

## 포장도로에서의 동결심도 조사분석

### Analysis of Penetration Depths in Pavement in Korea

김영진<sup>1)</sup>, Young-Chin Kim, 홍승서<sup>2)</sup>, Seung-Seo Hong

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원, Research Fellow, Civil Eng. Dept., KICT

<sup>2)</sup> 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Civil Eng. Dept., KICT

**SYNOPSIS** : 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 are no the formulation of the reasonable equation for frost penetration depths and of the criterion for identifying potentially frost-susceptible soil in design manual of pavement yet. Through this study 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.

**Key words** : frozen ground, equation for frost penetration depth, frost-susceptible soil, pavement

## 1. 서론

우리 나라는 계절동토지역(Seasonal Frost Area)으로 겨울철 추위가 장기간 지속되면 찬 공기가 도로의 노상부분에까지 침투하여 모세관현상에 의해 상승한 지하수를 얼린다. 이렇게 하여 생성된 얼음 조각을 빙정(氷晶, ice lenses)이라고 하는데 이 빙정은 지하로부터 계속 물을 공급받으면서 성장한다.

물이 얼면 약 9%의 체적팽창이 일어나지만, 지반내의 지하수가 공급되고 추위가 길게 지속되면 지반은 지속적으로 팽창하게 된다(Taber, 1929). 이 팽창하는 힘(동상력)은 매우 커서 도로나 철도의 도상(ballast), 공항·항만의 포장체, 상수도관, 가스관 등을 들어 올려 구조물의 안정을 저하시키는 요인이며 동상으로 인한 변위가 구조물의 허용범위를 넘어서 구조물의 고유기능을 위태롭게 하거나 손상을 주게 된다. 또한 봄에는 얼었던 지반이 차츰 녹는데 지중(地中)은 아직 언 상태를 유지하고 있으므로 녹은 물이 잘 배수되지 못한다. 따라서 지반의 유효응력이 줄어들면서 부등침하가 발생하여 구조물이 파손되거나 그 기능을 발휘하지 못하게 된다.

본 논문은 향후 건설하게 될 도로의 동상방지설계에 사용할 국내 동결심도 산정식을 도출하기 위한 기초연구로 전국 국도상의 83개 지점에 자체 개발한 Methylene Blue 동결심도계를 매설하여 매해 동절기에 동결심도를 측정하였다. 이러한 동결심도 측정자료(1991년 3월~2004년 3월)를 이용하여 전국 최대동결심도 분포도를 작성하였고 동결심도와 동결지수와의 상관관계를 전국, 지역단위, 동결지수, 포장두께별로 분석하여 국내 조건에 적합한 동결심도 추정모델을 산정하였다.

## 2. 지반의 동상원리 및 동결심도

### 2.1 동상의 원리

기온이 0℃ 이하로 장기간 계속되면 지표면 부근의 흙의 간극수가 차츰 얼기 시작한다. 이때 모세관현상

에 의해 얼지 않은 지중으로부터 수분이 동결면으로 이동하면서 빙정(ice lenses)이 생기고, 이 빙편이 점점 커지면서 수량도 증가하여, 지반이 팽창한다. 이 현상을 동상(frost heaving)이라고 한다(Taber, 1929).

그림 1은 도로 포장의 노상토에 빙정이 생겨 동상이 발생하는 개념도를 나타내고 있다. 물은 얼면 단지 9%의 체적팽창을 일으키지만 간극수가 얼 때 하부로부터 모관수가 계속 공급되면 그 체적이 50%이상 팽창하기도 한다(김영진, 1998). 이로 인해 도로 포장이 파손되기도 하고 철도, 매설관, 주택 등이 용기하기도 하는 피해를 일으킨다(김영진, 2000).

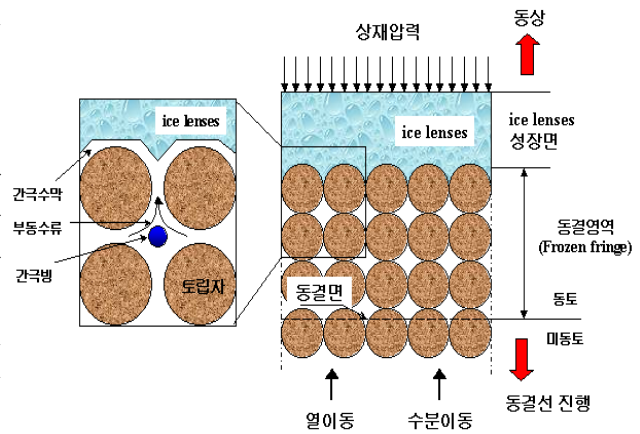


그림 1. 지반의 동상개념도

## 2.2 동결이론식

열전도 이론에 의한 동결깊이의 예측방법은 열의 흐름을 정상상태흐름(steady state flow of heat)으로 가정하여 동결깊이를 예측한다. 정상상태에서의 열전도 이론은 i)흙은 균질, 등방성 물질이고, ii)흙의 지반공학적 열적 성질은 일정하며, iii)흙의 동결은 0°C에서 시작되고 iv)흙의 열전도는 온도에 무관한 것으로 가정한다. 이 같은 가정 하에 지표면 온도가 동결온도( $T_f = 0^\circ\text{C}$ )보다 작게 되면 흙이나 도로포장 내에서는 동결이 시작된다. 온도강하가 클수록 그리고 재료의 열전도율이 클수록 동결진행은 빠르게 될 것이며 재료의 열용량이 클수록 동결 진행은 서서히 발생하게 된다. 단일층을 통한 열전도의 경우 재료(흙)의 동결상태와 비동결 상태의 열전도율을 고려함으로써 동결심도를 예측할 수 있다. 즉, 각 상태의 열전도율이 동일하다면 동결토의 열전도율은 비동결토의 열전도율과 같다고 가정하여 동결깊이를 산정하게 된다.

동결심도를 산정할 수 있는 이론적 방법으로는 Neumann이론, Stefan이론, 수정 Stefan이론 등이 있다. Neumann은 흙 속에 존재하는 수분을 정지상태로 보고 흙을 균질성, 등방성 및 반무한체로 가정하여 지반의 동결영역과 비동결영역을 고려하여 동결심도 문제를 수학적 방법으로 해석하였다. 반면에 Stefan은 지반내의 동결영역만을 고려하여 동결심도( $z$ )를 동결토의 열전도율( $K$ ), 용해잠열( $L$ ), 밀도( $\rho$ ), 동결온도( $T_f$ ), 도로 및 지표면의 온도( $T_s$ ), 동결지속시간(hr)의 함수로 다음과 같이 나타냈다.

$$z = \xi \sqrt{\frac{2K}{L \cdot w \cdot r_d} (T_f - T_s) \cdot t} \quad (1)$$

- 여기서,  $z$  : 동결깊이(m)                       $K$  : 동결토의 열전도율(kcal/m·h·°C)
- $L$  : 물의 잠열(kcal/kg)                       $w$  : 함수비(%)                       $r_d$  : 건조밀도(g/cm<sup>3</sup>)
- $T_f$  : 물의 동결온도(0°C)                       $T_s$  : 지표면의 동결온도(0°C)                       $t$  : 동결지속시간(hr)

Stefan식은 동결, 비동결 조건에서의 흙의 체적 열용량(volumetric heat capacity)을 무시하고 유도된 식으로서 실제 동결깊이보다 크게 평가되는 것으로 보고되고 있다. 따라서 Aldrich와 Paynter는 체적 열용량을 고려한 수정계수  $\lambda$ 를 도입하여 수정 Stefan식으로 다음과 같이 제안하였다.

$$z = \lambda \sqrt{\frac{48(K)(F)}{Q_L}} \quad (2)$$

여기서,  $\lambda$ 는 기상조건과 현장 흙에 대한 수정계수이며,  $K$ 는 흙의 열전도율(kcal/m·h·°C),  $F$ 는 공기동결지수( $F = T_{st}t$ ),  $Q_L$ 는  $L \cdot w \gamma_d$ 로서 흙의 잠열(cal/m<sup>3</sup>)이다.

## 2.3 각국의 동결심도 산정식

### 2.3.1 미공병단 경험식

미 육군공병단(1954)은 경험적인 방법으로 동결심도 산정식을 다음과 같이 제안하였다.

$$z = 4.69F^{0.53} \quad (3)$$

여기서,  $z$  : 동결깊이 (m),  $F$  : 동결지수(°C·day)

### 2.3.2 일본 Terada 공식

일본도로협회에서는 동상이 잘 일어나지 않는 균일한 입상재료를 포설한 포장도로에 대하여 최근 10년간 해당지역의 최대동결지수를 이용하여 동결깊이를 구하는 최대동결깊이 산정식을 도입하였다(Terada 공식). 표 1과 같이 동결지수별로 구분하여 동결심도 추정정수를 제안하였다. 따라서 특정지역의 동결심도를 산정할 때, 지역에 맞는 동결심도 추정정수를 사용하여 보다 정확한 동결심도를 예측할 수 있도록 하였다.

표 1. 일본의 동결깊이 추정정수(C)

동결지수(F, °C·day)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
동결심도 추정정수(C)	3.7	4.1	4.4	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	5.0	5.1	5.2

$$z = C\sqrt{F} \quad (4)$$

여기서,  $z$  : 동결깊이 (m)     $C$  : 동결깊이 추정정수(표 1의 값)     $F$  : 동결지수(°C·day)

## 3. KICT형 Methylene Blue 동결심도계 및 동결심도 측정

### 3.1 Methylene Blue 동결심도계 및 측정원리

KICT Methylene Blue 동결심도계는 1963년 스웨덴의 Gandahl이 개발한 동결심도계의 Methylene Blue 용액특성(국립건설시험소, 1989)을 이용하여 한국건설기술연구원에서 자체 제작한 것으로 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 연속하게 관입한 보어링공 속에 삽입한다. 안쪽에 있는 아크릴관에는 청색의 Methylene Blue 용액이 채워져 있으며 이 용액은 상온에서는 청색을 유지하지만 기온이 0°C이하가 되면 색이 무색으로 변한다. 동결깊이는 케이싱에서 내부의 아크릴관을 외부로 꺼내어 용액이 얼어서 무색으로 변한 곳과 얼지 않은 곳의 청색의 경계선까지 측정하여 동결심도를 측정하게 된다(김영진, 1999)

### 3.2 Methylene Blue 동결심도계의 설치 및 현황

그림 2는 Methylene Blue 동결심도계의 설치단면 및 측정모습을 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.

### 3.3 최대동결심도 분포도

1991년부터 2004년까지 전국 83개 지점에 매설한 동결심도계로 측정한 동결심도 중 최대동결심도를 이용하여 그림 3과 같은 전국 최대동결심도 분포도(contour map)를 작성하였다.

그림 3에서 최대 동결심도가 150cm 이상이 나타난 지역은 강원도 홍천, 평창, 횡성, 화천, 양구지역으로 나타났다. 또한, 경기도 연천, 문산, 파주 등과 같은 경기도 북부지역과 강원도 영월, 춘천, 정선지역과 경북 안동, 청송, 충북 제천, 충주지역 등은 최대동결심도가 120cm 정도의 분포를 나타냈다.

반면에, 강릉 등 동해안지역과 전남 함평, 광주, 순천, 남원지역과 경북 울진, 포항, 경남 진주 등의 남부지역에서는 동결심도가 0~50cm의 분포를 보였다.

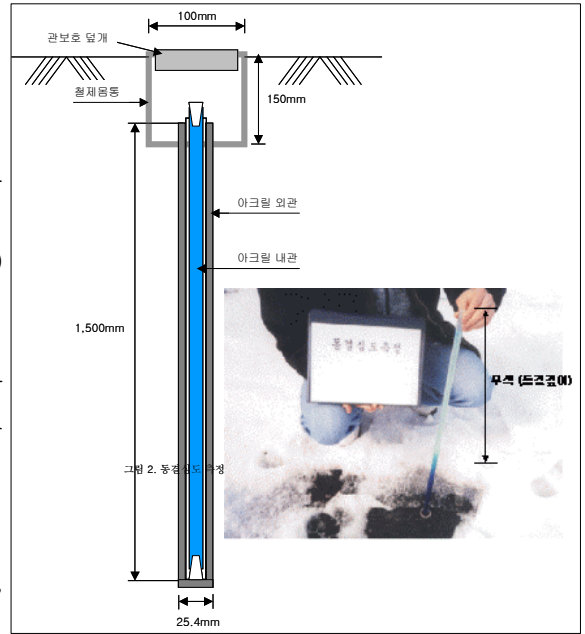


그림 2. Methylene Blue 동결심도계

### 4. 동결심도-동결지수 상관관계 분석

Jumikis(1955)는 지반의 동결심도에 영향을 미치는 동결변수의 요소들을 토질의 공학적 성질(밀도, 함수비, 간극비, 간극율)과 흙의 열적특성(열전도율, 용해잠열, 비열), 기상조건(노면의 피복상태에 따른 지표면의 온도, 동결온도, 동결기간), 지하수의 깊이 및 지반내 수분의 빙점분리작용 등이라고 하였다. 이러한 동결변수의 제반요소들을 모두 고려하고 이를 실용화하기에는 많은 문제점이 있다. 본 논문에서는 Stefan이론을 바탕으로 지금까지 현장에서 실측한 국내 동결심도자료와 해당연도의 동결지수과의 상관성을 분석하여 국내의 동결심도 추정모델을 개발하기 위한 기초연구를 수행하였다.

#### 4.1 동결지수 산정

전국 국도상에 매설된 Methylene Blue 동결심도계에서 측정한 동결심도와 인근의 측후소에 측정한 기후자료를 이용하여 해당연도의 동결지수를 산출하였다. 여기서 동결지수란 포장내의 동결관입 깊이를 산정하기 위한 대표적 척도로서, 포장구조와 노상토를 동결시키는 대기온도의 강도와 지속기간의 누가영향(cumulative effect)으로 표시된다. 동결지수의 단위는 온도·일(°C·일)이며, 어느 동결 계절동안의 누가온도·일에 대한 시간 곡선상의 최고점과 최저점의 차이로 나타낸다.

산정된 동결지수는 인근에 설치된 Methylene Blue 동결심도계의 표고에 대한 보정을 다음과 같다.

$$\text{보정동결지수}(^{\circ}\text{C}\cdot\text{일})=0.9\times\text{동결기간}\times\text{표고차(m)}/100 \quad (5)$$

여기서, 표고차는 동결심도계 위치표고(m) - 기상측후소 지반고(m)

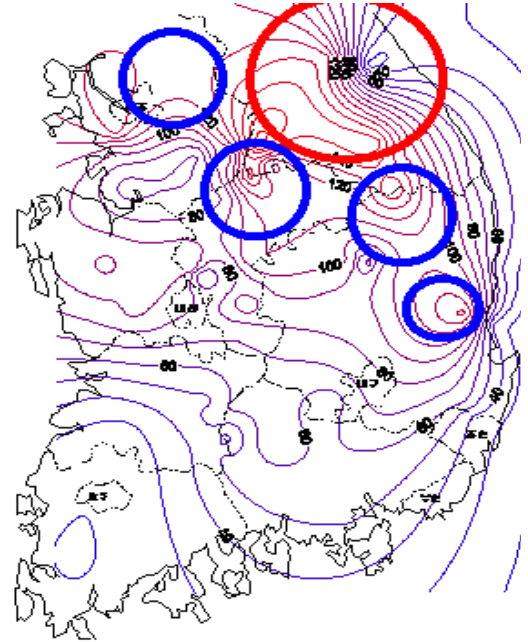


그림 3. 전국 최대 동결심도 분포도

## 4.2 동결심도-동결지수 상관관계 분석

### 4.2.1 국내 동결심도와 동결지수와의 상관성 분석

동결심도는 동일한 지역이라도 토질조건, 도로 포장두께, 음양(陰陽)조건, 지하수 등에 따라 동결깊이는 달라진다. 정확한 동결깊이를 산정하기 위해서는 정확한 동결지수의 산정은 매우 중요하다. 예를 들어 강원도 산간지역에 위치한 동결심도계가 가장 인접한 기상측후소의 위치가 해안지역이라면 해안지역에서 산출한 동결지수가 동결심도계가 설치된 위치의 기상조건을 대변할 수 없을 것이다. 따라서 이런 경우를 감안하여 해안지역보다는 조금 먼 위치라도 내륙지역의 기상측후소에서 산출한 동결지수가 동결심도계의 설치지역과 비슷한 경향을 나타낼 것이다.

### 4.2.2 전국의 동결심도-동결지수와의 상관관계

그림 4는 1991년부터 2004년까지의 전국 국도상에 매설되어 있는 동결심도계를 이용하여 해마다 측정된 최대동결심도와 그 해의 동결지수와의 관계를 도시한 그래프이다. 그래프로부터 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$z = 5.61\sqrt{F} \quad (6)$$

여기서,  $z$  : 동결심도(cm),  $F$  : 동결지수( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ )

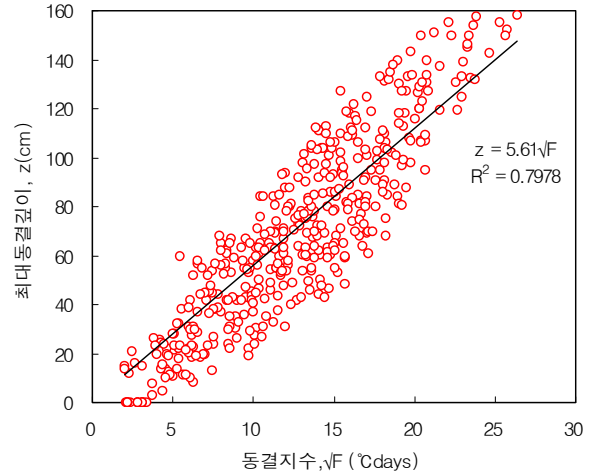


그림 4. 전국 동결심도-동결지수 상관관계 곡선

이 상관관계식은 그림 5에서 보는 바와 같이 동결지수의 증가에 따라 동결심도도 점진적으로 증가하고 있다. 상관계수( $R^2$ )도 0.7078로 비교적 크게 나타나고 있다.

### 4.2.3 지역별 동결심도-동결지수 상관관계 분석

지역별 동결심도와 동결지수와의 상관성 분석을 위해서 지역의 기후특성 및 표고를 대표할 수 있는 측후소를 중심으로 남한전역을 총 10개의 지역그룹으로 나누어 동결심도와 동결지수와의 상관관계를 분석하였다.

표 2. 지역별 구분내역

구분	지역명	설치수
GROUP 1	경기북부지역(문산, 파주, 가평지역)	4
GROUP 2	경기중남부지역(서울, 수원, 양평지역)	10
GROUP 3	강원북부내륙지역(대관령, 홍천, 횡성, 평창)	8
GROUP 4	강원중남부내륙지역(영월, 정선, 춘천지역)	6
GROUP 5	충청남도지역(천안, 부여, 당진지역)	6
GROUP 6	충청북도지역(제천, 충주, 보은지역)	8
GROUP 7	경북내륙지역(안동, 청송, 영주지역)	7
GROUP 8	동부해안지역(양양, 울진, 포항지역)	3
GROUP 9	남서부지역(전라남북도 지역)	11
GROUP 10	남동부지역(경상남도 지역)	10

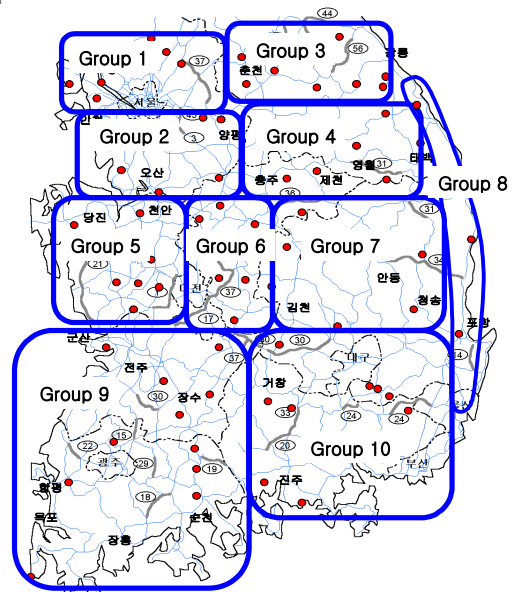


그림 5. 지역별 구간 선정

표 3 지역별 동결지수와 동결심도의 관계에서 도출한 동결심도 추정정수 C값을 나타낸 것이다. 표 3의 결과로부터 동결심도 추정정수(C)는 북쪽지역인 강원도지역(G3, G4)과 경기도북부지역(G1)에서 5.92~6.53의 범위로 가장 크게 나타났다. 또한 청송, 안동지역 중심의 경북내륙지역(G7)과 제천, 충주지역 중심의 충청내륙지역(G6)의 추정정수가 각각 5.71과 5.44로 나타났다. 또한 양양과 강릉, 울진, 포항으로 이어지는 동부해안지역(G8)의 동결심도 추정상수는 2.32로 가장 낮게 나타나 해안지역의 동결심도는 내륙지역보다 작은 것으로 나타났다.

표 3. 지역별 동결심도 추정상수(C)

구 분	동결심도 추정모델
경기북부지역(G1)	$z = 5.92\sqrt{F}$
경기중남부지역(G2)	$z = 4.88\sqrt{F}$
강원북부내륙지역(G3)	$z = 6.53\sqrt{F}$
강원남부내륙지역(G4)	$z = 6.48\sqrt{F}$
충청서부지역(G5)	$z = 4.73\sqrt{F}$
충청내륙지역(G6)	$z = 5.44\sqrt{F}$
경북내륙지역(G7)	$z = 5.71\sqrt{F}$
동부해안지역(G8)	$z = 2.32\sqrt{F}$
남서부지역(G9)	$z = 3.95\sqrt{F}$
남동부지역(G10)	$z = 3.62\sqrt{F}$

※ z : 동결심도(cm), F : 동결지수(°C·day)

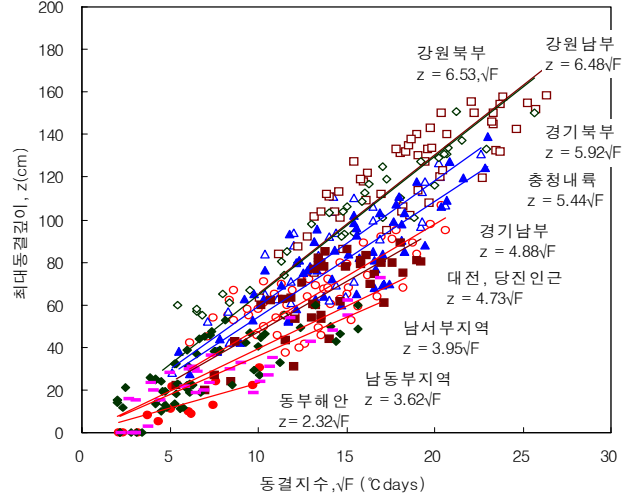


그림 6. 지역별 동결심도-동결지수 상관관계

#### 4.2.4 동결지수별 상관관계 분석

그림 7과 같이 동결심도 추정모델을 동결지수를 100단위로 구분하여 동결지수 추정정수를 산정하였다. 동결지수에 따른 동결심도-동결지수와 상관관계를 살펴보면 ① 0~100°C·day:z=4.95√F, ② 100~200°C·day:z=5.39√F, ③ 200~300°C·day:z=5.49√F, ④ 300~400°C·day:z=5.68√F, ⑤ 400~500°C·day:z=5.96√F, ⑥ 500°C·day이상:z=6.15√F로 나타났다. 이와 같이 동결지수의 증가에 따라 동결심도 추정상수(C)는 약간씩 증가하였다. 따라서 특정지역의 동결지수를 산정할 때, 그 지역에 적합한 동결지수별 동결심도 추정식을 적용한다면 보다 정확한 동결심도를 예측할 수 있을 것이다.

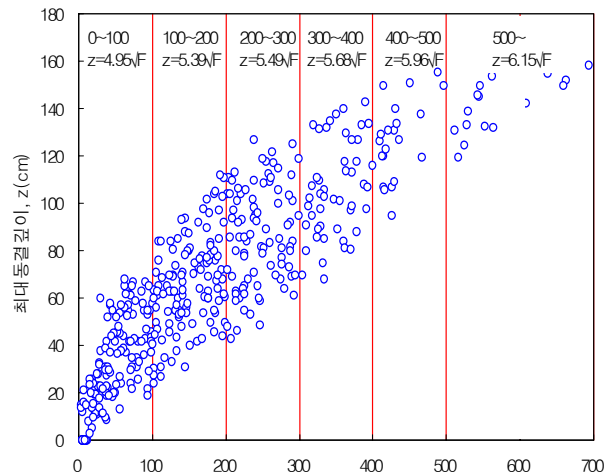


그림 7. 동결지수별 동결심도-동결지수 상관관계

#### 4.2.5 포장두께별 상관관계 분석

도로포장처럼 다층인 경우에는 각 층을 이루고 있는 재료의 열전도율과 용해잠열(融解潛熱)의 차이 때문에 실제의 동결깊이를 산정하는 것은 복잡한 문제이다. 따라서 동결심도의 실측자료를 통하여 도로의 포장두께에 동결심도가 미치는 영향을 포장두께별로 분석하였으며 그 결과는 표 4와 같다.

표 4. 아스팔트 포장두께별 동결심도 추정상수

구 분	보조기층+ 동상방지층의 두께 (cm)								
	30이하	35	40	45	50	55	60	65	70이상
동결심도 추정상수	6.35	6.17	6.01	5.95	5.94	5.92	5.88	5.69	5.67



표 4에서 도로의 포장두께가 두꺼울수록 상수 C는 감소하였다. 동일한 동결지수에서 C값이 작은 것은 동결심도가 작게 나타나는 것이므로 포장두께가 두꺼울수록 동결심도는 작게 추정된다.

### 4.3 기존식과의 비교

1989년 국립건설시험소에서는 1980년부터 1989년까지의 전국의 맨 땅에 대한 동결심도를 다음과 같은 식을 발표한 바 있다(국립건설시험소, 1989).

$$z = 14F^{0.33} \quad (7)$$

국립건설시험소 실측식, 미공병단경험식과 일본 Terada식을 본 연구에서 도출한 동결심도 산정식과 비교하면 다음의 그림 8과 같다.

그림 8에서 일점쇄선들은 기존의 동결심도 산정곡선을 나타내고 있다(미공병단식, 일본 Terada 식, 건설시험소식). 북부내륙지역인 강원도와 경기북부지역은 기존의 산정곡선보다 크게 나타나고 있다. 그러나 동결지수 100°C·day이하에서는 기존의 동결심도산정식이 크게 나타났으나 동결지수 100°C·day이상에서는 기존의 동결심도산정식이 작게 나타났다. 대체적으로 미공병단식과 경기북부지역의 상관식이 비슷한 경향을 나타내고 있으며 Terada식은 경기남부지역과 비슷한 경향을 보여주고 있었다. 반면 경상남도 전라남북도 지역과 해안지역에서의 상관곡선은 기존의 산정식보다 낮게 나타났다.

따라서 강원도북부 및 강원내륙지역과 같이 추운 지역에서는 기존의 상관식을 사용할 경우 동결심도를 과소평가하는 결과를 가져와 도로의 동상과피가 우려된다. 반면에 경상도와 전라도 지역과 해안지역에서 기존식을 설계에 적용할 경우, 동결깊이가 과대평가되어 동상방지층의 두께가 크게될 것이며, 이는 과도한 비용의 낭비를 초래할 것으로 사료된다.

기존의 동결심도 산정식이 이번에 KICT에서 실측한 결과와 일치하지 않는 이유는 각국의 기후조건 및 지반조건이 서로 상이하기 때문이다. 따라서 외국의 방법을 그대로 이용하는 데는 문제가 있다. 또한 1989년에 발표한 국립건설시험소식은 도로포장에서 측정된 동결심도와는 상이하게 나타난 것이다. 따라서 우리나라의 기후조건 및 지반조건에 맞는 국내 포장도로에 대한 지역별, 동결지수별, 포장두께에 따른 동결심도-동결지수 상관곡선을 바탕으로 동결지수와 흙의 공학적 성질을 고려하고 그 밖의 지하수의 영향, 입상조건 등을 감안한다면 국내 지반 및 기상여건을 고려한 동결심도 산정모델 개발이 가능할 것이다.

### 5. 결론

본 연구를 통해 도출한 결과는 다음과 같다.

1. 전국 83개 국도상에 한국건설기술연구원에서 제작한 KICT Methylene Blue 동결심도계를 매설하였으며 1991년부터 2004년까지의 동결심도 측정자료를 토대로 전국최대동결심도분포도를 작성하였다. 전국의 동결심도 분포를 살펴보면 강원도북부 내륙지역은 동결심도가 150cm이상으로 나타났고, 경기도북부지역과 강원도남부 내륙지역은 동결심도가 120cm이상으로 측정되었다. 반면에, 동부해안지역과 경상남도 및 전라도 지역에서는 동결깊이가 0~50cm로 대체적으로 동결심도가 낮게 나타났다.
2. 1991년부터 2004년까지의 전국 국도상에 매설된 Methylene Blue 동결심도에서 실측한 최대동결심

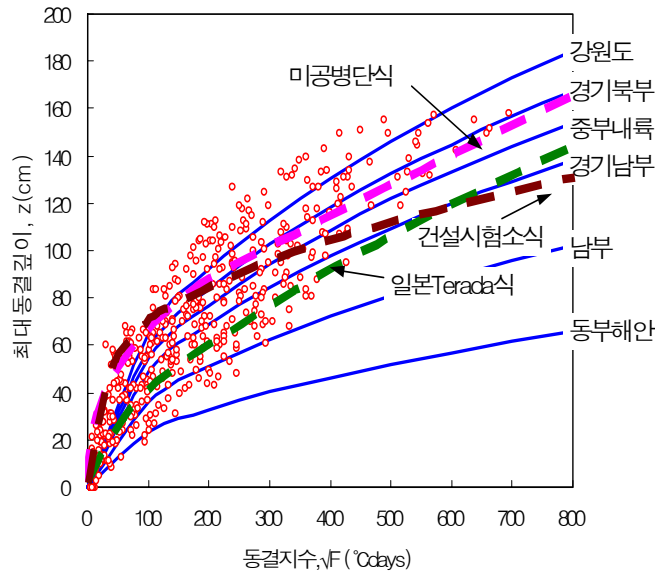


그림 8. 기존 동결심도 산정식과의 비교

- 도와 해당지역 당해연도의 동결지수와의 상관관계를 분석한 결과,  $z = 5.61\sqrt{F}$ 의 관계가 나타났다.
3. 국내에서 기상조건이 비슷한 총 10개 지역그룹으로 나누어 동결심도와 동결지수와의 상관관계를 분석하였다.
  4. 동결지수를 100단위로 나누어 동결심도-동결지수와의 상관관계를 분석하였다.
  5. 포장두께(아스팔트+보조기층)에 따른 동결심도 추정상수를 도출한 결과, 포장두께 30cm이하인 지점들에 대한 동결심도 추정상수(C)는 6.35로 나타나며 포장두께가 커질수록 추정상수는 감소하여 최대 70cm의 포장두께에서는 동결심도 추정상수가 5.67로 감소하고 있었다.
  6. 지역별 동결심도-동결지수와의 상관관계식을 기존의 동결심도 산정식과 비교하였다.

## 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, III, 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.