

포장도로의 실측값을 활용한 한국형 동결깊이 예측모델 개발

Development of Prediction Model of Frost Penetration Depth on Pavement in Korea

홍 승 서¹ Hong, Seung-Seo
김 영 석^{2*} Kim, Young-Seok
김 학 승³ Kim, Hak-Seung

ABSTRACT

Korea is known to have seasonal frozen ground during a winter season due to climatic and ground conditions. Temperatures below 0°C cause pavement failure by frost heaving and thaw settlement. A frost protection layer has been constructed in pavements to avoid damage caused by frost action. Anti-frost design methods in Korea have been adopted, which is established in U.S. and Japan. However the characteristics of soils in Korea are different and there are no reasonable modifications to accommodate these characteristics. Therefore, adequate pavement design procedures including seasonal frost action, as well as construction and maintenance practices are required.

In this paper, the frost penetration depths along national roads in Korea are presented based on field measurement over several years (1991~2010). The frost penetration depths are analyzed with respect to the Provinces of Korea and sunny/shaded areas.

요 지

우리나라는 동절기 지반이 동결되는 계절성 동토지대로 겨울철에 기온이 영하가 되면 포장도로가 동상으로 융기되거나 봄철 융해기에 침하가 발생하여 포장체의 손상을 유발한다. 일반적으로 도로포장 설계에서는 동상으로 인한 피해를 방지하기 위하여 동상방지층을 설치하는데 국내에 적용하는 동상방지층 설계는 외국에서 적용하는 방법을 사용하고 있다. 이 방법들은 각 나라마다의 기후나 지반 여건을 고려하여 만들어진 것으로 국내에서 그대로 적용하는 데에는 문제가 있다. 즉, 외국의 동결깊이 산정방법을 국내 도로설계에 적용할 경우 동상방지층 설계깊이가 달라질 수 있으며 이에 따라 공사비의 과도한 집행이나 도로의 내구성 저하가 발생할 수도 있다.

본 논문에서는 다년간(1991~2010) 전국 포장국도에서 측정한 동결깊이 자료를 이용한 동결깊이 산정식을 도출하였으며, 이를 바탕으로 지역, 일사량 등의 외적요인에 대한 보정상수를 적용한 동결깊이 추정모델을 제안하였다.

Keywords : Frost penetration depth, Frost gauge, Model of frost penetration depth, Pavement

1. 서 론

우리나라에서 도로설계에 적용하는 동결깊이 산정식은 다른 나라의 기후 및 지반조건을 반영한 경험식을 적용하여 국내 실정에는 맞지 않아 동상방지층 설계에는 불합리

하다. 현재 국내 도로설계시 동결깊이를 결정할 때에는 미공병단에서 제정한 동결깊이 산정식을 이용하거나 국립건설시험소에서 1989년에 발표한 동결깊이 산정식을 이용하고 있다(건설교통부, 2000).

미공병단에서 제정한 동결깊이 산정식을 기후 및 지반조건

1 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 전임연구원 (Member, Research Specialist, Geotechnical Engineering Resarch Division, KICT)

2* 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Resarch Division, KICT, E-mail: kimys@kict.re.kr)

3 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 전임연구원 (Member, Research Specialist, Geotechnical Engineering Resarch Division, KICT)

이 다른 국내에서 그대로 적용하기에는 불합리하고 국립건설 시험소식은 겨울철에 작업원이 직접 얼어있는 지반을 삽으로 파고 육안으로 동결깊이를 직접 확인하는 방법으로 정확성이 비교적 떨어지는 단점이 있다(국립건설시험소, 1989).

한국건설기술연구원(김영석과 홍승서, 2009)은 1991년부터 전국 국도상의 96개 지점에서 겨울철에 다년간 동결 깊이를 측정하고 있으며, 본 논문에서는 상기의 동결깊이 측정 자료를 바탕으로 세계적인 기후변화에 대응하고 국내 기후조건 및 지반조건에 적합한 한국형 동결깊이 산정식 개발하고자 한다.

2. 기존사례 조사연구

2.1 동결깊이 산정이론

도로포장의 구조는 포장재료에 따라 다층구조를 이루고 있다. 이에 Aldrich와 Paynter(1953)는 수정 Berggren 식을 사용하여 다음과 같이 도로 포장체의 동결심도 산정식을 정의하였다(日本土質工學會, 1983).

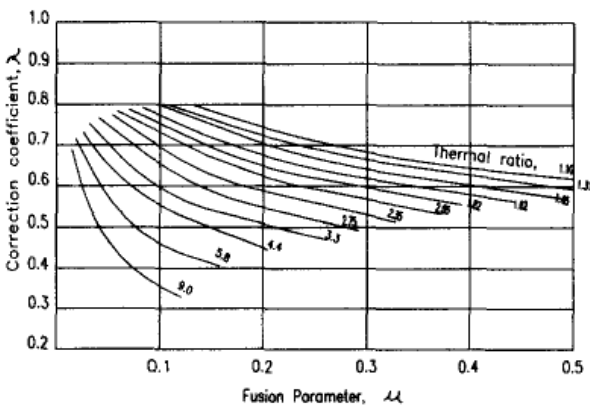


그림 1. 보정계수, 융해파라미터, 열비의 관계

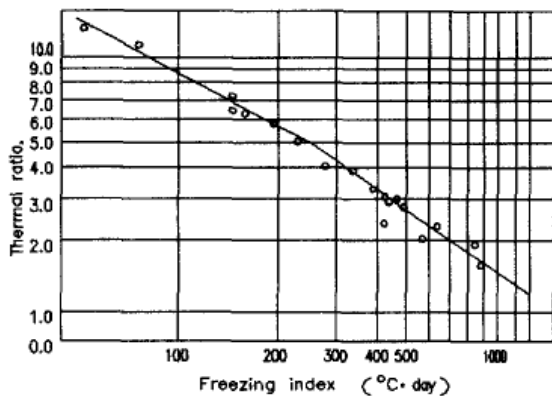


그림 2. 동결지수와 열비의 상관관계

$$Z = \lambda_c \sqrt{2(3600s/h)24h/day \times \frac{K[W/m \cdot k] \times F[^\circ C \times days]}{(L/K)_{eff}}}$$

$$Z = \lambda_c \sqrt{\frac{172800 \times K \times F}{L}}$$

$$Z = \lambda_c \sqrt{\frac{172800F}{(L/K)}} = \lambda_c \sqrt{\frac{172800}{(L/K)}} \sqrt{F} \quad (1)$$

여기서, Z : 동결깊이(cm), F : 동결지수(°C·days)
 K : 동결시 또는 미동결시 평균 열전도율(W/m/K)
 L : 동결잠열(潛熱, J/m³), λ_c : 보정계수 f(u, τ)

2.2 해외의 동결깊이 경험식 연구

2.2.1 동결깊이 실측치에 의한 산정방법 비교

동결깊이 계측값을 활용한 경험식의 산정은 식 (1) 수정 Berggren 식으로부터 상수 C로 나타낸 간편식(식 (2))으로 형태로 상관관계를 분석한다. 여기서 상수 C는 지반의 내적 성질인 밀도, 열적특성, 함수비 등을 포함한 상수이다(日本土質工學會, 1983).

$$Z = \lambda_c \sqrt{\frac{172800 F}{(L/K)_{eff}}} = C \sqrt{F} \quad (2)$$

테라다(寺田), Cohen & Fielding, Argue & Denyes 등은 동결심도 산정을 위해 표 1과 같이 경험식을 제시하였다(김영석과 홍승서, 2009).

일본 테라다는 온난한 지역과 한랭한 지역으로 구분하여 제안하였으며 또한, 한랭한 지역에 대하여는 동결지수를 300°C·day를 기준으로 하여 구분하였다. Argue & Danyes는 도로의 포장상태 및 지표면 상태 등으로 구분하여 경험식을 제안하였다. 그 밖에 Cohen & Fielding은 적설을 고려한 지반 동결깊이에 대한 경험식을 제안하였다(日本土質工學會, 1983).

2.2.2 러시아 동결깊이 산정식

러시아에서 동결깊이의 산정은 러시아 표준시방서에 규정하고 있으며 이 식은 장기계측 자료를 바탕으로 한 경험식으로 기본적으로는 핀란드 동결깊이 추정모델과 일본 테라다 식과 유사하나, 흙의 종류, 적설량, 측정 지역 등의 여러 가지 외적조건을 고려하여 다음과 같이 동결깊이를 산정모델을 제안하고 있다(김영진과 강재모, 2007).

표 1. 조건에 따른 동결깊이 추정 C값

| 동결깊이산정식 | 동결깊이 추정계수(C) | 비 고 | |
|--------------------|--------------|---------------|------|
| 데라다 식 | 2.94 | 온난 지역 | |
| | 4.0 | F > 300 | 한랭지역 |
| | 3.7 | 300 ≤ F < 100 | |
| Argue & Denyes 식 | 4.3 | 제설하지 않은 지역 | |
| Cohen & Fielding 식 | 7.4 | 지표면이 노출된 지역 | |
| | 4.6 | 30cm 눈이 덮힌 지역 | |

표 2. 지반경사에 따른 동결깊이 보정

| 지반경사 방향 | 개활지(cm) | 도심지(cm) |
|------------------------|---------|---------|
| 평평한 지반, 5° 미만의 남서방향 경사 | 0 | 0 |
| 남쪽 또는 남서방향 경사 | -20 | 0 |
| 동쪽 방향 경사 | +20 | 0 |
| 북동 또는 북서방향 경사 | +40 | +20 |
| 북쪽방향 경사 | +60 | +40 |

표 3. 흙의 함수비와 입도에 따른 동결깊이 보정

| 구 분 | 보정 값 |
|---------------------------|------|
| 함수비 25% 정도의 점성토 또는 세립 사질토 | 1.00 |
| 함수비 25% 이하의 점성토 또는 실트 | 0.75 |
| 자연함수비의 조립토, 자갈 | 1.33 |

$$h = K_1 \sqrt{\sum t} - K_2 S \quad (3)$$

여기서, h : 동결깊이 (cm) K₁, K₂ : 지역상수
 ∑t : 연평균 영하온도의 합(°C)
 S : 12월에서 2월 사이에 쌓인 눈의 평균깊이 (cm)

식 (3)에서 지역상수 K₁, K₂는 경험(계측자료)에 의해 구해진 상수로 각 지역마다 지방에서 규정하고 있는 지역상수 값을 사용하도록 하였다(감차카, 사할린 : K₁=4, K₂=1, 아무르 : K₁=5.6, K₂=3.5, 하바로프스크 : K₁=4.1, K₂=5.6).

또한 지역특성과 쌓인 눈의 깊이, 기후조건 외에도, 지반의 경사, 적설기간, 흙의 종류, 대상지반의 표고 등을 고려하였다(표 2 참조).

흙의 입도와 함수비에 따른 동결깊이의 보정 값은 표 3과 같으며 해당하는 보정 값을 구해진 동결깊이에 곱하여 최종 동결깊이를 산출한다.

2.2.3 동결깊이 분포도

DeGaetano와 Allen(2002)은 일차원적 열적흐름과 물

흐름을 감안한 NRCC(Northeast Regional Climate Center) 동결깊이 추정모델을 발표하였다. 그림 3과 같이 미국 전역 3,562개 기상측후소의 동결깊이 자료를 활용하여 동결깊이분포도를 작성하였다(김영석과 홍승서, 2009).

일본도로협회(2001)에서는 최대동결깊이의 70 %의 치환율을 적용한 동결치환깊이를 결정하여 그림 4와 같은 동결깊이 설계 치환깊이 분포도를 제시하였다. 그림 4의 동결치환깊이 분포도는 이론식을 근거로 산정된 동결깊이의 70%를 치환하도록 규정하였다. 또한 도심지에서는 열섬효과를 고려하여 동결깊이의 65 %까지 치환깊이를 적용하였다(日本道路協會, 2001).

3. 한국형 동결깊이 예측모델 개발

3.1 한국형 모델 개발을 위한 전제조건

동결깊이 산정모델 개발을 위한 전제조건은 다음과 같다.

- ① 수정 Berggren 이론식을 바탕으로 한 경험식 산정
- ② 국내 포장국도에서의 동결깊이 실측자료(1991 ~ 2010년) 및 동결지수 적용

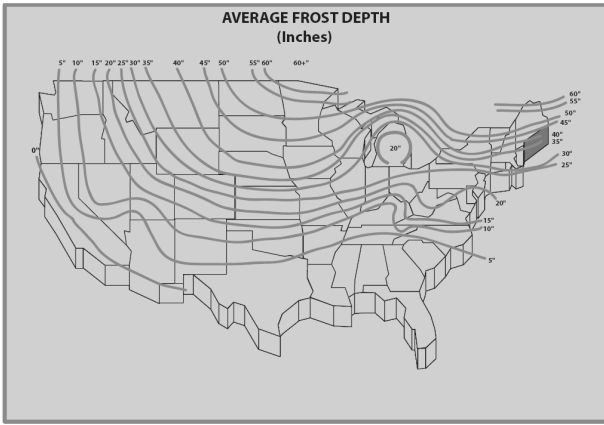


그림 3. 미국의 최대 동결깊이선도

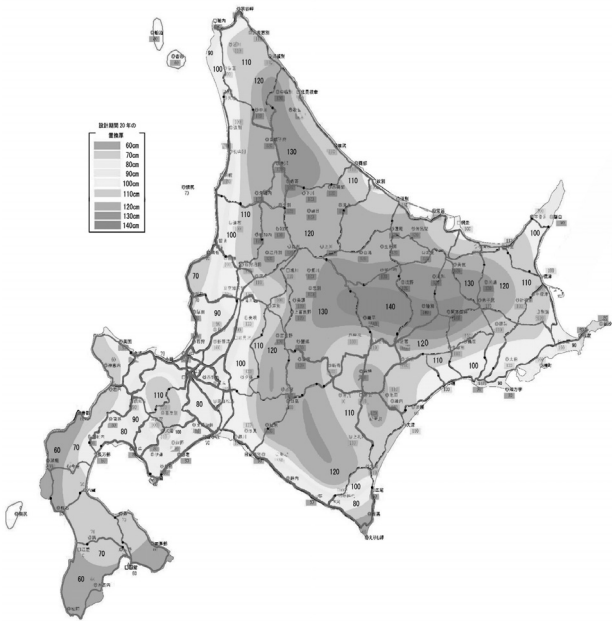


그림 4. 일본 북해도 20년 빈도 동결치환깊이 분포도

- ③ 동결깊이의 영향요소(외적 조건, 내적 조건) 고려
- 외적 조건 : i) 동결지수, ii) 지역, iii) 일사, iv) 적설
 - 내적 조건 : v) 포장체(다층구조), vi) 재료특성, vii) 밀도, viii) 함수비, ix) 열적 특성

3.2 동결깊이-동결지수 상관관계

3.2.1 전국별 상관관계

제주지역을 제외한 전국 94개 지점 952개의 동결깊이 측정값과 전국 52개 기상측후소의 온도자료로부터 도출한 동결지수를 이용하여 그림 5와 같이 동결깊이-동결지수 상관곡선을 도시하였다.

그림 5의 상관곡선으로부터 도출한 간편식은 다음과 같다.

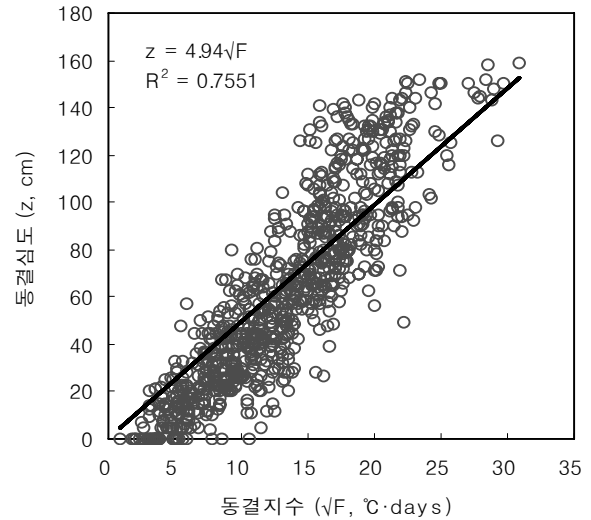


그림 5. 전국 동결지수-동결깊이 상관관계 곡선(1991~2010 빈도)

$$z = 4.94 \sqrt{F} \quad (4)$$

3.2.2 지역별 상관관계 및 보정상수 산정

지역에 따른 동결깊이-동결지수 상관곡선을 그림 6에 도시하여 상수 C값을 산출하였다. 지역구분은 경기, 강원, 충북, 충남, 경북, 전북, 남부(전남, 경남)으로 구분하였으며, 아울러 서울 도심부에 대한 상관곡선을 도시하였다. 지역별 상관곡선은 다음과 같다.

그림 6으로부터 도출된 지역별 상수 C와 식 (4)의 전국별 상수 C값을 이용하여 지역에 따른 보정상수(a)를 표 4와 같이 도출하였다.

3.2.3 일사(日射) 조건에 따른 보정상수(s)

동일 지점에서 일사량의 영향에 따라 동결깊이는 현저한 차이를 나타내며 이에 따른 동결깊이의 보정이 필요하다. 일사량의 영향에 따른 동결깊이 변화를 분석하기 위해 일사조건에 따른 동결깊이-동결지수 상관곡선을 도시하였다.

본 연구에서는 분석지역 84개 동결심도계 매설지점 중에서 음지지역 14개소, 반음지지역 44개소, 양지지역 26개소로 구분하여 각각에 대한 동결심도-동결지수에 대한 상관곡선을 그림 7에 도시하였다. 각각의 일사조건에 따라 상관식 및 정수 C는 식 (5)~(7)과 같다.

$$\text{- 음지지역 : } z = 6.01 \sqrt{F} \quad (5)$$

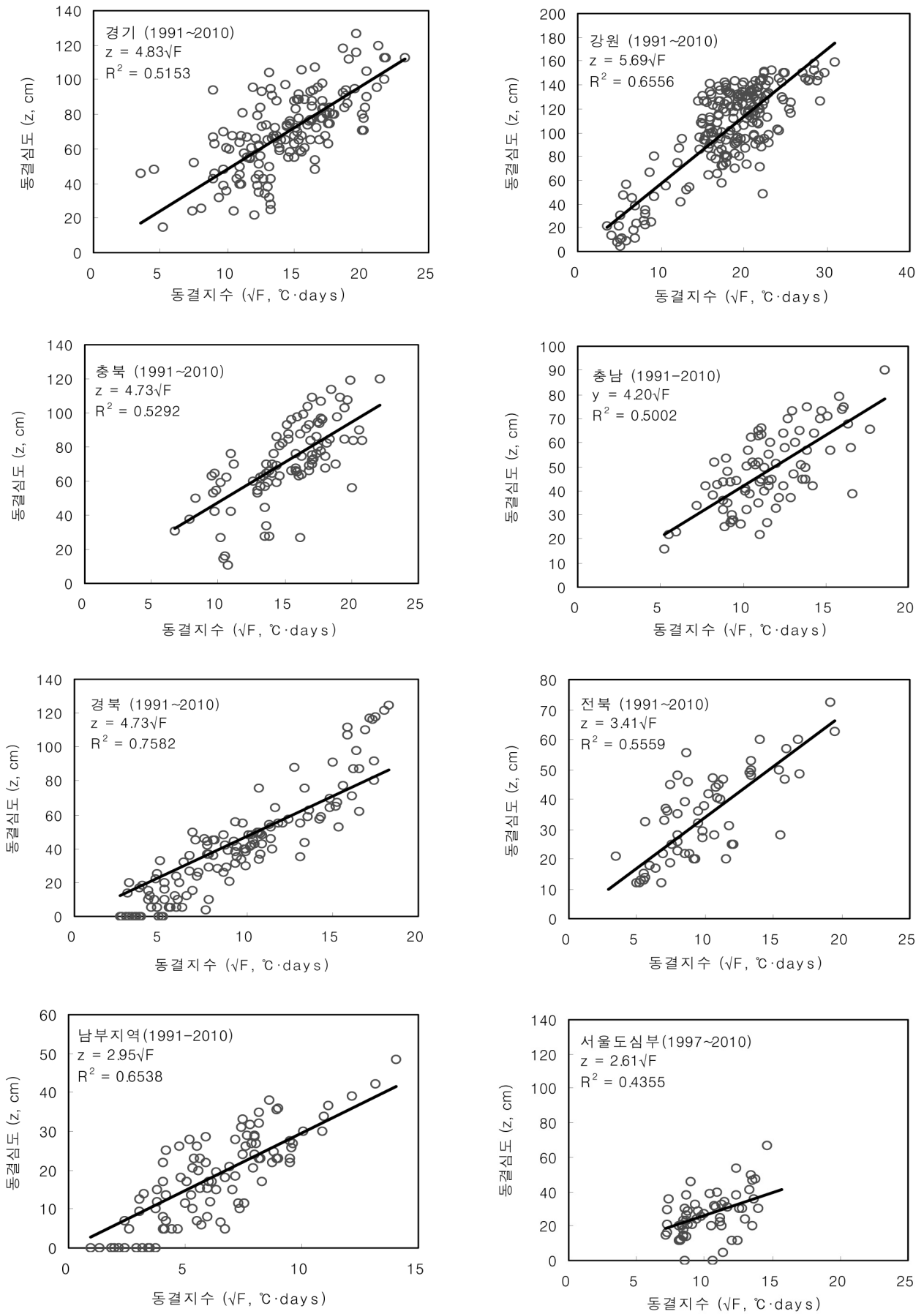


그림 6. 지역별 동결깊이-동결지수 상관관계 곡선(1991~2010)

표 4. 지역보정 상수(a)

| 지역구분 | 상수C | 보정상수 |
|-----------------------|------|------|
| 경기지역, a ₁ | 4.83 | 0.98 |
| 강원지역, a ₂ | 5.69 | 1.15 |
| 충북지역, a ₃ | 4.73 | 0.96 |
| 충남지역, a ₄ | 4.20 | 0.85 |
| 경북지역, a ₅ | 4.73 | 0.96 |
| 전북지역, a ₆ | 3.41 | 0.69 |
| 남부지역, a ₇ | 2.95 | 0.60 |
| 서울도심부, a ₈ | 2.61 | 0.53 |

표 5. 일사조건에 따른 동결깊이 보정 상수(s)

| 일사조건 | 상수C | 보정상수 |
|-----------------------|------|------|
| 음지지역, s ₁ | 6.01 | 1.22 |
| 반음지지역, s ₂ | 4.69 | 0.95 |
| 양지지역, s ₃ | 3.05 | 0.62 |

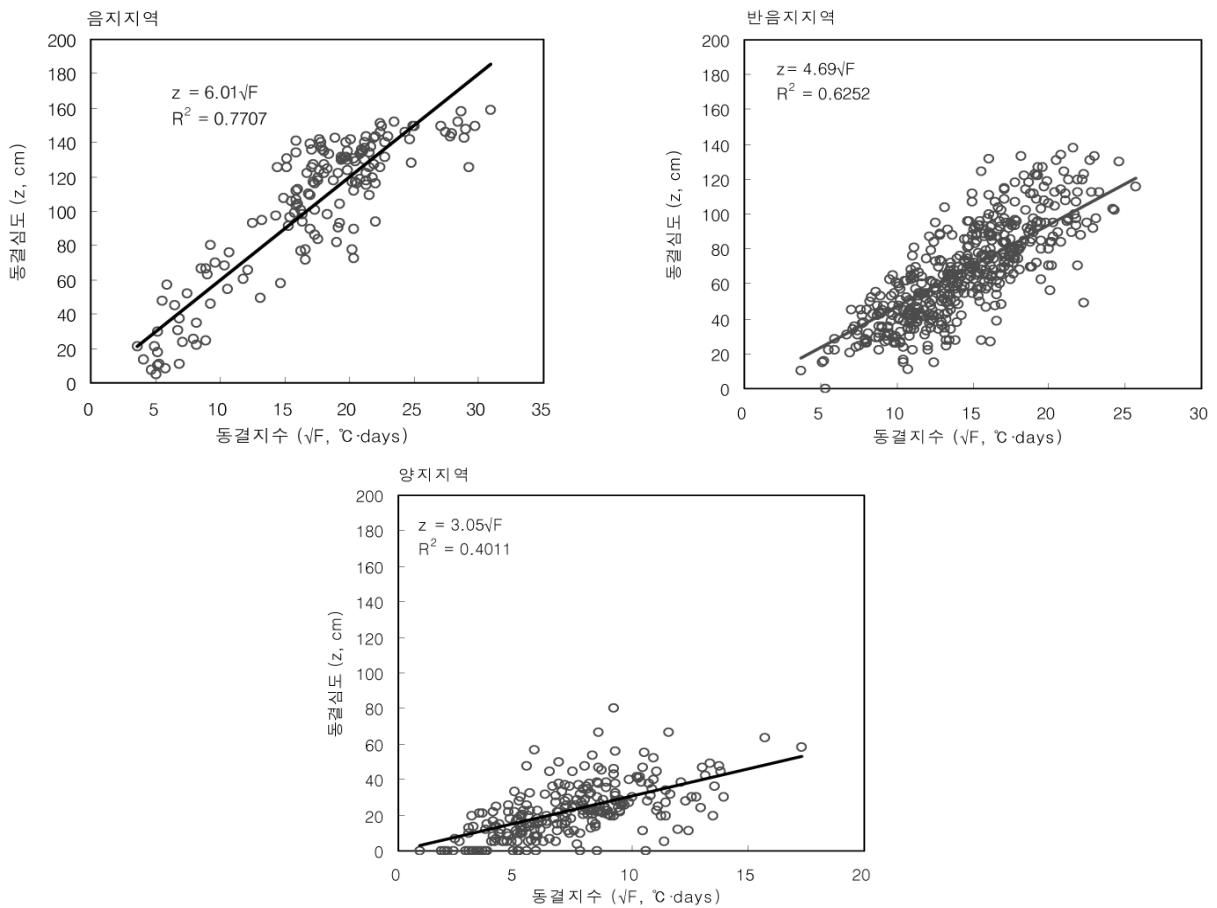


그림 7. 음양조건에 따른 동결지수-동결깊이 상관 곡선(1991~2010)

- 반음지지역 : $z = 4.69\sqrt{F}$

(6)

식 (4)의 전국 산정식을 이용하여 일사조건에 따른 보정상수 (s)를 음지조건(s₁), 반음지조건(s₂), 양지조건(s₃)으로

- 양지지역 : $z = 3.05\sqrt{F}$

(7)

구하였다. 각각의 보정상수는 표 5와 같이 s₁=1.22, s₂=0.95, s₃=0.62로 나타났다.

3.3 동결깊이 추정모델 제안

이상과 같이 동결깊이 장기계측 자료를 바탕으로 도출한 식 (4) ($z = 4.94\sqrt{F}$)와 국내의 지역별, 일사조건, 적설 등의 요건을 고려한 동결깊이 산정식을 제안하고자 한다.

전술한 바와 같이 지역별로 측정된 자료를 바탕으로 지역별 상수 C를 식 (4)의 전국별 상수 C에 적용하여 지역에 따른 동결깊이 보정상수 a를 도출하였다. 또한 일사조건에 따른 동결깊이 변화를 감안하여 설치지역의 음양(陰陽) 조건에 따른 보정상수 s를 개발식에 적용하였으며, 적설에 따른 동결깊이 감소를 감안하기 위하여 적설 20cm 이상일 때, 적설에 의한 동결깊이 감소계수를 적용하였다 (김영진 과 강재모, 2007).

본 논문에서 제안하는 한국형 동결깊이 추정모델은 다음의 식 (8)과 같다.

$$z = 4.94 \cdot a \cdot s (\sqrt{F - kS}) \quad (8)$$

여기서, z : 동결깊이(cm)

a : 지역별 보정상수

| 지역구분 | 보정상수 |
|-------|------|
| 경기 | 0.98 |
| 강원 | 1.15 |
| 충북 | 0.96 |
| 충남 | 0.85 |
| 경북 | 0.96 |
| 전북 | 0.69 |
| 남부 | 0.60 |
| 서울도심부 | 0.53 |

표 6. 조사지역 8개소 현황

| 측정지점 | 포장두께 | | 표고 |
|------|-------------|------------|--------|
| 여주 | 포장층: 15cm | 보조기층: 15cm | 198.0m |
| | 동상방지층: 45cm | 노상: 40cm | |
| 문산 | 포장층: 20cm | 보조기층: 30cm | 72.0m |
| | 동상방지층: 40cm | 노상: 40cm | |
| 연천 | 포장층: 20cm | 보조기층: 50cm | 80.0m |
| | 동상방지층: 0cm | 노상: 60cm | |
| 화천 | 포장층: 15cm | 보조기층: 20cm | 111.5m |
| | 동상방지층: 55cm | 노상: 50cm | |
| 양구 | 포장층: 15cm | 보조기층: 30cm | 237.0m |
| | 동상방지층: 35cm | 노상: 50cm | |
| 두촌 | 포장층: 15cm | 보조기층: 60cm | 292.7m |
| | 동상방지층: 0cm | 노상: 60cm | |
| 도암 | 포장층: 15cm | 보조기층: 30cm | 754.8m |
| | 동상방지층: 30cm | 노상: 70cm | |
| 울전 | 포장층: 15cm | 보조기층: 30cm | 850.0m |
| | 동상방지층: 30cm | 노상: 70cm | |

s : 일사조건에 따른 보정상수

| 일사조건 | 보정상수 |
|-------|------|
| 음지지역 | 1.22 |
| 반음지지역 | 0.95 |
| 양지지역 | 0.62 |

F : 동결지수(°C·days)

k : 적설에 따른 보정상수

| 일사조건 | 보정상수 |
|---------|------|
| 20cm 이상 | 1 |
| 20cm 이하 | 0.5 |

S : 12월에서 2월 사이에 평균 적설 깊이(cm)

3.4 개발식에 대한 이론값, 실측값과의 비교

이상과 같이 개발한 동결깊이 추정모델에서 도출한 동결깊이 값과 실제 측정된 측정값, 그리고 이론식을 비교하였다.

이론식은 식 (1)의 수정 Berggren식으로부터 도로포장체의 층별 재질특성을 고려한 Aldrich 식을 사용하였다. Aldrich와 Paynter(1953)는 포장체의 각 층별로 열적특성 (L/K)_{eff}를 유도하여 동결깊이를 추정하였다(日本道路協會, 2001). 추정식은 다음과 같다.

$$(L/K)_{eff} = \frac{2}{X^2} \left\{ \frac{d_1}{K_1} \left(\frac{L_1 d_1}{2} + L_2 d_2 + L_3 d_3 + L_4 d_4 \right) + \frac{d_2}{K_2} \left(\frac{L_2 d_2}{2} + L_3 d_3 + L_4 d_4 \right) + \frac{d_3}{K_3} \left(\frac{L_3 d_3}{2} + L_4 d_4 \right) + \frac{d_4}{K_4} \left(\frac{L_4 d_4}{2} \right) \right\} \quad (9)$$

표 7. 포장층 제반정수

| 측정항목 | | 측정방법 | 비고 |
|--|-----|--|----------------------------------|
| 포장층 두께 | | • 도로포장 설계자료 분석 | • 현장두께 적용 |
| 현장 함수비(ω , %) | | • 보조기층, 동상방지층 : 현장채취 후 함수비 측정 • 노상토:현장 TDR 측정 | • 부동수분량(%) • 전체 결과에 대한 평균값 적용 |
| 건조단위중량(γ_d , g/cm ³) | | • 아스팔트층 : 코어채취(1) • 보조기층(2), 동상방지층(3) : 국토유지사무소 자료 • 노상토(4) : 다짐시험(D 다짐) | • 각 층별 평균값 |
| 열전도율(K, W/m·K) | | • 현장채취 후 실내실험 | • -4°C에서 수행 • 층별 평균값 적용 |
| 체적열용량(J/m ³ ·K) | | • Kersten 식 | • Kersten 식 |
| 용해잠열(J/m ³) | | • Kersten 식 | • Kersten 식 |
| 동결기간(days) | | • 기상청 자료 | |
| 동결지수(F, °C·days) | | • 기상청 자료 | |
| 보정계수(λ_c) | | • 보정계수, 융해파라미터, 열비의 관계도 | 그림 1 참조 |
| 열비(μ) | | • 동결지수와 열비의 상관관계도 이용 | 그림 2 참조 |
| 동결깊이(Z) | 이론식 | • 열적정수를 적용한 산정치 | |
| | 실측값 | • 현장 실측값 | |
| | 개발식 | • 한국형 동결깊이 개발식 | |

표 8. 현장 포장도로의 제반 특성 산출결과

| 항 목 | 변수 | 여주 | 문산 | 연천 | 화천 | 양구 | 두촌 | 도암 | 울진 | 평균 | 미고 |
|------------------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|-----------------------|
| 건조밀도 (g/cm ³) | r ₁ | 2,31 | 2,3 | 2,32 | 2,35 | 2,29 | 2,31 | 2,33 | 2,35 | 2,3 | 실내실험 |
| | r ₂ | 1,95 | 1,92 | 1,96 | 1,98 | 1,91 | 1,9 | 1,97 | 1,89 | 1,9 | |
| | r ₃ | 1,72 | 1,78 | 1,68 | 1,76 | 1,72 | 1,77 | 1,68 | 1,71 | 1,7 | |
| | r ₄ | 1,79 | 1,88 | 1,86 | 1,76 | 1,82 | 1,75 | 1,83 | 1,81 | 1,8 | |
| 함수비(%) | w ₁ | 1,3 | 1,1 | 1,8 | 2,1 | 1,3 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 1,3 | 부동수분 TDR |
| | w ₂ | 2,8 | 3,1 | 2,9 | 3,3 | 3,4 | 3,2 | 3,7 | 3,2 | 3,2 | |
| | w ₃ | 3,5 | 2,6 | 3,5 | 3,6 | 2,9 | 3,5 | 3,8 | 3,5 | 3,4 | |
| | w ₄ | 3,7 | 4,2 | 4,8 | 3,8 | 3,9 | 4,6 | 5,1 | 3,5 | 4,2 | |
| 열용량 (J/m ³ ·K) | Q ₁ | 1,75 | 1,75 | 1,75 | 1,75 | 1,75 | 1,75 | 1,75 | 1,75 | 1,75 | kersten식 적용 |
| | Q ₂ | 1,78 | 1,78 | 1,78 | 1,78 | 1,78 | 1,78 | 1,78 | 1,78 | 1,78 | |
| | Q ₃ | 1,63 | 1,63 | 1,63 | 1,63 | 1,63 | 1,63 | 1,63 | 1,63 | 1,63 | |
| | Q ₄ | 1,86 | 1,86 | 1,86 | 1,86 | 1,86 | 1,86 | 1,86 | 1,86 | 1,86 | |
| 열전도율 (W/m·K) | K ₁ | 1,286 | 1,362 | 1,256 | 1,335 | 1,236 | 1,158 | 1,211 | 1,254 | 1,14 | 실내실험 |
| | K ₂ | 1,836 | 1,956 | 1,774 | 1,805 | 1,955 | 1,598 | 1,664 | 1,685 | 1,78 | |
| | K ₃ | 1,755 | 1,804 | 1,665 | 1,801 | 1,579 | 1,622 | 1,684 | 1,596 | 1,69 | |
| | K ₄ | 2,317 | 2,246 | 2,219 | 2,164 | 2,336 | 2,003 | 2,412 | 2,176 | 2,23 | |
| 동결잠열 (J/m ³) | L ₁ | 10,06 | 8,48 | 13,99 | 16,53 | 9,97 | 6,96 | 6,24 | 5,51 | 9,72 | kersten식 |
| | L ₂ | 18,29 | 19,94 | 19,04 | 21,89 | 21,75 | 20,37 | 24,42 | 20,26 | 20,75 | |
| | L ₃ | 20,17 | 15,50 | 19,70 | 21,23 | 16,71 | 20,75 | 21,39 | 20,05 | 19,44 | |
| | L ₄ | 22,19 | 26,45 | 29,91 | 22,40 | 23,78 | 26,97 | 31,27 | 21,22 | 25,52 | |
| 포장층(m) | d ₁ | 0,15 | 0,30 | 0,50 | 0,20 | 0,30 | 0,60 | 0,15 | 0,15 | 0,29 | 설계자료 (국토유지 사무소) |
| 보조기층(m) | d ₂ | 0,45 | 0,40 | 0,00 | 0,55 | 0,35 | 0,00 | 0,30 | 0,30 | 0,29 | |
| 동상방지층(m) | d ₃ | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,30 | 1,00 | 0,91 | |
| 노상층(m) | d ₄ | 0,40 | 0,40 | 0,60 | 0,50 | 0,50 | 0,60 | 0,70 | 0,70 | 0,55 | |
| 두께 합(m) | d _t | 2,00 | 2,10 | 2,10 | 2,25 | 2,15 | 2,20 | 1,45 | 2,15 | 2,05 | |
| 열적정수 | L/K | 1,21E+07 | 1,14E+07 | 1,61E+07 | 1,27E+07 | 1,26E+07 | 1,61E+07 | 1,70E+07 | 2,13E+07 | - | - |
| | Q _{wt} | 1,72E+06 | 1,72E+06 | 1,73E+06 | 1,73E+06 | 1,73E+06 | 1,73E+06 | 1,79E+06 | 1,74E+06 | - | |
| | L _{wt} | 1,94E+07 | 1,74E+07 | 2,13E+07 | 2,12E+07 | 1,82E+07 | 1,87E+07 | 2,52E+07 | 1,94E+07 | - | |
| 동결기간(일) | days | 73 | 88 | 89 | 85 | 98 | 110 | 115 | 122 | - | 기상청 기후자료 |
| 동결지수(°C·day) | F | 301,7 | 310,1 | 361,2 | 337,4 | 393,6 | 455,5 | 547,9 | 842,3 | - | |
| 융해파라미터 | | 0,367 | 0,348 | 0,330 | 0,324 | 0,380 | 0,383 | 0,338 | 0,644 | - | - |
| 열비(τ) | | 4,00 | 3,90 | 3,50 | 3,70 | 3,20 | 2,90 | 2,50 | 1,80 | - | |
| 수정계수(λ) | | 0,38 | 0,39 | 0,45 | 0,4 | 0,42 | 0,45 | 0,48 | 0,46 | - | |
| 이론식 동결깊이(cm) | | 85 | 88 | 99 | 94 | 104 | 114 | 126 | 152 | 107,4 | - |
| 실측 동결깊이(cm) | | 80 | 83 | 94 | 90 | 98 | 106 | 114 | 135 | 100,1 | |
| 개발식 동결깊이(cm) | | 79 | 84 | 92 | 89 | 98 | 104 | 113 | 137 | 99,5 | |

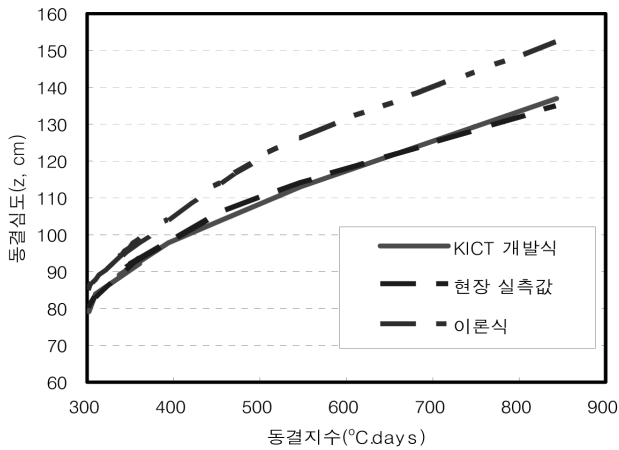


그림 8. 개발식과 이론식, 실측값과의 비교 곡선

$$\begin{aligned}
 (L/K)_{eff} &= \frac{2}{X^2} \left\{ \frac{d_1}{K_1} \left(\frac{L_1 d_1}{2} + L_2 d_2 + L_3 d_3 + L_4 d_4 \right) + \right. \\
 Q_{wt} &= \frac{Q_1 d_1 + Q_2 d_2 + Q_3 d_3 + Q_4 d_4}{X_1} \\
 L_{wt} &= \frac{L_1 d_1 + L_2 d_2 + L_3 d_3 + L_4 d_4}{X_1} \\
 \mu &= \frac{Q_{wt} \cdot F}{L_{wt} \cdot t} \quad (10)
 \end{aligned}$$

$X = d_1 + d_2 + \dots + d_n$: 예상 동결깊이(cm)
 d_n : 예상 동결깊이 이내의 각 층 두께이면 d_1 은 최상층의 두께(m)
 K_n : 각 층의 열전도율(W/m·K)
 L_n : 각 층의 용해잠열(J/m³)
 λ_c : $f(\mu, \tau)$: 보정계수
 $\mu = Q_{wt} \cdot F / L_{wt} \cdot t$
 $Q_{wt} = (Q_1 d_1 + Q_2 d_2 + \dots + Q_n d_n) / X$: 가중평균에 의한 열용량이며 Q_1 은 최상층의 것(J/m³·K)
 $L_{wt} = (L_1 d_1 + L_2 d_2 + \dots + L_n d_n) / X$: 가중평균에 의한 용해잠열이며 L_1 은 최상층의 것(J/m³)

상기와 같은 이론식을 바탕으로 표 6과 같은 8개 지점에 대한 도로 포장층의 재료특성을 측정(표 6, 7 참조)한 후 동결깊이를 도출하였다(표 8 참조). 실측값은 조사원이 동결기에 직접 현장에서 측정한 값을 사용하였다.

상기와 같은 동결깊이 결과를 바탕으로 개발식에서 도출 동결깊이와 현장 실측치, 이론식 도출 동결깊이를 그림 8과 같이 동결지수에 따른 동결깊이 곡선으로 도시하였다. 그림 8에서 보듯이 개발 모델식과 현장 실측치 곡선은 비슷하며, 이론식은 다소 높게 나타났다.

보정조건(지역조건, 일사조건, 적설량)을 반영한 개발 모델식은 현장의 실측치와 유사한 경향을 나타나 개발식의 정확성이 높아진 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 다년간 전국 포장국도에서 측정한 동결깊이 자료를 이용한 동결깊이 산정식을 도출하였으며, 이를 바탕으로 지역, 일사량 등의 외적요인에 대한 보정상수를 적용한 동결깊이 추정모델을 제안하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 국내 포장국도의 동결깊이 장기계측 자료를 바탕으로 동결깊이-동결지수와의 관계식(간편식)으로부터 $z = 4.94 \sqrt{F}$ 의 관계를 도출하였다.
- (2) 지역별로 측정한 동결깊이 자료와 일사조건에 따른 동결깊이 자료를 지역별 보정상수 a 와 일사조건에 따른 보정상수 s 를 도출하였다. 또한 적설에 따른 동결깊이 감소를 러시아 표준시방서의 방법을 활용한 동결깊이 추정모델을 제안하였다. 제안된 식은 $z = 4.94 \cdot a \cdot s \cdot (\sqrt{F - kS})$ 로 도출되었다.
- (3) 개발한 모델식과 현장 실측치, 이론식을 동결지수에 따른 동결깊이 곡선을 분석한 결과, 개발 모델식과 현장 실측치 측정곡선은 비슷하게 나타났으며, 이론식은 다소 높게 나타났다. 보정조건을 반영한 개발 모델식은 현장의 실측값과 유사한 경향을 나타나 개발식의 정확성이 높은 것으로 판단된다.
- (4) 개발된 모델식은 국내 도로 동상방지층의 경제적, 합리적 설계에 활용이 가능하며, 도로 이외의 매설관 설계깊이 결정 및 철도의 동상방지층 설계 등에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

향후 포장도로의 형태(절토, 성토)나 포장재료의 종류(아스팔트, 콘크리트) 등에 따른 세부적인 영향을 분석할 필요가 있으며, 지하수의 영향에 따른 동결깊이 변화 등에 관한 연구도 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2010년 한국건설기술연구원의 기획 및 정책 연구사업인 “국내 포장국도의 동결상태 조사 및 유지관리”와 주요연구개발사업인 “극한지 하부구조 급속시공 플

랫폼 기술 개발’ 과제의 지원을 받았습니다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2000), *도로설계편람 II 권 포장편*, pp.702-1-55.
2. 건설교통부 국립건설시험소 (1989), *동결심도 조사보고서*, pp.16-26, pp.42-44, pp.72-75.
3. 김영석, 홍승서 (2009), *동결심도 및 포장내부 온도조사*, 한국건설기술연구원, pp.6-10, pp.32-35.
4. 김영진, 강재모 (2007), “시베리아 계절동토 지역에서의 동결심도 산정”, *대한토목학회 추계학술발표회 논문집 II*, pp.365-368.
5. Aldrich, H. P. and Paynter, H. M. (1953), *Analytical Studies of Freezing and Thawing of Soils*, 1st Interim Report, Technical Report 42, U.S. Army Corps of Engineers, Arctic Construction and Frost Effects Laboratory.
6. DeGaetano, A. T. and Allen, R. J. (2002), “Trends in Twentieth-Century Temperature Extremes across the United States”, *Journal of Climate* 15, pp. 3188-3205.
7. 日本道路協會 (2001), *鋪裝設計施工指針*, pp.63, pp.169-172.
8. 日本土質工學會 (1983), *土質基礎工學 라이브러리-23*, pp. 23, pp.106-108, pp.269.

(논문접수일 2010. 8. 25, 심사완료일 2010. 9. 24)