

Methylene Blue 동결심도계에 의한 전국 동결심도 조사

An Investigation of Frost Penetration Depth by Methylene Blue in Korea

김영진* · 홍승서**

Kim, Young Chin · Hong, Seung Seo

Abstract

Many public facilities including roadway, railway, and embedded pipe lines in this country have been damaged by the repeated freezing and thawing of the soil during winter and spring every year.

However, there are only few research results in field of frozen ground in this country.

Also, there is no the formulation of the reasonable equation for frost penetration depth and of the criterion for identifying potentially frost-susceptible soil in design manual of pavement yet.

Through this paper it is anticipated to asses the frost action problem in roadway, railway, and water supply lines and to establish the design criterion about pavement in seasonal cold region.

요 지

우리나라에서도 과거에 전국 각 지역의 동결깊이를 조사한 적이 있다. 그러나, 그 당시 삽으로 지반을 파서 땅이 언 상태를 눈으로 확인하는 방법을 적용하였으므로 측정자료의 신빙성이 많이 떨어졌다. 즉, 지반이 동결될 때 기후조건이나 지반조건에 따라서는 동결이 되어도 빙정이 눈에 보이지 않는 경우도 있으며, 실제 도로나 공항은 아스팔트나 콘크리트 표층·기층 및 자갈 보조기층 등으로 구성되어 있어 맨땅의 동결깊이와는 다른 양상을 나타낸다. 따라서 국내 설계회사에서는 아직도 우리와 제반 조건이 다른 환경에서 개발한 동결깊이 산정식 즉, 미공병단 동결깊이 산정식을 이용하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 최신 동결깊이 측정장비인 Methylene Blue를 사용하여 실제 도로가 축조된 현장에서 장기간 동결깊이를 측정하여 국내 기후조건 및 지반조건에 맞는 동결깊이 산정식을 제안하고자 한다.

1. 서 론

우리나라는 계절 동토지대이다. 따라서 매년 동절기에 기온이 영하로 떨어지면 지반에 동상현

* 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원 · 공학박사 · 031-910-0215 · E-mail:yckim@kict.re.kr

** 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원 · 공학석사 · 031-310-0525 · E-mail:sshong@kict.re.kr

상(frost heaving)이 발생하고 이로 인하여 도로, 철도, 공항, 매설관, 절토사면, 항만 내 포장 등이 팽창·융기하여 파손됨으로써 인명사고나 구조물의 수명단축으로 많은 경제적 비용손실을 야기하게 된다. 이와 같이 동상으로 인한 구조물의 피해를 방지하기 위해서는 동결이 발생하는 노상지반을 동결이 발생하지 않는 자갈 등으로 치환하여야 하는데 이때 필요한 치환 깊이를 결정하기 위해서는 기후조건 및 지반의 성질에 맞는 최대동결깊이를 산정하는 식을 개발하여 구조물의 기초설계나 시공 등에 활용하여야 한다. 현재 국내 시공 및 설계회사들은 미국 공병단에서 사용하는 동결깊이 산정식을 도로, 철도, 매설관, 공항 포장, 항만 포장 설계 시 이용하고 있는데 미국은 우리나라와 기후나 지반성질이 달라서 이 식을 그대로 적용하기에는 문제가 따른다.

따라서 본 논문은 동결심도 전국 국도상의 79개 지점에 대해 자체 개발한 Methylene Blue 동결심도계를 직접 매설하여 측정한 동결심도 측정자료(1991~2004)와 기상청의 기상자료에서 산출한 최근 30년간 동결지수 측정자료(1973~2002)를 이용하여 국내 기후 지반조건에 적합한 동결깊이 산정식을 개발하고, 우리 실정에 맞는 동상방지층 설계기준을 개발하기 위한 기초연구이다.

2. KICT Methylene Blue 동결심도계

2.1 동결심도 측정원리 및 장비구성

이 장비는 1963년 스웨덴의 Gandahl이 개발한 동결심도계를 모델로 한국건설기술연구원에서 자체 제작한 것으로 그림 1과 같이 직경 24mm의 플라스틱 외관 안에 직경 16mm와 직경 10mm의 2중관으로 된 특수 아크릴 파이프가 들어 있다. 이 케이싱과 튜브는 예상되는 동결깊이를 초과하는 깊이(150cm로 제작)까지 연직하게 관입한 보오링공 속에 삽입한다. 안쪽에 있는 아크릴관에는 청색의 Methylene Blue 용액이 채워져 있으며 이 용액은 상온에서는 청색을 유지하지만 기온이 0℃이하가 되면 색이 무색으로 변한다. 동결깊이는 케이싱에서 내부의 아크릴관을 외부로 꺼내어 용액이 얼어서 무색으로 변한 곳과 얼지 않은 곳의 청색의 경계선까지 측정하여 동결심도를 측정하게 된다.

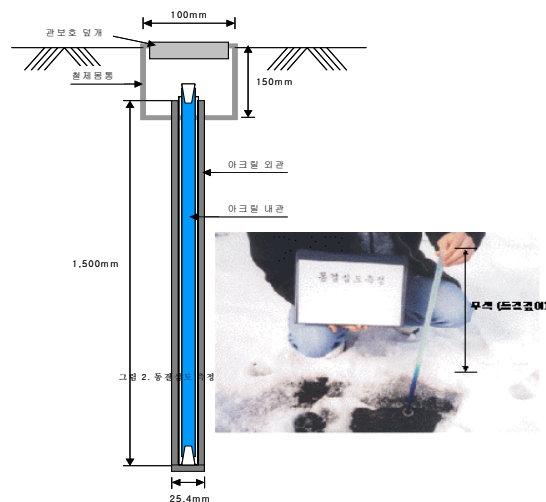


그림 1. Methylene Blue 동결심도계

2.2 Methylene Blue 동결심도계의 설치 현황

그림 2는 Methylene Blue 동결심도계의 설치작업을 순서대로 나타낸 것이다. Methylene Blue 동결심도계의 매설지점은 전국 국도상에서 설치하여 인근지역에서 도로건설시 설계에 반영할 수 있도록 하였다. 또한 Methylene Blue 동결심도계의 매설지역에 대한 지반 및 지형적 특성, 고도 및 음양 조건 등을 고려하여 매설하였다. Methylene Blue 동결심도계 매설연도 및 매설위치는 각각 다음의 표 1과 그림 3에 나타내었다.



(a) 위치 선정



(b) 아스팔트 코어링 작업



(c) 굴착작업



(d) 외부 아크릴 케이싱 설치



(e) 투명 아크릴관 설치



(f) 설치완료

그림 2. 동결심도계 설치 과정

표 1. Methylene Blue 동결심도계의 매설현황

연 도	매 설 개 소
1990	1
1991	5
1992	5
1993	9
1994	8
1995	8
1996	19
1997	15
1998	0
1999	0
2000	1
2001	2
2002	1
2003	4
합 계	79

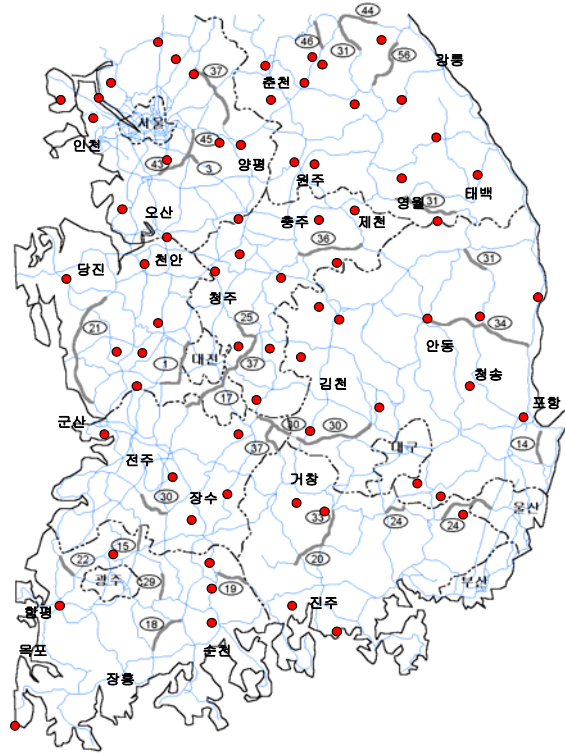


그림 3. Methylen Blue 동결심도계의 매설 지점

3. 최근 30년 기상자료에 의한 동결지수선도 작성

3.1 동결지수 산정의 필요성

현재 국내에서는 도로포장의 동결심도를 결정하기 위하여 사용하는 동결지수는 1949년부터 1978년까지 도로 조사단(1980)에서 작성한 동결지수선도를 이용하고 있다. 그러나, 1980년대 중반 이후 지구 온난화로 인한 지구환경의 변화가 계속되면서 기상자료가 많이 달라지는 것은 누구나 실감하고 있다. 따라서 현 시점에서 동상방지층을 설계할 때는 최근의 기상자료를 사용하여 동결지수를 산정해야 한다.

본 연구에서는 전국 50개의 기상측후소의 기상자료를 이용하여 최근 30년간의 동결지수를 작성한 후, 최근 30년간(1973~2003)의 동결지수선도를 작성하였다. 또한 이 자료를 기존의 동결심도 산정모델에 적용하여 같은 지역에서 달라진 동결지수에 따라 동결심도가 어떻게 변화되는지를 분석하였다.

3.2 동결지수 산정 방법

동결지수(frost index)는 포장내의 동결심도를 산정하기 위한 대표적 척도로서, 포장구조와 노

상토를 동결시키는 대기온도의 강도와 지속기간의 누가영향(cumulative effect)으로 정의된다. 동결지수의 단위는 온도·일($^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$)이며, 어느 동결기간 동안의 누가 온도·일에 대한 시간 곡선상의 최고점과 최저점의 차이로 결정한다(그림 4 참조).

3.3 동결지수 산정 및 전국 동결지수선도 작성

그림 4와 같은 방법으로 전국 50개의 기상청 측후소의 30년(1973년~2002년) 기상자료(일평균 온도)를 바탕으로 동결지수와 동결지속기간을 산정하였다. 그림 5는 강원도 홍천지역의 동결지수(1993~1995)를 도시한 예이다.

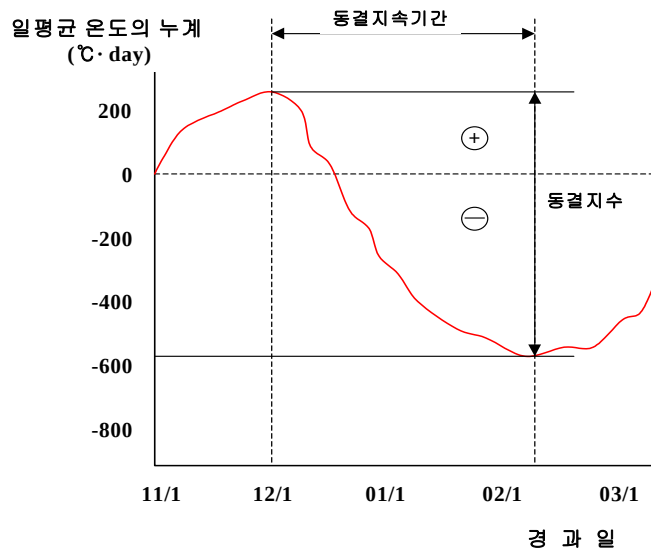


그림 4. 동결지수 산정 방법

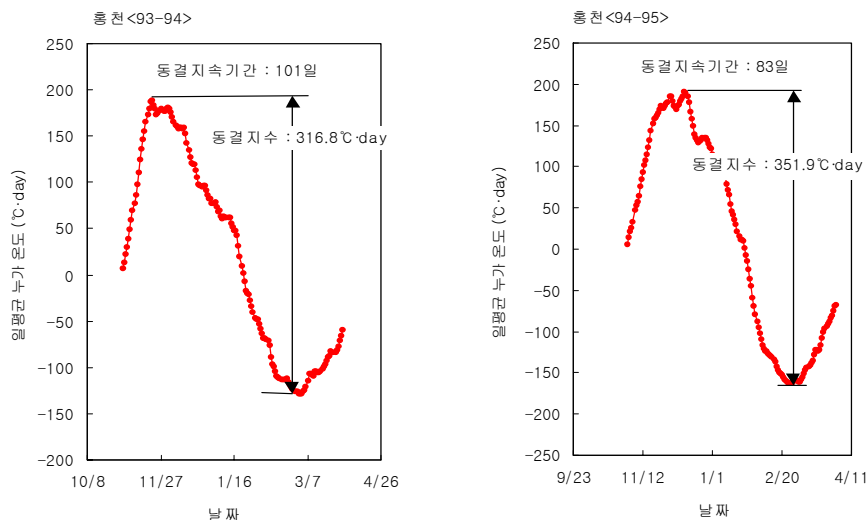


그림 5. 동결지수 산정 예 (강원도 홍천, 1993~1995)

표 2는 최근 30년간(1973~2003)의 동결지수와 도로조사단(1980)에서 산정한 30년 동결지수 중 동일지역 40개 측후소의 동결지수를 나타낸 것이다.

표 2. 최근 30년간 동결지수와 기존 동결지수 비교

측후소	동결지수 (°C · day)		동결지수差	측후소	동결지수 (°C · day)		동결지수差
	30년 동결지수 (1973~2003)	30년 동결지수 (1949~1978)			30년 동결지수 (1973~2003)	30년 동결지수 (1949~1978)	
1. 서울	381.0	408.9	-27.9	21. 안동	321.0	341.7	-20.7
2. 인천	347.3	373.3	-26.0	22. 포항	100.4	118.3	-17.9
3. 강화	484.8	449.4	35.4	23. 영주	417.7	397.2	20.5
4. 수원	468.8	445.0	23.8	24. 영덕	138.7	204.4	-65.7
5. 양평	619.5	480.0	139.5	25. 문경	279.4	296.1	-16.7
6. 강릉	167.2	171.7	-4.5	26. 울진	121.7	127.8	-6.1
7. 속초	179.0	212.2	-33.2	27. 대구	181.1	190.0	-8.9
8. 춘천	540.0	457.2	82.8	28. 전주	233.5	218.3	15.2
9. 이천	510.8	413.9	96.9	29. 임실	420.2	347.8	72.4
10. 홍천	633.7	576.7	57.0	30. 광주	141.4	167.8	-26.4
11. 대관령	876.4	799.4	77.0	31. 군산	195.6	238.9	-43.3
12. 보은	465.9	436.7	29.2	32. 남원	275.3	258.3	17.0
13. 충주	529.9	445.6	84.3	33. 정읍	222.8	243.9	-21.1
14. 보령	258.5	286.1	-27.6	34. 진주	133.0	138.9	-5.9
15. 제천	610.1	470.6	139.5	35. 부산	49.6	64.4	-14.8
16. 청주	412.6	350.0	62.6	36. 밀양	180.2	212.8	-32.6
17. 부여	333.0	322.8	10.2	37. 산청	140.0	181.1	-41.1
18. 대전	319.1	346.1	-27.0	38. 거제	51.9	81.1	-29.2
19. 서산	313.0	340.6	-27.6	39. 여수	54.6	72.2	-17.6
20. 거창	277.9	305.0	-27.1	40. 장흥	130.4	182.2	-51.8

이상과 같은 동결지수 산정결과로부터 우리 나라의 동결지수선도를 작성할 수 있다. 동결지수선도(凍結指數線圖)는 30년간의 기상자료 중 3개의 최대치의 평균을 사용하거나 그 자료가 없으면 10년간의 최대치를 사용하여 작성하게 되어 있다. 현재 국내에서 사용하고 있는 전국 동결지수선도는 도로조사단(1980)이 1949년부터 1978년 사이의 기상자료로 작성한 동결지수선도와 국립건설시험소(1989)가 1980~1989년 동안의 기상자료로 작성한 동결지수선도가 있다.

그러나 현재 사용하고 있는 동결지수선도는 지구온난화로 인한 기상환경의 변화로 인해 정확한 동결심도를 예측하기 위해서는 최근의 동결지수 자료가 반영된 동결지수선도가 필요한 상황이다.

그림 6과 그림 7은 각각 10년 동결지수선도와 30년 동결지수선도를 작성한 것으로 사용 프로그램은 Surfer 7.0이다. Surfer는 Microsoft Windows 환경에서 실행할 수 있는 그래픽 프로그램이다. Surfer는 불규칙한 x, y, z 데이터 파일을 규칙적인 간격을 갖는 Grid 데이터 파일로 만들어서 이것을 기초로 하여 동결지수선도(Contour Map)를 그릴 수 있다.

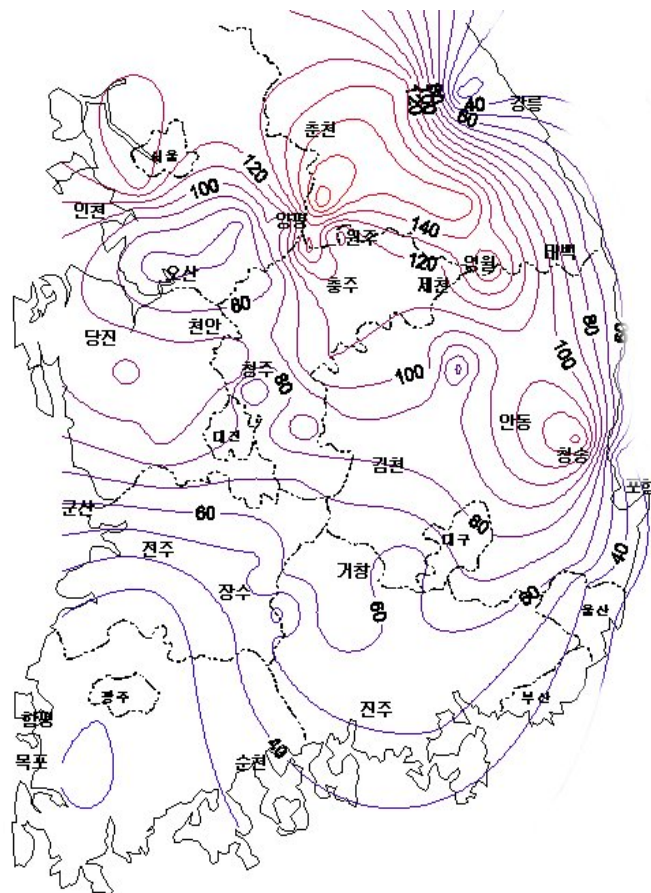
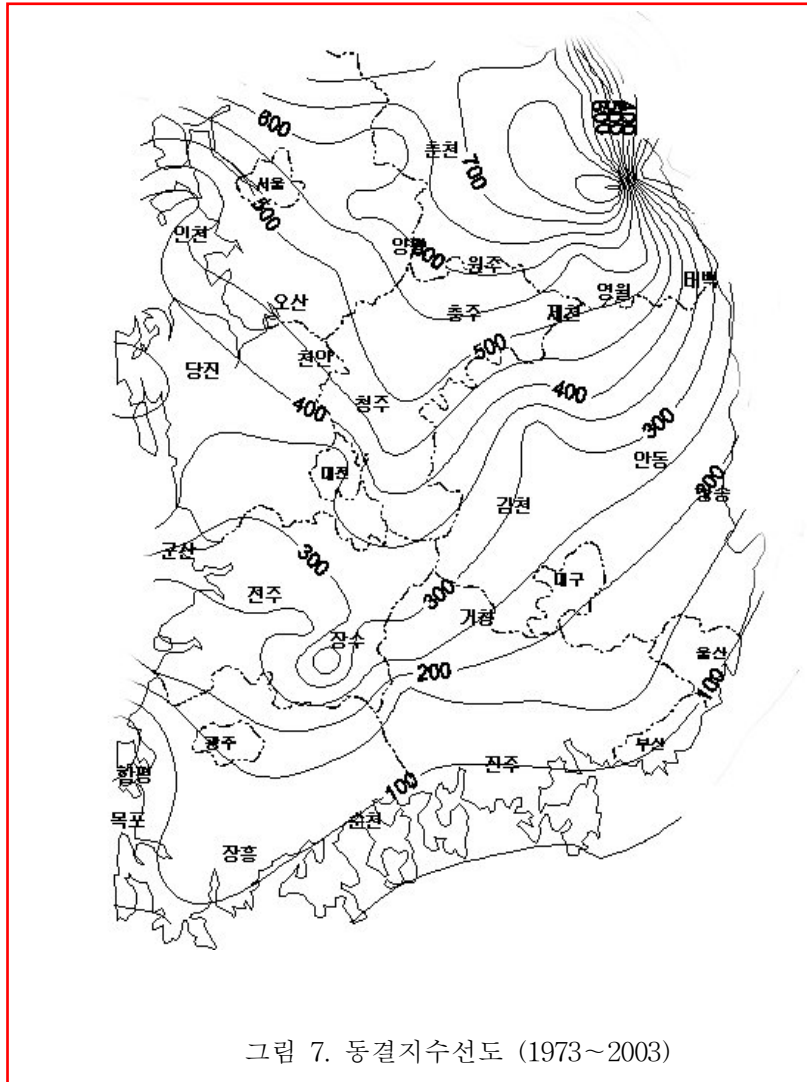


그림 6. 동결지수선도 (1993~2003)



전국 50개소의 기상측후소에서 1973년부터 2002년까지의 30년 설계동결지수와 1993년부터 2002년까지의 10년 설계동결지수를 살펴보면 30년 동결지수가 10년 동결지수에 비해 동결지수가 크게 나타난 것을 알 수 있다. 이는 전국적으로 추위가 가장 심했던 연도가 대부분 1990년대 이전이고 1990년대 이후, 지구 온난화로 인한 온도상승으로 최근 10년 설계동결지수는 감소하였다.

4. 전국 국도상 동결심도 분석

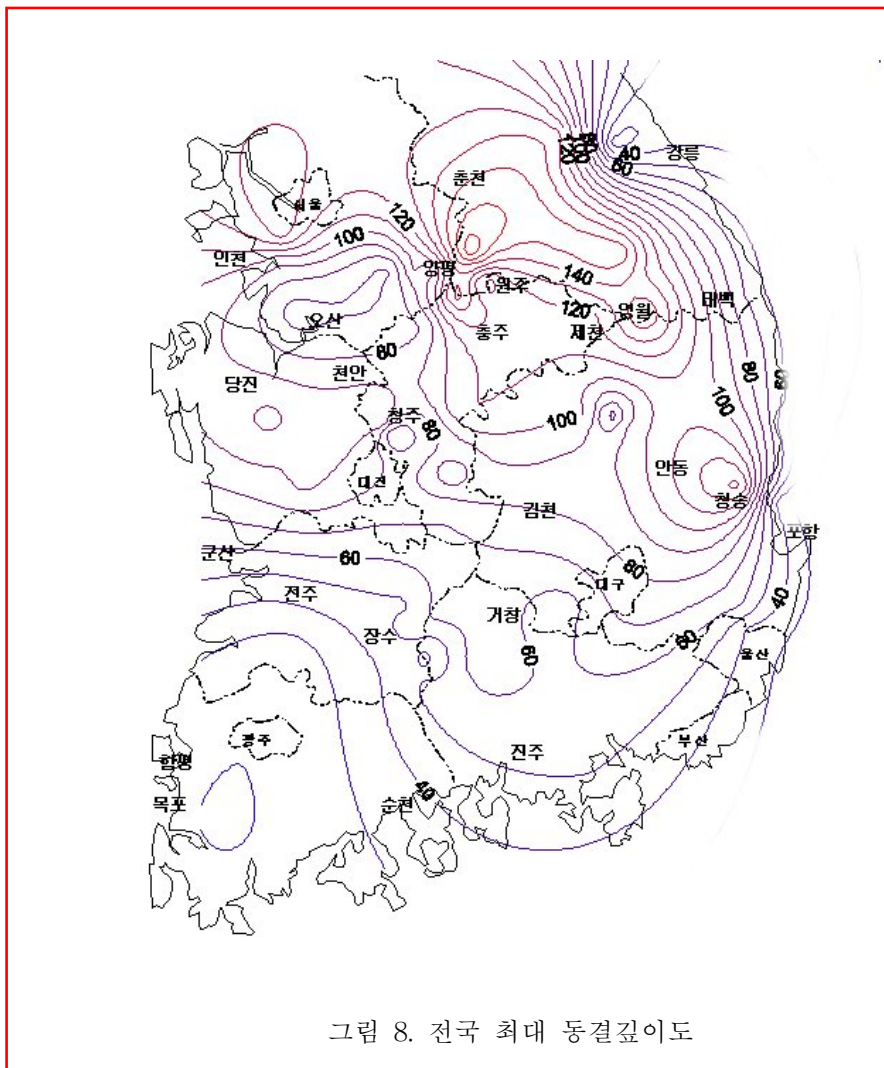
4.1 전국 최대동결깊이도

한국건설기술연구원에서는 Methylene Blue 동결심도계를 전국 국도상에 1990년부터 점진적으로 매설하여 총 79개의 Methylene Blue 동결심도계를 매설하였다.

지금까지 지역별로 측정한 동결깊이 중 최대 동결깊이만을 가지고 전국 최대동결깊이도(contour map)를 그려보면 그림 8과 같다. 조사기간은 1992년부터 2003년 3월까지 측정한 자료를 바탕으로 작성하였다.

그림 8에서 최대 동결깊이 150cm가 나타난 지역은 강원도 홍천, 평창 지역으로서 이곳들은 고도가 높은 산악 지역이다. 또한, 경기도 북부 지역과 경북 안동, 충북 제천지역 등도 동결심도가 120cm이상으로 크게 나타나고 있다.

반면에, 강릉 등 동해안 지역과 전남 함평, 경북 울진, 경북 포항 등지는 해안 지역은 동결깊이가 낮게 나타났다.



4.2 동결지수와 동결심도와의 상관관계 분석

한국건설기술연구원은 동상이 잘 일어나지 않는 균일한 입상재료를 포설한 전국 국도상의 포장도로에 대하여 최근 10년간(1992년~2003년) 동결심도계를 점차적으로 설치하여 운영하고 있으

며 앞으로 자료의 축적이 더 이루어질 경우, 측정된 해당연도의 최대동결심도와 해당지역의 최대 동결지수를 이용한 동결깊이를 산정모델을 제시할 예정이다.

그림 9는 1992년부터 2003년 3월까지 전국 국도에 매설되어 있는 동결심도계를 이용하여 해마다 측정된 최대동결심도와 그 해의 동결지수와의 관계를 도시한 것이다. 그림으로부터 다음과 같은 식 8.1의 관계가 성립된다.

$$z = 5.84\sqrt{F}$$

식 (1)

여기서, Z : 동결심도 (cm),
F : 동결지수 (°C · day)

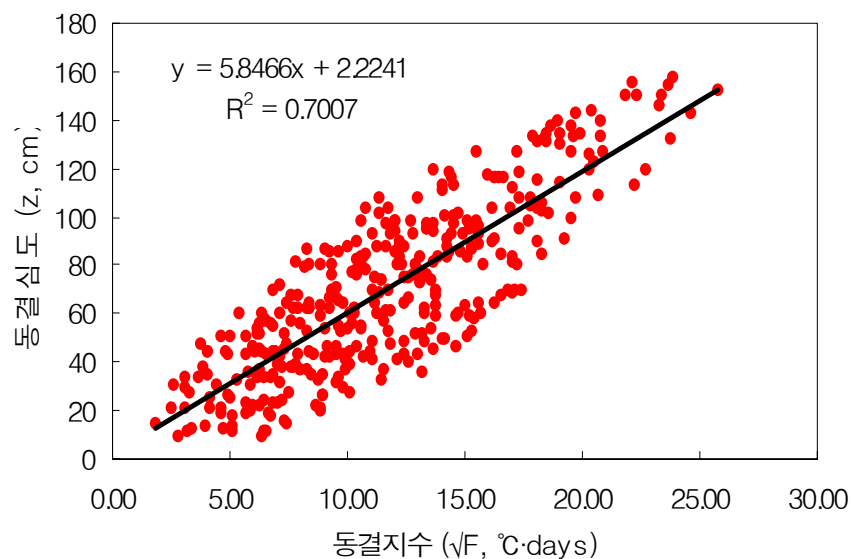


그림 9. 국내 동결지수와 동결심도와의 상관관계

5. 결 론

1. 정확한 동결심도의 측정을 위해 Methylene Blue 동결심도계를 자체 제작하여 전국 국도상에 79개소에 설치하여 동결심도를 측정하였다.
2. 전국 50개의 기상측후소의 기상자료를 이용하여 최근 30년간의 동결지수선도와 최근 10년간의 최대동결지수선도를 작성하였다. 또한 이 자료를 기존의 동결심도 산정모델에 적용하여 같은 지역에서 달라진 동결지수에 따라 동결심도가 어떻게 변화되는지를 분석하여 보았다.
3. 이와 같이 전국 79개소의 포장국도에 매설된 동결심도계(Methylene Blue)의 측정결과와 동결지수값을 이용하여 $z = 5.84\sqrt{F}$ 관계를 도출하였다.

4. 향후 자료의 축적이 더 이루어질 경우, 측정된 해당연도의 최대동결심도와 해당지역의 최대 동결지수를 이용한 동결깊이를 산정모델을 개발할 토대를 마련하였다.

참고문헌

1. 국립건설시험소(1989), 동결심도조사보고서.
2. 김영진, 홍승서(2001), " 동절기 지반의 동결심도 장기조사 ", 한국건설기술연구원 연구보고서.
3. 김영진, 강재모(2003), " 동결심도 및 포장내부 온도조사 ", 한국건설기술연구원 연구보고서.