

실내실험과 현장실험을 통한 Methylene Blue 동결깊이 측정장치 신뢰성 검토에 관한 연구

Experimental and Field Investigations for the Accuracy of the Frost Depth Indicator with Methylene Blue Solution

김학승¹, 이장근^{2*}, 김영석³, 강제모⁴, 홍승서⁵

HakSeung Kim¹, Jangguen Lee^{2*}, YoungSeok Kim³, Jae-Mo Kang⁴, Seung-Seo Hong⁵

¹Nonmember, Post-Master, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology. 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-gu, Goyang, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

²Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology. 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-gu, Goyang, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

³Member, Research, Fellow, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology. 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-gu, Goyang, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

⁴Nonmember, Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology. 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-gu, Goyang, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

⁵Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology. 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-gu, Goyang, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

ABSTRACT

The frost depth is one of important factors in the design of structures such as roadways, buried pipeline, and foundations. A frost indicator with methylene blue solution has several advantages with respect to installation cost, maintenance, and simple measurement. However, as a geotechnical engineering aspect, the accuracy of the frost indicator has not been proved yet. This paper presents experimental and field investigations of the accuracy of the frost indicator and contour maps of maximum frost depth. The contour maps of maximum frost depth can be applied to design geo-infrastructure in South Korea.

요 지

동결깊이는 영구 동토지역 및 계절성 동토지역에서 도로의 동상방지층, 매설관의 깊이 및 건물의 기초를 설계하는데 중요한 고려사항이다. methylene blue 동결깊이 측정장치는 지중 온도센서를 이용한 계측시스템과 비교하여 저렴하고 유지관리와 측정이 용이한 장점을 지니고 있다. 그러나 지반공학적인 관점에서 지중에 매설된 methylene blue 동결깊이 측정장치의 신뢰성을 검토한 연구는 미미하다. 본 논문에서는 실내실험과 현장실험을 통해 methylene blue 동결깊이 측정장치의 신뢰성을 검토하고, 나아가 국내 현장에서 검증된 측정장치로 장기간 측정된 동결깊이 실측 데이터를 이용하여 최대 동결깊이 분포도를 작성하였다. 본 연구를 바탕으로 실측된 동결깊이는 향후 국내 지반구조물 설계에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Frost depth, Frost indicator, Methylene blue, Laboratory test, Field measurement

1. 서 론

동결깊이는 영구 동토지역 및 계절성 동토지역에서 도

로의 동상방지층, 매설관의 깊이 및 건물의 기초를 설계하는데 있어 중요한 고려사항이다. 우리나라는 계절성 동토지역을 포함하고 있어 동절기에 동상현상이 발생하고 해빙기에는 얼었던 지반이 융해침하가 발생하여 도로, 철도, 매설관 등이 파손되거나 사면 붕괴가 발생한다. 동결깊이를 결정하는 산정식은 간단한 수학적 해석에서 열-유체 프

Received 6 Aug. 2013, Revised 2 Sep. 2013, Accepted 4 Sep. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0791; Fax: +82-31-910-0211

E-mail address: jlee@kict.re.kr (J. Lee)

로세스와 결합한 복잡한 수치해석 모델까지 다양하게 존재한다(Argue and Denyes, 1974; Cohen and Fielding, 1979; Ali and Tayabji, 1999; Zapata and Houston, 2008; Selezneva et al., 2008).

동결깊이의 계산을 위해서는 기후 및 지반조건과 같은 다양한 인자들을 고려하여 산정식에 적합한 입력변수들을 결정해야한다. 국내에서는 동결깊이를 동결지수와 포장의 일광조건, 토질, 배수조건 등을 포함한 보정상수를 이용하여 산정하는 연구가 활발히 진행되었다(Kim et al., 2009; Cho et al., 2011; Shin et al., 2011). 이러한 경험식을 사용하기 위해서는 현장에서 측정된 동결깊이를 이용하여 신뢰성을 검토해야 한다. 그러나 현장에서 측정한 동결깊이 데이터 수집기간이 길지 않고, 지중온도 변화를 측정하는 온도센서가 아직은 고가이며 유지보수가 쉽지 않다.

동결깊이 측정장치로는 methylene blue 측정장치, 알루미늄 호일형, over flow형이 있으며, 알루미늄 호일형은 정확한 동결깊이값을 측정하기 어렵고, over flow형은 동결시 체적팽창에 의하여 물이 넘친 손실분을 계산하여 동결깊이를 구해야 하는 번거로움이 있다. Methylene blue 동결깊이 측정장치는 온도센서를 이용한 계측시스템 투자비용의 5% 이하로 매우 경제적이며, 유지보수가 편리하다는 장점이 있다. 기존 연구(Grandahl, 1963)에서는 methylene blue를 이용한 동결깊이 측정장치의 정확도는 ± 50 mm라고 하였지만 측정장치의 신뢰성 검토에 대한 연구는 미미하다. 따라서 본 논문에서는 methylene blue 동결깊이 측정장치의 신뢰성을 검토하기 위하여 실내실험과 현장실험을 실시하였다. 이를 통해 검증된 동결깊이 측정장치로 다년간 실측한 동결깊이 데이터를 이용하여 최대 동결깊이 분포도를 작성하였다.

2. 실내실험

2.1 실험방법

Fig. 1은 실내실험 모식도를 보여주고 있다. 동결깊이를 측정하기 위하여 아크릴 몰드(직경 20cm, 두께 1cm, 높이 100cm)를 제작하였으며, 하부에는 일정온도를 유지할 수 있도록 발열장치를 설치하였다. 현장 조건과 유사한 열전달을 모사하기 위해 아크릴 몰드의 바닥을 포함한 주변은 단열시켜 아크릴 몰드의 상부에서 하부로 1차원 열전달만이 가능하다. 동결깊이 측정장치를 보호하기 위한 중공관

을 설치하고 그 내부에는 1% 농도의 methylene blue 용액이 채워진 얇은 아크릴관을 삽입하였다. 이 용액은 상온에서는 청색을 유지하지만 기온이 0°C 이하가 되면 무색으로 변한다. 따라서 동결기 지표가 얼기 시작하면 내부의 아크릴관을 외부로 꺼내어 용액이 얼어 무색으로 변한 곳까지의 깊이를 측정하면 동결깊이를 결정할 수 있다. 시간의 변화에 따른 시료내부의 온도변화를 관찰하고 methylene blue 동결깊이 측정장치의 신뢰성을 검토하기 위하여 측정범위가 $-267 \sim 260^{\circ}\text{C}$, 정밀도가 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 인 T-type 온도센서 6개를 15cm 간격으로 설치하였다. 동결깊이 측정장치와 온도센서가 설치된 후 아크릴 몰드는 완전 건조된 주문진 표준사로 채웠으며, 아크릴 몰드는 항온 유지가 가능한 냉동챔버 내에서 실험을 진행하였다. 냉동챔버의 크기는 $300 \times 300 \times 300\text{cm}$ 이며, 온도제어 범위는 -20°C 에서 0°C 까지 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 오차로 조절가능하며 온도하강시간은 최대 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 이다. 실험에 사용한 주문진 표준사의 비중은 2.65이며 공극비는 0.77로 나타났다. 입도분석 결과 입도 분포가 $0.3 \sim 0.8\text{mm}$ 사이에 집중되어 있는 통일분류법 상의 SP로 확인되었다.

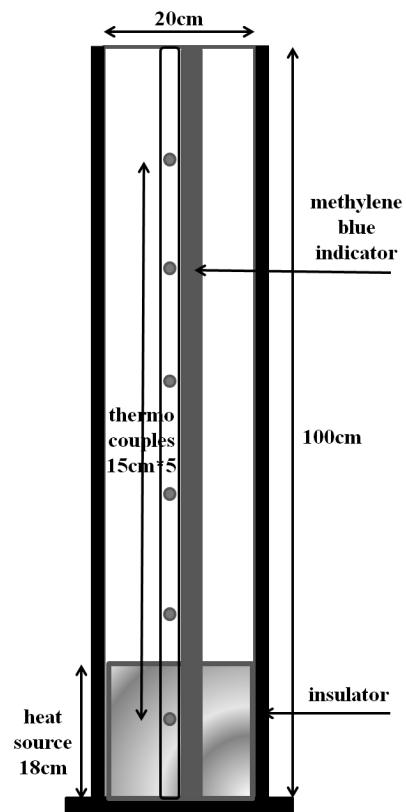


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 실험결과 및 분석

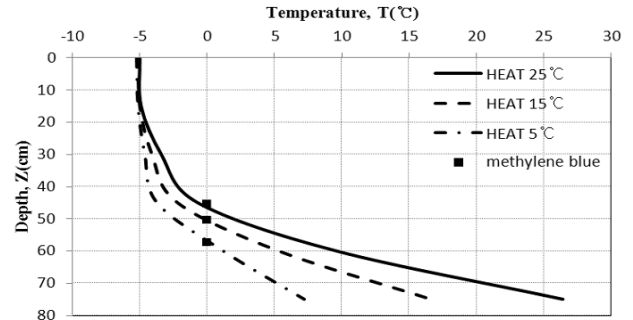
동결깊이 변화를 알아보기 위해 각각의 냉동챔버 온도 조건(-15°C, -10°C, -5°C)에 따른 발열장치 온도를 5°C, 15°C, 25°C로 변화시키며 실험을 실시하였고 조건별로 48시간 이상 지속시켜 지중 온도센서들이 온도평형이 되었는지 확인하였다. 그 후 동결깊이 측정장치인 내부 아크릴관을 뽑아 무색으로 변한 곳까지의 깊이를 관측하여 동결깊이를 측정하였다. 온도센서를 이용한 동결깊이 산정은 온도센서가 매설된 깊이에서의 온도를 이용한 0°C 지점의 깊이를 추정하여 동결깊이를 결정하였다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 냉동챔버의 온도가 일정하면 발열장치의 온도가 증가할수록 동결깊이가 감소하고 있다. 또한 발열장치의 온도가 일정하고 냉동챔버의 온도가 낮을수록 동결깊이가 증가함을 알 수 있다. 냉동챔버의 온도를 -5°C를 유지하면서 발열부의 온도를 5°C, 15°C, 25°C로 변화시키면서 실시한 실험에서 methylene blue를 이용한 측정장치에서 관측된 동결깊이는 각각 57, 50, 45cm이며, 온도센서를 통해 결정된 동결깊이는 57, 51, 46cm로 최대 동결깊이 차이는 1cm로 나타났다. 이밖에도 Table 1에 제시된 바와 같이 냉동챔버와 발열부의 다양한 온도 조합에서 최대 동결깊이 차이는 ±1cm로 확인되어 실내실험에서는 methylene blue를 이용한 동결깊이 측정장치의 신뢰성이 우수한 것으로 확인되었다.

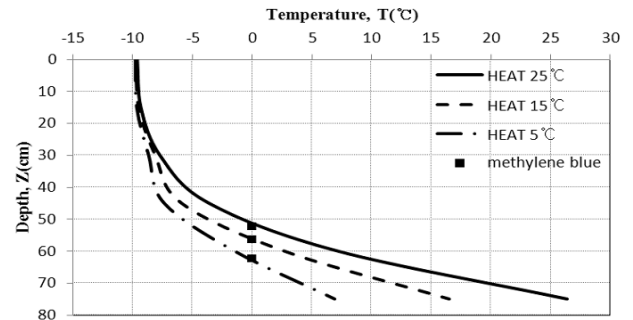
3. 현장실험

Methylene blue를 이용한 동결깊이 측정장치의 신뢰성 검토는 실내실험 뿐만 아니라 현장실험도 반드시 필요하다. 현장실험은 아스팔트 포장지역인 포천지역에서 수행하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 현장에 설치된 methylene blue 동결깊이 측정장치는 직경 25.4mm의 HDPE 외관, 직경 15mm의 아크릴 내관, 보호용 철제몸통, 철제뚜껑으로 구성된다. HDPE 외관 속에 설치하는 아크릴 내관은 실내실험과 동일하게 상온에서 청색인 1% 농도의 methylene

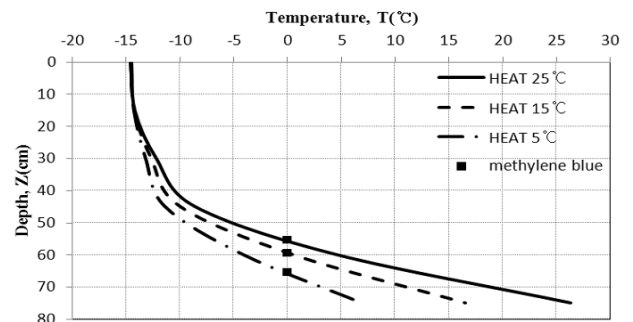
blue 용액이 채워져 있다. 지중 온도센서는 기 설치된 methylene blue 동결깊이 측정장치에 영향을 주지 않기 위하여 2m 이격된 지점에 매설하였다. 설치된 온도센서는 pt-100타입으로 깊이별 온도를 측정하기 위하여 10cm 간격으로 2m 깊이까지 측정이 가능하도록 제작되었고 온도 측정시간은 시간당 1회 측정하도록 하였다. 온도센서를



(a) chamber temperature: -5°C



(b) chamber temperature: -10°C



(c) chamber temperature: -15°C

Fig. 2. Measured temperature distributions from thermocouples and the frost depth from the frost indicator

Table 1. Frost depth from thermocouple and the methylene blue indicator

chamber temperature		-5°C			-10°C			-15°C		
heat source temperature		5°C	15°C	25°C	5°C	15°C	25°C	5°C	15°C	25°C
frost depth (cm)	1) thermocouple	57	51	46	63	56	51	66	59	56
	2) methylene blue indicator	57	50	45	62	56	52	65	59	55
1) - 2)		0	1	1	1	0	-1	1	0	1

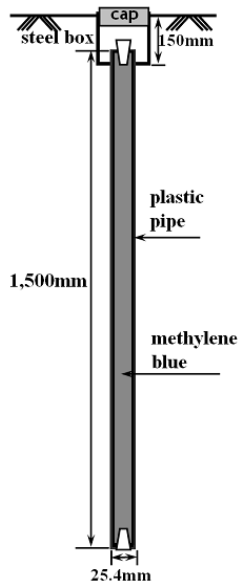


Fig. 3. Field installation for a methylene blue indicator

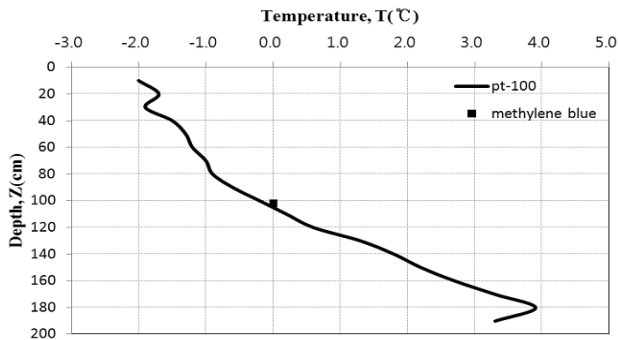


Fig. 4. Measured temperature distributions from thermocouples and the frost depth from the frost indicator at Pochon

매설한 지역 흙시료의 기본물성 결과를 살펴보면 0.8 ~ 1.0m는 입도가 양호한 실트를 포함한 모래, 1.3 ~ 1.5m는 실트를 포함한 모래, 1.8 ~ 2.0m는 입도가 불량한 실트를 포함한 모래로 분류되었다. 함수비는 7.5 ~ 13.6%, 비중은 2.62 ~ 2.64로 나타났다. 2011년 12월 22일부터 2012년 2월 21일(동절기)까지 시간당 깊이별 온도 변화를 측정하였으며, Fig. 4는 2012년 2월 21일의 깊이별 온도분포를 보여주고 있다. 온도센서를 이용하여 측정한 동결깊이는 약 105cm, methylene blue로 측정한 동결깊이는 102cm로 측정오차는 3cm에 불과하다. 따라서 현장에서도 methylene blue를 이용한 동결깊이 측정장치의 신뢰성을 확보하였다.

4. 동결깊이 측정장치를 이용한 현장 측정

한국건설기술연구원에서는 1991년부터 전국 국도상 90개 지점에 methylene blue 동결깊이 측정장치를 매설하여

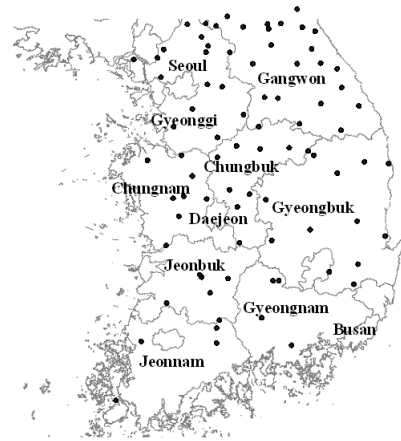
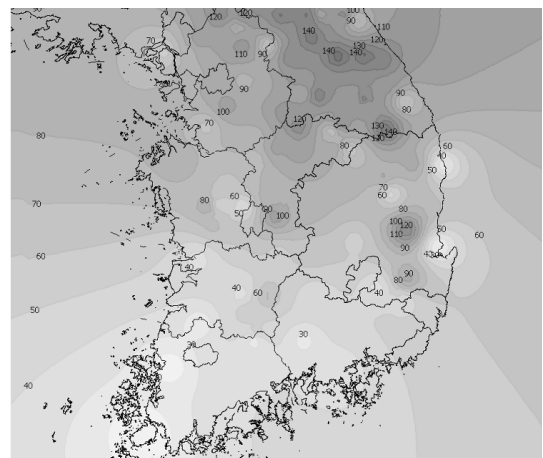
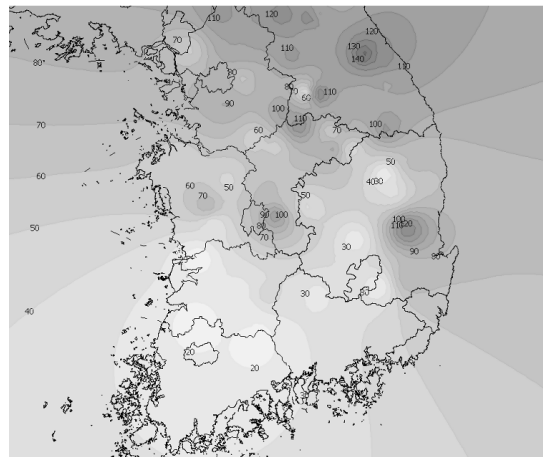


Fig. 5. Buried methylene blue indicator locations in South Korea



(a) 1994 ~ 2013



(b) 2013

Fig. 6. Contour maps of maximum frost penetration depth

매년 동절기에 동결깊이를 측정하고 있다(Fig. 5). 각 지점에서 측정한 최대 동결깊이를 이용하여 상용 프로그램(Surfer)을 사용하여 20년 기간(1994 ~ 2013년) 및 2013년의 최대 동결깊이 분포도를 Fig. 6에 나타내었다. 강원

도와 경기도 지역에서 20년 기간 최대 동결깊이가 2013년 최대 동결깊이와 비교하여 약 10cm 깊게 나타난다. 이는 1987년 이후 기후변화에 의하여 동결지수가 크게 감소하는 추이를 나타내고 있는 것과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 그러나 강원도와 경기도를 제외한 지역에서는 20년 동안 동결깊이의 변화가 미미한 것으로 확인된다.

2013년의 동결깊이 분포를 살펴보면 강원도 북부지역은 90 ~ 150cm 범위로 나타났고 경기 북부지역과 충청북도 제천, 경상북도 청송 지역은 동결깊이가 80 ~ 110cm, 경상남도과 전라남도 지역은 30cm 이하범위를 나타내고 있다. 최대 동결깊이 분포도를 이용하여 우리나라 동결깊이의 개략적인 분포상황을 알 수 있으며, 작성한 동결깊이 분포도를 통해 건물의 기초지반 깊이, 상하수도관, 지하매설물의 최소 매설깊이 및 도로의 동상방지층 두께를 결정하는데 활용할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 국내에서 사용 중인 methylene blue 동결깊이 측정장치의 신뢰성을 실내실험과 현장실험을 통해 검토하였으며, 측정장치를 활용한 국내 동결깊이 분포도를 작성하였다. 본 논문에서 도출된 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 현재 사용 중인 methylene blue 측정장치는 온도센서에 비해 경제적이고 간편하게 설치가 가능하며 비전문가도 측정이 가능하여 다양한 장점을 보유하고 있다.
- (2) 실내실험에서는 냉동챔버와 발열장치로 다양한 온도 조건에서 methylene blue 동결깊이 측정장치와 온도센서를 이용하여 동결깊이를 측정하였다. 그 결과 methylene blue 동결깊이 측정장치의 최대 측정오차는 ± 1 cm로 나타났다.
- (3) 현장에서도 두 계측방법으로 직접적으로 비교한 결과, methylene blue와 온도센서로 계측한 동결깊이는 3cm의 오차가 발생하였다. 따라서 현장에서도 methylene blue 측정장치는 높은 신뢰도의 계측방법임을 확인하였다.
- (4) Methylene blue 동결깊이 측정장치로 획득한 동결깊이 데이터를 이용하여 최대 동결깊이 분포도를 제시하였다. 강원도와 경기도 지역은 20년 동안(1994 ~ 2013년) 최대 동결깊이가 10cm 줄어든 것으로 확인

되며, 이는 최근 이상기후에 따른 동결지수 감소와 밀접한 관계가 있다. 본 연구를 바탕으로 실측 동결깊이를 이용하여 한국형 동결깊이 산정식의 개발과 동상방지층 설계, 파이프의 매설깊이를 결정하는데 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant from the Strategic Research Project Development of Extreme Cold Region Ground Stabilization Technology funded by the Korea Institute of Construction Technology (KICT).

Reference

1. Ali, H. A. and Tayabji, S. D. (1999), *Determination of Frost Penetration in LTPP Sections, Final Report : FHWA-RD-99-088*, FHWA, Washington, DC.
2. Argue, G. H. and Denyes, B. B. (1974), "Estimating the depth of pavement frost and thaw penetration", *Transportation Research Record* 497, pp.18-30.
3. Cho, Myung-hwan, Kim, Nakseok, and Shim, Jaepill (2011), "Computing Procedure of Daily Average Air Temperature using Field Data and Frost Index Calibration for Anti-Frost Heaving Layer Design", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.31, No.3D, pp.433-439 (in Korean).
4. Cohen, A. and Fielding, M. B. (1979), "Predicting frost depth; Protecting underground pipelines", *Journal of the American Water Works Association*, Vol.71, No.2, pp.113-116.
5. Gandahl, R. (1963), *Determination of the Ground Frost Line by Means of a Simple Type of Frost Depth Indicator*, National Swedish Road Research Institute Report. 30A, Stockholm.
6. Kim, Booil, Jeon, Sung Il, Lee, Moon Sup, and Lim, Kwang Su (2009), "Verification of Freezing Index and Frost Penetration Depth with Temperature Data of Korean LTPP", *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol.11, No.4, PP.143-152 (in Korean).
7. Selezneva, O. I., Jiang, Y. J., Larson, G., and Puzin, T. (2008), *LTPP Computed Parameter: Frost Penetration, Final Report: FHWA-HRT-08-057*, FHWA, Washington, DC.
8. Shin, Eun Chul, Lee, Jae Sik, and Cho, Gyu Tae (2011), "A Study on the Frost Penetration Depth of Pavement with Field Temperature Data", *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol.13, No.1, pp.21-32.
9. Zapata, C. E. and Houston, W. N. (2008). *Calibration and Validation of the Enhanced Integrated Climatic Model for Pavement Design, NCHRP Report 602*, Transportation Research Board, Washington, DC.