

동결지수와 전국 포장국도에서 실측한 동결깊이의 관계

The Relationship Between Freezing Index and Frost Penetration Depths in Korea National Road

김 영 진[†] · 홍 승 서¹⁾

Kim, Youngchin · Hong, Seungseo

ABSTRACT : Korea is known to have seasonal frost during winter and the effect of low temperatures and water may cause a weakening of pavements. For that reason, frost protection layers have been constructed in pavements to avoid damage caused by frost action. The practices established in USA and Japan have been adopted as anti-frost design methods in Korea. However, the characteristics of Korean soils are different. Additionally, there is no formulation of a reasonable equation for frost penetration depth and the criterion to identify potentially frost-susceptible soils in present pavement design manuals in Korea. Therefore, adequate pavement design procedures in seasonal frost areas, as well as construction and maintenance practices are required. In this paper, frost penetration depths 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, measurement results were compared to the formula of the US Army Corps of Engineers and Ifukube in Japan.

Keywords : Frost penetration depth, Freezing index, Frost protection layers, Equation for frost penetration depth

요 지 : 우리 나라는 계절 동토지대로서 겨울에는 기온이 영하로 떨어져 지반에 동상현상이 발생하고, 봄에는 얼었던 지반이 융해하면서 도로포장을 파손하거나 그 수명을 단축시킨다. 이러한 동상 및 융해로 인한 도로포장의 파손을 방지하기 위하여 도로포장 하부에 동상방지층을 설치하고 있다. 그런데 국내에서는 도로 동상방지층의 두께 결정시 사용되는 동결깊이 추정식으로 미국이나 일본에서 개발된 식을 이용하고 있다. 그러나 이 식들은 자국의 기후 및 지반 조건에서 만들어진 것이므로 국내에서 그대로 적용하는 것이 합리적이라고 말하기는 어렵다. 우리 나라의 기후 및 지반조건에 맞지 않는 동결깊이 산정식을 도로 설계시 적용할 경우 전국에 새로 설치하는 도로 동상방지층의 두께가 달라질 수 있으며, 이에 따라 공사비가 잘못 산정될 수도 있다. 따라서 도로 공사비의 효율적인 집행과 도로의 내구성 향상을 위해 국내 기후 조건과 지반 여건에 맞는 동결깊이 산정식의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 전국 89개 포장국도에서 측정한 동결깊이와 기상청 측정 기온으로부터 산정한 동결지수를 함수로 하여 동결깊이 산정식(안)을 만들어 보았다. 아울러 지역별, 음/양지(陰/陽地) 조건별로 동결깊이가 어떻게 다르게 나타나는지 분석하였다. 또한 국내에서 기존에 이용하고 있던 동결깊이 산정식 및 외국의 동결깊이 산정식들과 그 결과가 어떻게 다르게 나타나는지 분석하였다.

주요어 : 동결깊이, 동결지수, 동상방지층, 동결깊이 산정식

1. 서 론

우리 나라는 계절동토지역에 속하는 관계로 겨울철이면 지반에 동상현상(frost heave)이 발생하는데, 이 현상으로 인해 도로포장체 등의 시설물이 들어 올려지면서 파괴된다. 봄철 해빙기가 되면 얼었던 지반이 녹으면서 융해침하(thawing settlement) 현상이 일어나 다시 한 번 도로 포장체를 파손하거나 사면 붕괴를 일으킨다(Taber, 1929; Beskow, 1935; 김영진 등, 2001).

국내 도로에는 이러한 동상이나 융해침하에 의한 포장체의 파손을 방지하기 위하여 동상이 발생하지 않는 자갈 동

상방지층을 설치하고 있는데, 강원도 북부지방의 경우 이 동상방지층의 두께가 무려 60cm에 달하는 곳도 있다(건설교통부 B, 2001).

국내에서 현재 동결깊이를 산정할 때는 미공병단에서 제정한 동결깊이 산정식을 이용하거나 국립건설시험소에서 1989년에 발표한 동결깊이 산정식을 이용하고 있다(건설교통부 A, 2000; 국립건설시험소, 1989).

그러나, 미공병단에서 제정한 동결깊이 산정식을 기후 및 지반조건이 다른 국내에서 그대로 적용하기에는 불합리한 점이 있다.

국립건설시험소식은 1980년부터 1989년까지 겨울철에 조

† 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 책임연구원(E-mail : yckim@kict.re.kr)

1) 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원

사요원이 맨땅을 삽으로 파고 눈으로 지중의 얼음조각(ice lenses)을 직접 확인하는 방법으로 동결깊이를 조사한 후, 이를 기상청에서 측정된 기온자료로부터 산출한 동결지수와 함수관계로 나타낸 식이다. 그러나 맨땅은 실제 도로처럼 다져져 있지 않아 공기를 다량 함유하고 있으므로 동결깊이가 실제 도로의 노반이나 노상보다 대체로 얕으며, 흙의 종류에 따라 다른 형태를 보이는 얼음조각 중에는 눈에 보이지 않는 것들도 있으므로 이 산정식 또한 합리적이라고 하기에는 무리가 따른다.

KICT에서는 methylene blue라는 시약과 아크릴 파이프 등을 사용하여 연구진이 직접 동결깊이 측정장치를 제작하였으며, 이를 이용하여 포장이 이루어진 전국 국도상의 89개 지점에서 겨울철에 다년간 동결깊이를 측정하고 있다(김영진, 2007). 본 논문에서는 이렇게 측정된 동결깊이와 기상청 측정 기온으로부터 산정한 동결지수를 함수로 하여 KICT 동결깊이 산정식(안)을 제안하였다. 아울러 지역별, 읍·양지별, 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 동결깊이 측정계의 원리 및 설치 방법

2.1 원리

동결깊이를 측정하는 방법에는 몇 가지 종류가 있지만,

본 연구에서 사용한 동결깊이 측정계는 methylene blue 용액의 동결특성을 이용하여 한국건설기술연구원에서 자체 제작한 것이다. 장치의 구성은 그림 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(160cm로 제작)까지 연직으로 천공한 구멍 속에 삽입한다. 아크릴 내관에는 청색의 methylene blue 용액이 채워져 있는데, 이 용액은 상온에서는 청색을 유지하지만 기온이 0°C 이하가 되면 무색으로 변한다.

따라서 이 동결깊이 측정계를 전국 국도상 89개 지점에 매설 한 후, 겨울철에 연구요원이 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.

2.2 설치방법

동결깊이 측정계는 해당 지역의 가장 깊은 동결깊이를 측정할 수 있는 곳으로서 i) 그 지역을 대표하는 지반특성과, ii) 고도가 비교적 높은 곳, iii) 가능한한 읍지지역에 설치하였다.

매설이 끝난 후에는 향후 연구요원이 동결깊이를 조사할 때 위치파악이 용이하도록 측량을 통해 설치지점의 제반 정보를 획득한다.

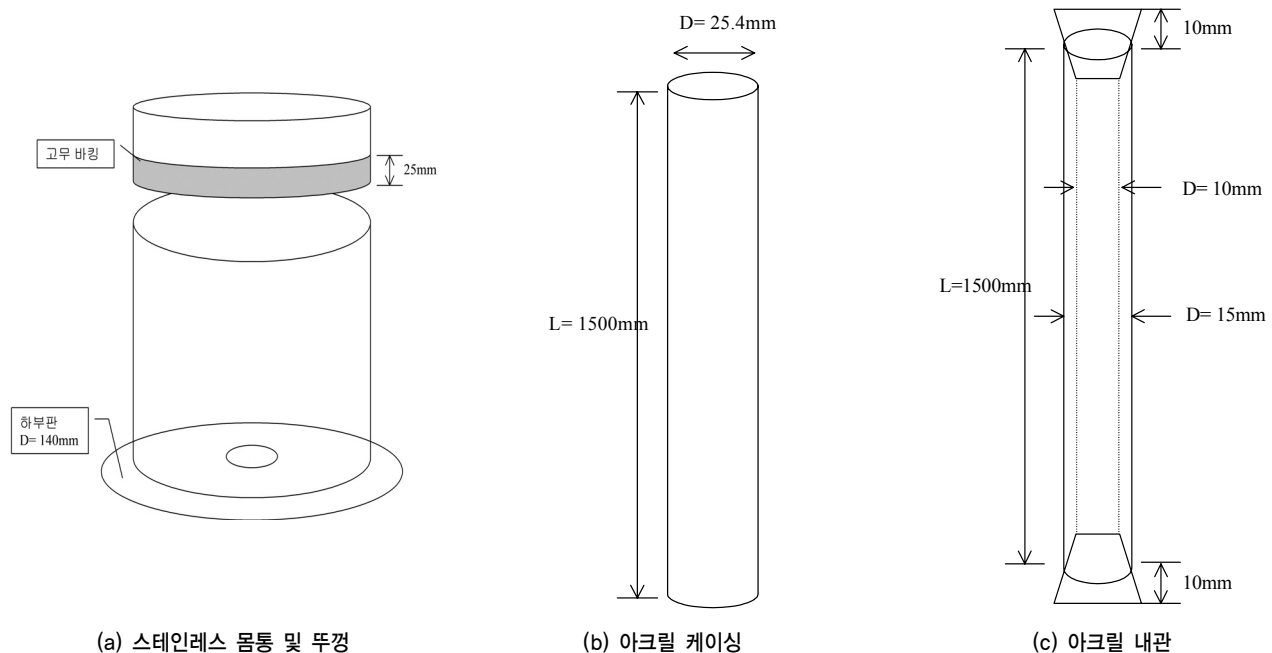
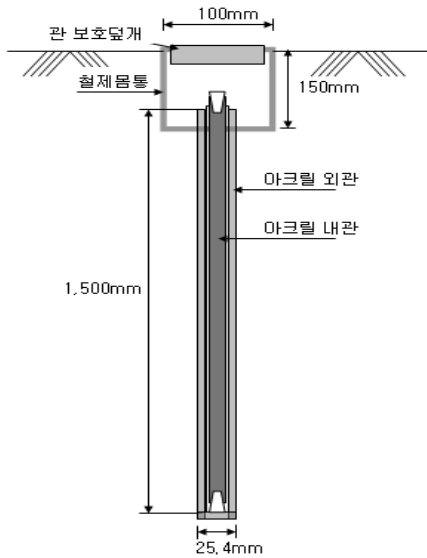
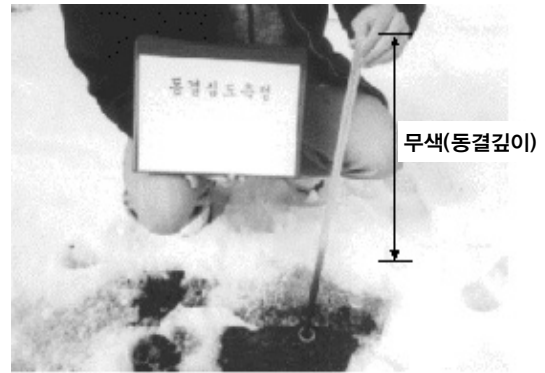


그림 1. Methylene Blue 동결심도계의 구성



(a) 설치단면



(b) 동결심도 측정

그림 2. Methylene Blue 동결심도계의 설치 및 측정

2.3 전국 동결깊이 측정계 설치 장소

동결깊이 측정계의 매설지점은 그림 3과 같다. 이 장치는 1991년부터 2008년 현재까지 순차적으로 포장국도상에 매설하였으며 현재 89개소가 매설되어 있다. 설치장소 설치시 해당번호 국도상에 적어도 한 개 이상을 설치하는 것

을 원칙으로 하였고, 남부지역보다는 북부지역에 많은 동결깊이 측정계를 설치하였다.

3. 동결지수

3.1 동결지수 산정방법

지반의 동결깊이는 0°C 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 °C·day이며, 동결기 동안의 누가 °C·day에 대한 시간 곡선상의 최고점과 최저점의 차이로 나타낸다(일본토질공학회, 1983).

3.2 국내 동결지수선도

도로설계를 위한 동결지수의 값은 대상 지역의 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 동결지수로 산정한다(건설교통부 A, 2000).

그림 4(a)와 그림 4(b)는 각각 10년 주기 국내 동결지수선도(1997~2006)와 30년 주기 국내 동결지수선도(1977~2006)를 작성한 것이다.

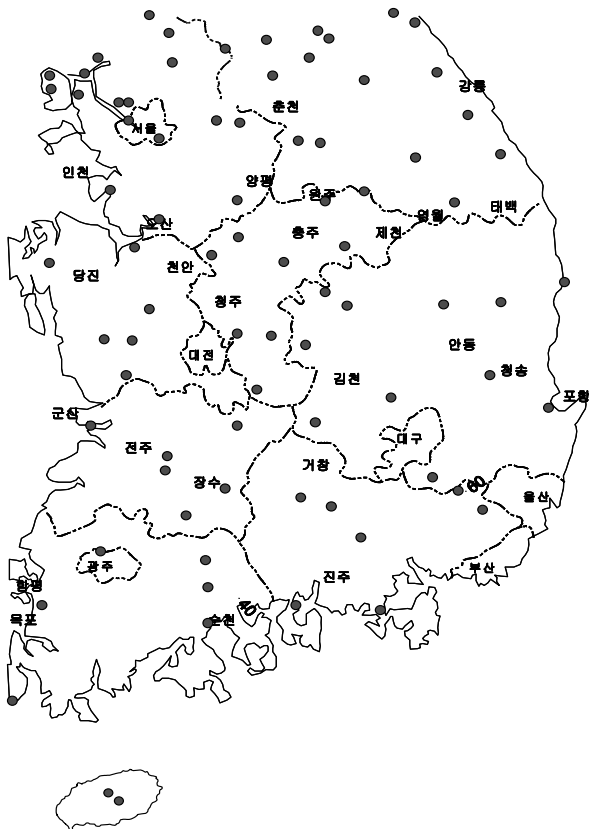
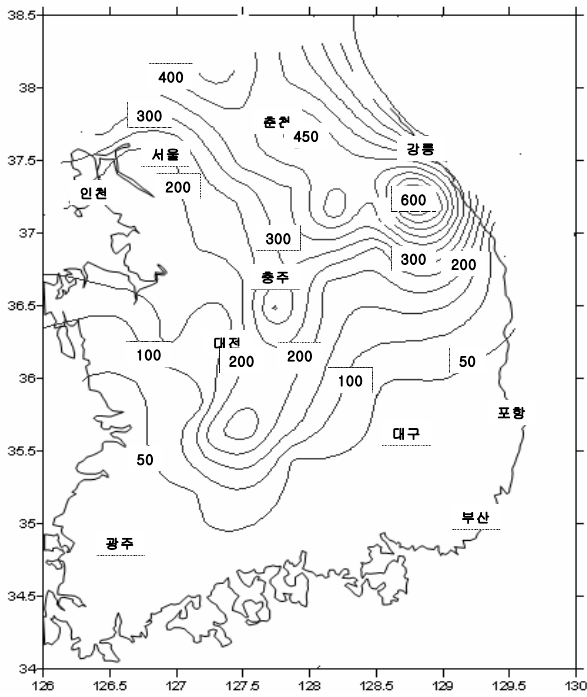
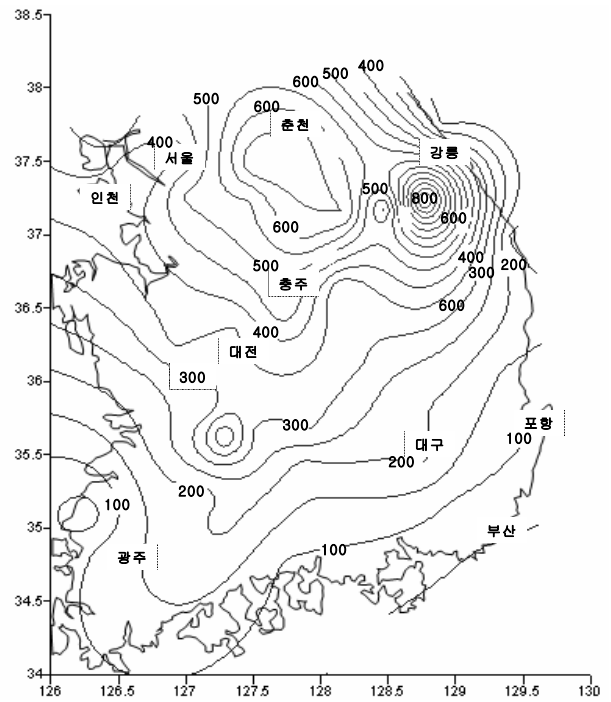


그림 3. 전국 국도상동결심도계 설치 장소



(a) 10년 주기 국내 동결지수선도(1997~2006년)



(b) 30년 주기 국내 동결지수선도(1977년~2006년)

그림 4. 국내 동결지수선도

4. 동결지수와 동결깊이 관계도

4.1 전국 동결깊이 분포도

전국 각 지점에서 측정된 최대동결깊이를 Golden Software INC에서 개발한 3D 그래픽 프로그램인 SURFER를 이용하여 그림 5에 나타냈다.

그림 5에서 우리나라의 동결깊이 분포를 보면 대체적으로 북쪽지방의 동결깊이가 깊었고, 동쪽이 서쪽보다 깊게 나타났다. 지역적으로는 강원내륙지역의 동결깊이가 가장 깊었고, 경기북부, 강원남부지역, 충북내륙, 경북내륙 순으로 깊게 나타났다. 반면 전라남도나 경상남도과 같은 남부지역은 동결깊이가 얇거나 지반에 동결이 발생하지 않았다.

그림 5(a)와 같이 1990~1999년 사이의 동결깊이 분포는 그림 5(b)의 2000~2005년 빈도 동결깊이 분포보다 5~10cm 정도 깊게 나타났다. 전 세계적인 지구온난화의 영향에 따라 동결깊이도 점진적으로 얇아지고 있었다.

그림 5(d)는 1991~2006년 사이의 최대 동결깊이 분포도를 도시한 것으로 강원도 인제, 홍천, 평창지역은 150cm 이상, 강원도 철원, 화천, 양구, 영월은 130cm 이상으로 분포되었다. 또한 경기북부, 충북내륙, 경북내륙지역인 가평, 연천, 제천, 청송 지역은 120cm로 나타났다. 경기중남부, 충청, 전북지역은 40~70cm의 범위를 보였다. 반면 남부지역인 경상남도는 40cm 이하, 전라남도는 20cm 이하로 알게

나타났다. 그림 5(d)와 같이 1991~2006년 사이의 동결깊이 분포는 2006년 동결깊이 분포보다 약 5~30cm 정도 깊게 나타났다.

그림 5(c)에서 2006년도 최대 동결깊이 분포는 평균적으로 1991~2006년 사이의 동결깊이 분포(그림 5(d))보다 약 10cm 정도 얇게 나타나고 있다.

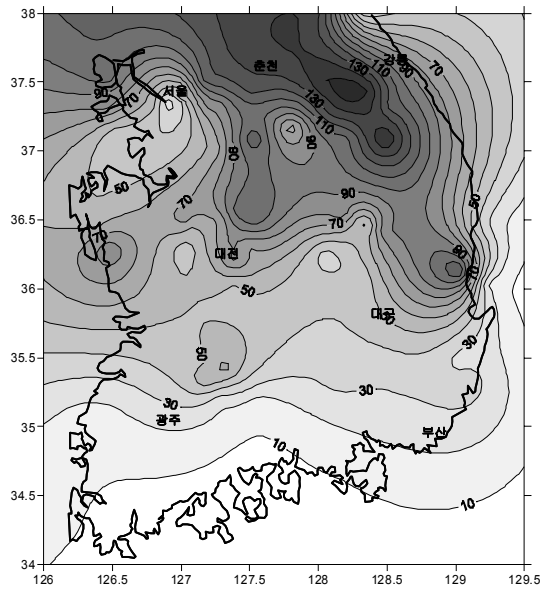
이와 같이 동결깊이 분포도로부터 우리나라 동결깊이가 나타나는 상황을 파악할 수 있으며, 동결깊이 분포도를 이용하여 건물의 기초 깊이, 상하수도관, 지하매설물의 매설 깊이를 결정하는데 활용할 수 있다.

4.2 전국 동결지수와 동결깊이 관계

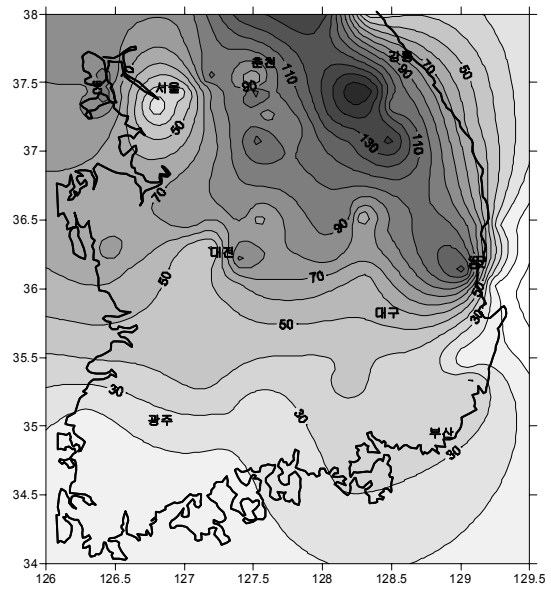
제주지역을 제외한 전국 87개 지점의 666개 동결깊이 측정치와 44개 기상측후소의 온도자료로부터 계산한 동결지수(F_m)의 관계를 그림 6에 도시하였으며, 이 결과로부터 구한 전국 동결깊이산정식을 식 (2)에 나타냈다.

동결지수는 동결깊이 측정지점과 인근한 측후소에서 측정한 일평균온도자료를 사용하여 구하였으며, 이렇게 구한 동결지수는 표고차를 고려하여 보정동결지수(F_m)로 환산한 후 동결깊이와의 관계식 산정시 이용하였다(건설교통부 A, 2000).

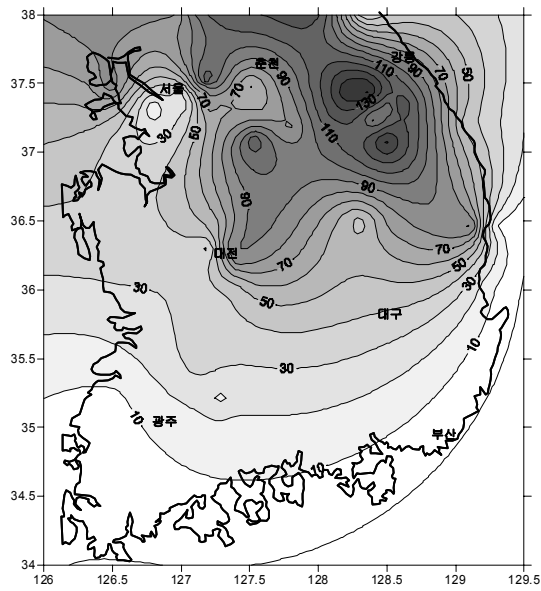
$$Z = C \sqrt{F_m} \quad (1)$$



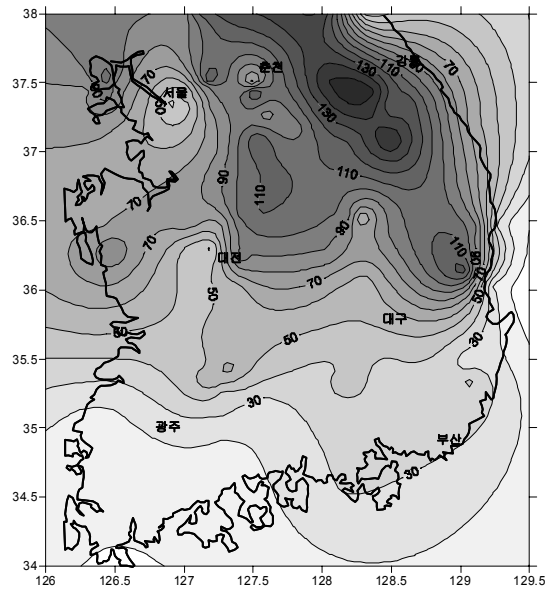
(a) 1991-1999년 최대동결심도



(b) 2000-2005년 최대동결심도



(c) 2006년 동결깊이 분포도



(d) 1991-2006년 최대동결깊이

그림 5. 전국 동결깊이 분포도

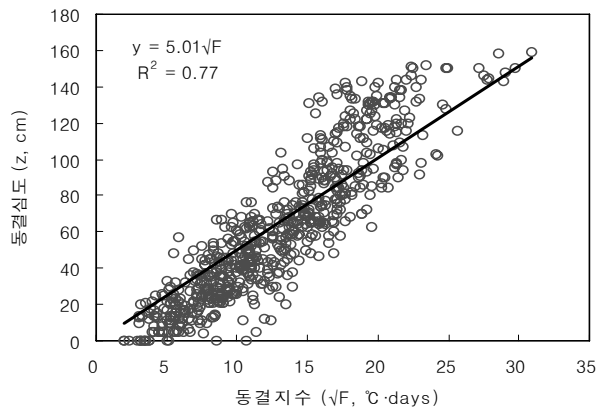


그림 6. 전국 동결지수-동결깊이 상관관계도

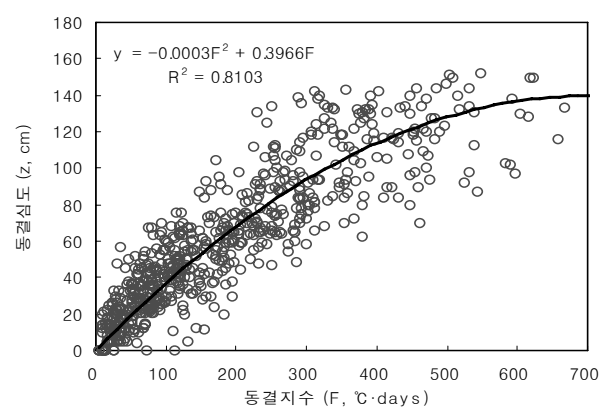


그림 7. 전국 동결지수-동결깊이 상관관계 곡선(다항식 형태)

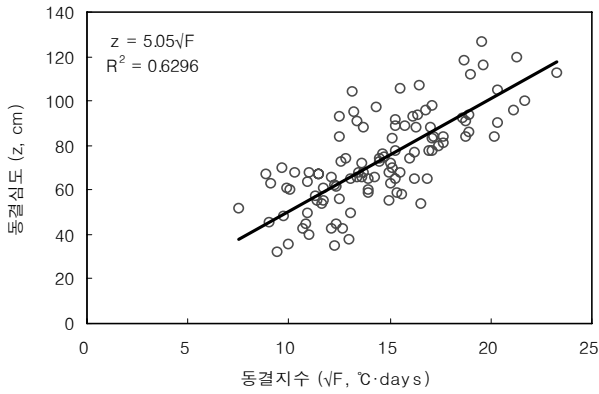


그림 8. 서울·경기지역 동결지수-동결깊이 상관관계 곡선

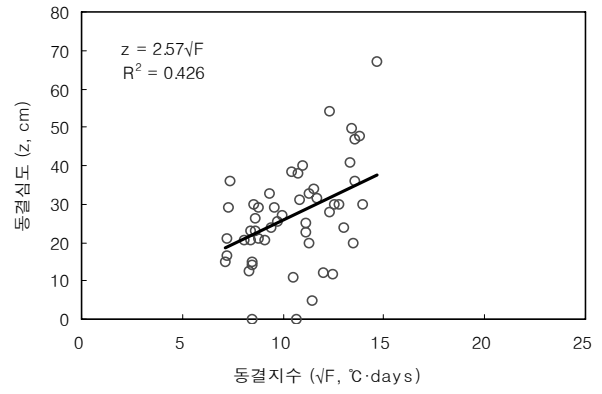


그림 9. 서울 도심부 동결깊이-동결지수 상관관계 곡선

여기서, Z : 실측한 지역별 최대동결깊이(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) = 동결깊이 측정계 매설지점 표고(m) - 측후소 지반고(m)

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

$$Z = 5.01 \sqrt{F_m} \quad (2)$$

동결깊이-동결지수 관계를 다항식으로 표시하여 식 (3) 및 그림 8에 나타냈다.

$$Z = -0.0003F_m^2 + 0.3966F_m \quad (3)$$

식 (3)은 다항식의 형태이며, 상관계수(R^2)는 0.8103으로 평방근으로 표시한 식 (2)보다 상관계수가 높게 나타났다.

4.3 지역별 분석자료

4.3.1 서울·경기지역

서울·경기지역에서는 총 20개 지점 158개 동결깊이 실측값과 9개 측후소에서 산출한 보정동결지수를 사용하여 분석하였다. 이 결과로부터 얻은 식의 정수 C값은 5.05로 나타났다.

$$Z = 5.05 \sqrt{F_m} \quad (4)$$

서울도심부에는 6개 지점에 동결깊이 측정계를 설치하였으며, 1995년부터 2006년 현재까지 서울특별시 품질시험소에서 관리하고 있다. 측정한 51개 동결깊이 측정값과 동결지수와의 상관관계를 식 (5) 및 그림 9에 나타냈다.

$$Z = 2.57 \sqrt{F_m} \quad (5)$$

4.3.2 강원지역

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

$$Z = 5.79 \sqrt{F_m} \quad (6)$$

4.3.3 충북지역

충북지역은 총 8개 지점 71개의 동결심도 측정치와 3개

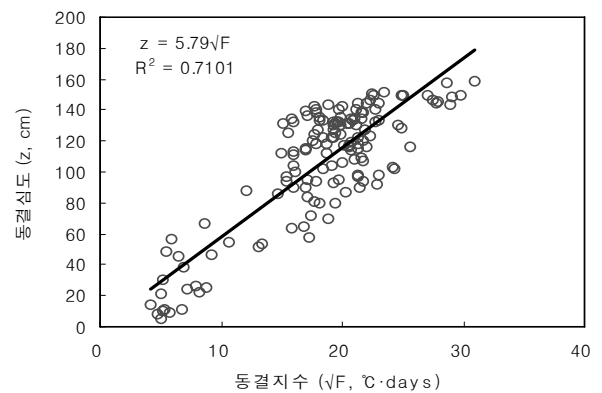


그림 10. 강원지역 동결깊이-동결지수 상관관계 곡선

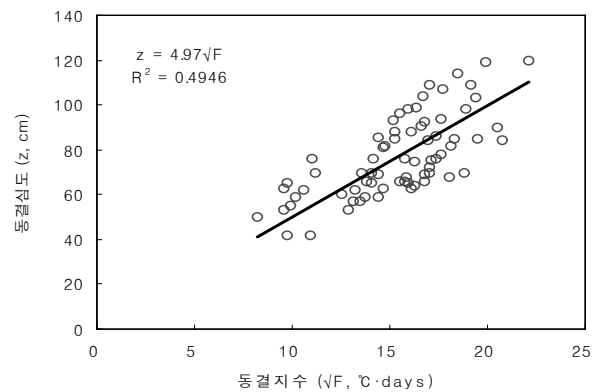


그림 11. 충북지역 동결깊이-동결지수 상관관계 곡선

측후소에서 도출한 동결지수의 상관관계를 분석하였다. 이 결과로부터 얻어지는 정수 C는 식 (7)과 같다.

$$Z = 4.97 \sqrt{F_m} \quad (7)$$

4.3.4 충남지역

충남지역은 총 7개 지점 64개 동결깊이 실측값과 3개의 측후소에서 산출한 동결지수 자료를 사용하여 동결깊이 산정식을 구하였으며, 식 (8)과 같다.

$$Z = 4.35 \sqrt{F_m} \quad (8)$$

4.3.5 경북지역

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

$$Z = 4.86 \sqrt{F_m} \quad (9)$$

4.3.6 전북지역

전북지역은 총 5개 지점 42개 실측값과 5개 측후소에서 산출한 동결지수를 사용하여 동결깊이 - 동결지수의 상관관계를 분석하였다.

$$Z = 3.56 \sqrt{F_m} \quad (10)$$

4.3.7 경남·전남지역

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

$$Z = 3.04 \sqrt{F_m} \quad (11)$$

4.3.8 제주지역

제주지역은 한라산에 매설한 2개 지점에서 총 20개의 동

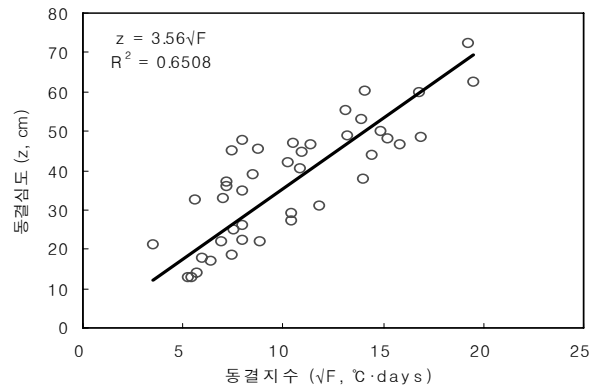


그림 14. 전북지역 동결깊이-동결지수 상관관계 곡선

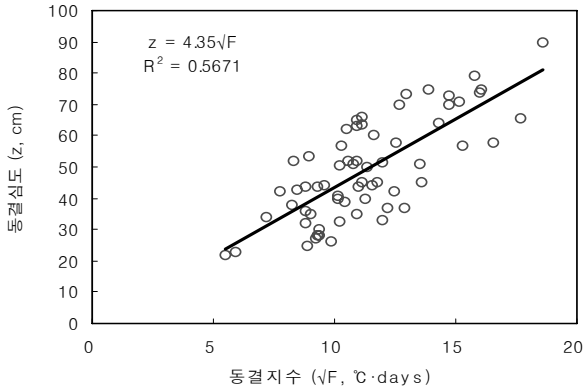


그림 12. 충남지역 동결깊이-동결지수 상관관계 곡선

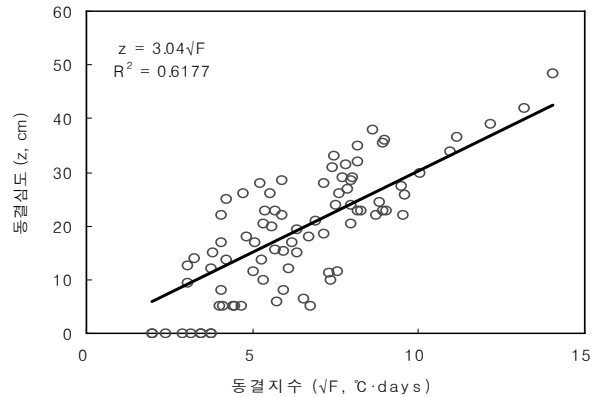


그림 15. 남부지역 동결깊이-동결지수 상관관계 곡선

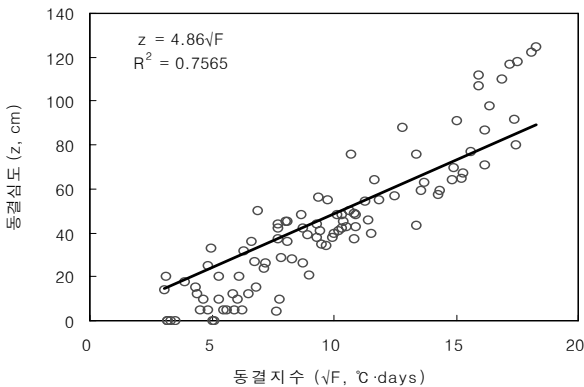


그림 13. 경북지역 동결깊이-동결지수 상관관계 곡선

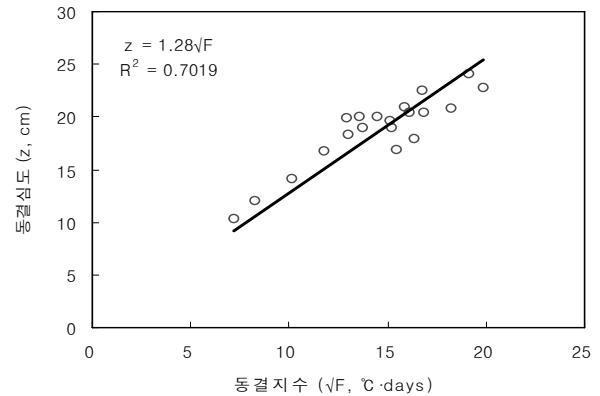


그림 16. 제주지역 동결깊이-동결지수 상관관계 곡선

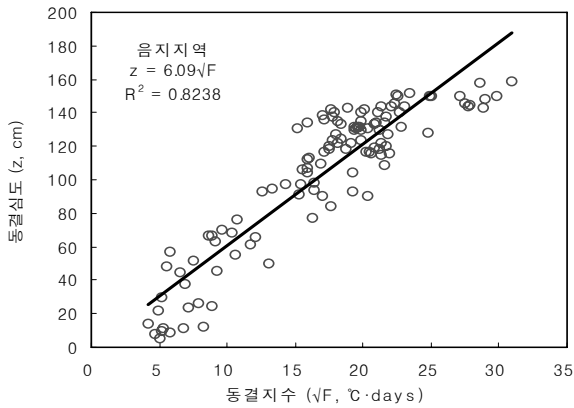
결깊이를 측정할 후 동결지수와 상관관계를 도출하였다.

$$Z = 1.28 \sqrt{F_m} \quad (12)$$

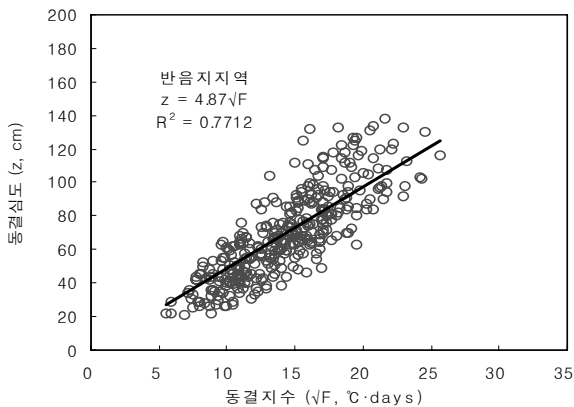
4.4 음·양지별 분석

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

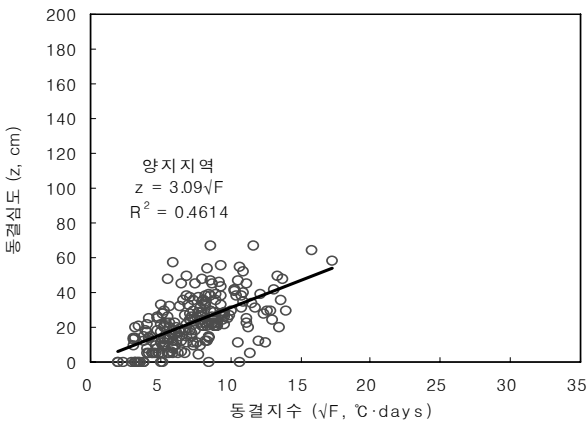
본 연구에서는 전국 89개 동결깊이 측정계 매설지점의



(a) 음지 지역



(b) 반음지 지역



(c) 양지 지역

그림 17. 음·양 조건에 따른 동결깊이-동결지수 상관 곡선

음양조건을 고려하여 각각 하루 종일 햇볕을 받지 않는 음지에 위치한 동결깊이 측정계와 만나질 동안만 햇볕을 받는 반음지, 하루 종일 햇볕을 받는 양지 조건으로 구분하여 각각에 대한 동결깊이-동결지수 상관관계를 분석하였다.

그림 17은 음·양지별 동결깊이-동결지수 상관관계를 나타낸 것이다. 각각의 음양조건에서 도출한 정수 C값은 식 (13)~식 (15)와 같다. 음지지역은 정수 C가 6.09이고, 반음지지역은 4.87, 양지지역은 3.09로 나타났다.

- 음지 지역

$$z = 6.09 \sqrt{F_m} \quad (13)$$

- 반음지 지역

$$z = 4.89 \sqrt{F_m} \quad (14)$$

- 양지 지역

$$z = 3.09 \sqrt{F_m} \quad (15)$$

상기의 식과 같이 햇볕을 받는 시간이 길수록 정수 C는 낮아진다. 음지에 비해 반음지 지역은 C값이 79.9% 감소하였고, 양지에서는 음지에 비해 무려 50.1%나 감소하였다.

4.5 포장체의 종류별 분석자료

전국 89개 동결깊이 측정계 매설 지역 중 3개소(철원, 가평, 춘천)에서는 콘크리트 도로에 동결깊이 측정계를 매설하였고, 나머지 86개소는 아스팔트 도로에 매설하였다. 아스팔트 도로의 동결깊이와 비교하기 위하여 2005년 콘크리트 도로에 처음 동결깊이 측정계를 매설한 후 2006년도부터 동결깊이를 측정하고 있다.

그림 18에서 콘크리트 포장의 경우 정수 C는 5.65로 나타났고 아스팔트 포장에서는 정수 C가 5.43으로 나타나 콘크리트 포장에서의 동결깊이가 아스팔트 포장의 그것 보다

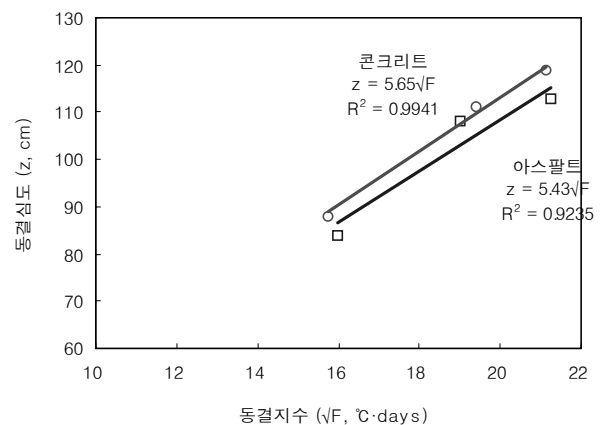


그림 18. 콘크리트와 아스팔트 포장도로의 상관성 비교

약간 컸다. 그러나 현재까지는 콘크리트 포장 국도에서의 측정 데이터가 매우 적어 향후 더 많은 자료를 축적한 후 그 결과를 좀더 자세하게 비교 분석할 예정이다.

4.6 기존식과의 비교

그림 19는 본 연구에서 수 년간 실측한 지역별 동결깊이-동결지수의 상관곡선 및 기존의 미공병단식, 일본 Ifkubeshi식, 1989년에 국립건설시험소에서 발표한 동결심도 산정식을 비교한 것이다.

그림 19에서 보는 바와 같이 미육군 공병단식은 한국건설기술연구원에서 실측한 강원도 지역을 나타내는 곡선과 비슷한 경향을 보이고 있다. 국립건설시험소식은 한국건설기술연구원에서 측정된 경기, 충북, 경북지역의 그래프와 비슷하게 나타나고 있다. 그러나 동결지수 400℃·day이하에서는 지역별 실측치보다 크며, 동결지수 400℃·day이상에서는 실측치보다 작게 나타났다. Ifkubeshi식은 한국건설기술연구원에서 실측한 충남지역 곡선과 전북지역 곡선 사이에서 분포하고 있다. 반면 남부지역, 서울도심, 제주지역은 기존의 어느 동결깊이 산정식보다 낮게 나타났다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실제 국내 포장국도에서 측정된 동결깊이 자료를 이용하여 KICT 동결깊이 산정식(안)을 만들었다.
- (2) 본 연구를 통하여 지구 온난화에 따라 1990년대 중반부터 전국 동결지수선도가 확실히 변화하는 것을 알 수 있었다.

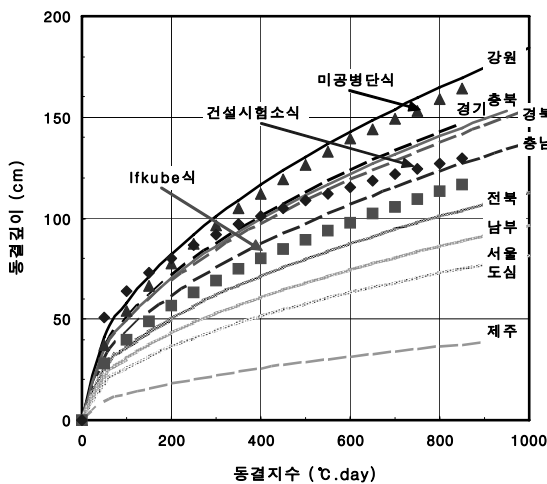


그림 19. KICT 동결깊이 산정식(안)과 기존 동결깊이 산정식의 비교

- (3) 한국건설기술연구원의 동토팀이 Methylene Blue 동결깊이 측정장치로 전국 포장국도에서 직접 측정된 동결깊이는 과거 국립건설시험소에서 맨땅에서 측정된 동결깊이 보다 깊게 나타났다. 그 까닭은 포장도로는 아스팔트나 콘크리트 및 자갈 등으로 구성되어 있는데 이들 재료의 열전도율은 흙의 그것 보다 더 클 뿐만 아니라, 노상에도 다짐작업을 통하여 흙 속의 공기가 추출되어 열전도율이 맨 땅의 그것 보다 더 크기 때문에 동결깊이도 과거 맨땅에서 측정된 것과 다르게 나타나는 것으로 풀이된다.

6. 향후 연구방향 및 기대 효과

향후 동결깊이 측정계가 매설된 도로 노상의 함수비 상태를 실측하여 함수비 변화에 따라서 동결깊이가 어떻게 달라지는지 추가로 분석할 예정이며, 공청회 등을 거친 후 본 연구 결과를 실제 도로 동상방지층 설계 시 활용할 수 있도록 확정, 공포할 계획이다.

본 연구 결과를 활용하여 국내 도로 동상방지층의 합리적 설계 및 시공이 가능해지고, 겨울철 상 하수도관 등 매설관의 매설깊이를 합리적으로 결정할 수 있으며, 아울러 개성공단 등 국내 건설업체의 북한 진출에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

표 1. 조건별 동결깊이 산정식 정리

1. 전국평균	$Z = 5.01 \sqrt{F_m}$ $Z = -0.0003F_m^2 + 0.3966F_m$ (다항식)
2. 지역별	- 서울·경기 : $Z = 5.05 \sqrt{F_m}$ - 경기충북부 : $Z = 5.24 \sqrt{F_m}$ - 경기남부 : $Z = 4.36 \sqrt{F_m}$ - 서울도심부 : $Z = 2.57 \sqrt{F_m}$ - 강원 : $Z = 5.79 \sqrt{F_m}$ - 충북 : $Z = 4.97 \sqrt{F_m}$ - 충남 : $Z = 4.35 \sqrt{F_m}$ - 경북 : $Z = 4.86 \sqrt{F_m}$ - 전북 : $Z = 3.56 \sqrt{F_m}$ - 남부(전남·경남) : $Z = 3.04 \sqrt{F_m}$ - 제주 : $Z = 1.28 \sqrt{F_m}$
3. 음양조건별	- 음지 : $Z = 6.09 \sqrt{F_m}$ - 반음지 : $Z = 4.87 \sqrt{F_m}$ - 양지 : $Z = 3.09 \sqrt{F_m}$
4. 포장종류별(경기북부)	- 아스팔트 포장도로 : $Z = 5.43 \sqrt{F_m}$ - 콘크리트 포장도로 : $Z = 5.65 \sqrt{F_m}$

참 고 문 헌

1. 건설부 국립건설시험소 (1989), 동결심도조사보고서, pp. 16~26, pp. 42~44, pp. 72~75.
2. 건설교통부 A(2000), 도로설계편람 II 권 포장편, pp. 702-1~55.
3. 건설교통부 B (2001), 2000 도로포장관리시스템 도로대장, pp. 229.
4. 김영진, 홍승서, 유준 (2001), 동절기 지반의 동결심도 장기조사, 한국건설기술연구원, pp. 6~7.
5. 김영진, 홍승서 (2007), 동결심도 및 포장내부 온도조사, 한국건설기술연구원, pp. 55~61.
6. Beskow, G. (1935), Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Road and Railroads, Swedish Geological Society, No. 375, pp. 1~144.
7. Taber, S. (1929), Frost Heaving, *Journal of Geology*, Vol. 37, pp. 428~461.
8. 日本土質工學會, 土質基礎工學 라이브러리-23, 1983, pp. 106~108.

(접수일: 2008. 9. 5 심사일: 2008. 11. 19 심사완료일: 2009. 4. 9)