

국내 기후특성을 고려한 도로터널의 동결-융해 평가기준 연구

문준식¹ · 안재욱^{2*} · 김홍균³ · 이종건⁴

¹정회원, 경북대학교 토목공학과 교수

²비회원, 한국시설안전공단 지반안전실 과장

³정회원, 한국시설안전공단 지반안전실 부장

⁴비회원, 한국시설안전공단 지반안전실 부장

A study on freeze-thaw evaluation criteria for road tunnels considering climate characteristics

Joon-Shik Moon¹ · Jai-Wook An^{2*} · Hong-Kyoon Kim³ · Jong-Gun Lee⁴

¹Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook National University

²Manager, Dept. of Ground Safety, KISTEC

³General Manager, Dept. of Ground Safety, KISTEC

⁴General Manager, Dept. of Ground Safety, KISTEC

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

Abstract

Globally, the frequency and intensity of abnormal climate events are increasing. Since this can directly damage lives and property, it is important to establish and implement an appropriate maintenance strategy in response to abnormal weather. Facilities built in cold regions where cold wave or heavy snow occurs frequently can be more damaged by freeze-thaw than facilities located in other regions. However, there are no clear criteria for quantitatively identifying the damage of freeze-thaw and how to cope with it. Therefore, based on the results of indoor freezing tests, the freezing conditions considering regional climate characteristics were selected as one day at -14°C, two days at -7°C or three days at -5°C. As a result, it was confirmed that they were in the freeze-thaw environment in order of Daegwallyeong (8.3 times), Cheorwon (5.3 times) and Taebek (4.9 times) in Gangwon region. Through this study, the evaluation criteria of freeze-thaw of road tunnels were newly proposed. The freeze-thaw evaluation criteria of the road tunnel presented in this study can be used for the quantitative evaluation and maintenance strategy of tunnels in cold regions.

Keywords: Freeze-thawing criteria, Cold regions, Heat transfer quantity analysis, Indoor freeze test

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
22(1)121-133(2020)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2020.22.1.121>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received December 18, 2019

Revised January 7, 2020

Accepted January 10, 2020



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 © 2020, Korean Tunnelling and Underground Space Association

www.kci.go.kr

초 록

전 세계적으로 이상기후 현상의 빈도와 강도는 높아지고 있는 추세이다. 이는 인명과 재산에 직접적인 피해를 줄 수 있으므로 이상기후에 대응하여 적절한 유지관리 전략을 수립하고 실천하는 것이 중요하다. 한파 또는 폭설이 빈번하게 발생하는 한랭지역에 건설되는 시설물의 경우에는 다른 지역에 위치하고 있는 시설물에 비하여 동결-융해에 의한 피해를 많이 받을 수 있으며, 해를 거듭할수록 그 피해 정도는 증가할 가능성이 매우 높다. 그러나 동결-융해의 피해를 정량적으로 확인할 수 있는 명확한 기준과 이에 대한 대응방안은 아직 제시되고 있지 않은 실정이다. 따라서 실내 동결시험 결과를 기반으로 지역별 기후특성을 고려한 동결조건을 -14°C에서 1일, -7°C에서 2일 또는 -5°C에서 3일 지속될 경우로 선정하였으며, 그 결과, 강원지역의 대관령(8.3회), 철원(5.3회), 태백(4.9회)의 순으로 동결-융해 환경에 노출되어 있는 것으로 판단되었다. 이러한 연구결과를 기반으로 도로터널의 동결-융해 평가기준을 새롭게 제시하였다. 본 연구에서 제시된 도로터널의 동결-융해 평가기준은 추후 한랭지역 터널의 정량적 평가와 유지관리 전략의 수립 시 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 동결-융해 평가기준, 한랭지역, 열류량 분석, 실내 동결시험

1. 서론

강원지역은 지형적 특성상 동절기 기온은 평지보다 낮고 연중 강수가 있는 냉대습윤기후로 동결-융해 반복에 의해 터널 구조물의 열화가 진행되어 보수·보강에 사용되는 비용이 필연적으로 증대될 수밖에 없는 상황이다. 이처럼 외부의 온도변화로 인하여 반복적인 동결-융해, 결로현상 등 외부 온도의 영향을 받지 않는 구간보다 콘크리트 라이닝의 품질이 좋지 못하게 된다(Park et al., 2017).

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).

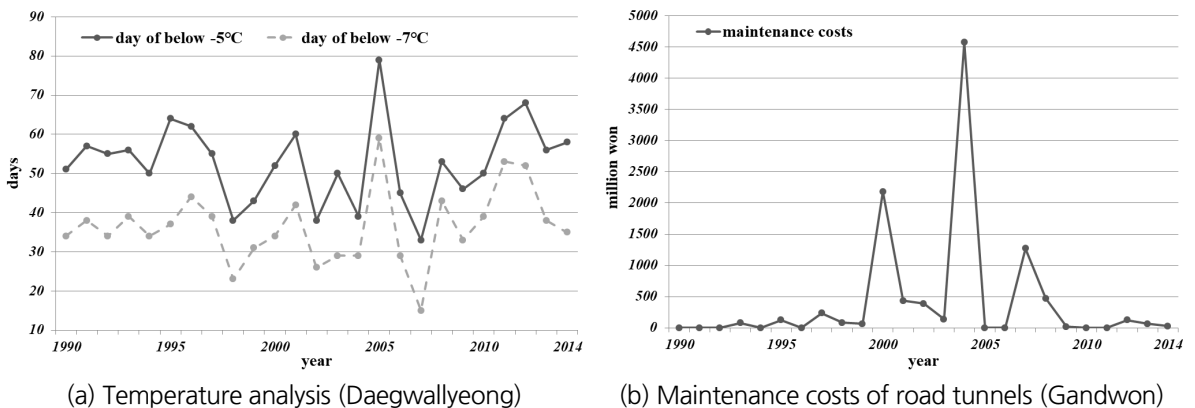


Fig. 1. Temperature status and road tunnel maintenance costs in Gangwon area by year

강원지역 중 대표적인 한랭지인 대관령의 기온을 분석한 결과와 강원도 도로터널의 보수·보강에 투입된 유지관리 비용을 비교·검토하여 추운 기온이 터널 시설물의 열화에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 1(a)는 대관령의 최근 15년(1990~2014년)간의 -5°C 이하 일수 및 -7°C 이하 일수 변화를 분석한 내용이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이, 1999~2001년 및 2004년, 2007년의 경우 매우 낮은 기온이 급격히 상승한 것을 확인할 수 있다. Fig. 1(b)는 강원지역 도로터널의 연도별 유지관리 비용 현황이다. 기온분석 결과와 유사하게 200년, 2004년 2007년에 많은 유지관리 비용이 투입된 것을 확인하였다.

이처럼 낮은 기온이 지속될 경우 동결-융해 등 환경적으로 불리한 조건에 의해 터널 라이닝의 품질이 상대적으로 떨어지게 되며, 누수 및 결빙이 반복적으로 발생하고 내·외부 온도변화에 의한 결함이 가속되는 특징이 있다.

따라서 국내 기후 분석을 통해 동결-융해의 피해 가능성을 판단하여 그에 적절한 유지관리를 수행할 수 있도록 동결-융해 평가기준의 정립이 필요한 실정이다. 본 논문에서는 국내·외에서 활용 중인 동해환경 및 동결-융해 평가기준을 기반으로 국내 기후조건을 고려한 평가를 실시하였다. 이를 위해 콘크리트 라이닝의 열류량 분석 결과를 활용하였으며, 국내 기후자료를 통해 정량적인 평가가 가능하도록 동결-융해 평가기준을 제안하였다.

2. 터널 동결-융해 평가기준 분석

국내 터널의 동결-융해 평가기준은 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침」에서 확인 할 수 있다. 터널의 유지관리에 활용하기 위해 평가를 수행하고 있으며, 동해환경 평가기준으로는 동결-융해 반복일수를 계산하여 활용한다. 여기에서는 동절기(11월 1일~3월 31일)를 대상으로 수분과 지속적으로 접촉하지 않는 일반부재와 수분과 지속적으로 접촉하는 부재로 구분하여 일 최저기온이 -2.2°C, 최고기온이 0°C인 일수를 동결-융해 반복일수로 지정하고 있다. 동결-융해 반복일수를 활용한 동해환경 평가기준은 Table 1과 같다(MOLIT, 2018).

Table 1. Evaluation criteria for freeze-thaw

Exposure condition	Classification (FHWA)		
	a (N/A)	b (Grade 1)	c (Grade 2)
(Korea) Freeze/Thaw repetition index ^{a)}	x < 3	3 ≤ x < 50	50 ≤ x
(FHWA) Freeze/Thaw durability exposure (x = F/T cycles per year ^{b)})			

a) Freeze/Thaw repetition cycles per year: the lowest temperature of a day = -2.2°C & day highest temperature = 0°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°C (28°F) followed by a rise in temperature above freezing

국외의 경우에는 미국 교통부 연방 도로청(FHWA)에서 활용하고 있는 고성능 콘크리트의 동결-융해 평가기준이다(FHWA, 1996). 미국의 경우에도 마찬가지로 구조물이 실제 노출된 지역의 동결-융해 반복횟수를 통하여 고성능 콘크리트의 동결-융해 저항성 등급을 제시하고 있다. 연평균 동결-융해 반복횟수를 3회와 50회를 기준으로 동결-융해 평가기준을 3개의 등급으로 구분하고 있으며 평가기준은 국내의 동해환경 평가와 동일하다(Table 1).

미국의 FHWA에서 활용하고 있는 평가기준에 적용된 동결에 대한 조건은 콘크리트가 주변의 온도에 따라 영하 2.2°C 이하로 떨어지는 경우로 규정하고 있으며, 국내 동해환경 평가에 적용된 동결에 대한 조건은 일 최저기온이 영하 2.2°C일 경우로서 다소 차이가 있다. FHWA에서는 외부 온도에 따라 재료자체의 온도가 변화할 때를 확인하는 반면 국내의 경우에는 외기의 온도를 통해 동결-융해를 판단하고 있다.

국내·외 평가기준의 적정성을 확인하기 위하여 국내 기후조건을 반영하여 평가기준에 따른 지역별 등급을 산정할 필요가 있으며, 결과 분석을 통해 국내에 적합한 평가기준을 마련한다면 한랭지역의 구분 및 적합한 유지관리 전략 수립 시 활용이 가능할 것이라고 판단된다.

3. 국내 기후특성을 고려한 지역별 동결-융해 반복일수 분석

3.1 콘크리트 라이닝 온도변화에 따른 열전달량 분석

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. 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 Δx 를 통한 열전도율 Q 는 벽의 온도차 ΔT 와 열전달 방향에 수직인 면적 A 에 비례하고, 벽의 두께에 반비례 한다. 열류량은 아래의 식 (1)과 같으며 단위는 와트(W)로 1초동안의 하는 일(J)인 일률의 단위(J/s)이다.

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

여기서, 비례상수 K_t 는 재료의 열전도계수로서 재료의 열전도 능력을 나타내는 크기이다. 콘크리트의 열전도계수(Thermal conductivity)는 1.4 W/m·K를 적용하였다(SciTech, 2013). ΔT 는 콘크리트 라이닝의 상부 표면의 온도(T_2)와 하부 표면의 온도(T_1)와의 차이이며, Δx 는 라이닝의 두께 이다.

본 연구에서는 실내동결시험을 실시하여 열류량 공식에 의하여 콘크리트 상부표면의 온도를 1°C 떨어뜨리는 데 필요한 일의 양인 열류량(W)을 산출하였으며, 이때 필요한 에너지(J)를 통해 외부 온도에 따른 콘크리트 라이닝의 시간에 따른 온도변화를 예측하였다.

콘크리트 라이닝의 한쪽 면은 냉동챔버를 통해 결빙이 되도록 하고 나머지 면은 상온을 유지할 수 있는 환경에 노출시켜 동결 시험을 실시하였다.

시험에 사용되는 콘크리트 라이닝은 일반적으로 터널 라이닝에 적용되는 두께(Δx) 인 300 mm이며, 콘크리트 라이닝 내부의 온도변화 분석을 위하여 라이닝 하부표면으로부터 각각 75 mm 간격(하부로부터 표면, 75 mm, 150 mm, 225 mm, 상부표면)으로 온도측정센서가 설치되었다(Jin and Hwang, 2017).

3.2 콘크리트 라이닝 온도변화 분석

본 동결시험의 경우, 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 내·외부에 설치된 온도센서를 이용하여 각 부분에서의 시간에 따른 온도변화를 측정하였다.

냉동챔버의 온도는 약 -20~-25°C로 유지되도록 하였으며, 2차례의 실험을 실시하였다. 각각 5.5°C 및 6.6°C의 영상의 온도로 유지되고 있던 콘크리트 라이닝이 약 -20~-25°C에 노출된 이후 영하의 온도로 내려가는데 약 1,230분 및 1,450분으로 측정되어 약 1일 정도가 소요되는 것을 확인하였으며, FHWA의 동결기준인 -2.2°C까지 내려가는데 약 1,830분 및 2,080분으로 측정되어 약 1.3일 정도가 소요되는 것을 확인하였다.

콘크리트 라이닝의 깊이에 따른 내부온도를 0°C 이하 및 -2.2°C 이하로 떨어뜨리는데 걸리는 시간은 Table 2와 같다.

Table 2. Time (min) to reach freezing temperature (0°C and -2.2°C) of concrete lining No. 1, 2

Sortation		Lower surface	75 mm	150 mm	225 mm	Upper surface
Concrete lining No. 1	Time of below 0°C	-	340 min	680 min	910 min	1,230 min
	Time of below -2.2°C	-	625 min	1,045 min	1,545 min	1,830 min
Concrete lining No. 2	Time of below 0°C	-	425 min	790 min	1,055 min	1,450 min
	Time of below -2.2°C	-	735 min	1,240 min	1,815 min	2,080 min

3.3 실내 동결시험 결과를 통한 열류량 분석

실제 터널 라이닝의 동결조건 검토를 위하여 실내 동결시험의 결과를 기반으로 열류량 분석을 실시하였다. 콘크리트 라이닝의 배면의 온도가 5°C일 때를 기준으로 1°C씩 온도가 내려갈 때의 콘크리트 라이닝 표면의 온도와 소요시간을 정리하였으며, 이때 콘크리트 배면의 온도를 1°C 떨어뜨리는데 필요한 열류량 값(W)을 산정한 결과 평균적으로 약 6.90 (J/s)가 사용되었으며, 이때 필요한 에너지는 평균 661,706 줄(J)이 필요한 것으로 분석되었다(Table 3). 터널 라이닝의 배면온도가 약 1~2°C로 유지된다고 가정하였을 때, 동결 시험을 통하여 확인한 열류량 분석결과를 기반으로 터널의 외기 온도변화에 따라 라이닝이 동결되는 시간을 예측하였다. 터널 라이닝의 동결 및 융해로 인해 동해발생이 가능한 콘크리트 라이닝의 온도는 FHWA의 동결조건을 반영하여 약 -2.2°C로 설정하였다.

Table 3. Heat transfer quantity analysis results

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

Table 4. Results of tunnel lining temperature change by duration due to ambient air temperature

Test result (Avg. Joule)	T ₁	T ₂	Q _{cond} (W)	Q _{cond} (Avg. W)	Cumulative days	T ₁	T ₂	Q _{cond} (W)	Q _{cond} (Avg. W)	Cumulative days
64,085	-14°C	2°C	6.72	6.93	1.07	-7°C	2°C	3.78	3.99	2.16
88,034	-14°C	1°C	6.30	6.51	0.96	-7°C	1°C	3.36	3.57	1.97
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 ₁	T ₂	Q _{cond} (W)	Q _{cond} (Avg. W)	Days	T ₁	T ₂	Q _{cond} (W)	Q _{cond} (Avg. W)	Days
64,085	-5°C	2°C	2.94	3.15	3.09	-3°C	2°C	2.1	2.31	5.80
88,034	-5°C	1°C	2.52	2.73	2.85	-3°C	1°C	1.68	1.89	5.48
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

동결시험에 따라 콘크리트 라이닝의 온도를 약 1°C의 변화하는데 드는 에너지와 시간과의 상관관계를 고려하여 약 1~2°C로 유지되고 있는 터널 라이닝의 배면의 온도를 -2.2°C까지 떨어뜨리는데 걸리는 시간을 예측하였다. 이때 외기의 온도는 -14°C, -7°C, -5°C, -3°C로 가정하였을 경우 예측된 결과는 Table 4와 같다.

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(An et al., 2018). 이처럼 외기 온도에 따라 동결 피해 발생이 가능한 지속시간은 다르게 나타난다. 따라서 국내의 지역별 기후특성에 적합한 온도와 지속시간을 활용하여 동결-융해 조건 및 평가기준을 제시하는 것이 필요하다.

4. 국내 기후조건을 고려한 동결-융해 영향 분석

4.1 국내 기준을 활용한 동해환경 분석

「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침」에서 제시하고 있는 동해환경 평가기준은 동절기(11월 1일~3월 31일)를 대상으로 하고 있으며, 수분과 지속적으로 접촉하지 않는 부재(일반부재)와 수분과 지속적으로 접촉하는 부재로 구분하고 일 최저기온이 -2.2°C, 최고 기온이 0°C인 일수를 동결-융해 반복지수(X)로 규정하고 있다. 터널 라이닝의 경우에는 수분과 지속적으로 접촉하고 있는 부재로 가정하였으며, 최근 10년(2008~2017년)간의 기후자료를 통하여 지역별 동결-융해 반복지수(X)를 분석하였다(Table 5).

동결-융해 반복지수(X) 분석결과, 동결-융해의 반복이 가장 심한 동해환경에 해당하는 지역은 경상북도 봉화, 의성, 충청북도 제천 순으로 나타났다.

Table 5. Freeze-thaw repetition index (X) by area

Area	Freeze/Thaw repetition index (X)	Area	Freeze/Thaw repetition index (X)	Area	Freeze/Thaw repetition index (X)
Sokcho	45.8	Gwangju	38.1	Geumsan	89.6
Cheorwon	87.0	Busan	22.6	Buan	54.4
Daegwallyeong	75.0	Tongyeong	25.9	Imsil	94.4
Chuncheon	78.9	Mokpo	28.3	Jeongeup	53.0
Gangneung	39.0	Yeosu	21.4	Namwon	85.9
Seoul	47.1	Wando	23.0	Jangsu	90.8
Incheon	38.8	Jeju	0.7	Jang Heung	64.0
Wonju	65.2	Ko San	1.0	Haenam	65.0
Ulleungdo	14.7	Sungsan	1.9	Goheung	58.2
Suwon	61.5	Seogwipo	0.8	Bonghwa	108.5

Table 5. Freeze-thaw repetition index (X) by area (continue)

Area	Freeze/Thaw repetition index (X)	Area	Freeze/Thaw repetition index (X)	Area	Freeze/Thaw repetition index (X)
Seosan	70.8	Jinju	80.5	Youngju	78.1
Uljin	46.7	Ganghwa	69.7	Mungyeong	73.5
Cheongju	54.1	Yangpyeong	74.8	Yeongdeok	44.2
Daejeon	61.8	Icheon	83.5	Uiseong	104.9
Chupungryeong	70.3	Inje	79.5	Gumi	65.3
Andong	80.3	Hongcheon	82.6	Yeongcheon	79.9
Pohang	30.0	Taebaek	78.0	Geochang	95.1
Gunsan	51.1	Jecheon	95.8	Hapcheon	83.3
Daegu	43.5	Boeun	91.1	Miryang	76.5
Jeonju	52.5	Cheonan	71.3	Sancheong	67.2
Ulsan	33.5	Boryeong	53.1	Geoje	27.9
Changwon	28.7	Buyeo	79.6	Namhae	37.6

4.2 국외 기준을 활용한 동결-융해 등급 분석

FHWA에서 제시하고 있는 동결-융해 평가기준에서 동결에 대한 조건은 콘크리트가 주변의 온도에 따라 -2.2°C 이하로 떨어지는 경우로 규정하고 있으며, 영상의 온도로 회복하는 것을 융해의 조건으로 제시하고 있다. 실내 동결시험을 통해 확인한 주변온도에 따른 콘크리트 라이닝의 동결시간을 기반으로 공용중인 터널 라이닝의 동결-융해 반복조건(x)을 다음과 같이 선정하였다.

1. -14°C 에서 1일 이상 지속된 이후 0°C 이상으로 상승한 경우 2. -7°C 에서 2일 이상 지속된 이후 0°C 이상으로 상승한 경우 및 3. -5°C 에서 3일 이상 지속된 이후 0°C 이상으로 상승한 경우의 총 3가지 조건에 대하여 분석을 실시하였다. 최근 30년(1988~2017년)간의 기후자료를 통하여 지역별 동결-융해 반복조건(x)을 분석하였다 (Table 6).

대관령의 경우 지난 30년간 동결-융해 반복조건(x)에 따른 반복일수는 총 248회로 나타났으며, 철원의 경우는 175회, 태백의 경우 145회, 홍천 144회 등 주로 강원지역에 많이 분포하고 있는 것을 확인하였다. 또한, 대관령, 태백 및 철원 등의 지역 외에는 주로 -5°C 에서 3일 이상 지속된 경우가 다른 조건에 비하여 가장 많은 동결-융해 반복조건(x)을 만족하는 것을 확인하였다.

지역별 기후분석에 따라 강원 일부 지역을 제외하고 가장 적합한 동결-융해 반복조건(x)으로 -5°C 에서 3일 이상 지속된 이후 0°C 이상으로 상승한 경우가 가장 적합한 것으로 판단된다.

Table 6. Freeze-thaw durability exposure (x) 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	248	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
Sungsan	0	0	0	Sancheong	0	4	3
Seogwipo	0	0	0	Geoje	0	0	0
Jinju	0	1	2	Namhea	0	0	1

4.3 지역별 동결-융해 영향 분석

국내 기후자료를 기반으로 하여 지역별 동결-융해에 대한 영향을 분석하였다. 평가기준은 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침」에서 제시하고 있는 동해환경 평가기준과 FHWA에서 제시하고 있는 동결-융해 평가기준을 적용하였다.

동해환경 평가기준에 따르면 우리나라에 약 70%는 최저등급인 c등급에 해당하며 a등급의 경우에는 2개의 지역만 해당하는 것으로 분석되었다. 그리고 c등급에 해당하는 지역 중에는 호남 및 영남 지역 등 강원지역에 비해 동해의 영향이 적은 지역이 다수 포함되어 있으므로 일부 보완이 필요할 것으로 판단된다.

또한, FHWA의 동결-융해 반복조건에 따르면 우리나라의 약 84%는 동해의 영향이 없는 것으로 나타났으며, 대관령, 철원, 태백 등의 10개 지역이 Grade 1에 해당하는 것으로 나타났다. 이중 7개 지역은 강원지역을 포함하고 있어 동해의 영향을 많이 받는 지역이 적정하게 포함되어 있는 것으로 판단된다(Table 7). 국내 및 국외기준에 따른 지역별 등급 분포는 Fig. 2와 같다.

Table 7. Freeze-thaw impact analysis results

Sortation		Seoul metropolitan area	Gwangdong area	Hoseo area	Honam area	Youngnam area	Sum (%)
Freeze/Thaw repetition index (X)	a	0	0	0	0	2	2 (3%)
	b	1	2	0	4	10	17 (27%)
	c	5	7	8	11	13	44 (70%)
Freeze/Thaw durability exposure (x)	N/A	5	2	7	15	24	53 (84%)
	Grade 1	1	7	1	0	1	10 (16%)
	Grade 2	0	0	0	0	0	0 (0%)

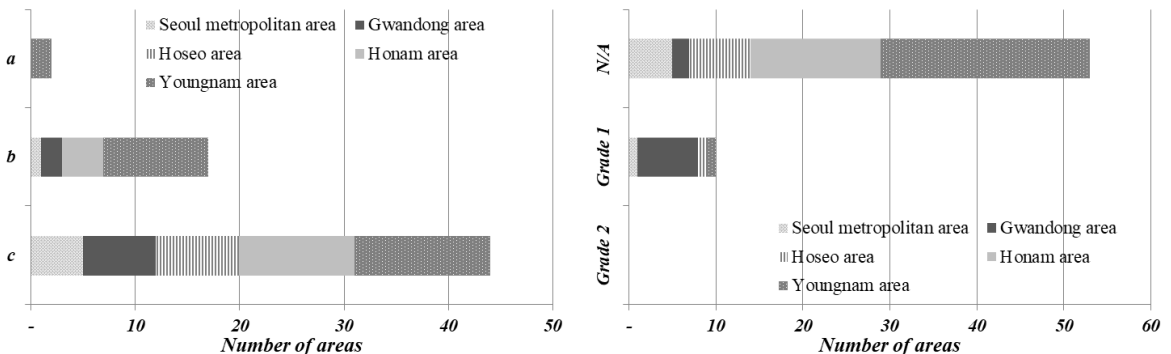


Fig. 2. Freeze-thaw effect analysis result graph

5. 국내 도로터널의 동결-융해 평가기준 제안

강원지역의 경우 추운 기후에 따른 결빙으로 피해가 빈번하게 발생하고 있으며 특히 도로터널 입·출구부에서는 낮은 일조량 및 외기의 유입에 따라 도로 및 라이닝 배면에 결빙으로 인한 동해가 발생하며, 터널 구조물의 내구성 저하와 함께 공용 중 심각한 사고로 발전할 수 있다.

이처럼 강원지역 터널은 동결-융해로 인한 피해에 노출되어 있으며, 시간이 경과함에 따라 터널 입·출구부의 도로면과 라이닝에 동결피해의 발생 가능성이 증가되고 있지만 적절한 평가기준은 마련되지 않고 있다. 또한, 국내 터널은 지역에 관계없이 모두 동일한 시방기준에 따라 설계·시공되고 있기 때문에 동결-융해로 인한 피해는 시간흐름에 따라 급격히 증가할 것으로 예상된다.

강원지역의 기후적, 환경적 특성에 따라 동결피해를 받는 터널구조물은 일회성 피해가 아닌 구조물의 내구성을 지속적으로 저감시킬 것으로 예상되므로 국내 기후조건을 고려하여 동결-융해의 정량적 평가와 동결피해에 대비하여 적절한 설계 및 유지관리에 활용할 수 있도록 국내 도로터널의 동결-융해 평가기준을 Table 8과 같이 제안하였으며, 제안된 평가기준에 따른 지역별 등급 분포는 Fig. 3과 같다.

Table 8. Freeze-thaw criterion proposal

Exposure condition	Classification				
	a	b	c	d	e
Freeze/Thaw repetition days (F = F/T cycles per year ^{a)})	F < 1	1 ≤ F < 4	4 ≤ F < 7	7 ≤ F < 10	10 ≤ F

a) 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°C followed by a rise in temperature above freezing

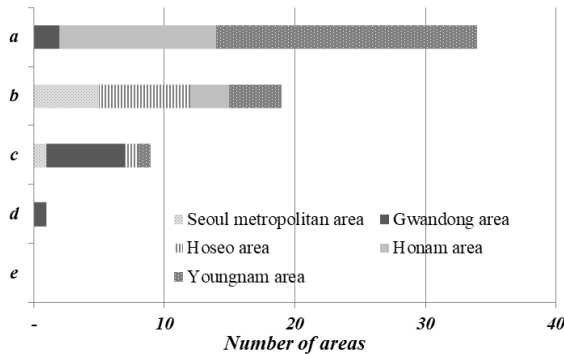


Fig. 3. Status of freeze-thaw ratings by region

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 대책 마련이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 도로터널의 동결-융해 평가기준을 개발하기 위하여 국내·외 평가기준을 분석하고 콘크리트 라이닝이 추운 외기의 온도에 노출된 시간에 따른 온도변화를 예측하였으며 국내 기후특성을 고려한 지역별 동결-융해 영향분석을 수행하였다. 향후 본 연구에서 제시한 동결-융해 평가기준은 국내 한랭지역의 정량적 평가와 각 등급에 적합한 유지관리 전략을 수립하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구의 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 국내·외 동결-융해 관련 기준은 동결-융해의 반복횟수를 기반으로 등급을 산정하고 있으나, 동결에 대한 정의에 다른 점이 존재하고 있어 국내 지역별 기후에 따른 분석을 실시하였다.
2. 국내 기준에서는 일 최저기온이 -2.2°C , 최고기온이 0°C 인 일수로 평가하지만 국외 기준에서는 콘크리트 재료의 온도가 -2.2°C 이하로 떨어지는 경우로 규정하고 있어 실내 동결시험을 통한 열류량 분석결과를 기반으로 외기의 온도가 -14°C 에서 1일 지속될 경우, -7°C 에서 2일 지속될 경우, -5°C 에서 3일 지속될 경우를 콘크리트 라이닝의 동결조건으로 판단하였다.
3. 국내 기준에 따른 한랭지역은 경상북도 봉화(108.5회), 의성(104.9회) 및 충청북도 제천(95.8회)의 순으로 나타났다으며, 국외 기준에 따른 한랭지역은 강원도 대관령(8.3회), 철원(5.3회) 및 태백(4.9회)의 순으로 나타났다.
4. 국내의 터널의 동결-융해에 의한 피해는 강원지역을 중심으로 빈번히 발생하고 있으므로 콘크리트 라이닝 재료의 동결조건을 고려한 평가기준의 제시가 필요하다. 따라서 국내 기후조건을 고려하여 동결-융해 평가기준을 제안하였으며, 연 평균 동결-융해 반복일이 3회 이상 지속되는 터널의 경우에는 적절한 대응책 마련이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 “터널 동결피해 저감공법 현장적용 및 실용화방안 개발사업 (과제번호 19RDRP-B066780)”의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

저자 기여도

문준식은 연구 개념 및 설계하였으며, 안재욱은 데이터분석 및 원고 작성을 하였으며, 김홍균은 데이터수집 및 해석을 수행하였고, 이종건은 데이터 해석 및 원고 검토를 수행하였다.

References

1. An, J.W., Seo, J.E., Jung, M.H., 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.
2. Cheong, H.M. (2013), “Degree of damage risk by freeze and thaw of concrete structures in Korea”, *Proceedings of the 2013 Spring Conference on Korea Concrete Institute Conference, Yeosu*, Vol. 25, No. 1, pp. 89-90.
3. FHWA (1996), Recommended HPC grade for given exposure condition, Federal Highway Administration.
4. Jin, H.W., Hwang, Y.C. (2017), “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.
5. Midas IT (2013), Understanding and using practical finite element analysis, pp. 2-3.
6. MOLIT (2018), Detailed guidelines for the safety and maintenance of facilities (performance evaluation), Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 2-52.
7. 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.
8. SciTech (2013), Heat transfer in practice, pp. 2-500.