

국내 동결심도 조사 및 분석

An Analysis of Frost Penetration Depths in Pavements in Korea

김영진¹⁾, Young-Chin Kim, 홍승서²⁾, Seung-Seo Hong

1) 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 책임연구원, Research Fellow, Geotechnical Disaster and Environment Research Division, Korea Institute of Construction Technology

2) 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 연구원, Researcher, Geotechnical Disaster and Environment Research Division, Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : In this study the frost penetration depth along national roads in Korea were measured and analyzed over several years. The frost penetration depth was analyzed with respect to the Provinces of Korea and sunny/shaded areas. Additionally, the measurement results were compared to the formular of the US Army Corps of Engineers and Terada in Japan.

Key words : frost penetration depth, freezing index ,methylene blue

1. 서 론

우리 나라는 계절동토지역에 속하는 관계로 겨울철이면 지반에 동상현상(frost heave)이 발생하는데, 이 현상으로 인해 도로포장체 등의 시설물이 들어 울러지면서 파괴된다. 봄철 해빙기가 되면 얼었던 지반이 녹으면서 융해침하(thawing settlement) 현상이 일어나 다시 한 번 도로 포장체를 파손하거나 사면 붕괴를 일으킨다.

국내 도로에는 이러한 동상이나 융해침하에 의한 포장체의 파손을 방지하기 위하여 동상이 발생하지 않는 자갈로 구성된 동상방지층을 설치하고 있는데, 강원도 북부지방의 경우 이 동상방지층의 두께가 무려 60cm에 달하기도 한다.

국내에서 현재 동결깊이를 산정할 때는 미공병단에서 제정한 동결깊이 산정식을 이용하거나 국립건설시험소에서 1989년에 발표한 식을 이용하고 있다.

미공병단에서 제정한 동결깊이 산정식은 기후 및 지반조건이 다른 타국의 식이기에 이를 그대로 우리나라에 적용하기에는 불합리한 점이 있다.

국립건설시험소식은 1980년부터 1989년까지 겨울철에 맨땅을 파고 눈으로 지중의 빙정(ice lenses)을 직접 확인하는 방법으로 동결깊이를 조사한 후, 이를 기상청에서 측정한 기온자료로부터 산출한 동결지수와 연결지어 함수관계로 나타낸 식이다. 그러나 맨땅은 실제 도로처럼 다져져 있지 않아 공기를 다량 함유하고 있으므로 동결깊이가 실제 도로의 노반이나 노상보다는 대체로 얕으며, 흙의 종류에 따라 다른 형태를 보이는 빙정 중에는 눈에 보이지 않는 형태도 있으므로 이 산정식 또한 완벽한 것이라고 보기에는 무리가 따른다.

KICT에서는 methylen blue라는 시약을 사용하여 연구진이 직접 제작한 최신 동결깊이 측정장치를

이용하여 실제 포장이 이루어진 전국 국도상의 89개 지점에서 겨울철에 다년간 동결깊이를 측정하고 있다. 본 연구에서는 이러한 방법으로 측정한 동결깊이와 기상청 측정 기온으로부터 산정한 동결지수를 함수로 하여 최신 동결깊이 산정식(안)을 만들었다. 아울러 지역별, 음양지 조건별, 포장방법의 종류별로 동결깊이 산정식이 어떻게 다른지 분석하였다. 또한 국내에서 기존에 이용하고 있던 동결깊이 산정식 및 외국의 동결깊이 산정식들과 그 결과가 어떻게 다르게 나타나는지 분석하였다.

2. Methylene Blue 동결심도계의 원리 및 설치 방법

2.1 원리

동결깊이를 측정하는 방법에는 몇 가지가 있지만, 본 연구에서 사용한 동결심도계는 Methylene Blue 용액의 동결특성을 이용하여 한국건설기술연구원에서 자체 제작한 것이다. 장비의 구성은 그림 2.1과 같이 직경 25.4mm의 아크릴 외관, 직경 15mm의 아크릴 내관, 직경 10mm의 고무튜브, 보호용 철제몸통 및 덮개로 구성되어 있다. 아크릴 파이프는 예상되는 동결깊이를 초과하는 깊이(150cm로 제작)까지 연속적으로 관입한 보호링공 속에 삽입한다. 안쪽에 있는 아크릴 내관에는 청색의 Methylene Blue 용액이 채워져 있는데 이 용액은 상온에서는 청색을 유지하지만 기온이 0°C이하가 되면 색이 무색으로 변한다.

따라서 이 동결심도계를 전국 국도상 89개 지점에 매설 한 후, 동절기에 연구원이 수시로 해당 지역을 방문하여 내부의 아크릴관(Methylene Blue 용액관)을 외부로 꺼내어 용액이 얼어서 무색으로 변한 곳까지의 최대 깊이를 측정하면 이 값이 당해년도 해당지역의 동결깊이가 된다.(그림 2.2 (b) 참조)

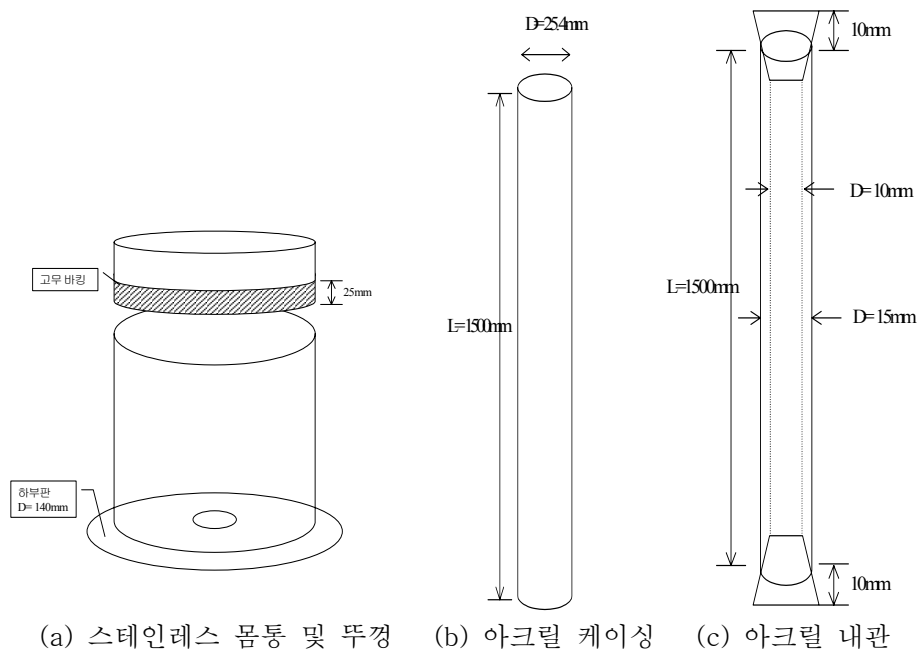
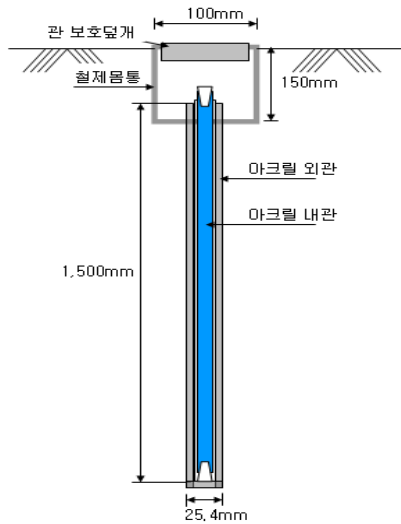


그림 2.1 Methylene Blue 동결심도계의 구성



(a) 설치단면



(b) 동결심도 측정

그림 2.2 Methylene Blue 동결심도계 설치 및 측정

2.2 설치방법

동결심도계는 해당 지역의 가장 깊은 동결심도를 측정할 수 있는 곳으로서 i)그 지역을 대표하는 지반특성과 ii)고도가 비교적 높은 곳 iii)가능한 한 음지지역에 설치하는 것을 원칙으로 한다.

매설이 끝난 후에는 향후 조사원이 동결심도를 조사할 때, 위치파악이 용이하도록 설치지점을 측량을 실시한다.

2.3 전국 국도상 동결심도계 설치 장소

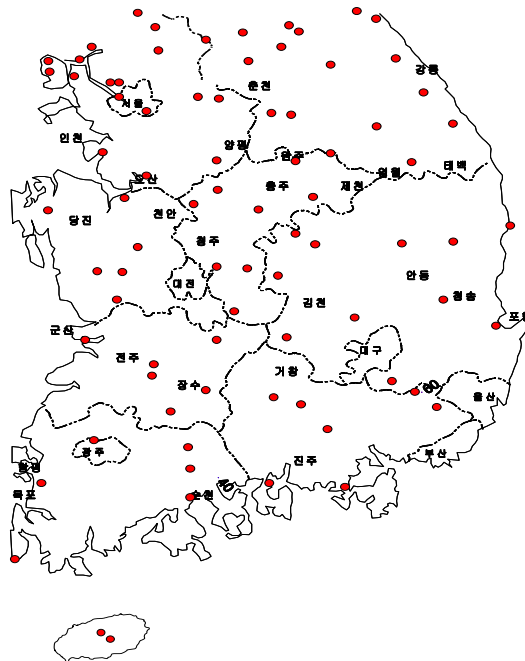


그림 2.3 전국 국도상 동결심도계 설치 장소

3. 동결지수

3.1 동결지수의 산정방법

지반의 동결깊이는 0℃ 이하의 온도와 그 지속기간에 영향을 받는다. 이것을 정량적으로 표시하기 위하여 동결지수(freezing index)라는 용어를 사용하는데, 동결지수는 대기온도의 강도(영하온도)와 그 지속기간(intensity and duration)의 누가치(cumulative effective)이다. 동결지수의 단위는 ℃·day이며, 동결기 동안의 누가 ℃·day에 대한 시간 곡선상의 최고점과 최저점의 차이로 나타낸다(그림 3.1 참조).

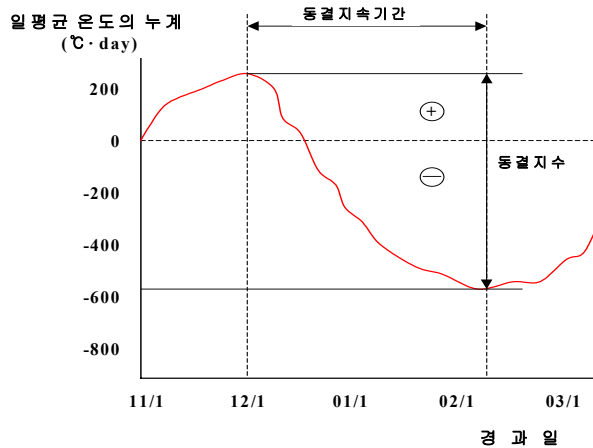
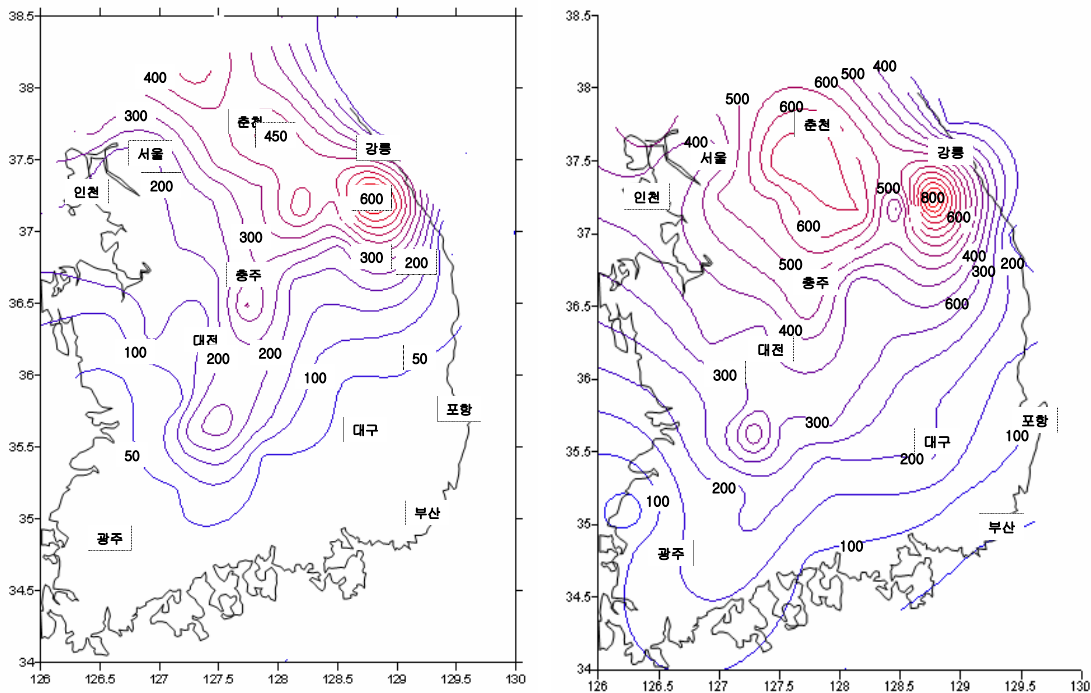


그림 3.1 동결지수와 동결지수기간 (일본토질공학회, 1983)

3.2 동결지수선도



(a) 1997~2006년 동결지수선도

(b) 1977년~2006년 사이의 동결지수선도

그림 3.2 동결지수선도

4. 동결지수와 동결깊이 관계도

4.1 전국 동결깊이 등심선(contour)

전국 각 지점에서 측정한 최대동결심도를 Golden Software INC에서 개발한 3D 그래픽 프로그램인 surfer을 이용하여 그림 4.1에 나타냈다.

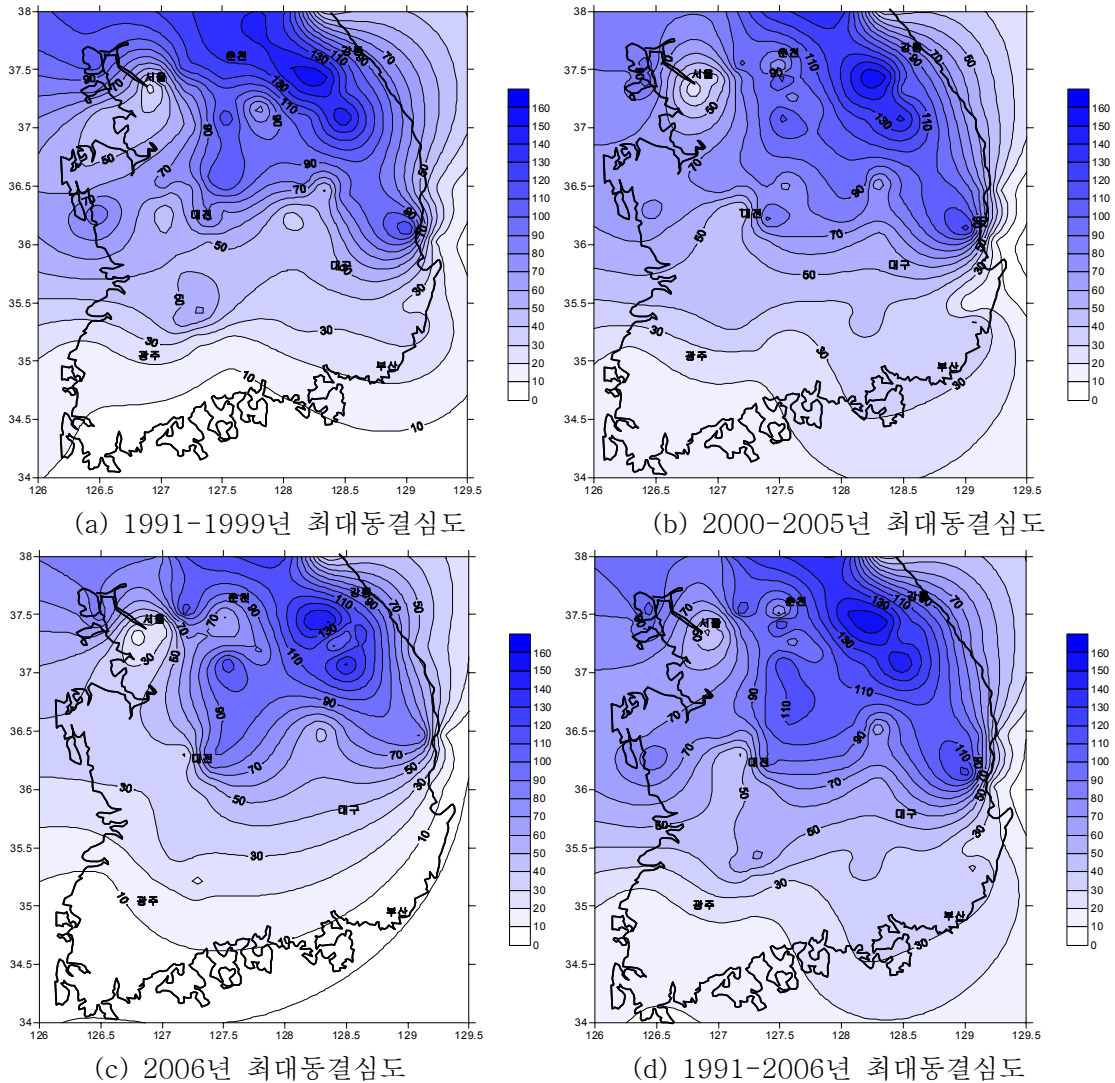


그림 4.1 동결심도 분포도

그림 4.1 (d)를 살펴 보면 우리나라에서 동결심도가 매우 깊게 나타난 곳은 강원도 홍천군의 두촌면, 울진면, 평창군 도암면 등으로 동결심도가 150cm 이상으로 나타났다. 해안지역인 양양, 삼척은 동결심도가 강원내륙지역보다 상대적으로 얇게 나타났다. 또한 연천, 가평과 같은 경기도 북부지역과 충북 제천, 경북 청송 등도 동결심도가 110cm 이상으로 크게 나타났다. 반면 전라남도의 경우에는 동결심도가 20cm 이하로 분포되었고, 경남지역도 40cm 이하로 나타났다.

그림 4.1 (c)에서 2006년도 최대 동결심도 분포도를 살펴보면, 평균적으로 1991년-2006년의 최대동결심도분포(그림 4.1 (d))보다 약 10cm 정도 얇게 분포하고 있다.

4.2 전국 동결지수와 동결깊이 관계

제주지역을 제외한 전국 87개 지점의 666개 동결심도 측정치와 44개 기상측후소의 온도자료로부터 도출한 동결지수(F_m)의 관계를 그림 4.2에 도시하였으며, 이 결과로부터 구한 전국 동결심도산정식을 식(4.2)에 나타냈다.

동결지수는 동결심도 측정지점과 인근한 측후소에서 측정한 일평균온도자료를 사용하여 구하였으며, 이렇게 구한 동결지수는 표고차를 고려하여 보정동결지수(F_m)로 환산한 후 동결깊이와의 관계식 산정시 이용하였다.

$$Z = C\sqrt{F_m} \quad (4.1)$$

여기서, Z : 실측한 지역별 최대동결심도(cm), F_m : 보정동결지수($^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$)

- $F_m = \text{측후소 동결지수} + \frac{0.9 \times \text{동결기간} \times \text{표고차(m)}}{100}$

- 표고차(m) = 동결심도계 매설지점 표고(m) - 측후소 지반고(m)

C : 지반의 제반성질을 포함하고 있는 상수(열전도율, 함수비, 건조단위중량 등)

$$Z = 5.01\sqrt{F_m} \quad (4.2)$$

동결심도-동결지수 관계를 다항식으로 표시하여 식 (4.3) 및 그림 4.3에 나타냈다.

$$Z = -0.0003F_m^2 + 0.3966F_m \quad (4.3)$$

식 (4.3)은 다항식의 형태이며, 상관계수(R^2)는 0.8103으로 평방근으로 표시한 식(4.2) 보다 상관계수가 높게 나타났다.

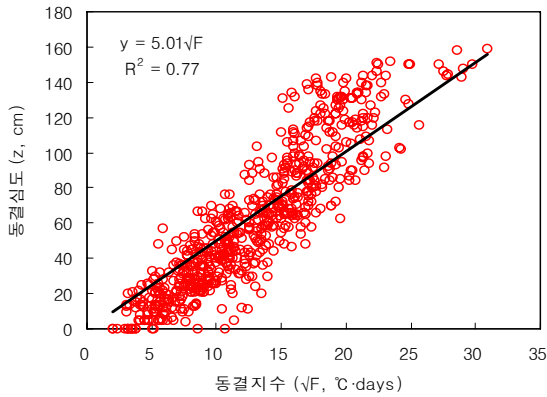


그림 4.2 전국 동결심도-동결지수 상관관계도

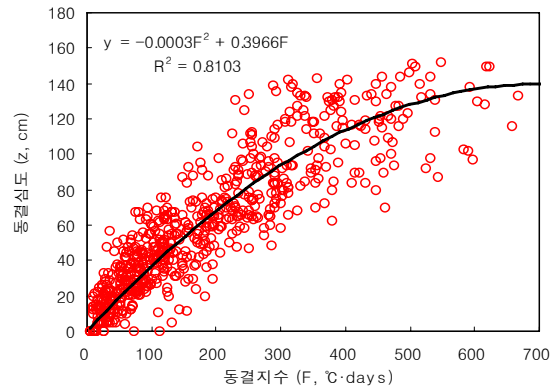


그림 4.3 전국 동결심도-동결지수 상관관계 곡선(다항식 형태)

4.3 지역별 분석 자료

(1) 서울·경기지역

서울·경기지역에서는 총 20개 지점 158개 동결심도 실측값과 9개 측후소에서 산출한 보정동결지수를 사용하여 분석하였다. 이 결과로부터 얻은 식은 (4.4)의 정수 C 값은 5.05로 나타났다.

$$Z = 5.05\sqrt{F_m} \quad (4.4)$$

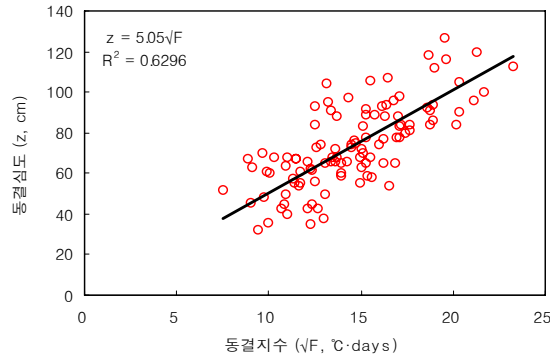


그림 4.4 경기지역 동결심도-동결지수 상관관계 곡선

경기지역은 서울지역과 경기북부, 경기남부지역의 지형적 특성이 크게 다르며 인구밀집지역으로 도심부의 영향을 많이 받는다. 따라서 본 연구에서는 경기지역을 크게 3구간(경기중북부, 경기남부, 서울도심부)으로 나누어 분석하였다.

경기중북부지역과 경기남부지역의 동결심도-동결지수 상관관계는 그림 4.5, 그림 4.6에 도시하였다. 경기중북부지역은 11개 지점 80개 실측치를 사용하였고, 경기남부지역은 4개 지점 28개 실측치를 사용하였다.

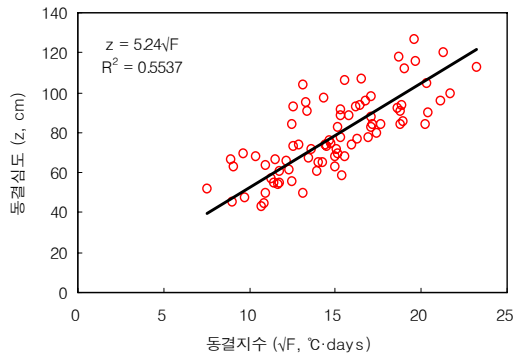


그림 4.5 경기중북부지역 동결심도-동결지수 상관관계곡선

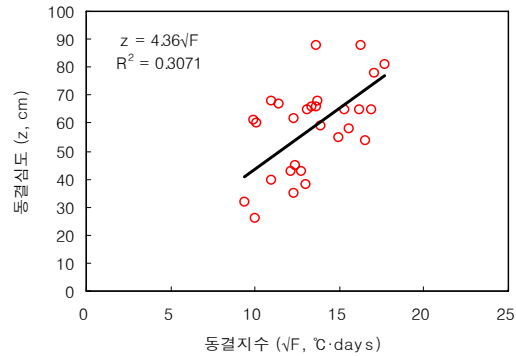


그림 4.6 경기남부지역 동결심도-동결지수 상관관계 곡선

서울도심부에는 6개 지점에 동결심도계를 설치하였으며, 1995년부터 2006년 현재까지 서울특별시 품질시험소에서 관리하고 있다. 측정된 51개 동결심도 측정값과 동결지수와의 상관관계는 식 (4.5) 및 그림 4.7에 나타냈다.

$$Z = 2.57\sqrt{\bar{F}_m} \quad (4.5)$$

(2) 강원도지역

그림 4.8은 강원도지역에 대한 동결심도-동결지수 상관관계는 총 18개 지점 143개 실측값과 10개 측후소 자료로부터 산출한 보정동결지수를 적용하였다.

$$Z = 5.79\sqrt{\bar{F}_m} \quad (4.6)$$

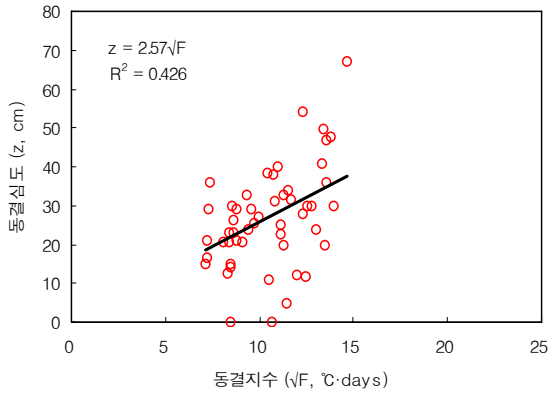


그림 4.7 서울 도심부 동결심도-동결지수 상관관계 곡선

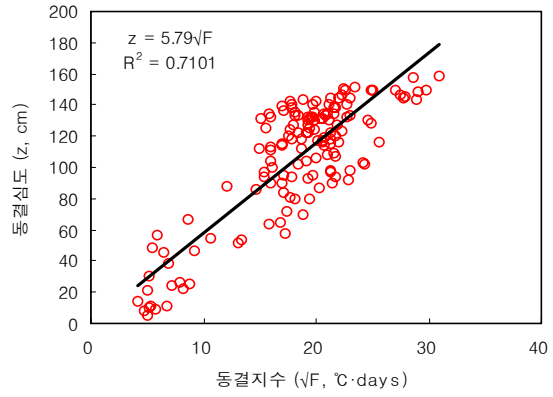


그림 4.8 강원도지역의 동결심도-동결지수 상관관계 곡선

(3) 충청지역

충청지역은 총 8개 지점 71개의 동결심도 측정치와 3개 측후소에서 도출한 동결지수의 상관관계를 분석하였다. 이 결과로부터 얻어지는 정수 C는 식 4.7과 같다.

$$Z = 4.97\sqrt{F_m} \quad (4.7)$$

(4) 충남지역

충남지역은 총 7개 지점 64개 동결심도 실측값과 3개의 측후소에서 산출한 동결지수 자료를 사용하여 동결심도산정식을 구하였으며, 식(4.8)과 같다.

$$Z = 4.35\sqrt{F_m} \quad (4.8)$$

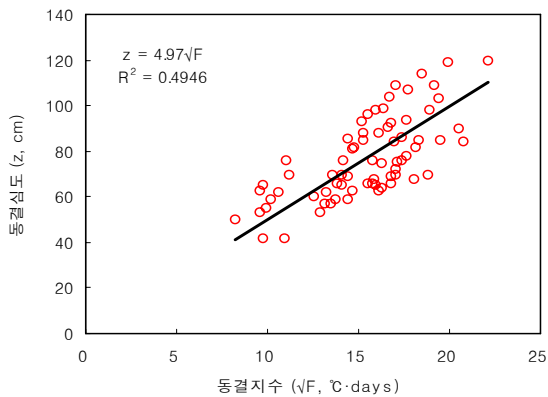


그림 4.9 충청북도지역의 동결심도-동결지수 상관관계 곡선

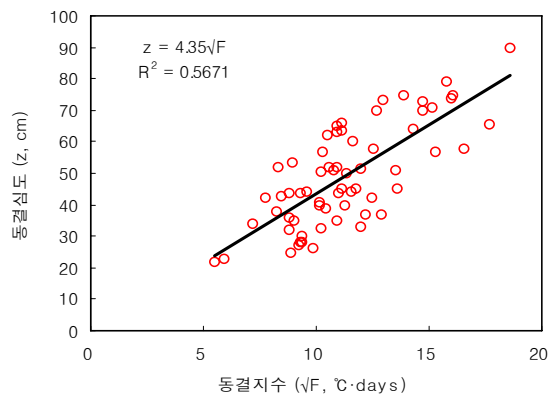


그림 4.10 충청남도지역의 동결심도-동결지수 상관관계 곡선

(5) 경북지역

경북지역은 총 12개 지점 100개 동결심도 실측값과 6개 측후소에서 산출한 동결지수를 사용하여 분석하였다.

$$Z = 4.86\sqrt{F_m} \quad (4.9)$$

(6) 전북지역

전북지역은 총 5개 지점 42개 실측값과 5개 측후소에서 산출한 동결지수를 사용하여 분석하였다.

$$Z = 3.56\sqrt{F_m} \quad (4.10)$$

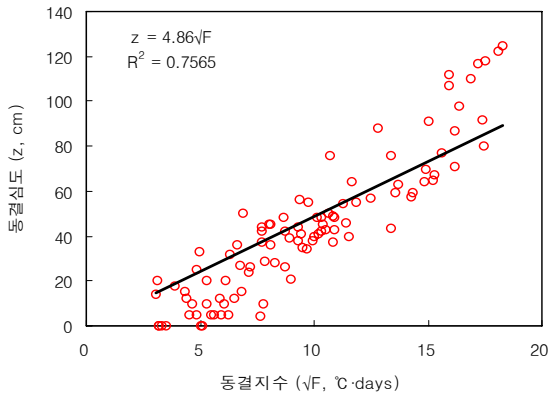


그림 4.11 경상북도지역의 동결심도-동결지수 상관관계 곡선

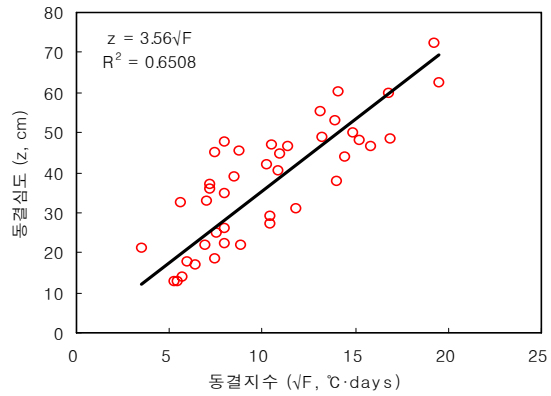


그림 4.12 전라북도지역의 동결심도-동결지수 상관관계 곡선

(7) 경남 · 전남지역

남부지역(경남, 전남)은 총 11개 지점 86개 실측값과 7개 측후소에서 산출한 동결지수를 사용하였다.

$$Z = 3.04\sqrt{F_m} \quad (4.11)$$

(8) 제주지역

제주지역은 한라산에 매설한 2개 지점에서 총 20개의 동결심도를 측정 후 동결지수와 상관관계를 도출하였다.

$$Z = 1.28\sqrt{F_m} \quad (4.12)$$

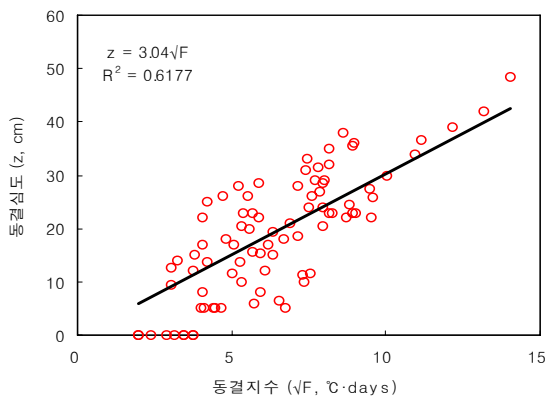


그림 4.13 남부지역의 동결심도-동결지수 상관관계 곡선

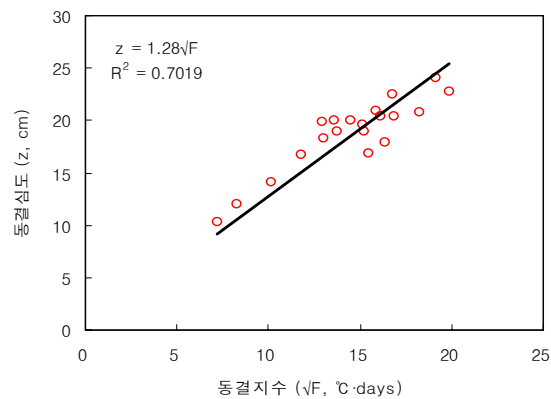


그림 4.14 제주지역의 동결심도-동결지수 상관관계 곡선

4.4 음양조건별 분석

동일한 지형조건 및 동결지수에서도 음양(陰陽)조건에 따라 동결깊이는 달라진다.

본 연구에서는 전국 89개 동결심도계에 대한 매설지점의 음양조건을 고려하여 각각 일사량이 전혀 없는 음지에 위치한 동결심도계와 반나절 동안만 일사량이 있는 반음지, 하루 종일 일사량이 있는 양지 조건으로 구분하여 각각에 대한 동결심도-동결지수 상관관계를 분석하였다.

그림 4.15은 음양조건에 따른 동결심도-동결지수 상관관계를 나타낸 것이다. 각각의 음양조건에 도출한 정수 C값은 식 4.13~식 4.15과 같다. 음지지역은 정수 C가 6.09이고, 반음지지역은 4.87, 양지지역은 3.07로 나타났다.

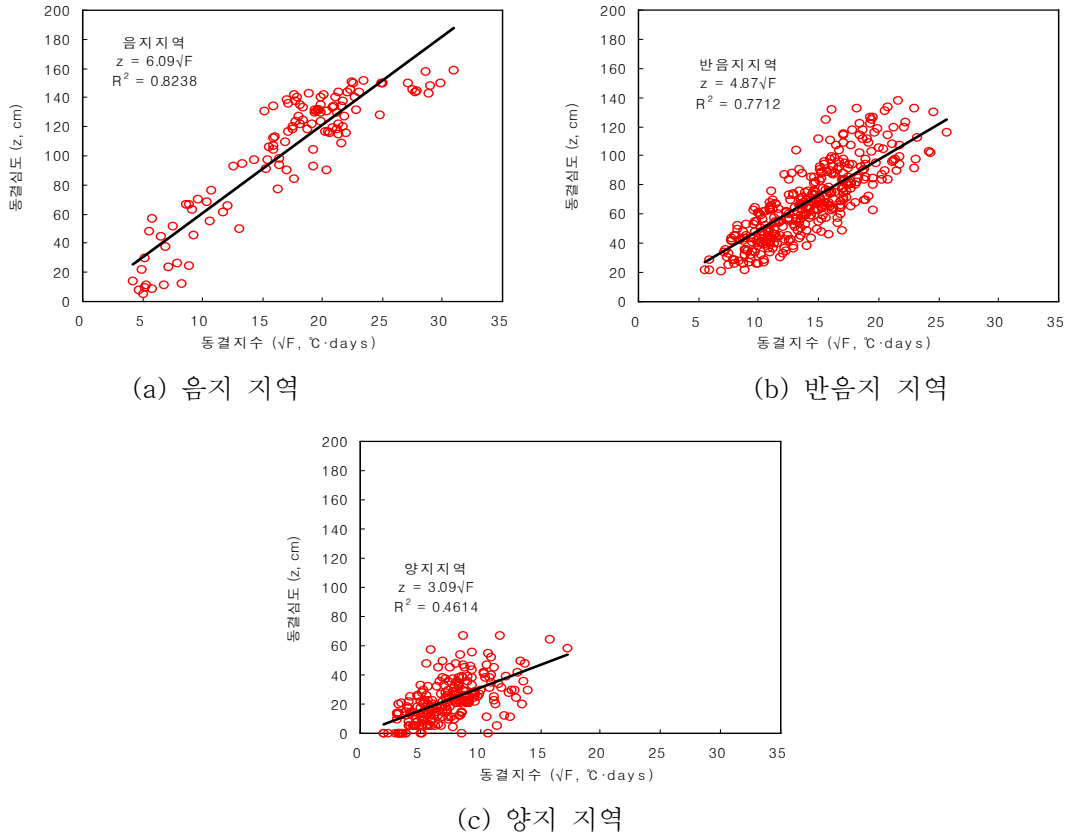


그림 4.15 음양지역에 따른 동결심도-동결지수 상관 곡선

- 음지지역

$$z = 6.09\sqrt{F_m} \quad (4.13)$$

- 반음지지역

$$z = 4.89\sqrt{F_m} \quad (4.14)$$

- 양지지역

$$z = 3.09\sqrt{F_m} \quad (4.15)$$

상기의 식과 같이 일사량이 커질수록 정수 C는 낮아진다. 음지지역에 비해 반음지지역은 C값이 79.9% 감소하였고, 양지지역에서는 음지지역에 비해 무려 50.1%나 감소하였다.

4.5 포장체의 종류별 분석 자료

89개 동결심도계 중에서 3개 지점(철원, 가평, 춘천)은 콘크리트 도로에 매설한 것이고, 나머지는 아스팔트 도로에 매설한 것이다. 아스팔트 도로와 비교하기 위하여 2005년에 콘크리트 도로에 동결심도계를 매설하한 후 2006년도부터 동결심도를 측정하였다.

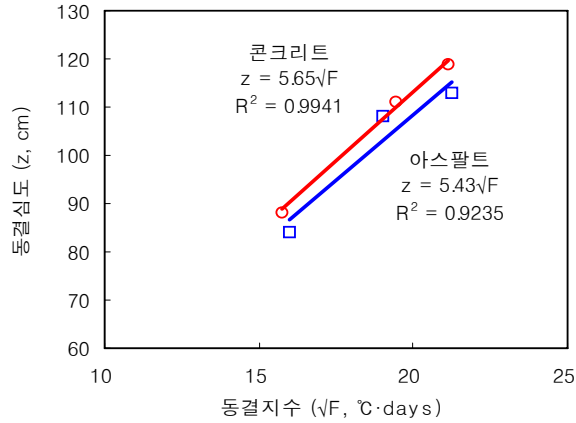


그림 4.16 콘크리트와 아스팔트 포장도로의 상관성 비교

그림 4.16에서 콘크리트 포장체의 경우, 정수 C는 5.65로 나타났고 아스팔트 포장체에서는 정수 C가 5.43으로 나타나 콘크리트 포장체가 아스팔트 포장체보다 약간 컸다. 그러나 콘크리트 도로에서의 측정치가 매우 적어 향후 더 많은 자료를 축적한 후 그 결과를 비교 분석할 예정이다.

4.6 기존식와의 비교

그림 4.17은 본 연구에서 수 년간 실측한 지역별 동결심도와 동결지수의 상관곡선 및 기존의 미공병단식, 일본 데라다식, 1989년에 국립건설시험소에서 발표한 동결심도 산정식을 비교한 것이다.

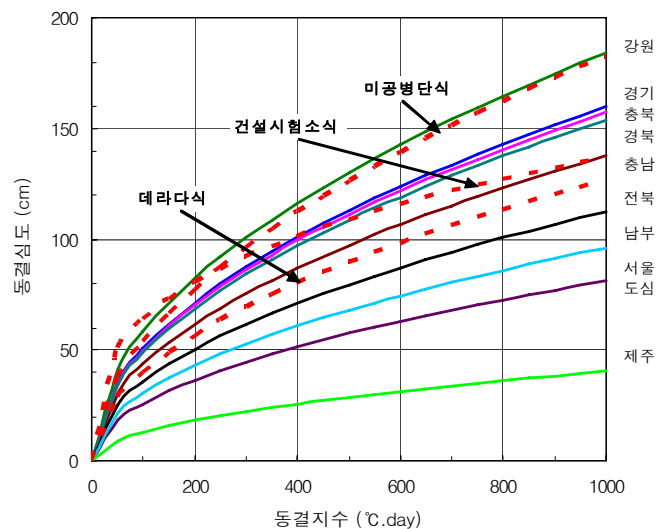


그림 4.17 기존 동결심도 산정식과의 비교분석

그림 4.17에서 보는 바와 같이 미공병단식은 한국건설기술연구원에서 실측한 강원도 지역을 나타내는 곡선과 비슷한 경향을 보이고 있다. 국립건설시험소식은 한국건설기술연구원에서 측정한 경기, 충북, 경

북지역의 그래프와 비슷하게 나타나고 있다. 그러나 동결지수 400°C·day이하에서는 지역별 실측치보다 크며, 동결지수 400°C·day이상에서는 실측치보다 작게 나타났다. 데라다식은 한국건설기술연구원에서 실측한 충남지역 곡선과 전북지역 곡선 사이에서 분포하고 있다. 반면 남부지역, 서울도심, 제주지역은 기존의 어느 동결심도 산정식보다 낮게 나타났다.

5. 결론 및 활용방안

본 연구를 통하여 다년간 실제 포장국도에서 측정한 동결깊이 자료를 이용하여 KICT 동결깊이 산정식(안)을 만들었다.

본 연구를 통하여 지구 온난화에 따라 1990년대 중반부터 전국 동결지수선도가 확실히 변화하는 것을 알 수 있다. 반면, Methylene Blue를 이용하여 도로상에서 직접 측정한 동결깊이는 과거 국립건설시험소에서 맨땅에서 측정한 것보다 오히려 깊게 나타나는데, 그 원인은 서론에서 살펴본 바와 같이 포장도로는 다짐작업을 거쳤기 때문에 공기가 추출되어 열전도율이 더 크고 따라서 동결깊이가 과거식과는 다르게 나타나고 있기 때문으로 해석된다.

향후 동결심도계가 매설된 도로의 노상의 함수비 상태를 실측하여 함수비 변화에 따라 동결깊이가 어떻게 달라지는지 추가로 분석할 예정이며, 이러한 보완을 하고, 공청회 등을 거친 후 본 연구 결과를 실제 도로 동상방지층 설계시 활용할 수 있도록 확정, 공포할 계획이다.

이렇게 할 경우 국내 도로 동상방지층의 경제적, 합리적 설계 및 시공이 가능해지고, 겨울철 매설관의 파손 방지에도 기여할 수 있으며, 개성공단 등 국내 건설업체의 북한 진출시에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 건설부 국립건설시험소(1989), 동결심도조사보고서.
2. 김영진, 강병희(1998), 페타이어를 이용한 지반동상 방지, 한국지반공학회 논문집, Vol. 14, No. 1, pp.49-58.
3. 김영진, 유준, 홍승서(2000), 아스팔트 포장의 신재료 기술의 개발, 한국건설기술연구원 연구보고서
4. Beskow, G.(1974), Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Road and Railroads(translated by Osterberg, J.), the Technical Institute, Northwestern University, Evanston, Ill, U.S.A.
5. Freden, S(1965). Mechanism of Frost Heave and Its Relation to Heat Flow, Proceeding of 6th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, pp.41-45.
6. Gandahl, R.(1985), Polystyrene Foam as a Frost Protection Measure on National Roads in Sweden, TRANSPORTATION REASERCH RECORD. 1146, pp.1-9.
7. Hill, D., and Morgenstern, N. R.(1977), Influence of Load and Heat Extraction on Moisture Transfer in Freezing Soils, International Symposium, University of Lulea, Sweden, Feb., pp.16-18.
8. Taber, S.(1929), "Frost Heaving", Journal of Geology, Vol. 37.