전도율[W/mK]	밀도[kg/m ³]	비열[cal/kg°C]
암반	3.27	2,750	795.5
콘크리트	1.99	2,310	879.2
속크리트	0.21	800	1130.4
단열재(저성능)	0.05	33	837.4
단열재(고성능)	0.035	-	-
아스콘	0.74	2,230	921.1

표 3은 태백지역의 연간 지중온도 분포를 식 (9)의 예측식에 의하여 산출한 결과이다. 이중 본 분석에서는 태백지역의 최한월인 1월의 지중온도를 근거로 해석을 위한 지중온도를 설정하였다.

화악터널 지중온도 계측결과에서 GL-10 m 지점은 온도는 9°C로 일정하게 나타났으며 이는 계산 결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 수치해석에는 T_{AV} 값에 9°C를 적용하여 해석하였다.

4.2.3 수치해석을 위한 재료 물성 조건의 설정

열전달 해석에 사용되는 재료의 물성은 표 4와 같다.

5. 수치해석 결과

5.1 취약부위 도출을 위한 예비 해석

단열재 두께별 대안에 대한 수치해석에 앞서 터널 단면의 형상에 따른 취약부위 도출을 위하여

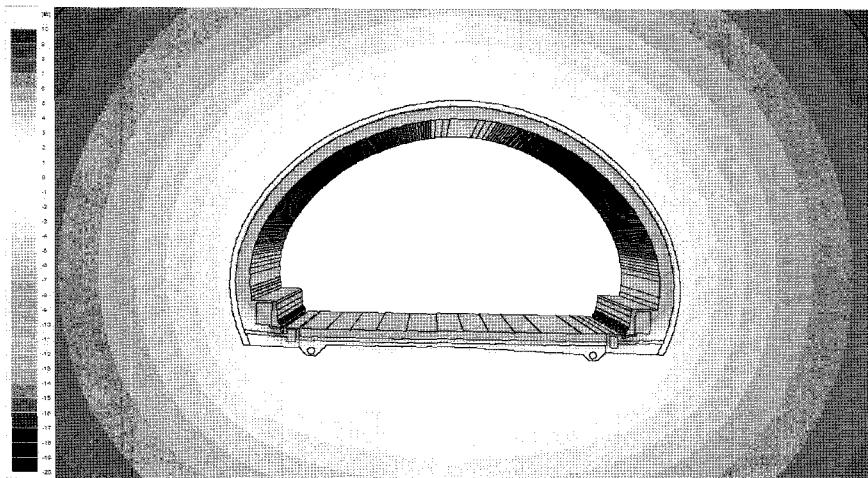


그림 15. 취약부 산정을 위한 예비해석결과

터널 상부(천정), 중간부(측벽) 그리고 하부(측벽하부)를 동시에 계측할 수 있도록 예비 해석을 실시하여 어느 부위가 취약한지 먼저 파악하였다. 그림 15는 표준단면의 예비해석 결과이다. 예비 해석 결과 터널 상부 및 중간부 즉 터널 라이닝 구조가 얇은 지점의 온도분포가 낮게 나타났다. 이에 따라 본 분석에서는 보다 단순한 모델링을 통하여 취약부위에 대한 단열재의 적정 두께를 산정하였다.

5.2 적정 단열두께 선정을 위한 해석

5.2.1 해석 조건

방수층의 온도가 영상을 유지할 수 있는 적정 단열 두께를 산정하고자 단열재 두께별 수치해석을

외기 온도	라이닝 콘크리트 30 cm	단열재 0~80 mm	방수 시트 1.5 mm	배수층 부직포 2 mm	숏크리트 160 mm	암반 10 m	지중 온도
-------	-------------------	----------------	-----------------	--------------------	----------------	------------	-------

그림 16. 열전달해석 모델 재료별 두께

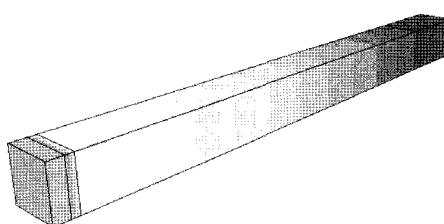


그림 17. 열전달해석 모델 예

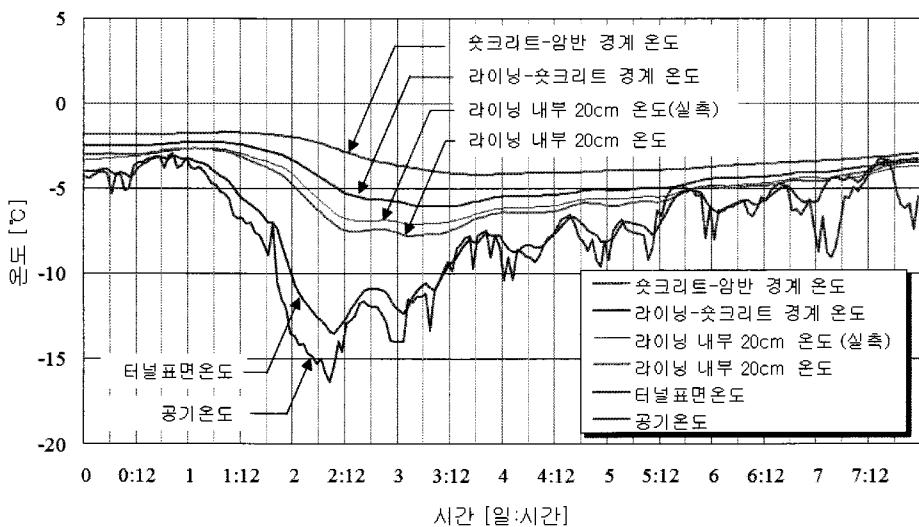


그림 18. 터널 30 m 지점에서의 역해석 결과와 실측온도 비교(단열재 미설치)

표 5. 역해석에 의한 재료 물성치

구분	열전도율[W/mk]	열전달율[W/m ² k]	밀도[kg/m ³]	비열[cal/kg°C]
암반	3.77	-	2,750	795.5
콘크리트	1.6	-	2,310	837.4
콘크리트 표면	-	25	-	-
숏크리트	1.977		800	1130.4
단열재(고성능)	0.035		33	837.4

수행하였다.

적정 단열두께 설정을 위한 해석 모델은 그림 16, 17과 같다. 단면의 크기는 가로(1 m) × 세로(1 m) × 길이(10.49 m~10.57 m)의 모델이며, 단열재는 고성능 단열재를 사용하였다. 해석에 사용한 온도분포는 4.2절에서 언급한 내용과 같다.

5.2.2 역해석에 의한 물성 재산정

이 해석모델에 대하여 터널 30 m 내측의 측벽에서 직접 계측한 공기의 온도를 입력값으로 하고 라이닝 내부 20 cm 깊이의 실제 계측값과 수치해석 결과값을 비교하여 유사한 결과를 산출할 수 있도록 역해석을 실시하였다. 역해석 결과는 그림 18과 같다. 해석 결과가 계측결과보다 약간 온도가 낮게 나오나 온도 오차는 약 0.7°C 정도로 설계에 적용시 문제없는 범위에 해당된다. 역해석에서 산출된 물성치는 표 5에 나타내었으며 이를 기준으로 단열재 해석에 적용하였다.

5.2.3 적정단열두께 해석

재산정한 물성치에 따라 3가지 온도패턴에 대하여 단열재 두께를 증가시켜가며 해석을 실시하여 적정 단열재 두께를 선정하였다.

(1) 온도패턴-1(터널 30 m 내측지점 기온, 최저 -16°C)

그림 19는 온도패턴-1의 온도분포를 기준으로 단열재두께를 20 mm로 설치하였을 경우의 해석결과를 도시한 것이다. 단열재 미설치 시에는 라이닝과 콘크리트 경계면에서 -6.04°C로 해석되었으나(그림 18), 단열재 설치후 단열재-콘크리트 경계의 온도가 최저 -0.91°C까지만 하강하는 것을 볼

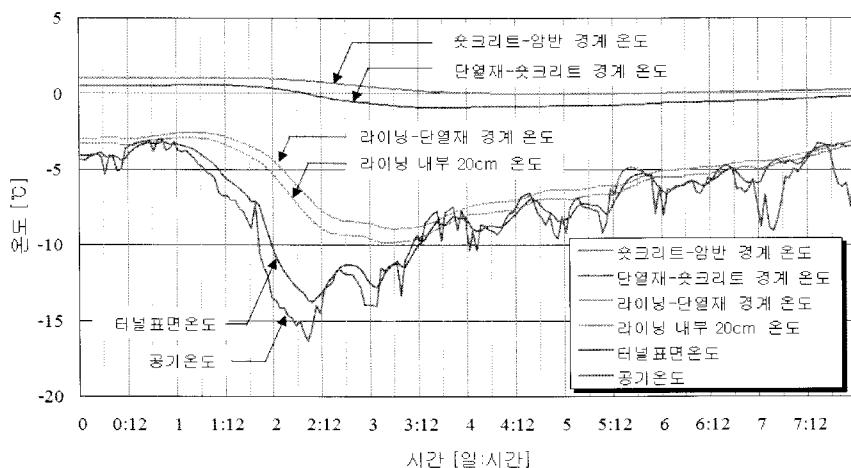


그림 19. 온도패턴-1에 대한 단열재 20 mm 설치시 각 경계면의 온도분포

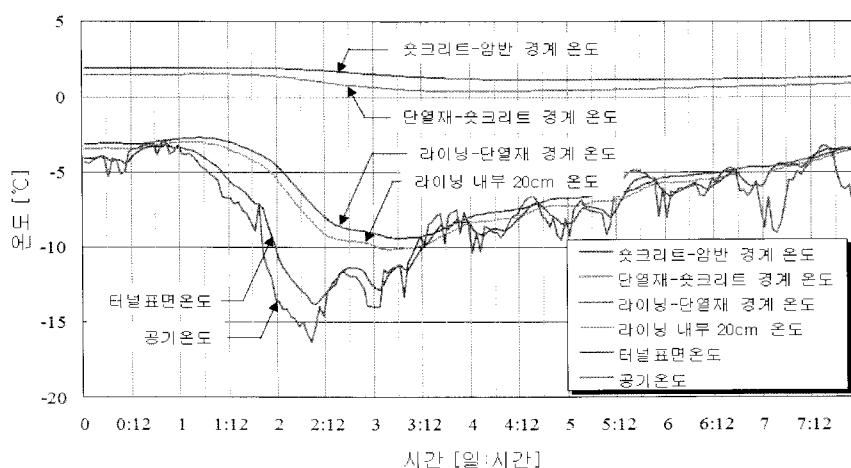


그림 20. 온도패턴-1에 대한 단열재 30 mm 설치시 각 경계면의 온도분포

수 있다. 그림 20에는 측벽 30 m 지점에서 측정한 온도를 기준으로 단열재두께를 30 mm로 설치하였을 경우의 해석결과를 도시하였다. 단열재와 솝크리트 사이가 0°C 이하로 강하되지 않는 것으로 나타났다. 따라서 -16°C 정도로 터널내부 기온이 하강할 경우 최소 30 mm의 단열재 설치가 필요함을 알 수 있다.

(2) 온도패턴-2(터널 30 m 내측지점 기온 + 3°C, 최저 -13°C)

그림 21은 온도패턴-2에 대하여 단열재를 설치하지 않은 조건에서의 각 경계면에서 해석된 결과를 도시한 것이다. 라이닝과 솝크리트 경계면에서 약 -3.45°C 까지 하강하여 동결피해를 입을 수

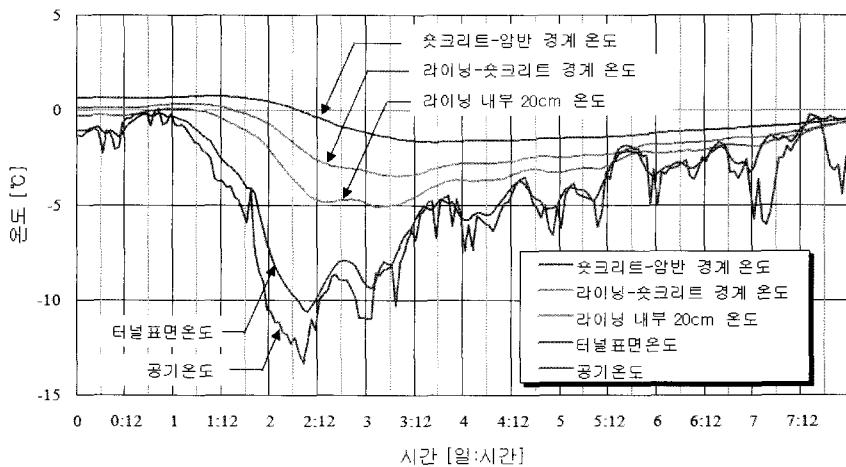


그림 21. 온도패턴-2에 대한 각 경계면의 온도분포(단열재 미설치)

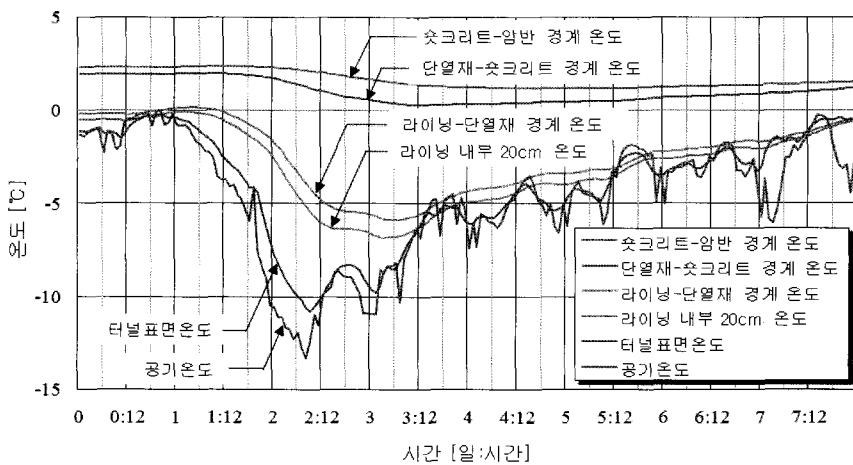


그림 22. 온도패턴-2에 대한 단열재 15 mm 설치시 각 경계면의 온도분포

있다. 그림 22에 온도패턴-2에 대하여 15 mm 두께의 단열재를 설치하였을 때 각 경계면에서의 온도분포를 나타내었다. 터널 내부의 온도가 약 -13°C 정도 강하할 경우 최소 15 mm 정도의 고성능 단열재를 설치한다면 단열재 배면의 온도는 0°C 이상이 유지됨을 알 수 있다.

(3) 온도패턴-3(터널 30 m 내측지점 기온 + 6°C, 최저 -10°C)

그림 23은 온도패턴-3에 대하여 단열재를 설치하지 않은 조건에서의 각 경계면에서 해석된 결과를 도시한 것이다. 라이닝과 콘크리트 경계면에서 약 -0.89°C까지 하강한다. 그림 24에 온도패턴-3

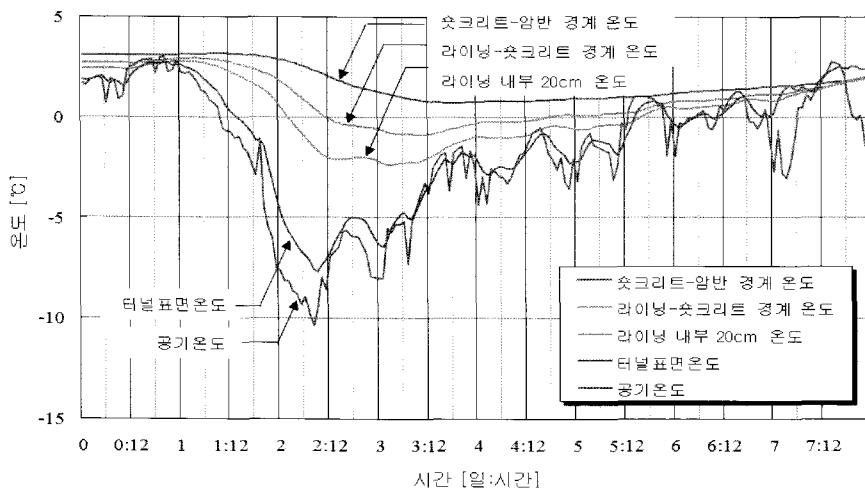


그림 23. 온도패턴-3에 대한 각 경계면의 온도분포

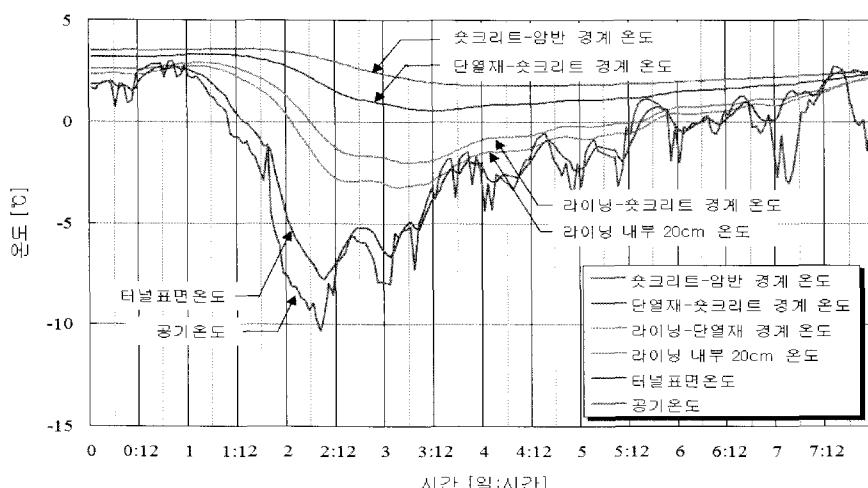


그림 24. 온도패턴-3에 대한 단열재 5 mm 설치시 각 경계면의 온도분포

에 대하여 5 mm 두께의 단열재를 설치하였을 때 각 경계면에서의 온도분포를 나타내었다. 터널 내부의 온도가 약 -10°C 정도 강하할 경우 최소 5 mm 정도의 고성능 단열재를 설치한다면 단열재 배면의 온도는 0°C 이상이 유지된다.

6. 터널 요소모델의 열유동 실험

6.1 시험체 제작

터널 요소모델에 대한 검증 및 단열재 설치 효과를 검증하기 위하여 폭 900 mm, 높이 600 mm, 길이 1800 mm의 EPS 블록을 길이방향으로 중앙선을 기준으로 반경 64 mm로 반월형 홈을 열선을 이용하여 만들고 직경 128 mm, 길이 6.68 m의 화강 편마암 코아를 EPS 블록 중앙 홈에 연속적으로 밀착하여 안치하였다. 시험 시 정상상태에 도달하였을 경우에 대한 해석에 의하여 EPS 블록을 통하여 외기가 영향을 미치지 않을 정도로 단열을 하는 것은 불가능한 것으로 나타났으나 단열 두께가 50 cm 이상이 되면 비정상상태에서는 단열재에 의한 효과에 대한 비교값을 얻을 수 있을 것으로 판단하여 EPS를 적용하였다. 최외측 한쪽에는 항온 조절이 가능한 히터를 부착하였으며 반대측에는 16 cm 두께의 속크리트와 2.0 mm 두께의 부직포, 1.5 mm 두께의 방수시트, 0~20 mm 단열재 그리고 30 cm 두께의 콘크리트를 설치하였다(그림 25).

암석 코아의 내부 중앙을 천공하여 30 cm 간격으로 온도센서를 설치하고, 암석-속크리트-콘크리트의 경계면 중앙에 온도센서를 설치하여 데이터로거에 연결한 후 시험체를 동일하게 제작한 EPS 블록으로 덮고 각 경계부는 실리콘으로 밀봉하였다. 이 시험체를 인공적으로 기후조절이 가능한 인공기후실에 설치한 후 화악터널에서 계측한 온도데이터를 입력하여 인공기후실의 온도가 화악터널과 유사하게 시간별로 변화하는 조건에 대하여, 단열재가 설치되지 않은 상태와 단열재를 설치한 상태를 비교하였다. 시험체 제작 모습은 그림 26, 27과 같다.

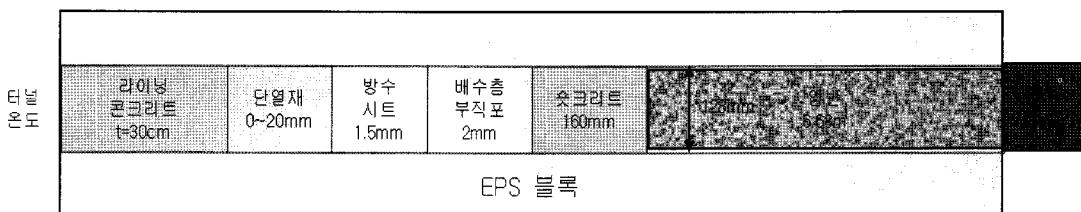


그림 25. 터널 요소모델의 열유동 실험



그림 26. 암석코아에 온도센서 설치



그림 27. 상부 EPS 블록 덮는 과정

6.2 시험 결과

최외측 암석코아에는 10°C 의 항온을 가한 상태에서 인공기후실 온도를 화악터널 계측결과와 유사하게 변화시키면서 단열재를 설치하지 않은 경우와 20 mm 단열재를 설치한 경우의 거리 및 시간별 온도변화를 측정하였으며, 측정 결과는 그림 28, 29과 같다. 온도분포는 앞서 해석에 적용한 온도분포-1을 적용하였다.

위의 두가지 조건에 대하여 암석 배부의 온도가 동일하게 되는 조건이 되는 시간을 선별하여 6시간 간격으로 도시하였다. 그림 28, 29의 결과에서 알 수 있듯이 시험 시작전 최외측에 항온을 가한지 오랜 시간이 지나도 1 m 이상 이격된 거리에서는 온도가 일정한 것으로 나타나 지중온도분포에 대한 모사가 정확하게 이루어지지 않은것을 알 수 있다. 이는 EPS 블록에서 만족할 만한 정도의 단열효과를 얻지 못하여 외기가 EPS 블록을 침투하여 수치해석과 같은 상황을 실험으로 모사하는 것은 상당히 문제가 있는 것으로 판단되었다.

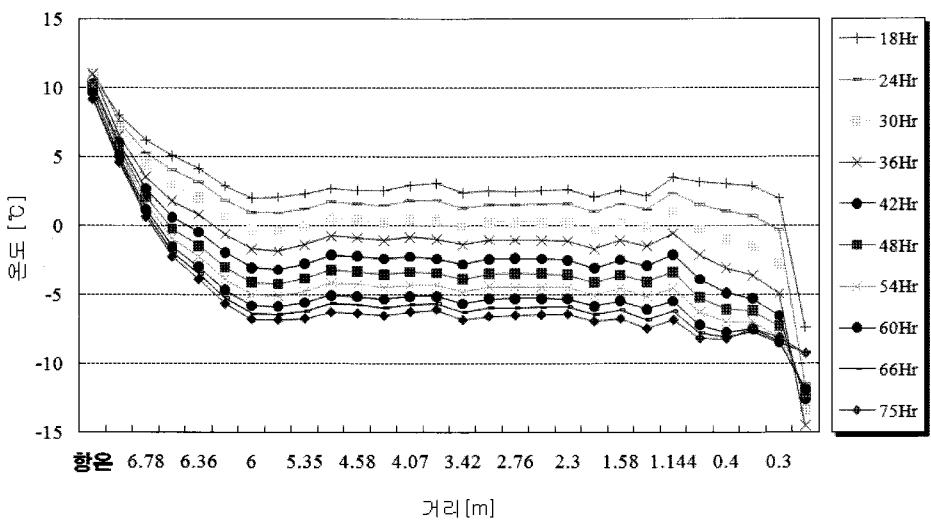


그림 28. 단열재 미설치 상태의 거리 및 시간에 따른 온도변화

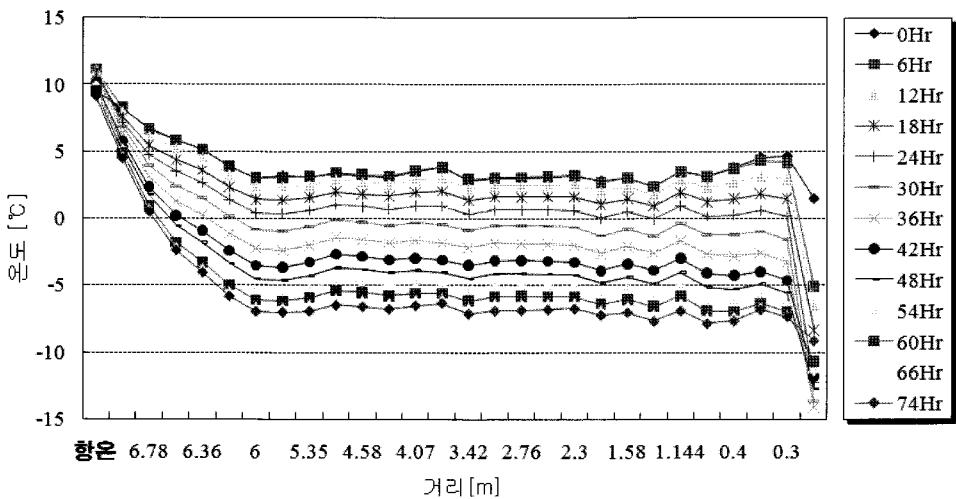


그림 29. 20 mm 두께 단열재 설치 상태의 거리 및 시간에 따른 온도변화

단열재 미설치의 경우와 설치한 경우에 대한 비교상태에서의 비교결과를 알아보기 위하여 외기기온, 콘크리트-숏크리트의 경계면 온도, 20 mm 두께의 단열재가 설치된 단열재-숏크리트 경계면의 온도를 그림 29에 함께 도시하였다. 숏크리트면의 온도가 서로 다른 것은 시험시기가 달라 외기 온도가 다른 상태에서 EPS 블록 내부 암석의 온도도 외기에 영향을 받았기 때문이다. 그림 30에서 비단열과 단열의 시험에서 두 온도(비단열, 단열 시 내부온도)가 일치된 이후부터 단열의 경우 상대적으로 외부온도의 영향을 덜 받는 것으로 나타났으며 약 1.3°C 정도 높은 것으로 나타났다.

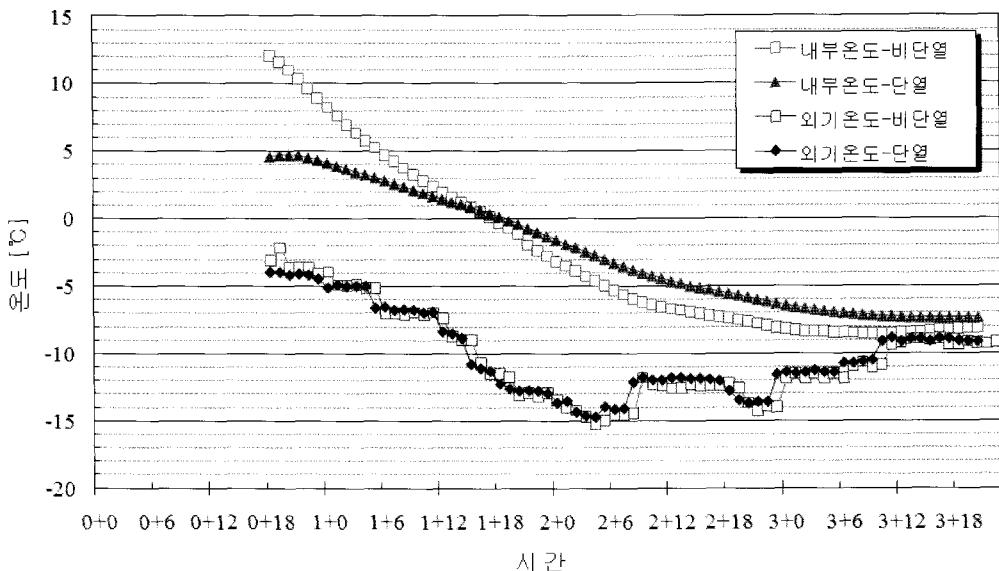


그림 30. 20 mm 두께 단열재 설치 전후의 콘크리트 경계면에서의 온도비교

다. 즉 실험을 통해 비록 EPS 블록을 통해 침투하는 외기의 영향으로 수치해석 결과와 직접적인 비교는 불가능 하지만 단열재 설치의 효과는 검증할 수 있었다.

7. 단열 설계 기준 제안

현재 한국도로공사의 내부기준에 의하면 겨울철 수정동결지수가 $700^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ 이상인 지역에서 동결방지를 위한 터널단열을 적용하도록 하고 있다. 하지만 겨울철 수정동결지수가 낮은 지역에서도 일정시간동안 낮은 온도가 유지될 경우 라이닝 배면의 지하수가 동결될 수 있지만 일일평균기온을 기준으로 결정되는 동결지수 및 수정동결지수는 이러한 현상을 적절히 반영할 수 없는 단점이 있다.

그림 31은 앞서 온도패턴-3을 적용하여 단열재를 설치하지 않은 조건에서 터널 단면 각 경계면의 온도 분포를 수치해석한 결과이다. 그림 30에 의하면 외기의 온도가 약 50시간 동안 평균 -5.82°C 로 지속되면 라이닝 배면의 온도는 $0^{\circ}\text{C} \sim -0.9^{\circ}\text{C}$ 가 되어 이 상태로 약 24시간 동안 유지되면 라이닝 배면 지하수의 결빙이 발생할 가능성이 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 해석 결과를 바탕으로 라이닝 배면 동결지수는 7일 미만의 시간별 온도누적치인 동결지수 $^{\circ}\text{CHr}$ 로 표현하는 것이 합리적이라 는 것을 판단할 수 있다. 시간당 평균기온 단위로 표현된 동결지수($^{\circ}\text{CHr}$) 기준에 의하면 그림 31에 서 라이닝-콘크리트 경계(라이닝 내부 30 cm 지점) 지점의 온도가 0°C 에 도달하는 동결지수는 약

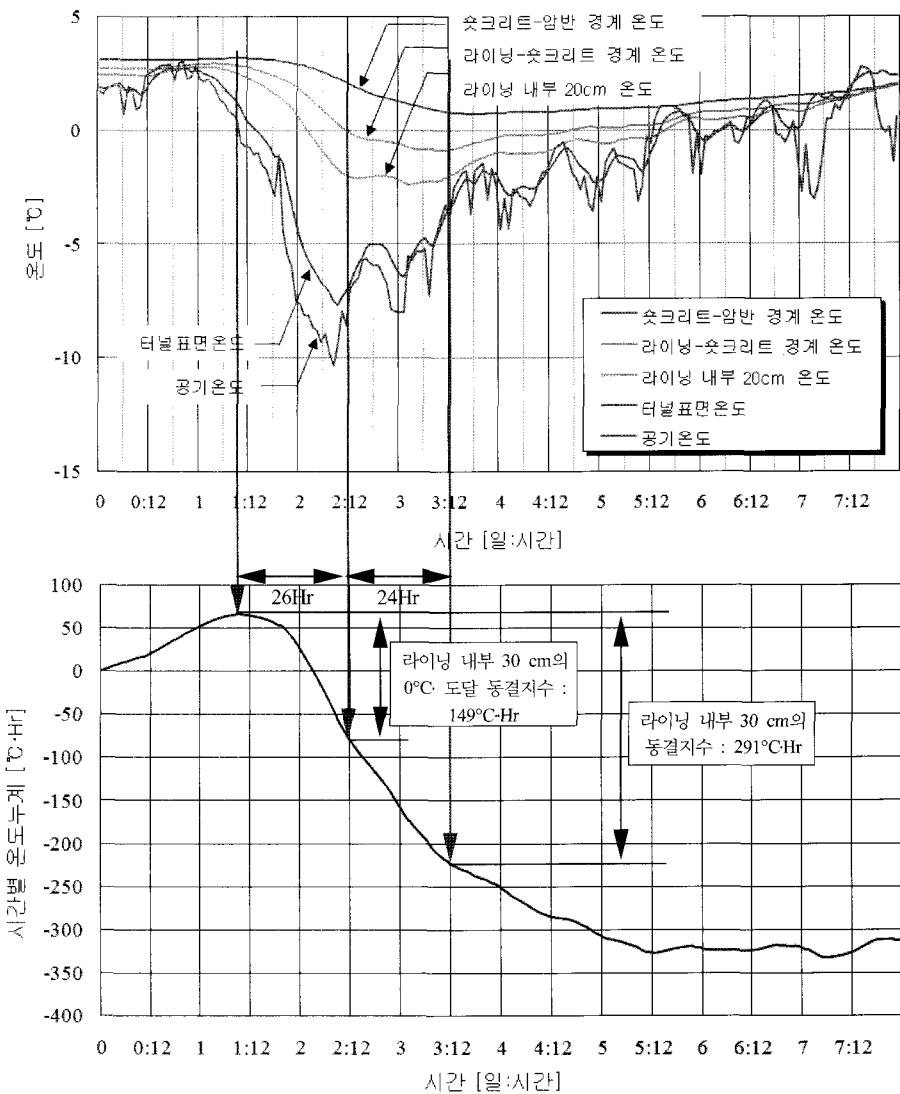


그림 31. 온도패턴-3(그림 23)에 대한 단열설계기준 제안

149°C·Hr이며, 따라서 라이닝 내부 30 cm 지점의 동결지수 기준은 약 291°C·Hr로 제안할 수 있다.

그림 32, 33은 그림 1의 전국 동결지수도에서 수정동결지수가 610°C·day인 제천기상대의 2007년~2008년 시간별 겨울철 기온과 그에 따른 시간별 온도누계를 나타낸 것이다.

그림 33에서 알 수 있듯이 2007~2008년 겨울철 °C·day로 표현된 수정동결지수는 약 303°C·day로 기준의 터널단열설계 기준인 700°C·day에 미치지 못하지만 그림 32에서와 같이 시간당 평균기온이 -5°C 이하로 상당시간 동안 지속됨에 따라 시간당 평균기온으로 표현한 수정동결지수(°C·Hr)

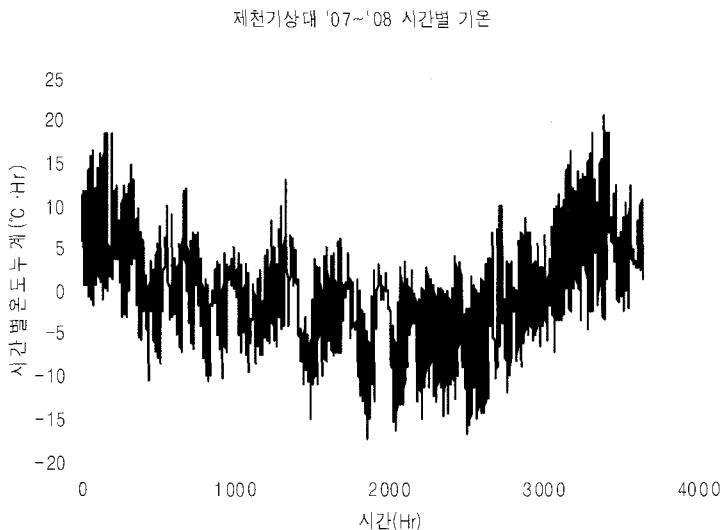


그림 32. 제천기상대 2007~2008년 시간별 기온

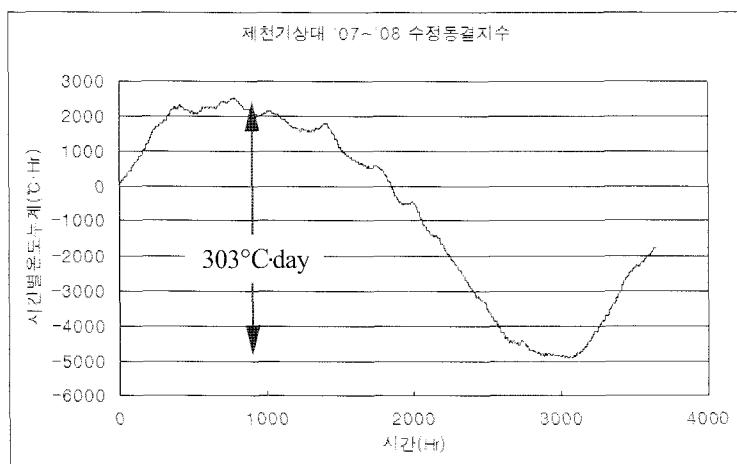


그림 33. 제천기상대 2007~2008년 시간별 온도누계

가 본 연구에서 제안한 기준인 291°CHr 보다 크게되어 라이닝 배면의 지하수의 결빙이 발생할 가능성이 있음을 알 수 있다. 이와같이 수정동결지수($^{\circ}\text{Cday}$)가 낮은 지역에서도 겨울철 일정시간 이상 낮은 기온이 유지된다면 본 연구에서 제시한 기준에 의하면(291°CHr) 터널 배면 지하수의 동결피해가 발생할 가능성이 있으므로 터널단열기준을 판단하기 위해 여러 지역 기온관측 자료에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

8. 결 론

동절기에 국내터널의 라이닝배면에서의 결빙에 의한 문제점이 발생한 사례를 살펴 보았으며, 화악터널에서의 2년간 온도 자동계측을 통하여 외기온도의 변화에 대한 터널 내부 깊이별 온도 변화 분포 및 라이닝 내부 온도 분포변화를 측정하였다. 계측결과의 분석 및 이를 통한 수치해석과 실내 시험을 통하여 국내 터널에 적용될 수 있는 단열재 두께를 제시하였으며, 새로운 단열설계 기준을 제안하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 국내의 강원 산간 지역을 포함한 중부 이상의 지역에 위치한 터널은 동절기에 지하수, 터널내 기온에 따라 결빙 가능성성이 있다.
2. 라이닝 내부 20 cm 지점의 온도계측결과 터널 입구로부터 30 m 지점의 온도는 $-2^{\circ}\text{C} \sim -8^{\circ}\text{C}$ 까지 저하되는 것으로 나타나 지하수가 있을 경우 동해에 의한 피해가 우려된다.
3. 비정상 상태의 열전달 수치해석 결과 터널 내부온도분포가 -15°C 이하로 내려가는 온도분포-1의 경우에 고성능 단열재의 두께가 30 mm이상일 경우 단열재 배면의 온도는 0°C 이상이 유지되는 것으로 나타났다. 터널 내부온도분포가 -12°C 이하로 내려가는 온도분포-2의 경우에 고성능 단열재의 두께가 15 mm이상일 경우 단열재 배면의 온도는 0°C 이상이 유지되는 것으로 나타났으며, 터널 내부온도분포가 -10°C 로 내려가는 온도분포-3의 경우에 고성능 단열재의 두께가 5 mm 이상일 경우 단열재 배면의 온도는 0°C 이상이 유지되는 것으로 나타났다.
4. 수정동결지수가 낮은 지역도 겨울철 일정시간 이상 낮은 온도가 유지되면 라이닝 배면의 온도가 영하로 떨어져 결빙이 발생할 가능성이 있으며, 수치해석 결과를 바탕으로 라이닝 배면의 동결지수기준을 약 291°CHr 로 새롭게 제안하였다.

감사의 글

이 연구는 현대건설(주)의 연구개발과제(06GEOS01)에 의해서 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(2007), 남북한지역 전국 동결지수선도.
2. 김대영(2005a), “국내터널 단열설계의 필요성-대관령 1터널 사례를 중심으로” 현대건설 창립기

념 기술세미나 논문집.

3. 김대영(2008), “터널배면 지하수 동결방지 대책에 대한 연구”, 현대건설 창립기념 기술세미나 논문집.
4. 김대영, 이영남(2005b), “라이닝 동상방지대책”, 대한토목학회 가을 학술발표회 논문집, pp. 3674-3677.
5. 석진호, 권승, 김선흥, 부성민(2006), “기존터널 확대굴착시 기 발생된 과대 여굴부에 대한 보강 방안 시공사례”, 대한토목학회 터널분과위원회 학술대회 논문집, pp. 185-199.
6. 정수일(2003), “측정자료가 없는 지역의 지중온도 예측방법에 관한 연구”, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 23, No. 2, pp. 1-7.
7. 한국도로공사 도로교통연구원 (2005), 터널 배수시설 결빙 방지 방안 검토.
8. Broch, E., Grov, E., Davik, K.I. (2002), “The inner lining system in norwegian traffic tunnels”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 17, No. 3, pp. 305-314.
9. Physibel (2002), RADCON manual, Belgium.