

기후변화를 고려한 동결지수 적용방안 연구

Application of Freezing Index Considering Climate Change

전종명, 이상연, 이석근(경희대학교)

차 례

1. 서론
2. 동결지수
3. 최근 동결지수 산정 및 분석
4. 동결지수 적용방안

■ keyword : | Frost | Freezing Index | Frost Penetration Depth |

1. 서론

국내 도로포장 설계 시 동상설계는 외국에서 제안한 설계방법들을 그대로 들여와 사용하고 있다. 이러한 방법들은 각국의 환경조건을 고려한 방법들이므로 국내에서 그대로 적용하기에는 무리가 있다. 또한 지구 온난화 등으로 평균기온이 과거에 비해 상승하였음에도 불구하고 이런 기후 변화를 전혀 고려하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 기후 변화를 고려하여 동결지수를 재 산정하고 기후변화에 합리적인 동결지수 적용방안을 제안하고자 한다.

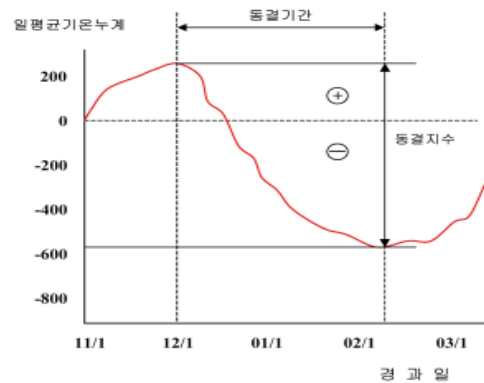
본 연구에서는 우선 기후 변화를 반영하기 위하여 기상청에서 제공하는 80여개 관측소의 최근 30여 년간 겨울철(11월~3월) 일평균 기온자료를 수집하여 각각의 동결지수를 산정하였다. 30년간, 20년간 및 10년간의 동결지수를 산정하여 각각의 산정 결과를 비교 분석하였다. 30년간의 동결지수 변화추이를 분석하여 최근 기후변화를 반영할 수 있는 합리적인 동결지수를 제안하고자 한다.

2. 동결지수

2.1 동결지수의 정의

동결지수는 포장내의 동결관입깊이를 산정하기 위한 대표적 척도로서, 포장 구조와 노상토를 동결시키는 대기온도의 강도와 지속기간의 누가영향으로 표시된다. 동결지수의 단위는 온도·일($^{\circ}\text{C}\cdot\text{일}$, $^{\circ}\text{F}\cdot\text{일}$)이며, 어느 동결 계절 동안의 누가 온도·일에 대한 시간 곡선상의 최고점과 최저점의 차이로 나타낸다.

동결지수의 산정은 일평균기온이 (+)에서 (-)로 변하는 달에서부터 시작하여 일평균기온이 (-)에서 (+)로 변하는 달까지의 일평균기온을 누계하여 동결기간 동안 그리면 그림 1과 같은 곡선을 그릴 수 있다. 이 곡선의 최정점과 최저점 사이의 차이를 동결지수로 정의한다[4].



▶▶ 그림 1. 동결지수 결정

2.2 설계동결지수 산정

포장의 동결깊이를 결정하는데 쓰여 지는 값을 설계 동결지수(design freezing index)라고 한다. 국내의 경우는 동결지수의 산정은 일반적으로 30년 자료 중 온도가 가장 낮은 3개년에 대한 평균치로 산정하거나, 10년 자료 중 온도가 가장 낮은 최대치를 동결지수로 택하여 산정할 수 있도록 제시하고 있다[5].

국외의 경우 미국에서는 30년 또는 10년 자료를 이용하여 동결지수를 산정하고, 일본에서는 10년 자료를 이용하여 동결지수를 산정하고 있다. 기상자료로부터 산정한 동결지수는 공기동결지수(air freezing index)라고

하고, 지표면에서의 온도를 기준으로 동결지수를 산정할 경우에는 지표면동결지수(surface freezing index)라고 한다. 일반적인 지표면의 온도는 기상대에서 측정되는 온도보다 높으므로 지표면동결지수는 공기동결지수보다 낮은 값을 보인다. 동결지수는 측후소 위치에서 관측한 값을 토대로 산정한 것이므로, 식 1과 같이 해당 설계노선의 표고에 대한 보정을 실시해야 한다.

$$\text{수정동결지수} = \text{동결지수} \pm 0.9 \times \text{동결기간} \\ \times \text{표고차(m)/100} \quad (\text{식 1a})$$

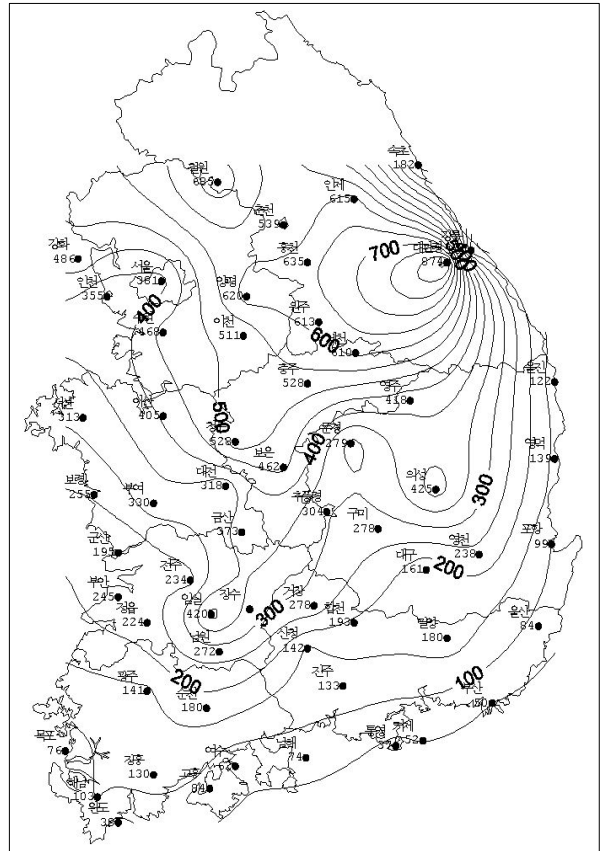
$$\text{여기서, 표고차} = \text{설계노선최고표고(m)} - \text{측후소} \\ \text{지반고(m)} \quad (\text{식 1b})$$

2.3 국내 동결지수 연구 현황

국내 기상자료를 이용한 각 지역의 동결깊이를 결정하기 위하여 40여 년 전부터 동결지수를 산정하여 왔다. 1967년 국립건설 연구소에서는 우리나라에 분포되어 있는 13개 측후소의 기상자료를 이용하여 동결지수를 산정하고 설계 동결지수선도를 발표하였다. 안상진, 백영식 교수(1971)는 수원농업기상측후소에서 1967년에서 1970년까지 각 12월, 1월, 2월, 3월에 실측한 동결깊이 측정 자료를 수집하여 동결지수와와의 상관관계식을 산정하고 20개 지역에 대한 토질별 동결깊이를 발표하였다. 1974년 건설교통부 도로조사단에서는 도로포장 설계를 위하여 외국기술자의 도움을 받아 전국에 대한 동결지수선도를 발표하였다. 이 동결지수는 °F·day로 산정하여 국립건설연구소의 자료에 비해 좀 더 자세히 작성하였다. 1980년에는 건설교통부 도로조사단에서 많은 기상자료를 이용하여 우리나라 22개 측후소와 농업기상 관측소 70개소 등 모두 92개소의 기상자료로부터 동결지수를 산정하여 설계 동결지수선도를 발표하였다.

2002년 한국도로공사에서 수행한 동결지수 적용기준에 관한 연구와 동년 한국건설기술연구원에서 한국형 포장설계기법 개선 및 포장성능 개선방안 연구를 수행하여 작성한 동결지수선도 성과를 근간으로 '03년 건설교통부에서 전국동결지수선도를 개정하였다. 이는 1970년부터 2001년까지 30년간 전국 66개소의 기상측후소에서 관측된 기온자료를 토대로 지역별 동결지수 및 동결기간과 그림 2와 같이 전국의 지역별 동결지수선도를 제시하였다. 그 결과 1980년 건설교통부 도로조사단에서 작성 제시한 동결지수선도와 동결지수는 평균 1.4°C·일이 감소

되었고 동결기간은 0.5일 증가한 것으로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.



▶▶ 그림 2. 전국동결지수선도(건설교통부, 2003)

3. 최근 동결지수 산정 및 분석

3.1 최근 동결지수 산정

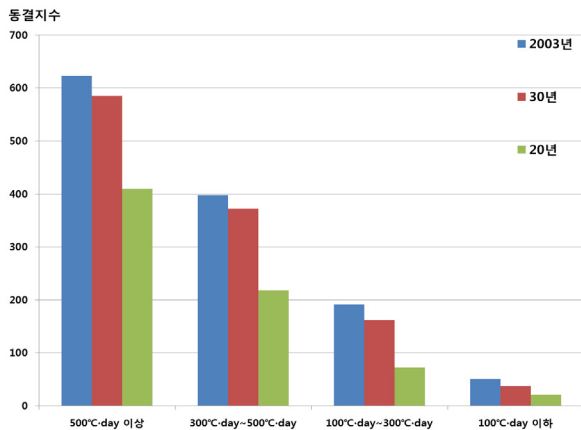
최근 기후를 반영한 동결지수 재산정 및 특성 분석을 위하여 최근 33년간(1979년~2011년)의 동결지수를 산정하였다. 동결지수 산정을 위하여 81개 관측소의 동결기(11월~3월) 기온자료를 기상청으로부터 수집하였다. 수집된 기온자료는 일평균 기온이며 동결기의 일평균 기온값을 누적하여 각 관측소 별로 33년간의 동결지수를 산정하였다.

33년간의 동결지수는 다시 동결지수 특성 분석을 위하여 최근 30년간, 20년간, 10년간 및 5년간의 동결지수로 구분하였다. 30년간의 동결지수는 최대 동결지수 3개년 값을 평균하였고, 20년간의 동결지수는 최대 동결지수 2개년 값을 평균하였다. 10년간 및 5년간의 동결지수는 최대동결지수를 사용하였다.

81개 측후소 자료를 2003년 동결지수선도에 따라 500°C·day 이상, 500°C·day~300°C·day, 300°C·day~100°C·day와 100°C·day 이하로 구분하여 기존 동결지수와 본 연구에서 산정된 동결지수를 비교 하였으며 동결지수의 변화 추이를 분석하였다.

그림 3은 동결지수 크기에 따른 500°C·day 이상, 500°C·day~300°C·day, 300°C·day~100°C·day, 100°C·day 이하의 기존 동결지수와 본 연구에서 산출한 동결지수의 평균값을 비교한 것이다. 최근 30년간의 동결지수는 2003년 동결지수와 큰 차이를 보이지 않았고, 최근 20년간의 자료로 산출된 동결지수는 기존 값과 큰 차이를 나타내었다. 10년간 및 5년간의 동결지수는 20년간 동결지수와 큰 차이를 보이진 않았는데 이는 80년대에 추위가 극심한 해가 많았으며, 그 해의 큰 동결지수가 기존 동결지수 및 30년간 동결지수 산정에 영향을 끼쳤기 때문이다. 즉, 90년대 이후부터 동결지수가 급격히 감소하는 현상을 보였다.

30년간의 동결지수는 2003년 동결지수에 비해 평균 27°C·day 감소하였으며, 20년간의 동결지수는 평균 134°C·day, 10년간, 5년간의 동결지수는 각각 평균 146°C·day, 152°C·day씩 감소하였다.



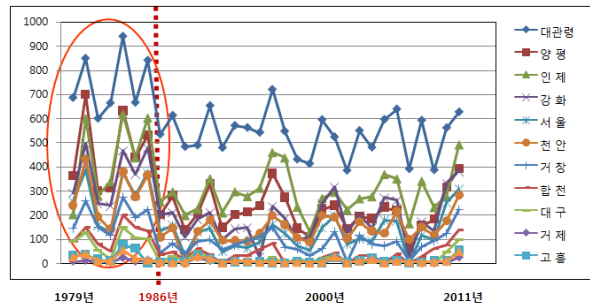
▶▶ 그림 3. 동결지수 비교

3.2 동결지수 변화 추이

동결지수의 분석은 본 연구에서 기상자료를 수집하여 산정한 1979년부터 2011년까지 동결지수 크기별로 대표 지역에 대한 연도별 동결지수 변화 추이를 분석하였다. 그림 4에서 연도별 동결지수의 변화 추이는 1986년을 기점으로 뚜렷하게 감소하는 경향을 알 수 있다. 결과적으로 동결지수 값은 1986년을 기준으로 그 이전 기온자료

의 포함여부에 따라 동결지수 값이 크게 달라지는 것으로 분석되었다.

앞서 30년 및 20년 동결지수 산정 시 두 값이 큰 차이를 보인 이유는 30년 동결지수의 경우 동결지수 산정 시 86년 이전의 동결지수가 사용되었고, 20년 동결지수 산정 시는 86년 이전 동결지수가 제외되었기 때문이다. 이는 표 1의 30년 동결지수 산정 시 최대치 3개년 사용빈도에서도 잘 나타나 있다. 즉 30년 동결지수 산정 시 추위가 극심했던 1980년, 1983년 및 1985년의 동결지수 최대치 3개년 값으로 사용되었고, 20년 동결지수 산정 시에는 제외되어 두 값 사이에 큰 차이를 나타냈다.



▶▶ 그림 4. 연도별 동결지수 비교

표 1. 30년도 동결지수 산정 시 최대치 3개년 사용빈도

지역	동결지수 최대치 3년 사용빈도			사용빈도			
	30년 동결지수	최대치 3년	지역	30년 동결지수	최대치 3년	해당 연도	사용 횟수
속초	159.0	80,83,85	함천	165.6	80,83,84	79년	6
대관령	876.3	80,83,85	거창	250.4	80,83,85	80년	54
춘천	519.0	80,83,85	영천	194.4	80,83,85	81년	1
강릉	140.3	80,83,85	구미	253.0	80,83,85	82년	0
서울	379.4	80,83,85	의성	415.7	80,83,85	83년	58
인천	347.3	80,83,85	영덕	115.4	80,83,84	84년	13
원주	602.4	80,83,85	문경	255.0	80,83,85	85년	37
울릉도	108.4	80,83,94	영주	396.9	80,83,85	86년	0
수원	456.5	80,83,85	성산포	0	-	87년	0
충주	499.5	80,83,85	고흥	58.6	80,83,84	88년	0
서산	290.7	80,83,85	해남	64.2	79,81,83	89년	4
울진	102.5	80,83,85	장흥	94.7	80,83,84	90년	0
청주	400.3	80,83,85	순천	144.2	80,83,84	91년	0
대전	288.2	80,83,85	남원	250.7	80,83,85	92년	0
추풍령	287.9	80,83,85	정읍	187.1	80,83,84	93년	0
포항	70.6	80,83,84	임실	411.6	80,83,85	94년	1
군산	166.9	80,83,85	부안	211.8	80,83,85	95년	1
대구	125.7	80,83,84	금산	313.3	80,84,85	96년	0
전주	206.2	80,83,85	부여	319.8	80,83,85	97년	0
울산	55.9	80,83,89	보령	233.2	80,83,85	98년	0
광주	109.4	80,83,84	아산	392.7	80,83,85	99년	0
부산	34.4	79,80,83	보은	447.5	80,83,85	00년	4
통영	26.7	79,83,00	제천	610.3	80,83,85	01년	0
목포	46.7	79,80,83	홍천	635.5	80,83,85	02년	0
여수	44.3	79,80,83	인제	607.4	80,83,85	03년	0
완도	19.3	79,83,00	이천	494.4	80,83,85	04년	1
제주	3.3	80,83,89	양평	619.6	80,83,85	05년	0
남해	40.8	80,83,89	강화	479.5	80,83,85	06년	0
거제	23.8	83,89,00	진주	118.5	83,84,85	07년	0
산청	114.4	80,83,84	서귀포	0	-	08년	0
밀양	149.5	80,83,84	철원	465.1	95,00,04	합계	180

현재 사용 중인 30년 동결지수는 80년대 초 기온자료를 토대로 산정된 값이며 현재의 기후변화를 반영하지 못하고 있다. 이는 현재 도로 동상설계 시 과다설계의 원인이 될 수 있어 20년 동결지수를 설계에 적용하였을 때 현 30년 동결지수를 적용한 설계에 비해 동상방지층 감소 효과가 어느 정도인지 살펴보았다. 표 2는 기존 2003년에 개정된 동결지수값을 사용하여 설계된 동결깊이와 본 연구를 통해 산정된 20년 동결지수를 사용하여 설계한 동결깊이를 비교한 것이다. 표 2에서 알 수 있듯이 20년 동결지수 적용 시 현 설계방법에 비해 뚜렷한 동상방지층 절감 효과를 가질 수 있다.

표 2. 20년 동결지수 포장적용 예

포장구간	측후소	적용 측후소 [동결지수(°C 일)/동결기간(일)]		동결깊이(cm)		
		기존 (2003년)	변경 (20년)	기존	변경	감소
인풍-옥계	남원	272.4/67	138.1/82	86	73	13
순창-운암	임실	420.3/86	232.2/90	86	59	27
이화-석천	서산	402.4/79	178.4/62	84	51	33
행복도시	대전	317.7/80	115.7/53	76	45	31
관산-벽계	서울	387.0/80	191.4/66	90	59	31
쌍림-고령	합천	193.0/62	72.2/48	60	41	19
영광-대산	정읍	223.9/61	79.7/31	60	40	20
평장-정선	제천	610.2/91	438.9/05	110	90	20
전곡-영중	서울	380.9/80	188.4/66	90	60	30
인천청라	인천	354.7/78	172.3/62	80	55	25
고삼-삼죽	이천	511.0/89	253.4/73	100	70	30
올림픽대로 방화-행주	서울	380.9/80	188.4/66	85	56	29
용두-동면	아산	446.4/78	205.9/74	94	63	31
화평-상환	이천	552.0/89	253.4/73	97	68	29

4. 동결지수 적용 방안

동결지수는 그동안 포장도로의 동결깊이를 결정하는데 가장 중요한 요소로서 포장 구조체와 노상도를 동결시키는 대기온도의 높낮이와 지속기간의 누가영향(cumulative effect)으로 정의하여 사용해왔다. 현재는 2003년도에 개정된 동결지수를 사용하여 동결깊이를 결정하고 있다. 앞서 동결지수 변화 추이 분석을 통해 나타났듯이 현재 사용 중인 2003년도 동결지수는 1986년 이후 기온이 상승하였으나 이런 기후 변화를 전혀 반영하지 못하고 있다. 지구온난화 등으로 인한 기온상승이 계속되고 있는 현실점에서 기후 변화를 전혀 반영하지 못한 동결지수를 설계에 사용하는 것은 문제가 있다. 이는 동상 설계 시 과다 설계로 이어져 비경제적인 도로 시공을 유발한다. 따라서 기후 변화를 잘 반영할 수 있는 20

년 동결지수를 도로 동상설계에 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

참고문헌

- [1] 가열 아스팔트 혼합물의 생산 및 시공 지침, 국토해양부, 2009
- [2] 도로설계편람 II권, 포장편, 건설교통부, 2000
- [3] 도로 동상방지층의 효율성 검증 및 설치기준 연구 보고서, 국토해양부, 2010
- [4] E. J. Yoder, M. W. Witzczak, Principles of Pavement Design, John Wiley & Sons, 1975
- [5] 도로설계편람 제5편 교량, 국토해양부, 2008년

저자소개

● 전 종 명(Jongmyung Jeon)



- 2004년 2월 : 경희대학교 토목공학과 (공학사)
- 2006년 2월 : 경희대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2012년 2월 : 경희대학교 토목공학과 (공학박사)

• 2013년 3월 ~ 현재 : 경희대학교 사회기반시스템 공학과 강사
<관심분야> : 도로공학, 도로포장설계, 도로포장 재료

● 이 상 염(Sang-Yum Lee)



- 1998년 2월 : 경희대학교 토목공학과 (공학사)
- 12000년 8월 : 경희대학교 토목공학과 (공학석사)
- 12007년 12월 : North Carolina 주립대학교 토목공학과 (공학박사)
- 12014년 9월 ~ 현재 : 서울시 품질시험소 도로포장연구센터장

<관심분야> : 건설, 도로, 도시 안전

● 이 석 근(Sukkeun Rhee)



- 1980년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (학사)
- 1987년 3월 : University of Washington (공학석사)
- 1991년 5월 : University of Texas A&M (공학박사)
- 1994년 7월 : 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

• 1994년 9월 ~ 현재 : 경희대학교 사회기반시스템공학과 교수
<관심분야> : 도로, 교통, 토목시공학, 공항공학, 도로포장 공용성 평가 및 비파괴시험