

# 실내동결시험을 통한 열류량 분석에 따른 동결-융해 조건 분석 및 한랭지역의 분류

안재욱<sup>1\*</sup> · 서정은<sup>2</sup> · 정민형<sup>2</sup> · 성주현<sup>3</sup>

<sup>1</sup>비회원, 한국시설안전공단 시설성능연구소 연구원

<sup>2</sup>비회원, 한국시설안전공단 시설성능연구소 선임연구원

<sup>3</sup>정회원, 한국시설안전공단 시설성능연구소 책임연구원

## Classification of cold regions and analysis of the freeze-thaw repetition cycle based on heat transfer quantity by freezing test

Jai-Wook An<sup>1\*</sup> · Jeong-Eun Seo<sup>2</sup> · Min-Hyung Jung<sup>2</sup> · Joo-Hyun Seong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Researcher, Research Institute for Infrastructure Performance, Korea Infrastructure Safety Corporation

<sup>2</sup>Senior Researcher, Research Institute for Infrastructure Performance, Korea Infrastructure Safety Corporation

<sup>3</sup>Principal Researcher, Research Institute for Infrastructure Performance, Korea Infrastructure Safety Corporation

\*Corresponding Author : Jai-Wook An, jwan@kistec.or.kr

### Abstract

Tunnels constructed in cold regions can cause serious defects such as cracks and leaks due to external temperature changes in the portals and vents. In order to prevent the freezing damage of the tunnel, appropriate measures should be applied to the section where the freeze damage is concerned. However, the specific criteria and contents for judging whether or not the anti-freeze measures are applied are not presented. In this study, the laboratory freezing tests on the temperature changes of the concrete specimens under freezing conditions were carried out. And the freeze-thaw repetition cycle ( $F$ ), which can judge the possibility of freezing damage, were presented based on the heat transfer quantity ( $W$ ) by experimental results of case studies. Also, we propose a classification of cold regions considering the climatic characteristics of Korea for using it to efficient design and maintenance.

**Keywords:** Cold regions, Heat transfer quantity, Freeze and thaw repetition cycle, Maintenance

### 초 록

한랭지역에 건설된 터널은 내·외부의 온도변화에 의해 갱구부 또는 환기구와 같이 특정한 구간에서 외부 온도변화의 영향으로 균열, 누수 등을 비롯한 심각한 결함이 발생할

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association  
20(6)957-972(2018)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.6.957>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received August 14, 2018

Revised September 19, 2018

Accepted September 28, 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

[www.kci.go.kr](http://www.kci.go.kr)

수 있다. 이러한 동결-융해로 인한 터널의 결함을 방지하기 위해서는 동결 피해가 우려되는 구간에 대해서 적절한 동결 피해 방지 대책을 적용하여야 하지만 동결-융해 조건을 판단하는 구체적인 기준은 제시되어 있지 않다. 본 연구에서는 국내 터널의 정밀안전진단 결과를 통해 강원지역의 동결피해 현황을 분석하였으며 향후 한랭지역 터널의 동결피해 저감을 위한 설계 및 유지관리에 활용할 수 있도록 동결-융해 반복일수(F) 조건에 따른 국내 동결피해 가능지역을 분류하고자 한다. 따라서 한랭지역 터널의 동결피해 사례분석과 국내·외 동해환경 평가기준을 바탕으로 콘크리트 시멘트의 온도 변화에 대한 실내실험을 실시하였으며 실험적 검토결과를 기반으로 시간 및 온도변화에 따른 열류량( $W$ ) 분석을 실시하였다. 최종적으로 열류량( $W$ ) 분석결과와 국내의 기후특성을 고려하여 동결-융해 반복일(F)에 대한 조건을 제안하였으며, 동결기 동결피해에 대비하여 효율적인 설계 및 유지관리에 활용할 수 있도록 국내 한랭지역을 분류하였다.

**주요어:** 한랭지역, 열류량, 동결-융해 반복일, 유지관리

## 1. 서론

강원지역은 남북으로 길게 뻗은 태백산맥과 산업과 도시의 발달로 인하여 다수의 산악터널이 건설되어 있다. 특히 지형적 특성상 동절기 기온은 평지보다 낮고 연중 강수가 있는 냉대습윤기후로 인해 동결-융해 반복에 의한 터널 구조물의 열화가 발생하여 보수·보강에 사용되는 유지관리 비용이 필연적으로 증대될 수밖에 없는 상황이다. 강원지역과 같은 한랭지에 건설된 터널의 경우 주변지반 지하수의 동결에 따라 터널 배수 장애의 원인이 되며 라이닝을 내공측으로 압출시키는 원인으로 작용하기도 한다(Kim et al., 2011).

동절기가 길고 기온이 낮은 노르웨이에서는 터널의 방수 및 라이닝 동해방지를 위한 연구가 오래전부터 수행되어 왔다. 터널 라이닝 동해방지를 위해 PE 폼(polyethylene foam)의 사용이 시방에 규정되어 있으며 동결지수 625°C 까지의 단열에 PE 폼 45 mm 두께가 가장 적절한 것으로 보고되고 있다(Broch et al., 2002).

노르웨이 등 해외에서는 한랭지역에 건설되는 터널의 동해방지를 위한 기준을 가지고 설계 및 유지관리에 적용하고 있으나 국내에서는 아직 한랭지역의 동결피해 방지를 위한 유지관리 개념이 도입되지 않고 있다.

국내의 전국 90개소에 설치된 동결심도 측정장치를 통해 실측한 결과, 강원지역의 동결심도는 90~150 cm 범위로 나타났으며, 경기북부 및 제천, 영월, 청송 등은 70~90 cm 정도, 전라남도과 경남지역은 40 cm 이하로 나타났다(Hong et al., 2015). 강원지역의 경우 동절기 일 평균기온이 영하로 내려가므로 동해에 의한 손상 가능성은 전반적으로 높다고 볼 수 있다.

강원지역의 터널의 경우 외부의 온도변화로 인하여 반복적인 동결융해, 결로현상 등 외부 온도의 영향을 받지 않는 구간보다 콘크리트 라이닝의 품질이 좋지 못하게 된다(Park et al., 2017). 강원권 터널을 대상으로 입·출구 부의 결함도를 조사한 결과 동결융해 등 환경적으로 불리한 조건에 의해 타 구간에 비해 라이닝의 시공품질이 상대적으로 떨어지며, 악순환적으로 누수가 빈번히 발생함과 동시에 내·외부 온도변화에 의한 결함이 가속화되는 특징을 가지고 있다. 동결-융해에 의한 콘크리트 손상은 일 평균기온이 낮다고 하여 발생하는 것이 아니라 동결-융해의 반복과정을 통한 콘크리트 조직이완 현상에 의해 손상이 현저해 지는 경향을 보인다(Cheong, 2013).

그러나 터널의 환경조건에 따른 단열 공법과 발열 공법의 적용기준 등 동결-융해 조건에 따른 구체적 판단기준 역시 전무하다.

따라서 한랭지역의 동결피해 가능성을 판단하여 적절한 유지관리를 수행할 수 있도록 국내 기후특성에 맞는 동결-융해 조건의 정립이 필요하며, 동해에 따른 손상위험을 판단하고 동결피해 위험지역을 분류하여 합리적인 설계 및 유지관리를 수행할 수 있도록 동결-융해 반복일(F)에 따른 한랭지역의 분류가 필요하다.

본 논문에서는 동결조건에 노출되어 있는 콘크리트 라이닝이 외기의 온도에 따라 동결되는 시간과 온도조건을 분석하여 외기온도에 따른 동결-융해 반복일(F) 조건을 제시하기 위해 실험적 검토를 실시하였다. 실내실험을 위해 실제의 터널 라이닝과 유사하도록 콘크리트 시험체를 제작하여 실내동결실험을 수행하였으며, 이를 통해 시간변화에 따른 온도변화를 측정하여 열류량( $W$ ) 분석을 수행하였다. 실험결과로서 동결-융해 반복일(F)에 대한 동결 및 융해 시의 온도조건을 제안하였으며, 이에 따른 지역별 동결-융해 반복일을 산정하고 그 결과를 활용하여 국내 한랭지역을 분류하였다.

## 2. 터널 동결-융해 평가기준 및 동결피해 현황

### 2.1 국내·외 동결-융해 평가기준 조사

콘크리트구조기준(MOLIT, 2012)에서는 국내 구조용 콘크리트 부재에 대해 예측되는 노출 정도를 고려하여 등급을 4가지로 구분하여 각 등급에 따른 물-결합재비와 최소설계기준강도를 확보하도록 하고 있으며(Table 1), 콘크리트표준시방서(MOLIT, 2004) 내구성편에서는 상대동탄성계수평가법(KS F 2456 (A법))에 의해 동결융해 내구성 평가를 수행하도록 하고 있다(Table 2). 그러나 동결-융해 조건에 대한 구체적 판단기준은 제시되지 않고 있기 때문에 실제 현장에 적용하는데 어려움이 있다.

**Table 1.** Criteria for durability of concrete structures (Concrete Structural Criteria, 2012)

Category	Classification		Exposure conditions	Water cement ratio (%)	Minimum design strength (MPa)
F (freezing and thawing)	F0	Minor	Concrete not exposed to the repetition of freeze-thaw	-	21
	F1	Moderate	Concrete occasionally exposed to moisture and the repetition of freeze-thaw	45	30
	F2	Severe	Concrete constantly exposed to moisture and the repetition of freeze-thaw	45	30
	F3	Very severe	Concrete continuously in contact with water and exposed to de-icing chemicals and repetition of freeze-thaw	45	30

**Table 2.** Durability evaluation by relative dynamic modulus of elasticity (KS F 2456)

Weather condition	Freeze-thaw repeated frequently and the weather is severe		The temperature rarely drops below the freezing point and the weather is not severe	
	Thin case	Ordinary case	Thin case	Ordinary case
(1) In case of continuous or repeated saturated with water	85	70	85	60
(2) Normal exposure, not applicable to (1)	70	60	70	60

시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(MOLIT, 2018)에서는 터널의 유지관리를 위하여 열화환경평가의 수행을 통해 동해환경을 평가한다. 동해환경 평가기준으로는 동결융해 반복일수를 계산하여 활용하며, 동절기(11월 1일~3월 31일)를 대상으로 수분과 지속적으로 접촉하지 않는 부재(일반부재)와 수분과 지속적으로 접촉하는 부재로 구분하여 일 최저기온이  $-2.2^{\circ}\text{C}$ , 최고기온이  $0^{\circ}\text{C}$ 인 일수를 동결융해 반복일수로 지정하고 있다. 동결융해 반복일수를 활용한 동해환경 평가기준은 Table 3과 같다.

**Table 3.** Evaluation criteria for freeze/thaw

Exposure condition	Classification (FHWA)		
	a (N/A)	b (Grade 1)	c (Grade 2)
(Korea) Freeze/thaw repetition index <sup>a)</sup>	x < 3	$3 \leq x < 50$	$50 \leq x$
(FHWA) Freeze/thaw durability exposure (x = F/T cycles per year <sup>b)</sup> )			

a) Freeze/Thaw repetition cycles per year: the lowest temperature of a day =  $-2.2^{\circ}\text{C}$  & day highest temperature =  $0^{\circ}\text{C}$

b) F/T stands for "freeze/thaw". A freeze/thaw cycle is defined as an event where saturated concrete is subjected to an ambient temperature which drops below  $-2.2^{\circ}\text{C}$  ( $28^{\circ}\text{F}$ ) followed by a rise in temperature above freezing

미국 교통부 연방 도로청(FHWA)도 마찬가지로 구조물이 실제 노출된 지역의 동결융해 반복일수를 통하여 고성능 콘크리트의 동결융해 저항성 등급을 제시하고 있다. 연평균 동결융해 반복일수를 3회와 50회를 기준으로 동결융해 평가기준을 3개의 등급으로 구분하고 있으며 국내의 평가등급과 동일하다(Table 3).

그러나 Table 3의 미국 FHWA 평가기준에 적용된 동결조건은 콘크리트가 주변 온도에 노출되어  $-2.2^{\circ}\text{C}$  이하로 떨어진 경우로 국내의 동결조건인 일 최저기온이  $-2.2^{\circ}\text{C}$ 인 경우와 차이가 있다.

따라서 본 연구에서는 동결조건에 노출된 콘크리트 라이닝이 외기온도에 따라 동결되는 시간과 온도조건을 분석하여 외기온도에 따른 동결-융해 반복일(F) 조건을 제시하기 위해 실험적 검토를 실시하였다. 실내실험을 위해 터널 라이닝과 유사하도록 콘크리트 시험체를 제작하여 조사된 동결융해 평가기준과 국내 동결피해 사례를 바탕으로 실내동결실험을 수행하였으며, 실내동결실험을 통해 시간변화에 따른 온도변화를 측정하여 열류량(W) 분석을 수행하였다.

## 2.2 강원지역 도로터널의 결함분포 현황

2002년 대관령 1터널은 개통 직후 터널 입구에서부터 약 500 m 지점까지 온도가  $-6^{\circ}\text{C}$  정도까지 하강하여 터널 측벽 하부 중배수관의 동결로 인하여 배수에 문제가 발생한 바 있다. 대관령 1터널은 2001년 11월 개통된 이후에 대관령 지역의 일평균 기온이 약  $-7^{\circ}\text{C}$  이하로 2~3일간 지속되면서 배수관이 동결되는 현상이 관찰되었으며, 시공 이음부의 측벽바닥에서 천정부까지 올라가면서 고드름이 발생한 후 외기가  $0^{\circ}\text{C}$  이상이 되면 고드름이 녹아 내리는 현상이 반복적으로 발생하였다(Kim and Shim, 2013).

강원권 도로터널을 대상으로 입·출구부의 결함도를 조사한 결과 기후적 특성에 따라 동결-용해에 기인한 피해가 빈번히 발생하고 있는 것으로 조사되었다. 강원지역 도로터널의 정밀안전진단보고서의 평가내용을 살펴보면 균열, 누수 및 백태 등의 결함이 터널의 시점부와 종점부를 중심으로 많이 나타났으며 공용연수가 경과함에 따라 결함도 동일하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 아래의 Fig. 1은 강원지역 A터널의 '07년도와 '12년도의 정밀안전진단(KISTEC) 시 누수량을 비교한 결과로 '07년도에 비해 '12년도의 시점부와 종점부의 누수량이 많이 증가한 것을 확인할 수 있으며 균열의 경우에도 동일한 양상을 보였다. 이처럼 터널 시설물의 경우 외기의 영향으로 입출구부에 심각한 영향을 초래할 수 있다.

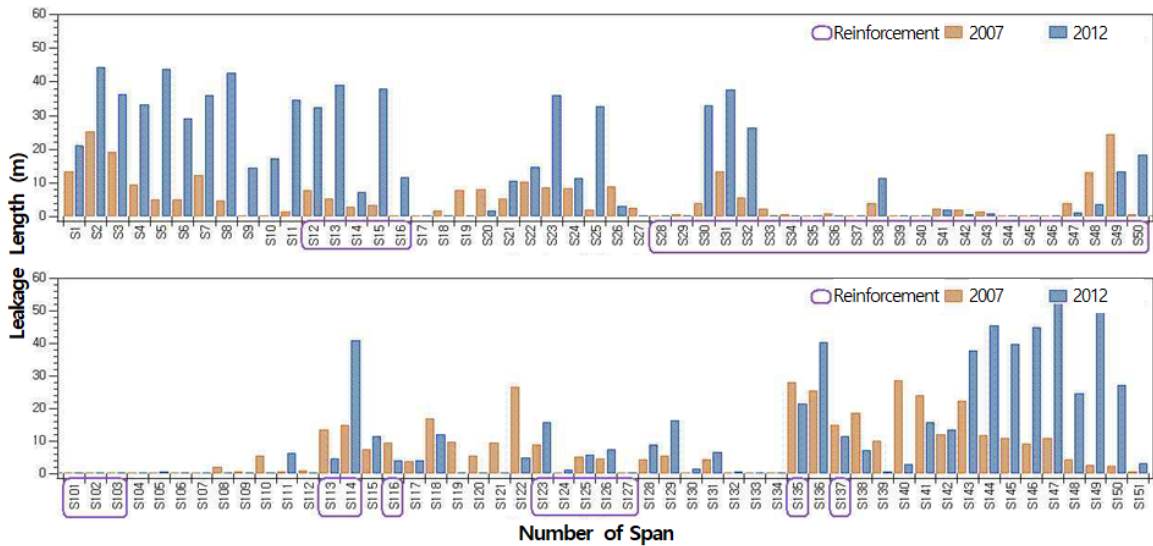


Fig. 1. Amount of leakages in 2012 compared to 2007 for sample tunnel

그러나 이러한 결함이 동결-용해에 기인한 것인지를 판단하는 것은 매우 어려운 일이기 때문에 환경적인 조건에 따라 발생할 수 있는 결함을 예측하고 적절한 보수보강 방안을 강구하는 것은 매우 중요한 일이다.

강원지역의 다른 터널을 대상으로 라이닝의 결함을 정량적인 지수로 확인한 결과 터널 입·출구부에서 결함지수가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, SPAN별 결함점수를 도식화 하면 아래의 Fig. 2와 같다.

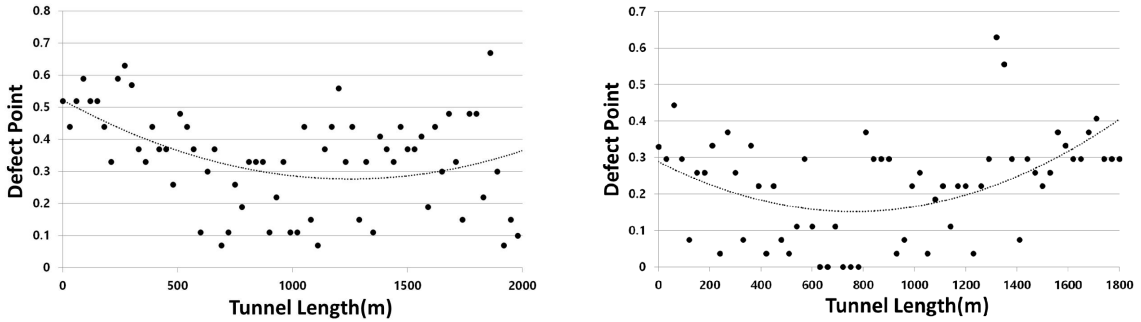


Fig. 2. Defect point by span of road tunnel in Gang-won area

### 3. 동결-융해 반복일(F) 조건 분석

#### 3.1 콘크리트 시험체 온도변화에 따른 열전달 이론

열은 전도, 대류 및 복사의 세 가지 방법으로 전달된다. 이중에서 전도는 입자가 상호작용의 결과로서 보다 활동적인 물질의 입자로부터 인근의 활동이 적은 입자로의 에너지 전달이다(Jin and Hwang, 2017a). 어떤 물체가 주위와 다른 온도에 놓여 있을 때 온도차에 의하여 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 열의 흐름 즉, 열에너지의 이동이 발생하며, 이 현상을 열전달(Heat Transfer)이라고 한다.

열전달해석은 온도차에 의한 열흐름과 이에 따른 온도분포, 변화를 해석하는 것이다(Jin and Hwang, 2017b). 시간에 따른 온도변화 여부에 따라 정상상태 열전달(steady-state heat transfer) 과 비정상 열전달(transient heat transfer)로 구분된다. 정상상태는 물체와 주위온도가 동일한 상태로 시간에 따른 온도변화가 없으며, 비정상 열전달 상태는 물체와 주위의 온도가 동일한 온도에 놓일 때까지 시간에 따라 온도분포가 계속 변화하는 것을 말한다(Midas IT, 2013).

고체에서는 격자 내의 분자 진동과 자유 전자에 의하여 에너지 수송에 따른 전도가 일어난다. 일정한 두께  $\Delta x$  를 통한 열전도율  $Q$ 는 벽의 온도차  $\Delta T$ 와 열전달 방향에 수직인 면적  $A$ 에 비례하고, 벽의 두께에 반비례 한다. 열류량은 아래의 식 (1)과 같으며 단위는 와트(W)로 1초 동안의 하는 일(J)인 일률의 단위(J/s)이다.

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

여기서, 비례상수  $K_t$ 는 재료의 열전도계수로서 재료의 열전도 능력을 나타내는 크기이다. 콘크리트의 열전도계수(Thermal conductivity)는  $1.4 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 를 적용하였다(SciTech, 2013).  $\Delta T$ 는 콘크리트 시험체의 상부 표면의 온도( $T_2$ )와 하부 표면의 온도( $T_1$ )와의 차이이며,  $\Delta x$ 는 시험체의 두께이다.

본 연구에서는 실내동결시험을 실시하여 열류량 공식에 의하여 콘크리트 상부표면의 온도를  $1^\circ\text{C}$  떨어뜨리는

데 필요한 일의 양인 열류량( $W$ )을 산출하였으며, 이때 이동한 에너지( $J$ )를 통해 외부 온도에 따른 콘크리트 라이닝의 시간에 따른 온도변화를 예측하였다.

### 3.2 동결시험 콘크리트 시험체 제작

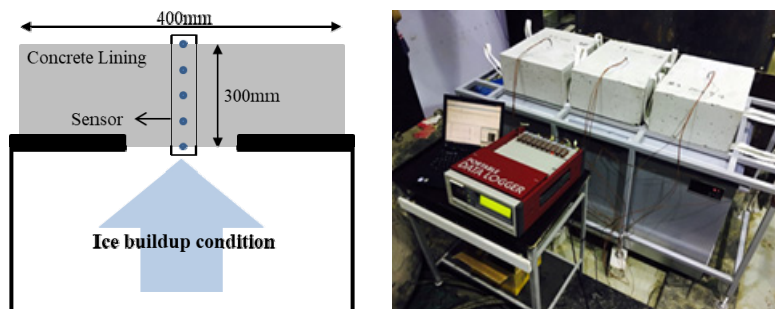
터널은 구조적 특징에 따라 라이닝 배면이 주변지반에 접하여 있으며 라이닝 내측은 외부에 노출되어 있다. 한랭 지역에서 영하의 기온이 지속됨에 따라 외기의 온도는 터널 라이닝을 통하여 배면지반까지 전달되어 암반의 결빙 또는 지하수를 동결시켜 동결피해를 유발하게 된다. 콘크리트 라이닝 시험체를 냉동챔버 내에서 시험할 경우 터널 라이닝 외부와 배면에서의 온도상태를 모사하기 어려우므로 냉동챔버의 일부분 절단하여 콘크리트 라이닝 시험체의 한쪽 표면만이 결빙될 수 있도록 하고 나머지 면은 라이닝 배면과 같이 상온을 유지할 수 있도록 하였다. 이를 위하여 시험체는 육면체에서 중앙부가 돌출되도록 제작하고 냉동챔버의 상부에 시험체의 돌출된 부분이 삽입되도록 하여 냉동챔버 내로 삽입된 돌출부분의 한쪽면만 냉동챔버의 온도영향을 받도록 하였다(Jin and Hwang, 2017c).

실내 실험을 위해 제작된 콘크리트 시험체의 28일 강도는 36.4 Mpa이며, 슬럼프는 190 mm이다. 콘크리트 배합비는 아래의 표와 같다(Table 4).

**Table 4.** Mix proportion of concrete

W/C (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					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

시험에 사용되는 시험체는 일반적으로 터널 라이닝에 적용되는 두께( $\Delta x$ ) 인 300 mm로 제작하였으며, 콘크리트 라이닝 내부의 온도변화 분석을 위하여 시험체 제작시 시험체 표면과 표면으로부터 각각 75 mm 간격으로 온도측정센서를 설치하여 총 5개의 센서(하부로부터 표면(0 mm), 75 mm, 150 mm, 225 mm, 300 mm (상부표면))가 위치하도록 하고 양생하여 제작하였다(Fig. 3). 제작된 시험체의 가로 및 세로길이는 각각 400 mm이며, 두께는 300 mm이다.



**Fig. 3.** Concrete lining test specimen

### 3.3 콘크리트 시험체 온도변화 분석

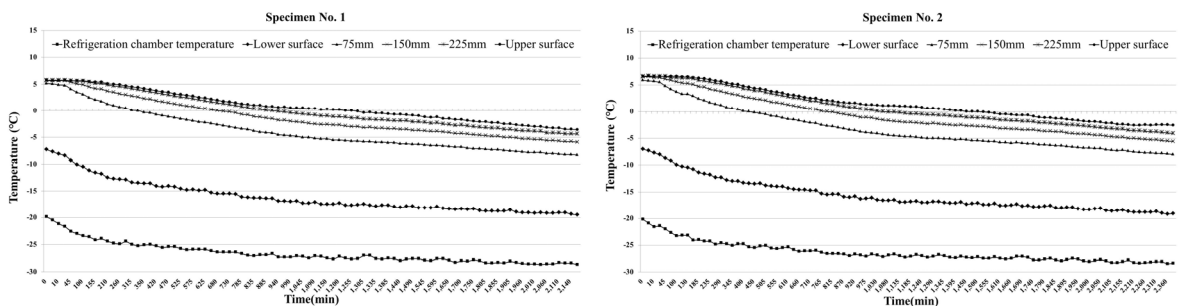
콘크리트 라이닝 시험체를 냉동챔버 상부에 설치하고 한쪽면을 동결조건하에 노출시켜 라이닝의 시간에 따른 온도변화를 확인하였다. 일반 콘크리트 라이닝을 기준으로 터널 외기가 영하로 내려가는 경우에 영상의 온도로 유지되고 있던 배면의 온도가 영하의 일정온도까지 내려가는데 걸리는 시간과 이때의 온도변화에 따른 열류량( $W$ )을 구하기 위한 시험으로서 콘크리트 내부, 외부에 설치된 온도센서를 이용하여 각 부분에서의 시간에 따른 온도변화를 측정하였다.

시험조건은 터널 외기의 온도가 약  $-20\sim-25^{\circ}\text{C}$ 로 영하의 온도조건일 경우를 대상으로 시험을 실시하였으며, 온도변화 측정을 위한 센서는 콘크리트 시험체 표면과 표면으로부터 75 mm 간격으로 총 5개(하부표면, 75 mm, 150 mm, 225 mm, 상부표면)가 설치되었다. 시험은 2차례 수행되었으며 동결실험을 실시하기 이전의 콘크리트 시험체 상부표면 온도는 각각  $5.5^{\circ}\text{C}$ ,  $6.6^{\circ}\text{C}$ 로 측정되었으며, 실제 터널 라이닝과 유사하게 제작된 콘크리트 시험체를 영하권( $-20\sim-25^{\circ}\text{C}$ )에 노출시킨 후 시간에 따른 온도변화를 측정하였다.

영상  $5.5^{\circ}\text{C}$ ,  $6.6^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 유지되고 있는 두께 300 mm의 콘크리트 시험체를 약  $-2.2^{\circ}\text{C}$  (FHWA의 동결기준) 이하의 온도로 변화시키는데 약 1,830분과 2,080분으로 측정되어 평균 약 1.3일정도가 소요되는 것을 확인하였다. 시험체의 구간별 내부온도를  $-2.2^{\circ}\text{C}$  이하로 떨어뜨리는데 걸리는 시간은 아래의 Table 5와 같으며, 각 구간 별 측정온도를  $-2.2^{\circ}\text{C}$  이하로 변화시키는 시간은 75 mm 구간 약 680분, 150 mm 구간 약 1,140분, 225 mm 구간 약 1,680분으로 측정되었다. 실내동결시험 결과에 따른 온도변화의 양상은 아래의 Fig. 4와 같다.

**Table 5.** Time (min) to reach freezing temperature of concrete lining specimen No. 1, 2

Sortation	Lower surface	75 mm	150 mm	225 mm	Upper surface
Specimen No. 1	-	625 min	1,045 min	1,545 min	1,830 min
Specimen No. 2	-	735 min	1,240 min	1,815 min	2,080 min



**Fig. 4.** Temperature change of concrete lining specimen No. 1, 2

실제 터널은 다양한 외기온도에 노출되기 때문에 실내실험을 통해 측정된 시간에 따른 온도변화를 기반으로 열류량( $W$ )을 분석을 통해 외기의 온도에 따른 터널 라이닝의 동결 조건을 검토하였다.



실내동결시험을 실시하여 열류량 공식에 의하여 콘크리트 상부표면의 온도를 1°C 떨어뜨리는데 필요한 열류량( $W$ )의 평균값을 산출한 결과와 이때 이동한 에너지( $J$ )을 산출한 한 결과는 아래의 Table 6과 같다.

**Table 6.** Heat transfer quantity analysis

Sortation	Upper surface ( $T_2$ ) (°C)	Lower surface ( $T_1$ ) (°C)	Time (sec)	$Q_{cond}$ ( $W$ ) ( $J/s$ )	Energy ( $J$ )
Specimen No. 1	-12.7°C	5°C	-	-	-
	-13.8°C	4°C	8,700	7.11	61,857
	-14.6°C	3°C	8,400	7.08	59,472
	-15.5°C	2°C	8,400	7.02	58,968
	-16.3°C	1°C	9,900	6.92	68,508
	-17.3°C	0°C	22,800	7.03	160,284
	-17.9°C	-1°C	16,500	6.89	113,685
	-18.4°C	-2°C	14,400	6.70	96,480
	-18.7°C	-2.2°C	3,300	6.55	21,615
Specimen No. 2	-12.9°C	5°C	-	-	-
	-13.8°C	4°C	7,500	7.19	53,925
	-14.5°C	3°C	7,800	7.05	54,990
	15.5°C	2°C	9,900	6.99	69,201
	-16.8°C	1°C	15,300	7.03	107,559
	-17.3°C	0°C	22,800	7.02	160,056
	-17.8°C	-1°C	16,800	6.80	114,240
	-18.5°C	-2°C	16,500	6.60	108,900
	-18.6°C	-2.2°C	2,100	6.51	13,671

실내 동결시험의 결과를 통하여 콘크리트 시험체의 온도를 영상 5°C에서 영하 -2.2°C까지 약 7.2°C 떨어뜨리는데 평균 6.90의 열류량( $W$ )이 사용되었으며, 이때에 이동한 에너지는 평균 661,706 줄( $J$ )이 이동한 것으로 분석되었다.

강원지역의 경우 동절기의 연평균 기온은 약 1.4°C로서 실제 터널의 동절기 배면온도가 약 1~2°C로 유지된다고 가정하였을 때 실험적 검토결과를 반영하여 외기 온도변화에 따른 터널 라이닝의 동결시간을 예측하였다. 동결피해 발생이 가능한 콘크리트 라이닝의 온도는 FHWA의 동결조건을 반영하여 약 -2.2°C로 설정하였으며, 실험결과로부터 측정된 시간과 에너지의 상관관계를 고려하여 외기온도의 영향에 따라 영상 2°C의 콘크리트 라이닝이 영하 -2.2°C까지 변화하는 시간을 예측하였다. 동절기 터널 외기의 온도를 -14°C, -7°C, -5°C, -3°C로 가정하였을 경우 예측된 결과는 아래의 Table 7과 같다.

**Table 7.** Results of tunnel lining temperature change by duration due to ambient air temperature

Test result (avg. joule)	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	Q <sub>cond</sub> (W)	Q <sub>cond</sub> (avg. W)	Cumulative days	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	Q <sub>cond</sub> (W)	Q <sub>cond</sub> (avg. W)	Cumulative days
57,891	-14°C	4°C	7.56	7.77	1.24	-7°C	4°C	4.62	4.83	2.45
57,231	-14°C	3°C	7.14	7.35	1.16	-7°C	3°C	4.20	4.41	2.31
64,085	-14°C	2°C	6.72	6.93	<b>1.07</b>	-7°C	2°C	3.78	3.99	<b>2.16</b>
88,034	-14°C	1°C	6.30	6.51	<b>0.96</b>	-7°C	1°C	3.36	3.57	<b>1.97</b>
160,170	-14°C	0°C	5.88	6.09	0.80	-7°C	0°C	2.94	3.15	1.69
113,963	-14°C	-1°C	5.46	5.67	0.50	-7°C	-1°C	2.52	2.73	1.10
102,690	-14°C	-2°C	5.04	5.25	0.23	-7°C	-2°C	2.10	2.31	0.51
17,643	-14°C	-2.2°C	4.97	5.00	0.04	-7°C	-2.2°C	2.02	2.06	0.10

Test result (avg. joule)	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	Q <sub>cond</sub> (W)	Q <sub>cond</sub> (avg. W)	Days	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	Q <sub>cond</sub> (W)	Q <sub>cond</sub> (avg. W)	Days
57,891	-5°C	4°C	3.78	3.99	3.44	-3°C	4°C	2.94	3.15	6.26
57,231	-5°C	3°C	3.36	3.57	3.27	-3°C	3°C	2.52	2.73	6.05
64,085	-5°C	2°C	2.94	3.15	<b>3.09</b>	-3°C	2°C	2.1	2.31	<b>5.80</b>
88,034	-5°C	1°C	2.52	2.73	<b>2.85</b>	-3°C	1°C	1.68	1.89	<b>5.48</b>
160,170	-5°C	0°C	2.10	2.31	2.48	-3°C	0°C	1.26	1.47	4.94
113,963	-5°C	-1°C	1.68	1.89	1.67	-3°C	-1°C	0.84	1.05	3.68
102,690	-5°C	-2°C	1.26	1.47	0.81	-3°C	-2°C	0.42	0.63	1.89
17,643	-5°C	-2.2°C	1.18	1.22	0.17	-3°C	-2.2°C	0.34	0.38	0.54

실험결과를 기반으로 외기의 온도에 따른 라이닝 온도변화를 예측한 결과, 터널 외기의 평균온도가 -14°C일 경우 영상 1~2°C의 온도로 유지되고 있는 콘크리트 라이닝을 -2.2°C까지 떨어뜨리는데 걸리는 시간은 약 1.02일이 소요되는 것으로 확인되었다. 외기의 온도가 -7°C인 경우에는 약 2.06일, 외기의 온도가 약 -5°C인 경우에는 약 2.97일, -3°C인 경우에는 5.64일이 소요되는 것으로 나타났다.

앞서 언급한 대관령 터널의 동결피해 사례에서 동절기에 일 평균 온도가 -7°C로 약 2~3일간 유지될 경우에 콘크리트 라이닝의 온도는 -2°C 이하로 떨어지게 되어 콘크리트 내부의 수분이 동결하여 콘크리트의 표면바리, 균열 등의 내구성을 저하시킬 수 있으며, 라이닝 배면원지반의 동결 및 융해가 발생으로 인하여 라이닝이 내공측으로 압축-해방되는 반복작용이 장기간에 걸쳐 발생한다면 구조적인 안전성에도 영향을 미칠수 있다.

콘크리트 라이닝의 동결조건은 외기의 온도와 지속시간에 따라 달라진다. Table 7에서 확인 할 수 있듯이 라이닝의 동결조건은 일 평균 기온이 -14°C일 경우에 지속시간은 약 1일, -7°C일 경우에 지속시간은 약 2일, -5°C일 경우의 지속시간은 약 3일이 소요되며, -3°C의 경우의 지속시간은 약 6일이 소요되는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 외기 온도에 따라 동결피해 발생이 가능한 지속시간은 다르게 나타난다. 따라서 국내의 지역별 기후특성에 적합한 온도와 지속시간을 활용하여 동결-융해 반복일(F)의 조건을 제시하는 것이 필요할 것이다.

## 4. 동결-융해 반복조건에 따른 한랭지역의 분류

### 4.1 기후특성에 따른 지역별 동결-융해 반복일(F) 조건 제시

국내 지역별 기후자료(기상청)를 활용하여 각 지역의 기후분포에 따른 동결-융해 반복 조건을 제시하고자 지난 30년 동안의 동절기(11월 1일~3월 31일) 기후자료를 통하여 동결조건에 가장 적합한 일 평균기온과 지속시간을 분석하였다.

구조물의 경우 사용연한에 따라 노후화에 대비해야 하는 시점이 있다. 유로코드(BS EN 1990, 2005)에서는 사용연한을 ‘필요한 주요 보수를 수행하지 않고 구조물 또는 구성 부재들이 본래의 목적에 맞게 사용되는 가정된 기간’으로 정의하고 있으며, 국내에서는 법인세법 시행규칙에 근거하여 ‘철근콘크리트’ 구조물의 내용연수 하한인 30년을 구조물의 노후화 기준으로 설정하고 있다.

따라서 동결-융해 반복에 따라 구조물이 손상될 가능성을 판단할 수 있도록 30년 동안의 기후특성을 활용하였으며, 적용된 동결-융해 반복일(F) 조건은 ‘-14°C에서 1일 이상 지속된 이후 0°C 이상으로 상승한 경우’, ‘-7°C에서 2일 이상 지속된 이후 0°C 이상으로 상승한 경우’와 ‘-5°C에서 3일 이상 지속된 이후 0°C 이상으로 상승한 경우’로 총 3가지의 동결-융해 반복일(F) 조건에 대하여 분석을 실시하였다.

강원지역(대관령)의 동절기 일 평균기온의 온도분포의 예시(2012~2013)는 아래 Fig. 5와 같다.

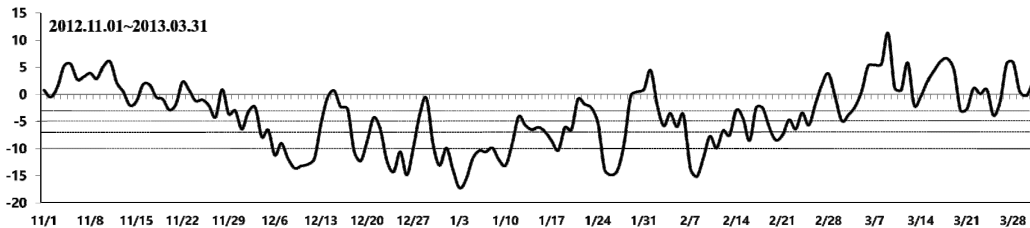


Fig. 5. Example of temperature distribution in winter season (2012~2013)

대관령의 경우 지난 30년간 -14°C에서 1일 이상 지속된 경우는 50회로 나타났으며, -7°C에서 2일 이상 지속된 경우는 총 248회, -5°C에서 3일 이상 지속된 경우는 총 206회로 나타났다. 또한 철원의 경우 -14°C에서 1일 이상 지속된 경우는 24회로 나타났으며, -7°C에서 2일 이상 지속된 경우는 총 175회, -5°C에서 3일 이상 지속된 경우는 총 163회로 나타났다. 서울의 경우에도 -7°C에서 2일 이상 지속된 경우가 59회로 가장 많았다.

또한 제천, 봉화, 장수 등의 지역은 -5°C에서 3일 이상 지속된 경우가 다른 조건에 비하여 가장 많은 동결-융해 반복 횟수를 보이기 때문에 지역에 따른 동결-융해 반복조건이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

부산의 경우에는 지난 30년간 -5°C에서 3일 이상 지속된 경우가 약 2회로 나타났으며 진주, 거제, 통영 등 대부분의 경남지역의 경우에는 동결-융해 반복은 거의 조사되지 않아 동결-융해로 인한 피해는 매우 미비할 것으로 예측된다. 지역별 기후특성에 따른 동결-융해 반복일(F) 조건 분석결과는 아래의 Table 8과 같다.

**Table 8.** Freeze/thaw repetition cycle (F) by area

Area	-14°C (1 day)	-7°C (2 days)	-5°C (3 days)	Area	-14°C (1 day)	-7°C (2 days)	-5°C (3 days)
Sokcho	0	8	9	Ganghwa	7	74	80
Cheorwon	24	175	163	Yangpyeong	6	77	90
Daegwallyeong	50	<b>248</b>	206	Icheon	4	63	81
Chuncheon	9	96	114	Inje	12	127	128
Gangneung	0	6	7	Hongcheon	13	125	144
Seoul	5	59	53	Taebaek	13	146	133
Incheon	1	40	45	Jecheon	17	128	136
Wonju	6	82	95	Boeun	4	63	84
Ulleungdo	0	1	2	Cheonan	2	43	53
Suwon	1	51	57	Boryeong	0	11	14
Seosan	0	19	33	Buyeo	0	23	30
Ulsan	0	4	4	Geumsan	1	42	58
Cheongju	0	28	46	Buan	0	10	14
Daejeon	0	21	31	Imsil	0	43	60
Chupungryeong	0	23	37	Jeongeup	0	8	12
Andong	0	22	41	Namwon	0	20	28
Pohang	0	2	2	Jangsu	4	53	83
Gunsan	0	9	15	Jang Heung	0	2	2
Daegu	0	3	5	Haenam	0	0	1
Jeonju	0	8	14	Goheung	0	0	1
Ulsan	0	0	2	Bonghwa	4	101	108
Changwon	0	0	1	Youngju	2	43	51
Gwangju	0	2	6	Mungyeong	0	28	37
Busan	0	0	2	Yeongdeok	0	4	7
Tongyeong	0	0	0	Uiseong	1	49	71
Mokpo	0	0	2	Gumi	0	7	10
Yeosu	0	0	1	Yeongcheon	0	6	10
Wando	0	0	1	Geochang	0	10	19
Jeju	0	0	0	Hapcheon	0	3	6
Ko San	0	0	0	Miryang	0	3	4
Sungshan	0	0	0	Sancheong	0	4	3
Seogwipo	0	0	0	Geoje	0	0	0
Jinju	0	1	2	Namhea	0	0	1

지역별 기후분석에 따라 강원지역의 경우에는 가장 적합한 동결융해 반복일(F) 조건으로는 외기의 온도가  $-7^{\circ}\text{C}$ 에서 2일 이상 지속된 이후  $0^{\circ}\text{C}$  이상으로 1일 이상 지속된 경우가 가장 적합한 것으로 판단된다. 향후 지역별 기후특성을 더욱 자세히 반영하기 위하여 동결-융해 반복일(F) 조건을 더욱 세분화하여 적용하는 것이 필요할 것이다.

#### 4.2 국내 동결피해 위험지역의 분류

터널의 지속적인 성능유지를 위해서는 변상발생의 주요 원인을 파악하고 이에 따른 적절한 대책공을 적용하는 것이 매우 중요하다. 강원지역에는 지역적 특성에 따라 산악지역이 넓게 분포하고 있으며 많은 터널이 운용되고 있다. 동결-융해 조건(F)에 따른 지역 별 동결-융해 반복횟수를 분석한 결과, 강원지역의 경우에는 타 지역에 비하여 동결-융해로 인한 피해가 많이 발생할 것으로 예측되었다.

한랭지역의 기후적, 환경적 특성에 따라 동결피해를 받는 터널구조물은 일회성 피해가 아닌 구조물의 내구성능을 지속적으로 저감시킬 것이며 최근 기후변화로 인해 그 정도는 점차 심해지는 추세이다. 따라서 동결피해에 대비하여 적절한 설계 및 유지관리에 활용할 수 있도록 국내 지역별 기후특성에 따른 동결-융해 반복 일(F) 분석 결과를 통해 아래 Fig. 6과 같이 동결피해 위험지역을 분류하였다.

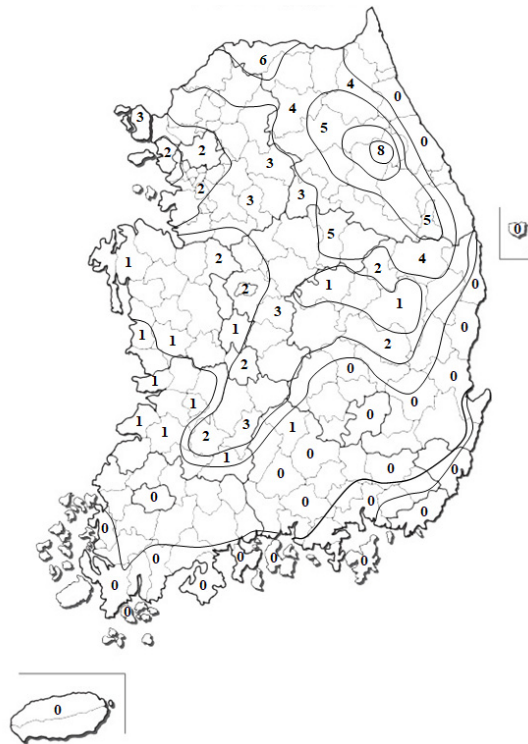


Fig. 6. Cold region classification

동결피해 가능지역을 분류한 지도에서 나타내고 있는 숫자는 해당지역의 연평균 동결-융해 반복일(F)로서, 지난 30년간의 기후자료를 근거로 하여 산정한 결과이다. 강원지역 중 대관령의 경우에는 8일로서 가장 많은 동결과 융해가 반복되는 것으로 조사되었으며 그 다음은 철원, 홍천, 태백, 제천 순으로 나타났다. 경남지역 대부분의 경우에는 동결-융해로 인한 피해발생 가능성은 미약한 것으로 나타났으나, 전라북도 장수와 임실, 경상북도 의성 등에서는 약 3일정도의 동결-융해가 반복하는 것으로 조사되었다. 연 평균 동결-융해 반복일수는 사용연수가 지남에 따라 축적됨으로 동결피해로 인한 내구성의 저하가 급속도로 진행될 수 있다. 따라서 연 평균 동결-융해 반복일이 3일 이상이 되는 경우 터널의 사용연수가 증가함에 따라서 동결피해가 발생할 위험이 있으므로 이에 적절한 대비책 마련이 필요할 것으로 판단된다.

실제 강원지역의 경우 추운 기후로 결빙으로 인한 피해가 빈번하게 발생하고 있으며 특히 터널 입·출구부에서는 낮은 일조량 및 외기의 유입에 따라 도로면에 결빙이 발생하며 유출된 지하수가 터널 내 온도저하로 인하여 결빙될 우려가 있다. 이러한 경우 터널구조물의 내구성 저하와 함께 빙결로 인한 건축한계 침범 또는 낙하로 인한 도로주행 중의 안전사고가 발생하는 등의 2차 피해를 발생시킬 수 있다.

이처럼 한랭지역 터널은 동결-융해로 인하여 주로 터널 입·출구부의 도로면과 라이닝에서 동결피해가 빈번히 발생하고 있다. 하지만 국내 터널은 지역에 관계없이 모두 동일한 시방기준에 따라 설계·시공되고 있기 때문에 동결융해로 인한 피해는 시간흐름에 따라 급격히 증가할 것으로 예상된다.

강원지역의 경우, 동결-융해 반복일(F)의 분석결과에 따르면, FHWA의 고강도 콘크리트의 동결융해 저항성 등급기준에 따라 그 등급은 Grade 1로 분류된다. 여기서, 고강도 콘크리트의 경우는 보의 길이를 줄이거나 마모에 대한 저항을 높이기 위하여 주로 교량에 사용되어 왔으며, 원자력 발전소, 지하 구조물 등에도 이용 범위가 넓어지고 있다.

그러나 국내 터널의 경우 일반적으로 보통 포트랜드 시멘트가 사용되며 재령 28일 강도가 21~24 MPa인 콘크리트를 표준강도로 하는 것을 원칙으로 하고 있다. 따라서 동결-융해 반복일(F)에 따른 등급선정 시 FHWA의 기준을 적용하는 것은 어려울 것으로 판단된다. 향후 국내 터널의 동결-융해 반복에 따른 등급기준 설정을 위하여 동결-융해 반복에 따른 콘크리트 내구성능 평가시험이 선행되어야 할 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 한랭지역 동결피해 사례분석 및 국내·외 동해환경 평가기준을 기반으로 콘크리트 시험체의 시간에 따른 온도변화 분석을 위한 실내동결실험을 실시하였으며, 실험적 검토결과에 따른 열류량( $W$ ) 분석을 통하여 국내 기후특성에 적합한 동결-융해 반복일(F)에 대한 조건을 제시하였다. 우리나라 강원지역의 경우 타 지역에 비하여 동결-융해의 반복에 따라 결함발생이 증가할 것으로 예측됨으로 한랭지역 터널 동결피해 대책공법의 적용과 합리적인 유지관리가 필요할 것이다.

실내동결시험의 결과를 통해 콘크리트 시험체의 온도변화를 분석한 결과, 시험체의 온도를 5°C에서 -2.2°C까

지 약 7.2°C 저감시키는데 이동한 열류량( $W$ )은 평균 6.90  $W$ 이며, 이때 이동한 에너지는 평균 661,706줄( $J$ )이 이동한 것으로 분석되었다. 실제 터널에서 외기온도의 변화에 따른 터널 라이닝의 동결시간을 예측하기 위해 실험 결과로부터 측정된 열류량( $W$ )과 온도변화와의 상관관계를 고려하여 시간 별 온도변화를 예측하였다.

동결피해가 예측되는 터널 라이닝의 온도는 FHWA의 동결조건을 반영하여 약 -2.2°C로 설정하였으며, 이때 외기 온도는 -14°C, -7°C, -5°C 및 -3°C로 가정하였다. 열류량( $W$ ) 분석결과를 기반으로 외기온도에 의하여 라이닝의 온도가 -2.2°C까지 떨어지는 시간을 예측한 결과, 외기온도가 -14°C인 경우에 약 1.02일, -7°C의 경우 약 2.06일, -5°C일 경우 약 2.97일, -3°C인 경우 약 5.64일이 소요되는 것을 확인하였다.

지난 30년간의 일 평균기온 자료를 통하여 강원지역의 동결-융해 반복일(F)를 분석한 결과, ‘일 평균기온이 -7°C에서 2일 이상 지속된 이후 라이닝의 온도가 0°C 이상으로 상승한 경우’가 다른 조건에 비해 가장 많은 약 248일로 분석되어 강원지역 기후특성에 가장 적합한 동결-융해 반복일(F) 조건으로 확인되었다.

동결-융해 반복일(F) 조건을 활용하여 국내 지역 별 기후특성에 따른 동결피해 위험지역을 분류한 결과, 강원 지역의 경우 다른 지역에 비해 가장 많은 동결과 융해가 반복되는 것으로 조사되었으며, 그 중 대관령의 경우 연 평균 약 8회로 가장 빈번한 동결-융해 반복조건에 노출되어 있는 것을 확인하였다. 연 평균 동결-융해 반복일수는 터널의 사용연수가 지남에 따라 축적되기 때문에 동결피해로 인한 심각한 내구성 저하가 발생할 가능성이 크다. 따라서 동결피해에 대비하여 적절한 설계 및 유지관리에 활용할 수 있도록 국내 지역별 기후 특성에 따른 동결피해 위험지역을 분류하였다.

향후 동결-융해 반복일(F)을 기반으로 하여 국내 기후조건에 적합한 한랭지역 선정기준을 개발한다면 한랭지역 터널의 합리적 설계, 시공 및 유지관리 체계를 마련할 수 있을 것이라고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(18RDRP-B066780)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Broch, E., Grov, E., Davik, K.I. (2002), “The inner lining system in Norwegian traffic tunnels”, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 17, No. 3, pp. 305-314.
2. Cheong, H.M. (2013), “Degree of damage risk by freeze and thaw of concrete structures in Korea”, Proceedings of the Korea Concrete Institute, Vol. 25, No. 1, Yeosu, pp. 89-90.
3. Eurocode EN 1990 : 2002 A1 (2005), Basis of structural design, pp. 16.
4. FHWA (Federal Highway Administration) (1996), Recommended HPC grade for given exposure condition.
5. Hong, S.S., Kim, Y.S., You, B.H. (2015), A Study on the Frost Penetration Depth in Pavements, KICT 2016-007, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, pp. 64.

6. Jin, H.W., Hwang, Y.C. (2017a), “Experimental study on internal temperature change induced by heating element attached to tunnel lining surface”, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 18, No. 11, pp. 35-40.
7. Jin, H.W., Hwang, Y.C. (2017c), “Heat transfer test of tunnel lining with heat insulation”, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 18, No. 7, pp. 5-12.
8. Jin, H.W., Kim, T.S., Hwang, U.C. (2017b), “Analysis of temperature change of tunnel lining with heating element”, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 18, No. 1, pp. 5-12.
9. Kim, D.Y., Lee, H.S., Sim, B.K. (2011), “A study on the design of tunnel lining insulation based on measurement of temperature in tunnel”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 13, No. 4, pp. 319-345.
10. Kim, N.Y., Shim, J.W. (2013), “Case studies on the tunnel frost due to the low temperature”, *Proceedings of the 2013 Spring Geosynthetics Conference*, Daegu, pp. 107-110.
11. Midas IT (2013), *Understanding and Using Practical Finite Element Analysis*, pp. 2-3.
12. MOLIT (Ministry of Employment and Labor) (2004), *Concrete standard specification, Durability*, pp. 14-15.
13. MOLIT (Ministry of Employment and Labor) (2012), *Concrete structural criteria, Grade According to Exposure of Concrete*, pp. 77-78.
14. MOLIT (Ministry of Employment and Labor) (2018), *Detailed instructions for the safety and maintenance of facilities, Performance Evaluation*, pp. 107-108.
15. Park, K.H., An, J.W., Park, S.H., Yoon, T.G. (2017), “A study on the development of maintenance system for tunnel with freezing-thawing damage”, *Geotechnical hazard Mitigations: Experiment, Theory and Practice, Proceedings of the 5th International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation*, Taipei, pp. 121-135.
16. SciTech (2013), *Heat Transfer in Practice*, pp. 2-500.