도로 동상방지층의 온도계측 자료를 이용한 수치해석 연구 Temperature Prediction of Road Anti-Frost Layer

손재호* · 서용원** · 박영목*** · 조규태****

Son, Jaeho* · Seo, Youngwon** · Park, Youngmog*** · and Cho, Gyutae****

Abstract

In Korea, the temperature drops below 0 °C in winter and rises above 0 °C in spring. The temperature variation between the two seasons causes the ground to freeze and thaw, which damages the road pavement structures. Predicting the ground temperature is very important to identify and respond to the road damage due to ground freezing and thawing. Numerical analysis was performed using the Crank-Nicholson differential method to predict the temperature of each layer of the road. Additionally, the data gathered from temperature measurements of each layer of the road pavement for 42 days for "Evaluation of validity for Anti-frost layer and development of its construction criteria" organized by the Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs (2012) was used for the prediction. The thermal diffusion factor obtained in the present numerical analysis were compared with those of previous studies. The numerical analysis was conducted using temperature data measured from three sections: cutting area, boundary area of cutting and banking, and low banking for 42 days from January 25, 2011 to March 6, 2011. The coefficient of thermal diffusion are $1 \times 10^{-1.6}$, $1 \times 10^{-2.8}$, $1 \times 10^{-2.1}$, and $1 \times 10^{-2.3}$ in the surface, base, subbase, and anti-frost layers, respectively. The calculated value of the lowest temperature showed a difference of approximately 3 °C compared with the actual measured temperature.

Key words : Crank-Nicholson Model, Anti-frost Layer, Thermal Diffusivity, Ground Temperature

요 지

우리나라는 겨울철이 되면 기온이 0 °C 이하로 내려가고 지반이 동결되고 팽창되어 도로구조물에 피해를 끼친다. 지반동결로 인한 피해를 사전에 파악하고 대처하기 위해서는 지중온도의 예측은 매우 중요하다. 지중온도를 예측하기 위하여 장기간 도로포장구조물의 온도를 측정한 국토해양부(2012)에서 주관한 “도로 동상방지층의 효용성 검증 및 설치기준 연구”의 포장층별 온도자료를 이용해 Crank-Nicholson 차분법에 의한 수치해석을 통하여 온도예측을 실시하였다. 저성토부, 절성경계부, 절토부으로 세 구간의 표층, 기층, 동상보조기층, 동상방지층의 온도데이터로 수행하였고, 기간은 2011년 1월25일~2011년 3월 6일 총 42일간의 자료를 이용하여 수치해석을 실시하였다. 열확산계수는 표층, 기층, 보조기층, 동상방지층에서 각각 $1 \times 10^{-1.6}$, $1 \times 10^{-2.8}$, $1 \times 10^{-2.1}$, $1 \times 10^{-2.3} \text{ cm}^2/\text{s}$ 로 나타났고, 계산결과온도와 실제측정온도의 최저기온에서 약 3 °C 차이가 나타났다.

핵심용어 : 크랭크-니콜슨 차분법, 동상방지층, 열확산계수, 지중온도

*정회원, (주)동명기술공단종합건축사사무소 사원(E-mail: thswogh1992@naver.com)

Member, Staff, Dong Myeong Engineering Consultants & Architecture Co., Ltd

**영남대학교 건설시스템공학과 교수(E-mail: yseo@ynu.ac.kr)

Professor, Department of Civil Engineering, Yeungnam University

***중신회원, 영남대학교 건설시스템공학과 교수(E-mail: ympark@ynu.ac.kr)

Permanent Member, Professor, Department of Civil Engineering, Yeungnam University

****교신저자, 정회원, 영남대학교 건설시스템공학과 교수(Tel: +82-53-810-2414, Fax: +82-53-810-4622, E-mail: gtcho@ynu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Yeungnam University

1. 서 론

우리나라는 겨울철의 기온이 0℃ 이하로 내려간다. 이는 지반을 동결시키는 역할을 하고 동결된 지반은 팽창하여 도로나 구조물과 같은 시설물에 영향을 끼쳐 파손시키거나 수명을 단축시킨다. 또한 기온이 영상으로 바뀌는 봄철이 되면 동결되었던 지반이 녹기 시작한다. 이때 팽창되었던 지반이 다시 수축하면서 지반침하가 생기고 이 또한 시설물에 파손을 야기한다. 이와 같이 지반동결로 인한 피해를 사전에 파악하고 대처하기 위해 정확한 지중온도의 예측은 매우 중요하다.

국내 지중온도 예측에 대한 연구는 다음과 같이 실험적, 이론적 방법 혹은 수리해석에 의한 방법으로 제시되어 왔다. Jeong (2004)은 구미지역에 지중온도를 측정하여 회귀식을 이용한 보정계수를 수정하여 예측값을 제시하였고, Shin et al. (2012)은 경상대학교 교내에 온도센서를 설치하여 지중온도를 측정 후 2차원 비정상 열전도방정식, 수치계산법으로 계산하여 해석하였고, Cho and Ihm (2014)은 창원지역에 실험식(Buggs식)을 사용하여 기상청에서 제공된 지중온도와 비교 분석하여 지중온도를 예측하였으며, Jeong et al. (2015)은 충남 예산지역의 산림 토양에 대해 지중온도를 관측하고, FEFLOW모형을 사용하여 지중온도 변화를 모사하였으며, Hwang (2017)은 Newton-Raphson반복계산법을 이용하여 초기지표면 온도로부터 근사해를 구하는 방법을 사용하여 수치 해석적 방법을 제시하고 있다.

그러나 동상방지층을 포함한 지중온도 예측에 대한 연구는 다소 미비한 실정이다. Kim and Hong (2005)은 1991년~2005년까지의 동결심도 측정자료를 이용하여 전국최대 동결심도 분포도를 작성하고 동결심도와 동결지수를 분석하여 동결심도 추정모형을 산정하였고, Hong et al. (2010)은 외국기준의 동상방지층설계깊이가 적용되어 국내도로에서는 달라지므로 동결깊이 산정식을 도출하여 동결깊이 모델을 제안하였다. 그러나 이러한 연구는 다양한 조건에 대한 평가가 제시되어 있지 않은 실정이다. 따라서 이에 관련된 추가적인 연구가 요망되는 상황이다.

본 연구에서는 MLTM (2012)의 강원도 원주시의 국도 19호선 천은사 부근의 구축된 현장측정시스템 관측 자료를 기초로 하여 Crank-Nicholson 차분법을 이용하여 열확산계수를 추정 및 검증하고 이를 통하여 도로 포장층에 나타나는 열확산계수를 제시하였고, 열확산계수를 통하여 포장층의 온도를 예측하였다. 실험데이터와 수치해석 모델을 비교 검증하고 정밀도를 검증하는 데에 목적이 있다.

2. 이론적 배경

2.1 동상의 조건

Fig. 1은 동상 발생조건을 도시화한 그림이며, 동상에

영향을 미치는 세 가지 중요한 조건이 있다. 첫 번째 조건으로는 0℃ 이하의 온도가 오랜 시간 유지되어야 하는 온도조건이 있다. 두 번째 조건으로는 아이스렌스의 형성을 위해서 물의 충분한 공급이 있어야 하는 수분조건이고 마지막 세 번째 조건으로는 동상이 일어나기 쉬운 조건의 흙이 존재해야 하는 토질조건이다. 이러한 세 가지의 조건을 모두 다 만족하지 않으면 동상은 생기지 않는다. 즉 Fig. 1과 같이 온도조건, 수분조건, 토질조건이 교집합을 성립하여야만 동상이 발생한다.

Fig. 1. Condition of Frostbite

2.2 열전도율

흙의 열특성에는 체적열용량계수와 열전도율(열전도계수)이 있다. 특히 동결깊이와 산정의 주요 변수인 열전도율(K)은 Eq. (1)과 같이 열이 움직이는 열류방향으로 단위온도 경사 하에서 요소의 단위면적을 통해서 단위시간당 흐르는 열의 양으로 정의된다(Farouki, 1986).

$$K = \frac{q}{A(T_2 - T_1)/l} \quad (1)$$

여기서 K는 열전도율, T_2 , T_1 는 양단면에서의 온도, q는 요소의 단면을 통해서 흐르는 열량, l는 요소의 길이, A는 단면적을 나타내며, 열전도율의 단위는 cal/cm·s·℃ 또는 W/m·k로 나타낸다. 열전도율은 수분의 함량, 공기, 광물성분의 체적율, 유기물의 체적율의 영향을 크게 받으며, 열전도율의 영향을 주는 인자로 충전율(간극율) 등의 밀도와 입자의 크기, 구성성분의 종류 등이다. 흙의 열전도율은 흙의 전도를 통하여 열을 전달하는 능력을 말한다. 따라서 영상의 온도에서 온도가 변화함에 따라 열전도율이 점점 변화한다. 그러나 이러한 증가는 증가폭이 미미하기 때문에 공학적인 관점에서 무시가 가능하다. Table 1은 온도 증가에 따른 액체상태의 물의 열전도율을 나타낸다.

Table 1. Thermal Conductivity Coefficient of Water (Van Wijk, 1963)

Temperature (°C)	Thermal conductivity coefficient (cal/cm · s · °C)	(°C)	(cal/cm · s · °C)
5	0.00137	30	0.00148
10	0.00140	35	0.00150
15	0.00142	40	0.00151
20	0.00144	45	0.00153
25	0.00146	50	0.00154

2.3 Crank-Nicolson 차분법

지중온도는 깊이와 지표면 온도의 시간에 따른 변화에 영향을 받는다. 추가로 지표면에서의 일사량, 강우량, 증발량 등 현장조건의 변화와 더불어 지표면 상태, 토질의 열확산 계수, 지하수 유동 등 다양한 영향을 받는다. 그래서 모든 조건을 고려하여 지중 온도 변화를 시간과 깊이에 따라 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 비균질 토질을 균질 토질로 가정한 후, 열전도를 지배 기구로 하여 접근하는 것이 일반적인 방법이다.

균질-등방체 토질 내에서 전도에 의해서만 열이 전달되는 1차원 열전도 관계식으로 표현할 수 있으며, Eq. (2)와 같이 나타낸다.

$$C_g \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Eq. (2)에서 T는 지중온도, t는 시간, z는 깊이, C_g 는 지중 토질의 체적열용량, k는 지중 토질의 열전도도를 각각 의미한다.

반무한 고체 내의 열전달을 열확산계수(α)를 이용하여 정리할 경우, Eqs. (2)를 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3)$$

Eq. (3)의 확산 항에 시간레벨 n 및 n+1의 중심 차이의 평균으로 대체한다면, Eq. (4)와 같다.

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = \frac{a}{2(\Delta x)^2} [(u_{i+1}^{n+1} - 2u_i^{n+1} + u_{i-1}^{n+1}) + (u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n)] \quad (4)$$

방정식의 왼쪽은 $\frac{\Delta t}{2}$ 의 중심차이이며, 즉 $(\Delta t)^2$ 의 순서이다.

Fig. 2는 Crank-Nicolson 차분법이 단계를 거치는 격자점을 나타낸 것이다.

Fig. 2. The Grid Points of the Crank-Nicolson Model

3. 도로 동상방지층 현장계측

3.1 계측기설치

본 연구에서 적용된 Data는 MLTM (2012)에서 얻은 자료이다. 현장계측시스템은 Fig. 3과 같으며 국도19호선 천은사 부근에 구축되어 있다. 강원도 원주시 국도19호선 현장계측시스템은 절토부, 절성경계부 및 저성토부로 구성되어 있고, 설치 단면은 Fig. 5와 같다.

Fig. 3. Gangwon-Wonju Road Site (Gwirae-Madge) Location Map

Fig. 4는 Fig. 3의 A-A' 단면을 나타낸 것이다. 또한 절토부와 절성경계부, 저성토부의 계측기 설치는 본선 구간내에 모두 위치하고 있다.

Fig. 4. Gangwon-Wonju Road Site (Gwira-Madge) Measurement System Location

Table 2는 절토부, 절성경계부, 저성토부의 단면에 대한 계측 센서별 매설 깊이를 나타낸 것이다. 강원도 원주시 현장계측시스템은 계측 센서, 수집장치(컨트롤 박스), 태양열 전원장치로 구성되어 있으며, 각 층 별 계측센서 배치는 Fig. 5와 같다. Fig. 5의 센서설치 단면은 콘크리트 포장 단면인 린 콘크리트 층과 보조기층 중앙부에 온도센서를 매설하였고, 도로 하부 층에 매설된 함수센서는 각층에 매설된 센서 간 간섭작용을 최소화하기 위하여 지그재그 형태로 매설하였다.

Table 2. Gangwon-Wonju Road Site Cutting Area, Boundary Area of Cutting and Baking, Low Banking Measurement Sensor Embedded Position

Category	Depth	Measuring Instrument	
		Moisture meter	Thermometer
Concrete	15.0 cm	-	2
Lean concrete	7.5 cm	-	2
Subbase layer	15.0 cm	3	2
Anti-frost layer	20.0 cm	3	2
Road	15.0 cm	3	2
Total number		9	10

Fig. 5. Sensor Installation Section (Function, Temperature sensor)

MLTM (2012)에서 강원도 원주시 국도19호선 현장계측 시스템은 2009년 1월 6일 절토부 단면을 시작으로 현장계측자료를 지속적으로 수집하고 있으며, 2012년 6월 30일까지 수행된 약 42개월간의 현장계측 데이터를 수집하였다.

현장계측시스템으로부터 얻어진 현장계측 데이터는 온도와 함수비로 분류가 되며, 온도계측 데이터는 포장층별 온도분포 특성 분석 및 동결깊이를 분석하는데 이용되며, 함수비분포 데이터(Volumetric Moisture Content, VMC)는 겨울철 노상토의 동결특성을 분석하는데 이용된다. 강원도 원주시 현장계측분석에 이용된 강수량데이터는 기상청의 원주 기상대 자료를 활용하였다.

3.2 계측센서

현장 계측시스템에 적용된 계측센서는 Table 3과 같으며, 함수센서는 포장층하부의 함수비를 측정한다. 현장계측에서 적용된 T3 Probe와 CS616은 유전율의 비저항을 사용하는 Time domain reflectometry, TDR) 방식의 함수계측 센서이다. TDR 방식은 다른 방식보다 정밀도가 매우 우수하며, 오랜 시간동안 자동 계측과 수동 계측이 가능하다.

현장 계측시스템에 사용된 온도센서는 도로포장체의 내부 온도를 계측하며, 표층과 기층, 보조기층, 동상방지층 그리고 노상에 설치하였다. 현장계측시스템에 사용된 온도센서는 thermocouple K-type이며, 측정범위가 -100 ℃에서 400℃ 이고, 온도계측에 많이 사용되고 있는 모델이다.

4. 수치해석

수치해석은 이전 층의 온도를 경계값으로 사용하였고 k 값을 변경하여 가장 높은 신뢰도를 가지는 k 값에 대한 온도를 그림으로 나타내었다. 각 그림에 대한 설명은 다음과 같다.

Fig. 6은 각 구간별 표층의 대기온도, 측정온도, 계산온도를 나타낸 그래프이다. 저성토부 k는 $1 \times 10^{-2.0} \text{ cm}^2/\text{s}$, 절성경계부 k는 $1 \times 10^{-1.9} \text{ cm}^2/\text{s}$, 절토부 k는 $1 \times 10^{-2.9} \text{ cm}^2/\text{s}$ 이다.

표층 세 구간에서 실제온도와 계산온도의 최저기온은 6일차에 동시에 나타났고 또한 경계값인 기온의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 각 구간별 기층의 표층온도, 측정온도, 계산온도를 나타낸 그래프이다. 저성토부 k는 $1 \times 10^{-2.8} \text{ cm}^2/\text{s}$, 절성경계부 k는 $1 \times 10^{-3.0} \text{ cm}^2/\text{s}$, 절토부 k는 $1 \times 10^{-3.0} \text{ cm}^2/\text{s}$ 이다. 기층에서도 이전 층인 표층의 온도의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다. 최저점은 계산온도와 실제온도는 표층보다 1일 차이가 나는데 온도전달속도 차이로 판단된다.

Fig. 8은 각 구간별 보조기층의 기층온도, 측정온도, 계산온도를 나타낸 그래프이다. 저성토부 k는 $1 \times 10^{-2.1} \text{ cm}^2/\text{s}$, 절성경계부 k는 $1 \times 10^{-2.1} \text{ cm}^2/\text{s}$, 절토부 k는 $1 \times 10^{-2.1} \text{ cm}^2/\text{s}$ 이다. 보조기층에서는 이전층인 기층의 영향을 받음을 보이고

Table 3. Measurement Sensor Type

Category	Model	Sensor Photo	Sensor Description	Manufacture
Moisture Sensor	CS616		TDR system Manual and Automatic measurement	Campbell (U.S.A)
	T3 Probe		TDR system Manual measurement	IMKO (Germany)
Temperature Sensor	Thermocouple		The Atmosphere and Packaging layer Temperature Measurement Sensor	YAMARI (Japan)

Fig. 6. Measured Temperature and Calculated Temperature of the Surface Layer

Fig. 7. Measured Temperature and Calculated Temperature of the Base Layer

LOW
BANK

CUT-
BANK

CUT

Fig. 8. Measured Temperature and Calculated Temperature of the Sub-base Layer

Fig. 9. Measured Temperature and Calculated Temperature of the Anti-frost Layer

추가로 온도변화폭이 기층보다 보조기층에서 더 적은 것으로 판단된다.

Fig. 9는 각 구간별 동상방지층의 보조기층온도, 측정온도, 계산온도를 나타낸 그래프이다. 저성토부 k 는 $1 \times 10^{-2.3} \text{ cm}^2/\text{s}$, 절성경계부 k 는 $1 \times 10^{-2.4} \text{ cm}^2/\text{s}$, 절토부 k 는 $1 \times 10^{-2.4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 이다. 동상방지층에서는 이전층인 보조기층의 온도의 영향을 다른 층보다 적게 받음을 보이는 데, 이는 함수비, 잠열 등에 의한 것으로 판단되며 영향을 알아보는 추가적인 연구가 필요하다.

결정된 온도확산계수를 이용하여 겨울기간(2011년 11월 -2012년 2월)의 예상동결일수를 구할 수 있었다. Fig. 10은 겨울철 기온을 이용하여 연쇄계산을 통한 동상방지층의 온도를 예측한 그래프이다. 비슷한 모양을 띄고 있으나

초기 값에서 차이가 나서 실제 측정온도보다 0°C 아래로 내려가는 온도가 많이 예측되었다. 이렇게 측정되는 이유로 표층에서 공기와 지표사이의 온도전파가 다르기 때문에 표층에서 열확산계수가 다소 작게 측정되었고 동상방지층에서는 대기온도의 영향이 다른 층들에 비해 적게 받는 영향 때문인 것으로 분석된다.

5. 결 론

본 연구는 MLTM (2012)에서 수행된 강원도 원주지역의 측정 데이터를 이용하였다. 수치해석적 접근을 통하여 동상방지층의 온도를 예측하였다. 동상방지층 온도예측을 위하여 수치해석은 Crack-Nicholson 차분법을 사용하고 열

Fig. 10. Estimation of Temperature in Anti-frost Layer Using Thermal Diffusivity

확산계수(k)를 도출하였다. 열확산계수의 적합도가 낮은 부분은 함수비, 현장환경, 대기와 지표의 열전달방법 등의 영향이 있는 것으로 볼 수 있다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) MLTM (2012)에서 수행된 동상방지층 온도Data를 활용하여 수치해석을 한 결과로 열확산계수(k)는 표층, 기층, 보조기층, 동상 방지층에서 각각 $1 \times 10^{-1.6}$, $1 \times 10^{-2.8}$, $1 \times 10^{-2.1}$, $1 \times 10^{-2.3} \text{ cm}^2/\text{s}$ 으로 도출되었다.
- (2) Crank-Nicholson 차분법 수치해석기법을 통해 열확산계수(k)를 얻었으며, 이를 적용하여 동상방지층 온도 예측이 가능했다. 온도 예측은 기간은 11월~2월, 겨울에 대해하였으며 실제온도보다 예측온도가 더 낮게 나타났다. 이는 함수비, 현장여건 등이 고려되지 않았기 때문이라고 판단된다.
- (3) 기존 연구된 열확산계수와 비교를 통하여 표층과 동상방지층에서 낮은 열확산계수를 얻었으며 이러한 결과는 함수비나 현장여건을 적용하는 데 어려움이 있었다. 본 연구에서는 동상방지층의 온도예측을 열확산계수로 하였으며 앞으로 함수비, 현장여건을 고려한 연구가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 “도로 동상방지층의 효율성 검증 및 설치 기준 연구” 과제의 일환으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

References

Cho, S.W., and Ihm, P.C. (2014). The study on the prediction of underground temperature in Changwon district.

- Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 26, No. 3, pp. 97-102.
- Choi, I.G., and Park, Y.M. (2006). *Geotechnical Engineering*. Seoul: Goomibook (in Korean).
- Farouki, O.T. (1986). *Thermal properties of soils*. Series on Rock and Soil Mechanics, Vol. 11, Clausthal-Zellerfeld, Germany: Trans Tech, pp. 29-68.
- Hong, S.S., Kim, Y.S., and Kim, H.S. (2010). Development of prediction model of frost penetration depth on pavement in Korea. *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol. 9, No. 3, pp. 47-56.
- Hwang, S.H. (2017). A study on prediction method for low-depth ground temperature by using surface energy balance equation. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, Vol. 11, No. 2, pp. 142-148.
- Jeon, J.M. (2012). Development of frost depth prediction model considering thermal dynamic characteristic of pavement materials. Ph.D. dissertation, Kyung Hee University.
- Jeong, J.H., Kim, G.B., Park, S.K., Kim, H.S., and Kim, T.H. (2015). Fluctuation features and numerical model for underground temperature in shallow subsurface soil. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 16, No. 5, pp. 35-42.
- Jeong, S.I. (2004). A study on the comparison of measurement and prediction of underground temperature in Gumi. *Journal of the Korean Housing Association*, Vol. 15, No. 4, pp. 99-105.
- Kim, S.K., Lee, Y.H., and Oh, S.B. (2013). *Soil mechanics*. Paju: CheongMoonGak (in Korean).
- Kim, Y.C., and Hong, S.S. (2005). A study for penetration

- depth in pavement in Korea. *Proceedings of Korean Geo-Environmental Conference*, Korean Geo-Environmental Society, pp. 271-278.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2012). *Evaluation of validity for frost protection layer and development of its construction criteria*.
- Shin, Y.H., Tanshen, Md. R., Chung, H.C., and Jeong, H.M. (2012). A study on the yearly measurement and numerical analysis of underground temperature. *Journal of the Korea Society for Power System Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 30-35.
- Sohn, B.H. (2011). Evaluation of ground temperature and soil thermal diffusivity using the soil temperature data of KMA. *Transactions of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-9.
- Van Wijk, W.R. (Ed.) (1963). *Physics of plant environment*. Amsterdam: North Holland Publishing Company.

Received	September 19, 2019
Revised	September 23, 2019
Accepted	October 29, 2019