기후환경 변화를 고려한 동결지수 연구

Development of Freezing Index Considering Climate Change

전종명* · 이석근** · 김인태*** · 임정용**** · 한용진*****
Jeon, Jong Myung · Rhee, Suk Keun · Kim, In Tae · Lim, Jung Yong · Han, Yong Jin

1. 서 론

동상파괴(frost damage)는 동결과정에서 융기, 즉 동상(frost heaving)과 융해시 지지력 감소로 대별된다. 특히 도로포장에서의 동상은 융해과정의 강성 감소 영향이 매우 중요해서, 영구동토지역 또는 LNG 저장시설 등에서의 동상과는 공학적으로 매우 큰 차이가 있다. 현재 설계법은 동결깊이의 결정에 있어 기온자료를 분석하여 만든 동결지수를 근간으로 하여 동결지수와 동결깊이의 상관관계식으로부터 동결깊이를 산정하여 동상방지층의 두께를 일률적으로 결정한다. 그러나 실제 포장내 토사들의 함수비는 계절적으로 변하고 있으며 포장내 토사의 함수비는 동결깊이와 밀접한 관계를 가지고 있다. 하지만 국내의 동결깊이 산정식은 이러한 사실들을 고려하지 못하고 더욱이 포장재료들의 열적 특성조차 반영하지 못하고 있는 실정이다. 이러한 동결깊이를 포장구조설계에 적용하다 보니 포장설계의 부실 내지는 과다설계의 우려가 있다. 또한 동결깊이 산정에 사용하는 동결지수는 2003년 건설교통부에서 발표한 기준을 적용하고 있으나 기후 온난화 현상 등 변화된 기상조건을 반영하여 현실에 적합한 동결지수 재산정과 이를 통한 도로포장설계의 동결심도 산정 시 적정 기준을 제시할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 전국 81개 측후소의 최근 30년(1979년~2008년)간의 기후자료를 수집하였다. 최근 기후의 변화에 따른 동결지수 특성을 파악하기 위하여 최근 30년간, 20년간, 10년간, 5년간 각각의 기간에 대한 동결지수 특성을 비교 분석하였다.

2. 기후자료 수집 및 분석

본 연구에서는 기후환경 변화를 고려한 동결지수 특성을 분석하기 위하여 기상청으로부터 81개 측후소의 최근 30년(1979년~2008년)간의 기후자료를 수집하였다. 관측대상 기상 측후소는 표 1과 같다. 30년간 각 해마다 동절기인 11월부터 3월까지 5개월간의 일평균 기온을 수집하였다. 수집한 자료는 그림 1과 같이 5개월간의 데이터를 누적하여 그래프로 나타내어 동결지수 및 동결기간을 산정하였다.

* 학생회원 · 경희대학교 토목공학과 도로연구실 · 박사과정 · 031-201-2923(E-mail: rang-ne@hanmail.net)
** 정회원 · 경희대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 031-201-2900(E-mail : skrhee@khu.ac.kr)
*** 정회원 · 명지대학교 교통공학과 조교수 · 공학박사 · 031-330-6505(E-mail : kit1998@mju.ac.kr)
**** 학생회원 · 명지대학교 교통공학과 · 석사과정 · 031-201-2923(E-mail: iiijjjyyy@hanmail.net)
***** 학생회원 · 경희대학교 토목공학과 도로연구실 · 석사과정 · 031-201-2923(E-mail: ssocom@nate.com)

표 1. 관측대상 기상측후소

강릉	강화	거제	거창	고산	고창	고흥	광주	구미
군산	금산	김해	남원	남해	대관령	대구	대전	동두천
동해	마산	목포	문경	문산	밀양	백령도	보령	보은
봉화	부산	부안	부여	북강릉	산청	상주	서귀포	서산
서울	성산	속초	수원	순창	순천	안동	양평	여수
영광	영덕	영월	영주	영천	완도	울릉도	울산	울진
원주	의성	이천	인제	인천	임실	장수	장흥	전주
정읍	제주	제천	진도	진주	천안	철원	청주	추풍령
춘천	충주	태백	통영	포항	합천	해남	홍천	흑산도

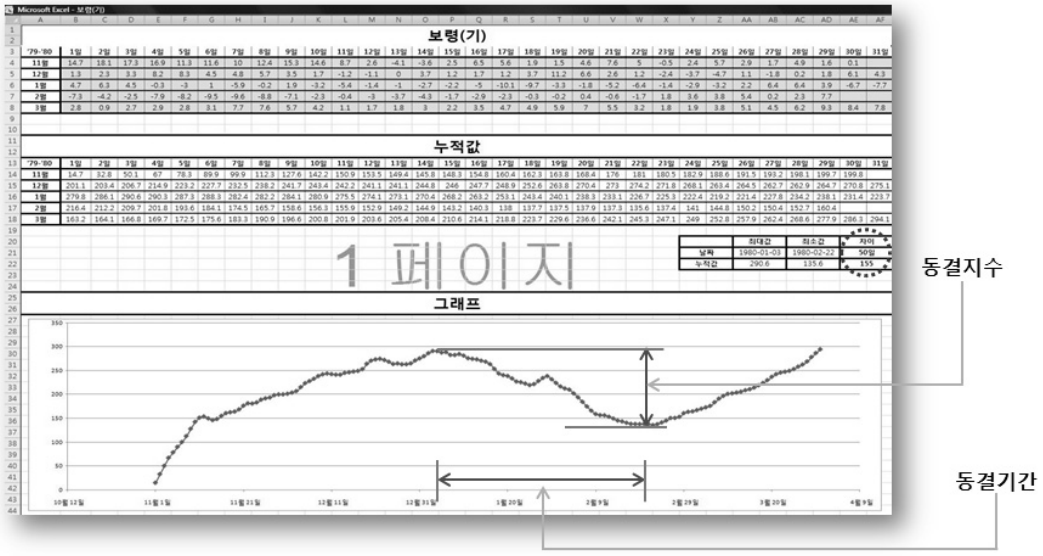

그림 1. 기후자료 분석

3. 동결지수 특성 분석

3.1 동결지수의 정의

동결지수는 포장내의 동결관입깊이를 산정하기 위한 대표적 척도로써, 포장구조와 노상토를 동결시키는 대기온도의 강도와 지속기간의 누가영향으로 표시된다. 동결지수의 단위는 ℃·days이며, 그림 1과 같이 어느 동결 계절동안의 누가 온도·일에 대한 시간곡선상의 최고점과 최저점의 차이로 나타나다. 동결지수의 산정은 대상지역의 인근측후소에서 관측한 월평균대기온도의 크기와 지속기간에 대한 30년 기록을 토대로 한다. 도로포장의 동결심도를 결정하는데 사용하는 값을 설계동결지수라고 하는데 설계동결지수의 산정은 대상 인근 측후소에서 관측한 월 평균 대기온도의 크기와 지속기간에 대한 30년간의 기상자료에서 추위가 가장 심하였던 3년간(즉 동결지수의 최대 3년치)의 평균동결지수로 정한다. 만일 30년간의 기상자료가 없으면 최근 10년간의 최대동결지수를 설계동결지수로 산정한다.

3.2 동결지수 분석

각 측후소 별로 30년간 기후자료를 수집하여 동결지수를 산정하였으며, 기후환경 변화에 따른 동결지수 특성을 파악하기 위하여 최근 30년간, 20년간, 10년간, 5년간의 동결지수를 산정하였다. 30년간의 동결지수는

최대 동결지수 3개년 값을 평균하였고, 20년간의 동결지수는 최대 동결지수 2개년 값을 평균하였다. 10년간 및 5년간의 동결지수는 최대동결지수를 사용하였다. 또한 기존 1980년에 작성된 동결지수와 2003년에 작성된 동결지수와 비교 분석하였다. 81개 측후소 자료를 2003년 동결지수선도에 따라 500℃·day, 500℃·day～300℃·day, 300℃·day～100℃·day와 100℃·day 이하로 구분하여 기존 동결지수와 본 연구에서 산정된 동결지수를 비교하였다.

3.2.1 동결지수 500℃·day 이상

표 2와 그림 2는 동결지수가 500℃·day이상인 지역의 기존 동결지수와 본 연구에서 산출한 동결지수를 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 않았으며 이는 80년대 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 37℃·day 감소하였으며, 20년간의 동결지수는 평균 214℃·day가 감소하였다.

표 2. 동결지수 비교(동결지수 500℃·day 이상)

측후소	1980년	2003년	본 연구(2009년)			
	30년	30년	30년	20년	10년	5년
대관령	799.4	873.8	802.9	685.9	637.9	637.9
양 평	480	619.7	619.6	349.4	239.3	231.5
원 주	-	613	602.4	327.3	276.7	276.7
이 천	413.9	511	494.4	253.4	258.1	229.8
인 제	525	614.5	607.4	448.5	369.0	369.0
제 천	526.1	610.2	610.3	438.9	389.4	335.6
철 원	-	685	465.1	473.2	449.2	448.9
춘 천	457.2	539	519.0	346.0	339.5	316.7
충 주	445.6	528.4	499.5	313.9	290.4	290.4
홍 천	576.7	635.4	635.5	455.0	377.9	377.9

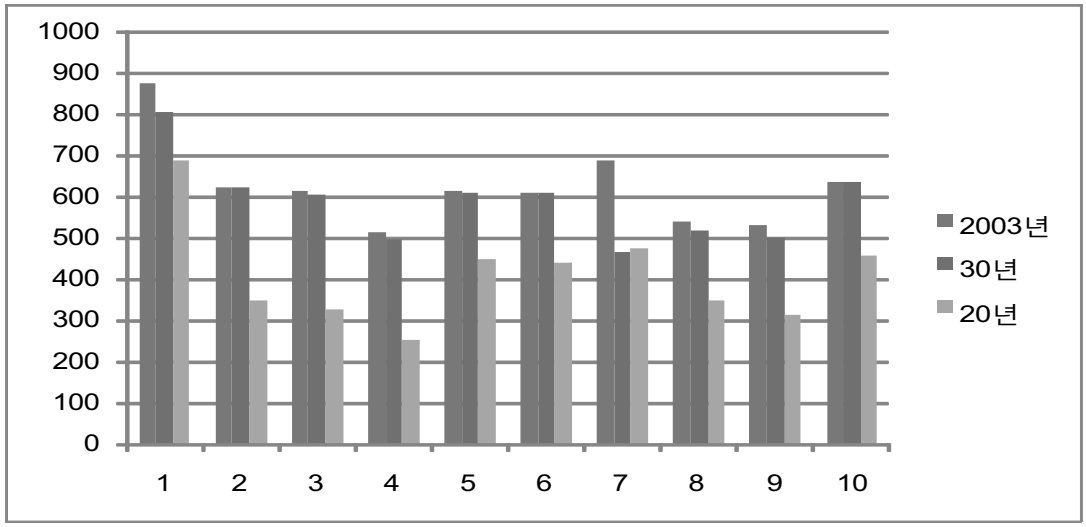

그림 2. 동결지수 비교(동결지수 500℃·day 이상)

3.2.2 동결지수 300℃·day ~ 500℃·day

표 3과 그림 3과 같이 동결지수가 300℃·day ~ 500℃·day인 지역의 동결지수를 비교하였다. 표 2에서와 같이 1980년, 2003년, 최근 30년간의 동결지수는 큰 차이를 나타내지 않는다. 그러나 최근 20년간의 동결지수는 기존 동결지수와 큰 차이를 나타내며 이 또한 80년대 극심한 추위를 보인 해가 많았기 때문이다. 30년간의 동결지수는 2003년 값과 평균 약 26℃·day의 차이를 나타내었으며, 20년간의 동결지수는 평균 약 180℃·day 정도 감소하였다.

표 3. 동결지수 비교(동결지수 300℃·day ~ 500℃·day)

측후소	1980년	2003년	본 연구(2009년)			
	30년	30년	30년	20년	10년	5년
강 화	449.4	486.2	479.5	292.6	314.3	270.8
금 산	388.3	372.5	313.3	207.9	177.0	177.0
대 전	346.1	317.7	288.2	115.7	95.1	92.3
동두천	-	496	327.5	357.5	373.0	341.9
보 은	436.7	461.7	447.5	311.8	251.4	251.4
부 여	322.8	330	319.8	162.8	170.5	170.5
서 산	340.6	313.2	290.7	178.4	182.7	174.1
서 울	408.9	380.9	379.4	188.4	198.1	178.6
수 원	445	468.4	456.5	184.7	191.5	176.8
영 주	397.2	417.8	396.9	238.3	197.4	170.4
의 성	399.4	425.2	415.7	296.2	214.1	214.1
인 천	373.3	354.7	347.3	172.3	178.5	166.0
임 실	347.8	420.3	411.6	232.2	206.1	205.4
천 안	406.7	405.4	392.7	205.9	214.2	214.2
청 주	350	411.6	400.3	169.7	145.1	145.1
추풍령	304.4	303.9	287.9	177.8	179.0	176.6

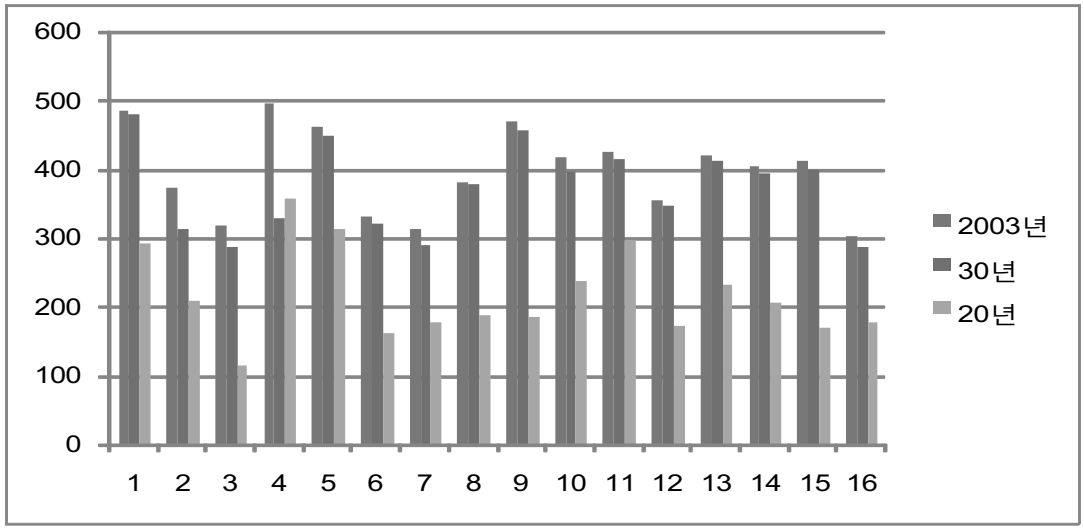

그림 3. 동결지수 비교(동결지수 300℃·day ~ 500℃·day)

3.2.3 동결지수 100℃·day ~ 300℃·day

표 4. 동결지수 비교(동결지수 100℃·day ~ 300℃·day)

측후소	1980년	2003년	본 연구(2009년)			
	30년	30년	30년	20년	10년	5년
강 릉	171.7	167.2	140.3	42.3	38.9	38.9
거 창	305	278.2	250.4	138.9	129.3	91.9
광 주	167.8	141.4	109.4	40.9	42.7	42.7
구 미	298.9	278.1	253.0	103.9	93.6	93.6
군 산	238.9	194.9	166.9	82.2	100.7	100.7
남 원	258.3	272.4	250.7	138.1	128.3	128.3
대 구	190	160.9	125.7	40.9	32.9	11.3
문 경	296.1	279.4	255.0	172.3	173.4	173.4
밀 양	212.8	180.2	149.5	55.6	67.8	67.8
보 령	286.1	254.8	233.2	73.9	83.8	83.8
부 안	287.2	244.7	211.8	75.3	80.6	80.6
산 청	181.1	141.8	114.4	46.0	37.9	37.9
속 초	212.2	181.6	159.0	83.1	93.7	72.4
순 천	120.6	179.9	144.2	80.1	97.9	97.9
영 덕	204.4	138.8	115.4	43.7	43.8	41.2
영 천	257.8	237.8	194.4	100.8	107.1	107.1
울릉도	121.1	129.3	62.7	30.5	26.3	21.6
울 진	127.8	121.6	100.2	39.0	37.3	8.4
장 흥	182.2	130.1	94.7	39.4	32.3	32.3
전 주	218.3	233.5	206.2	71.6	80.8	80.8
정 읍	243.9	223.9	187.1	79.7	96.6	96.6
진 주	138.9	132.8	118.5	48.6	54.7	54.7
합 천	231.1	193	165.6	72.2	62.5	62.5
해 남	157.8	102.6	70.3	26.2	22.2	12.5

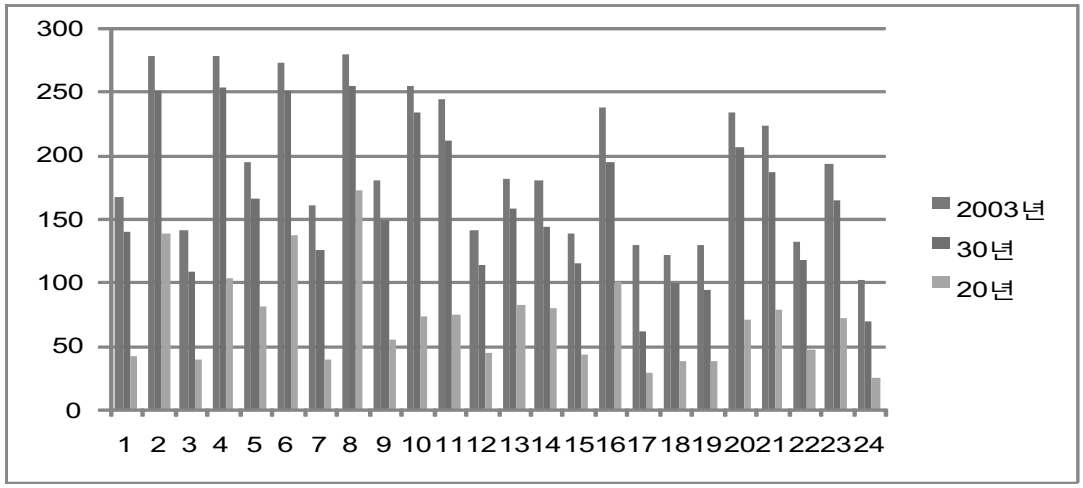

그림 4. 동결지수 비교(동결지수 100℃·day ~ 300℃·day)

표 4와 그림 4는 동결지수 100℃·day ~ 300℃·day인 비교적 따뜻한 지역의 동결지수를 나타낸 표와 비교 그래프이다. 이 지역 또한 90년대부터 동결지수가 감소하는 현상을 보여 30년간의 동결지수는 기존 동결지수와 큰 차이를 보이지 않았으며 최근 20년간의 동결지수부터는 큰 차이를 보였다. 30년간의 동결지수는 2003년 동결지수에 비해 평균 30℃·day의 감소를 보였으며, 20년간의 동결지수는 평균 120℃·day정도의 감소를 보였다.

3.2.4 동결지수 100℃·day 이하

표 5. 동결지수 비교(동결지수 100℃·day 이하)

측후소	1980년	2003년	본 연구(2009년)			
	30년	30년	30년	20년	10년	5년
거 제	86.7	52.1	23.8	23.9	23.1	5.5
고 흥	112.8	83.5	58.6	28.2	22.1	9.4
남 해	83.9	74.3	40.8	27.6	26.2	8.4
목 포	83.3	75.6	46.7	25.5	23.8	17.9
부 산	64.4	49.6	28.8	22.6	22.3	11.4
서귀포	-	0	0.0	0.0	0.0	0.0
성 산	-	-	38.8	12.9	15.6	4.7
여 수	72.2	62.2	44.3	19.1	21.0	9.5
완 도	72.8	38.1	39.0	15.3	20.3	10.2
울 산	96.7	83.6	55.9	30.3	25.0	8.5
제 주	-	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0
통 영	53.9	37.4	38.7	37.5	55.9	2.0
포 항	118.3	98.5	71.7	34.6	32.3	28.6

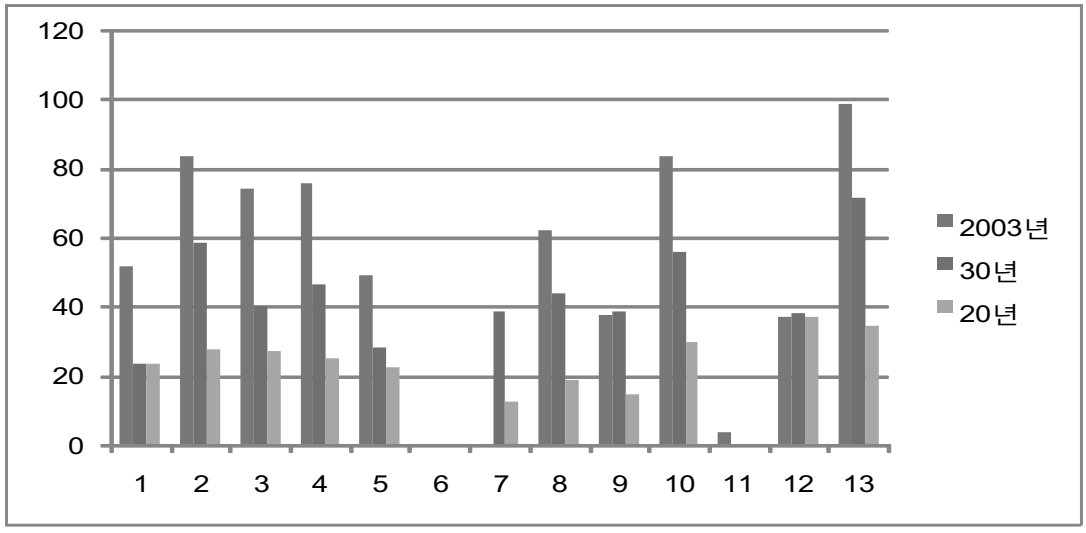

그림 5. 동결지수 비교(동결지수 100℃·day 이하)

표 5는 동결지수 100℃·day 이하의 매우 따뜻한 지역의 동결지수를 보여준다. 기존의 동결지수가 매우 작은 값을 보였지만 80년대의 기후 데이터가 배제된 즉, 최근 기후를 고려한 20년간, 10년간의 동결지수는 그

보다 더 감소했음을 알 수 있다. 큰 동결지수를 보이는 지역에 비해 감소치가 적지만 30년간의 동결지수는 2003년의 동결지수에 비해 평균 13℃·day가 감소하였고, 20년간의 동결지수는 평균 29℃·day가 감소하였다. 특히 제주도의 서귀포 및 제주의 동결지수는 0℃·day을 나타내었다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구는 전국 81개 측후소의 최근 30년간(1979~2008)의 기후자료를 수집하여 동결지수를 산출하였다. 최근 30년간, 20년간, 10년간과 5년간의 각각의 동결지수를 산출하여 기존의 동결지수와 비교·분석 하였다. 비교 결과는 다음과 같다.

1) 기존 동결지수(1980년, 2003년)에 비해 본 연구에서 30년간의 기후자료를 토대로 작성된 동결지수는 정도의 차이는 있지만 거의 모든 지역에서 감소하였다.

2) 2003년의 동결지수와 비교할 때 최근 30년간의 동결지수는 기존 값과 큰 차이를 보이지 않았으며 최근 20년간의 동결지수는 기존 값에 비해 현저하게 감소하였으며 10년간의 동결지수와 5년간의 동결지수는 20년간의 동결지수와 큰 차이를 보이지 않았다.

3) 동결지수의 크기별로 지역을 구분하여 기존 동결지수와 비교하였으며 평균 동결지수 감소량은 다음 표와 같다. 표에 나타난 바와 같이 동결지수가 큰 지역일수록 동결지수 감소폭이 크게 나타났다.

동결지수 구분	2003년 평균 동결지수	30년 평균 동결지수	평균 감소량	20년 평균 동결지수	평균 감소량
500℃·day 이상	623.0	585.6	37.4	409.1	213.9
500℃·day~300℃·day	397.8	372.2	25.7	218.2	179.6
300℃·day~100℃·day	191.6	161.6	30.0	79.1	119.8
100℃·day 이하	50.7	37.5	13.2	21.3	29.4

4) 이와 같은 결과는 80년대에 추위가 심한 해가 많아 그 해의 큰 동결지수가 기존 2003년 동결지수 및 최근 30년간의 동결지수 산출에 반영되었기 때문이다.

5) 즉, 90년대부터 전 지역에 걸쳐 동결지수가 감소하는 현상이 뚜렷이 나타났다. 이는 90년대부터 기온이 상승하여 기존 동결지수 및 30년간 기후조건을 대상으로 동결지수와 최근 20년간, 10년간 및 5년간의 동결지수와의 큰 차이를 보이게 된다.

6) 향후 본 연구를 통하여 국내 상황에 맞는 동결지수를 결정하고 최근 기후를 고려한 동결지수선도를 제시하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업인 “도로 동상방지층의 효용성 검증 및 설치기준 연구”의 과제 일환으로 작성되었습니다. 본 연구의 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

건설부 도로국 도로조사단(1980), “동결지수에 관한 조사보고서”
기상청 홈페이지 순별기상자료 http://www.kma.go.kr
이경하, 옥창권, 김인수(2003), “동결지수 적용기준에 관한 연구”, 한국도로공사 도로교통연구원 2003년도 연구보고서