

환경변수 및 도로재료의 특성을 고려한 동결깊이 분석

Freezing Depth Analysis Considering Environmental Factors and Physical Properties of Pavement Materials

김석명* · 이석근** · 김석남***

Kim, Suk Myung · Rhee, Suk Keun · Kim, Suk Nam

Abstract

In this research freezing depth analyses were performed for the recent 9 project field sites using FrostAM which is a freezing analysis model developed recently within the country and a model based on regional environmental factors and physical properties of pavement materials. The environmental factors needed for freezing depth analysis were obtained from the meteorological agency website. And there were laboratory tests and analyses using a measuring device for properties of unsaturated soil for the field site samples across country to obtain hydrographical properties among physical properties. The freezing depths analyzed by FrostAM were deeper in the range of 14cm~44cm than those based on freezing index. It is considered that the freezing depths based on freezing index were overestimated. And there are considerable differences among the freezing depths based on freezing index which were designed by different designers.

Keywords : freezing analysis model, freezing depth, pavement, unsaturated soil, freezing index

요 지

이 연구는 지역별 환경변수 및 도로포장재료의 물리적 특성을 토대로 하여 국내에서 최근에 개발된 동결해석모델인 FrostAM을 사용하여 최근에 사업시행중인 전국 9개 사업지구에 대해 동결깊이 분석을 실시하였다. 동결깊이 분석에 필요한 자료중 환경변수는 기상청 사이트의 측정자료를 사용하였으며, 물리적 특성중 수리특성 분석을 위해 전국 각 지역으로부터 시료를 채취하여 불포화도 물성측정 장치를 사용하여 실내실험 및 분석을 실시하였다. FrostAM을 사용하여 분석된 동결깊이는 동결지수를 사용하여 결정된 각 사업지구의 동결깊이와 비교한 결과 14cm~44cm 작게 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 동결지수에 의한 동결깊이는 전반적으로 크게 계상되었으며, 사업지구별로 설계자가 다르다는 점을 고려할 때 동결깊이 산정이 설계자에 따라 상당한 편차가 있는 것으로 보인다.

핵심용어 : 동결해석모델, 동결깊이, 포장, 불포화도, 동결지수

1. 서 론

현재 국내의 도로포장 설계시 동결깊이의 결정은 동결지수에 근거한 동결깊이 결정법들을 사용하고 있다. 그러나 이러한 방법들은 지역별 기후특성을 정확히 반영하지 못하고 있으며, 특히 도로포장재료의 물리적 특성을 고려함이 없이 동결깊이를 결정함으로써 인해 많은 문제점을 가지고 있다.

이 연구에서는 동결깊이 결정함에 있어 보다 정확한 결정을 위해 지역별 환경변수(대기온도, 지중온도, 강우량, 지하수위)와 도로포장재료의 물리적특성(열특성, 수리특성)을 측정 및 분석을 실시하고, 그 결과를 토대로 국내에서 최근에 개발된 동결해석모델인 FrostAM을 사용하여 동결깊이 분석을 실시하였다.

2. 동결해석모델 FrostAM

FrostAM은 동결 및 용해 현상을 분석하기 위해 김석남과 김석명(2006)에 의해 개발된 유한요소해석 프로그램으로 환경변수 및 토사 등의 재료의 물리적 특성을 입력자료로 하여 지반내에서의 모관흡수력변화, 함수비변화, 온도변화 등을 분석한다. 지반내에서의 동결 및 용해과정은 물흐름과 열흐름의 복합적인 과정으로 FrostAM에서 사용된 식은 불포화도의 물흐름 편미분방정식과 불포화도의 열흐름 편미분방정식으로 각각 식 (1), 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(k_y (\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} + 1 \right) \right) = c(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (1)$$

*정회원 · 한국토지공사 차장 · 경희대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : ksmjung@lplus.or.kr)

**정회원 · 교신저자 · 경희대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : skrhee@khu.ac.kr)

***정회원 · 한국토지공사 차장 · 공학박사 (E-mail : suknam-kim@hanmail.net)

여기서, y :연직방향의 길이

$k_y(\psi)$:불포화토의 투수계수

ψ :흙의 모관흡수력

$c(\psi)$:흙의 체적함수비와 모관흡수력 간의 관계를 나타내는 함수특성 곡선의 기울기

t :시간

ρ_i :얼음의 밀도

ρ_w :물의 밀도

θ_i :얼음의 체적함수비

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(K_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) - v_y C_w \frac{\partial T}{\partial y} = C_m \frac{\partial T}{\partial t} - L \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (2)$$

여기서, K_T :흙 요소의 열전도계수

T :온도

v_y :물의 유속

C_w :물의 체적열용량 계수

C_m :흙 요소의 체적열용량 계수

L :0°C, 1g의 물이 0°C, 1g의 얼음으로 변환시 방출되는 열량(잠열)

식 (2)에서 흙 요소의 열전도계수 K_T 와 흙 요소의 체적열용량 계수 C_m 는 상수가 아니고 흙 요소내에 존재하는 물과 얼음의 양에 따라 변화한다. 물과 얼음의 양을 고려한 이 두 계수에 대한 식으로 FrostAM은 다음의 DeVries(1966) 식을 사용하고 있다.

$$C_m = C_w \theta_u + C_i \theta_i + C_s (1 - \theta_0) \quad (3)$$

$$K_T = K_w \theta_u + K_i \theta_i + K_s (1 - \theta_0) \quad (4)$$

여기서, θ_u :얼지 않은 물의 체적함수비

θ_0 :흙의 공극비

C_w :물의 체적열용량 계수

C_i :얼음의 체적열용량 계수

C_s :흙 입자의 체적열용량 계수

K_w :물의 열전도계수

K_i :얼음의 열전도계수

K_s :흙 입자의 열전도계수

그림 1은 FrostAM 프로그램의 순서도를 보여주는데 물흐름과 열흐름의 복합적인 과정인 동결해석과정의 절차를 이해할 수 있다. 그림 1의 순서도에서 '등온상의 상변화과정 분석'은 동결이나 융해과정중의 토사 즉, 물과 얼음이 동시에 존재하는 토사의 동결 또는 융해과정에 대한 분석을 실시하는 단계이다.

3. 동결깊이 분석 기초자료

이 연구에서는 동결깊이 분석대상 지역으로 상대적으로 동결피해가 예상되는 지역인 수도권지역과, 강원도 및 충남 일부 지역 등 최근에 시행 및 시행계획중인 9개 사업지구를 대상으로 하여 동결깊이 분석에 필요한 시험 자료들을 준비하였다.

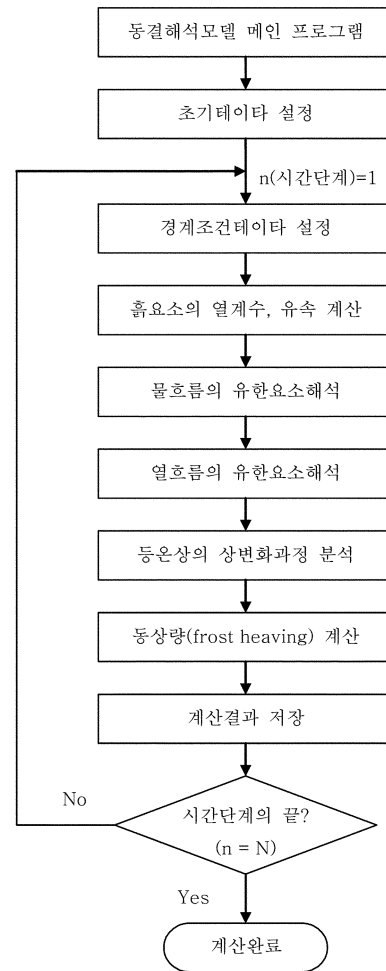


그림 1. FrostAM 순서도

3.1 환경변수

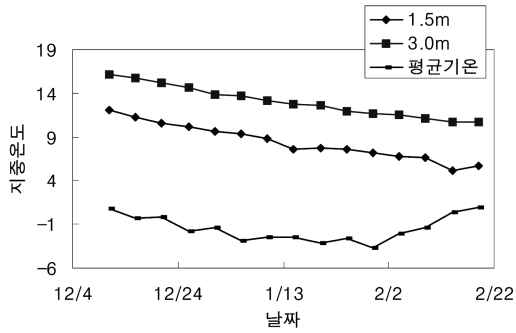
이 연구에서 동결해석의 분석대상기간은 가장 최근의 동결기간으로 하였으며, 기상청의 온도변화를 고려한 결과 2007.12.11~2008.2.19까지가 동결기간으로 판단되었다.

그림 2는 환경변수중 서울, 수원, 춘천, 대전관측소의 동결 분석기간 동안의 지중온도의 변화를 보여준다. 동결깊이 분석시 지표의 온도변화는 일평균 평년기온을 사용하였으며, 강우량은 당해 연도 강우량을 사용하였다. 이러한 온도변화와 강우량은 기상청 사이트로부터 얻을 수 있다. 분석대상 사업지구의 지하수위는 조사결과 도로계획고에서 2~3m 아래에 위치하고 있었다.

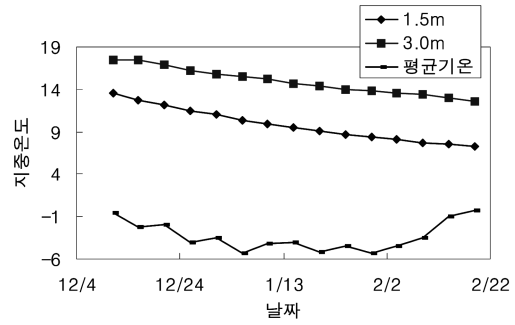
3.2 도로포장재료의 물리적 특성

3.2.1 불포화토 물성 측정장치

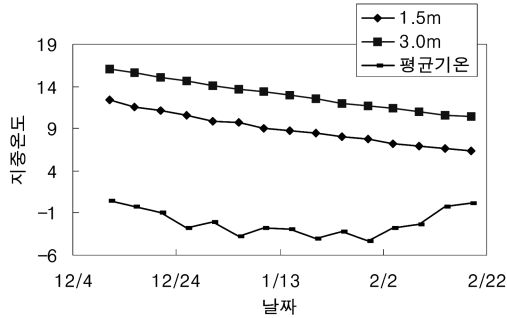
도로포장내 보조기층과 노상은 보통 불포화상태로 존재한다. 불포화토의 수리특성을 나타내는 함수특성곡선은 토사의 체적함수비와 모관흡수력 간의 관계를 나타내는 곡선이다. 함수특성곡선을 구할 수 있는 실험장치가 몇몇이 있으나, 이 연구에서는 국내에서 최근에 개발된 장치인 그림 3의 불포화토 물성 측정장치(김석남, 2004)를 사용하여 함수특성곡선을 구하기 위한 실험을 실시하였다. 그림 3의 불포화토 물성 측정장치는 포화투수시험, 함수비와 모관흡수력 변화관계 시험, 불포화토 삼축압축시험 등을 할 수 있는 실험장치이다. 불포화토 물성 측정장치는 삼축셀, 재하대, 제어판넬, 부속장



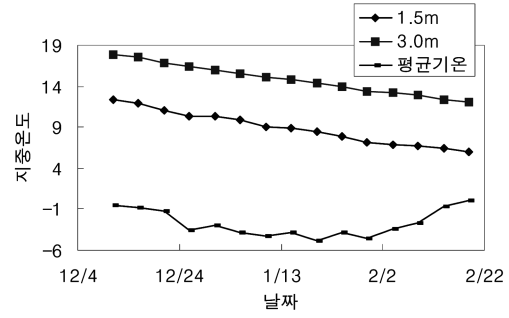
(a) 서울관측소



(b) 수원관측소



(c) 춘천관측소



(d) 대전관측소

그림 2. 평균기온 및 지중온도 변화

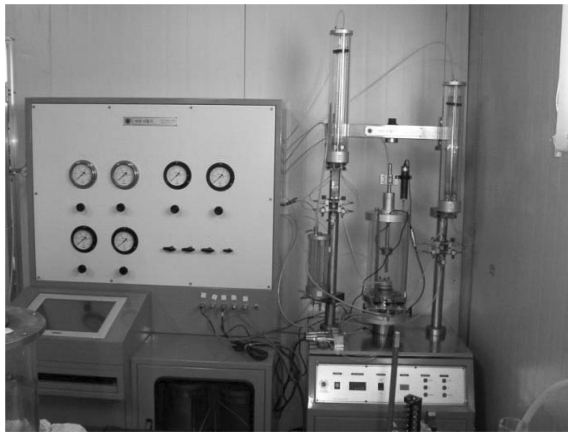


그림 3. 불포화도 물성 측정장치

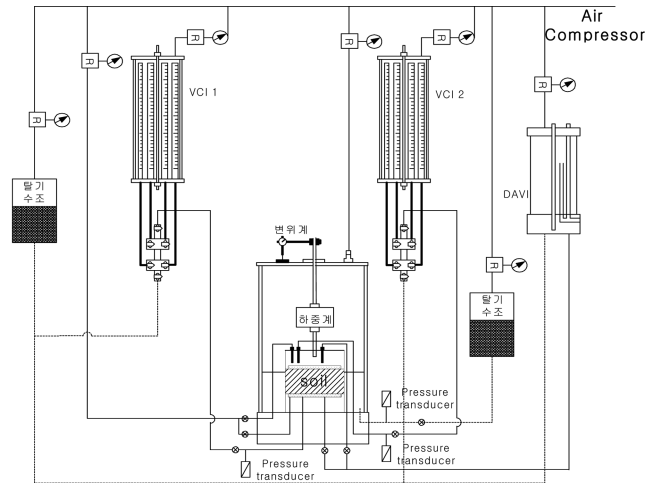


그림 4. 불포화도 물성 측정장치 계통도

치들로 구성되어 있다. 그림 3의 좌측 부분에 있는 장치 제어판넬이고 오른쪽에 있는 장치들은 재하대에 삼축셀과 부속장치들이 연결되어 있다. 그림 4는 불포화도 물성 측정장치의 체계적인 계통도를 보여주고 있다. 이 시험장치의 주요 작동원리는 삼축셀내에 거치된 시료에 공기압력을 연결시켜 시료에 적절히 공기압력을 가하여 시료의 포화도를 실험자가 원하는 값으로 변화시켜 가면서 불포화도의 여러 물성 값들을 구하는 것이다.

3.2.2 수리특성

동결깊이 분석에 필요한 수리특성은 함수특성곡선과 투수 계수방정식이다. 함수특성곡선은 체적함수비와 모관흡수력 간의 관계를 몇몇 지점에 대해 실험을 통해 구한 후, 이 관계를 동결해석모델에 사용하기 위해 함수특성곡선식으로 나타내야 하는데 이 연구에서는 함수특성곡선식으로 Fredlund와 Xing(1994)이 제시한 다음의 식을 사용하였다.

$$\theta_u = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{\alpha} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (5)$$

식 (5)에서 $C(\psi)$ 는 식 (6)로 표현되고, e 는 로그지수 값, 그리고 α , n , m 은 상수 값들이다.

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + (\psi/\psi_r))}{\ln(1 + (100000/\psi_r))} \quad (6)$$

식 (6)에서 ψ_r 는 잔류함수비에 대응되는 모관흡수력으로 본 연구에서는 1,500~2,000kPa을 사용하였다. 잔류함수비는 체적함수비를 감소시키기 위하여 큰 모관흡수력의 변화가 필요할 때의 체적함수비이다. 표 1과 그림 5는 각 분석대상지구 노상의 일반물성과 함수특성실험 결과를 보여준다. 그림 5에서 점들은 실험결과 값들이고 실선은 식 (5)의 Fredlund와 Xing(1994) 식으로 표현된 함수특성곡선이다.

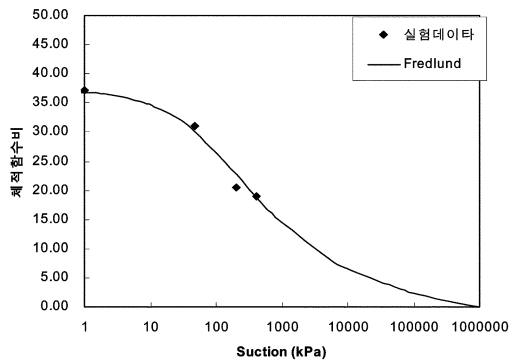
표 1. 각 지구 노상재료의 물성

구분	투수계수 (cm/min)	밀도 (g/cm ³)	액성한계 (%)	소성한계 (%)	흙의분류
원주A	5×10 ⁻⁶	2.63	NP	NP	SW-SM
고양B	5×10 ⁻⁶	2.66	NP	NP	SM
남양주C	5×10 ⁻⁶	2.65	NP	NP	SM
인천D	1×10 ⁻⁷	2.66	NP	NP	SM
춘천E	5×10 ⁻⁶	2.61	NP	NP	SW-SM
파주F	5×10 ⁻⁶	2.65	NP	NP	SM
평택G	6×10 ⁻⁶	2.67	34.6	21.9	CL
충남H	4×10 ⁻⁶	2.67	33.2	21.6	CL
화성I	5×10 ⁻⁶	2.63	NP	NP	SM

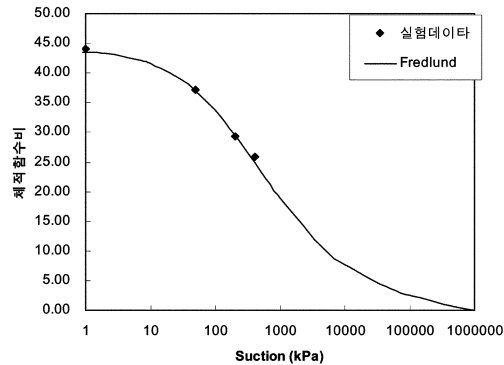
불포화토의 투수계수와 모관흡수력 간의 관계를 나타내는 투수계수방정식은 직접측정하는 방법과 간접적으로 구하는 방법이 있다. 간접적인 방법은 포화투수계수와 함수특성곡선을 이용하여 투수계수방정식을 구하는 방법인데, 이 연구에서는 간접적인 방법을 사용하였다. 이 연구에서 사용된 동결 해석모델 FrostAM에서는 직접측정하는 방법과 간접측정법을 모두 적용가능하며, 직접법의 경우 Gardner 투수계수방정식을 사용하고, 간접법의 경우 Fredlund 등(1944)에 의해 발표된 식 (7)의 투수계수방정식을 사용한다.

$$k_r = \frac{\left(\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \right) \theta'(e^y) dy}{\left(\int_{\ln(\psi_{aev})}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \right) \theta'(e^y) dy} \quad (7)$$

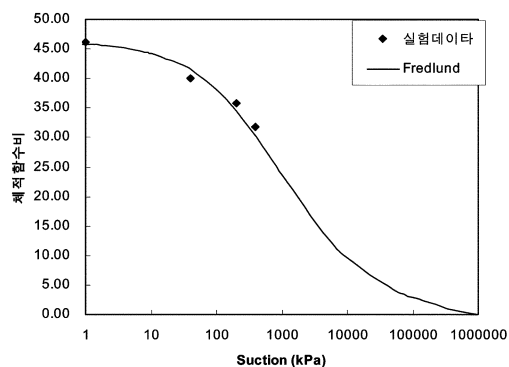
여기서, k_r : 흙의 포화시의 투수계수에 대한 흙의 불포화시의 투수계수의 비



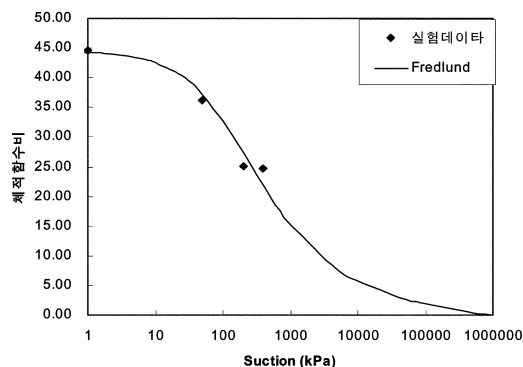
(a) 원주 A지구



(b) 고양 B지구



(c) 남양주 C지구



(d) 인천 D지구

그림 5. 함수특성곡선

θ' : 식 (5)를 미분한 값

b : 1000000의 자연로그 값

$\ln \psi_{aev}$: air entry value에 자연로그를 취한 값

식 (7)에서 air entry value는 공기가 흡속으로 들어가기 시작할 때의 모관흡수력으로 그림 5의 함수특성곡선에서는 10~50kPa의 범위에 분포한다.

3.2.2 열특성

포장재료의 열특성으로 열전도 계수와 체적열용량 계수가 있다. 열전도 계수는 열의 흐름 방향으로의 단위온도경사 하에서 요소의 단위면적을 통해서 단위시간당 흐르는 열의 양을 말하며, 체적열용량계수는 단위체적의 온도를 1°C 올리는 데 필요한 열의 양을 의미한다. 이 연구에서 분석대상지구의 포장재료는 아스팔트층, 보조기층 및 노상토로 구성되어 있다. 포장재료의 열특성은 실험의 어려움, 재료에 따른 열특성 변화가 그리 크지 않은 점을 고려, 문헌(CRREL Report 93-2)을 참조하여 표 2의 값을 사용하였다.

표 2. 포장재료의 열특성

구분	체적열용량계수 cal/(cm ² · °C)	열전도율 cal/(cm · hr · °C)
아스팔트층	0.2	9
보조기층	0.2	5
노상	0.2	5

3.3 동결깊이 분석

3.3.1 분석대상 사업지구의 동결깊이

분석대상 사업지구는 최근 시행 및 시행예정 사업지구인

원주A지구, 고양B지구, 남양주C지구, 인천D지구, 춘천E지구, 파주F지구, 평택G지구, 충남H지구 및 화성I지구 등 9개 사업지구로 분석포장단면은 대로로 하였다. 각 지구의 동결깊이 결정은 모두 다 동결지수를 사용하는 방법중 하나인 노상동결 관입허용법을 사용한 것으로 조사되었다. 표 3은 분석대상 사업지구의 포장단면 구조 및 동결깊이를 보여준다. 동결깊이는 75cm~105cm의 범위를 보여주고 있다.

표 3. 각 사업지구의 포장단면 구조 및 동결깊이

단위 : cm

구분	아스팔트층	보조기층	동상방지층	동결깊이
원주A지구	21	20	64	105
고양B지구	31	25	29	85
남양주C지구	26	20	38	84
인천D지구	21	41	18	80
춘천E지구	15	40	25	80
파주F지구	31	35	20	86
평택G지구	21	20	34	75
충남H지구	21	15	39	75
화성I지구	22	20	40	82

3.3.2 FrostAM 분석에 의한 동결깊이

분석대상 지구들의 동결해석분석은 포장단면 전체에 대해서 하는 것은 불필요하므로 동결의 취약부로 판단되는 부위인 보도와 차도의 경계부를 중심으로 차도부 2m와 보도부 1m에 대해서 분석범위를 정하였으며, 깊이방향에 있어서는 계획고로부터 지하수위선 까지를 분석범위로 하였다. 그림 6부터 그림 14까지 그림들은 각각 지구들의 시간에 따른 동결깊이 변화과정을 보여준다. 모든 지구에서 공통적으로 볼 수 있는 바와 동결깊이는 동결기간이 길어질수록 동결깊이가 커짐을 알 수 있다. 그러나 사업지구 분석결과중 고양B지구와 충남H지구의 경우는 동결기간의 마지막 부분에 동결깊이가 감소하였는 바, 이는 온도가 영상으로 상승하여 동결깊이가 감소한 것으로 보인다.

표 4는 동결지수를 사용하는 노상동결 관입허용법에 의한 동결깊이와 FrostAM 분석결과에 의한 동결깊이 및 그 차이를 보여준다. 표 3에서 볼 수 있는 바와 같이 동결지수에 의한 방법이 동결깊이가 크게 나타남을 볼 수 있다. 그리고

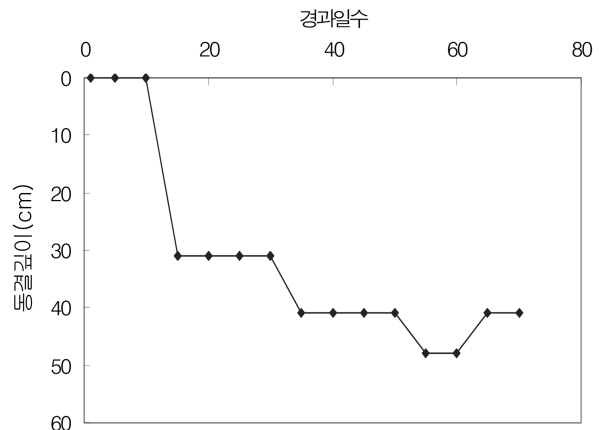


그림 7. 고양B지구 동결깊이 변화

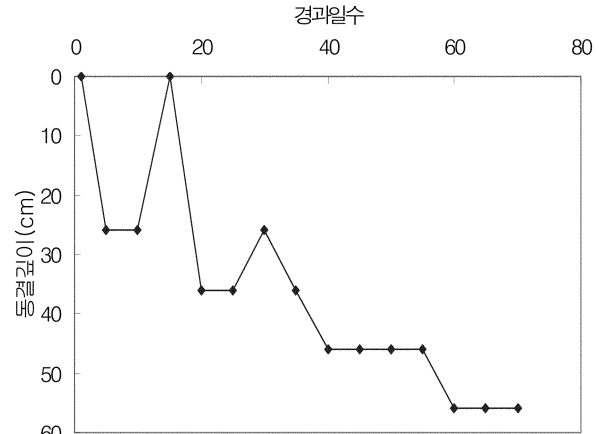


그림 8. 남양주C지구 동결깊이 변화

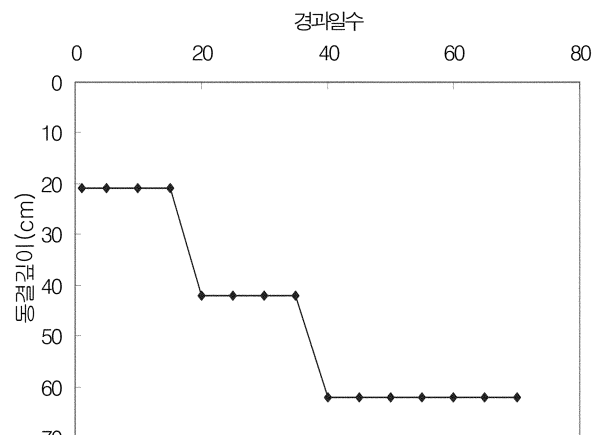


그림 9. 인천D지구 동결깊이 변화

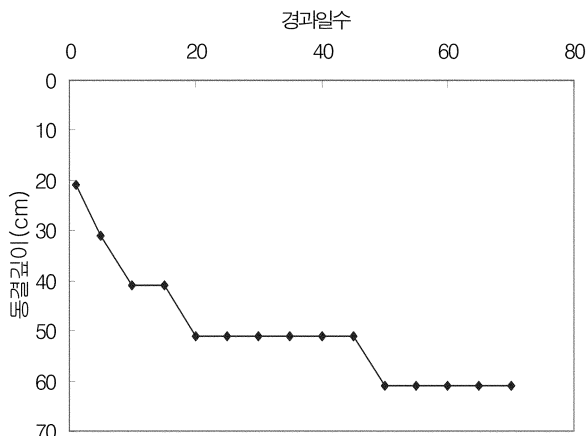


그림 6. 원주A지구 동결깊이 변화

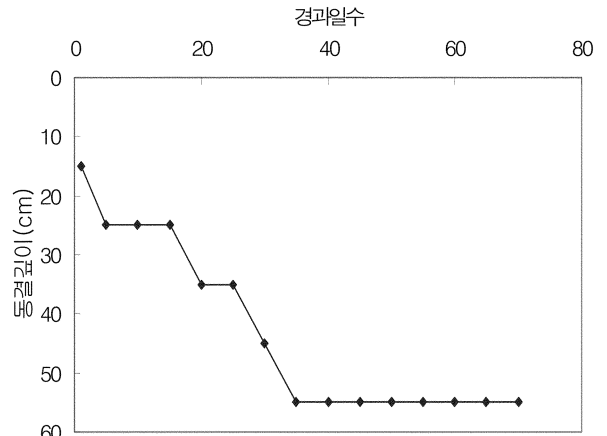


그림 10. 춘천E지구 동결깊이 변화

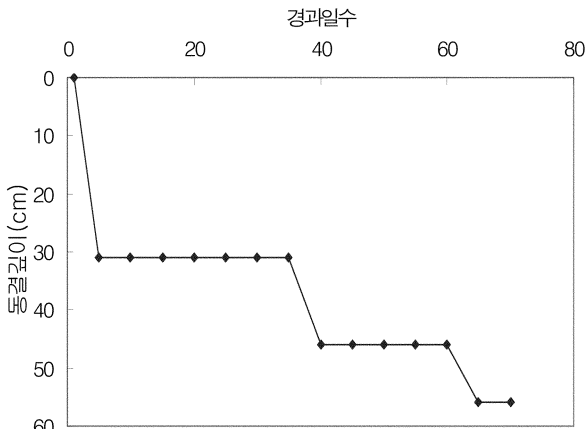


그림 11. 파주F지구 동결깊이 변화

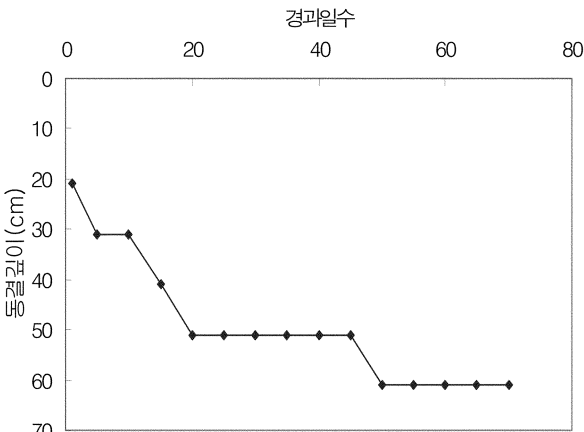


그림 12. 평택G지구 동결깊이 변화

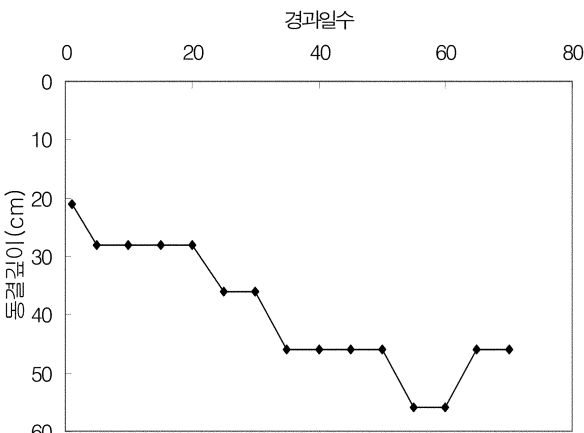


그림 13. 충남H지구 동결깊이 변화

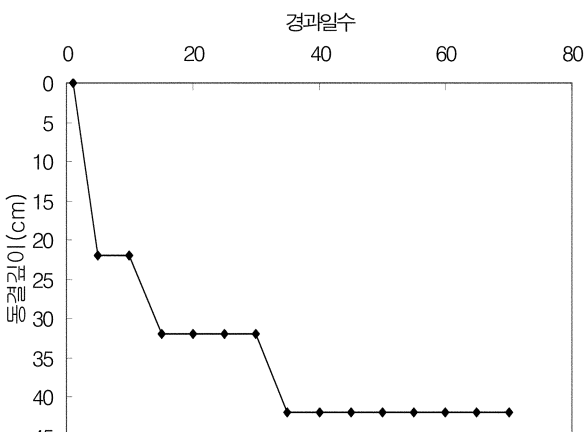


그림 14. 화성지구 동결깊이 변화

두 결과간의 동결깊이의 차이가 14cm~44cm로 편차가 큼을 알 수가 있다. 이처럼 설계자에 따라 동결깊이 분석결과와 차가 크다는 것은 동결깊이의 분석에 있어 오차가 크다는 것을 의미한다.

표 4. 동결깊이 비교

단위 : cm

구분	동결지수사용	FrostAM	동결깊이 차
원주A지구	105	61	44
고양B지구	85	48	37
남양주C지구	84	56	28
인천D지구	80	62	18
춘천E지구	80	55	25
파주F지구	86	56	30
평택G지구	75	61	14
충남H지구	75	56	19
화성I지구	82	42	40

4. 결론 및 향후과제

국내에서 현재 사용되고 있는 동결깊이 결정방법은 모두 다 동결지수에 근거한 방법이고, 그 중 하나인 노상동결 관입허용법을 대체적으로 사용하고 있으며, 이러한 방법은 도로재료의 물리적 특성을 고려하지 못하고 있다. 이 연구에서는 보다 정확한 분석을 위해 지반환경 변수와 도로재료별 물리적 특성을 고려하여 동결깊이 분석을 실시하였다.

앞의 분석결과에서 볼 수 있는 바와 같이 동결지수에 의한 방법과 FrostAM 분석결과 간에는 상당한 차이를 보여주고 있다. 최소 14cm에서 44cm까지 차이를 보여주고 있는데, 이는 전체 동결깊이에 비할 때 상당한 차이를 나타내고 볼 수 있다. 이러한 차이를 보이고 있는 주원인은 위치별 환경변수의 고려미흡, 도로포장 재료별 물리적 특성의 미고려, 설계자별 개인오차 등이 있을 수 있다. 특히 설계자별 개인오차로 인해 두 방법 간에 오차가 큰 것으로 보인다.

FrostAM 분석결과와 시간의 변화에 따른 동결깊이는 동결기간이 장기화함에 따라 커짐을 알 수 있었다. 그러나 동결깊이가 어느 정도 깊이가 되면 동결깊이는 더 이상 커지지 않았는데, 이는 동결기간의 마지막 부분은 영하의 온도가 크지 않아 더 이상의 동결은 진행되지 않은 것으로 보인다.

현재 국내의 모든 동상방지층 설계는 동결지수에 근거한 방법을 사용하고 있으며, 이 방법 자체가 도표 등을 이용하여 동결지수를 결정함으로 인해 설계자별 개인오차가 상당히 크게 나타나고 있어 보다 정확한 동결깊이 분석방법을 사용할 필요가 있다. 또한 이 연구에 의한 분석결과로부터 판단할 때 동결지수에 근거한 현재의 국내 동상방지층의 설계는 대체적으로 크게 계상되고 있어 이에 대한 보완이 필요하다고 생각된다.

참고문헌

- 김석남, 김석명, 목영진, 이석근(2006) 포장내 토사의 함수비 변화 및 동결깊이 결정모델 개발, 한국토지공사 연구보고서.
- 김석남, 박치원, 목영진, 김석명(2005) 변형된 삼축압축장치를 이

- 용한 불포화토의 함수특성곡선과 투수계수방정식의 결정, **한국지반공학회논문집**, 한국지반공학회, Vol. 21, No. 5, pp. 59-64.
- 김석남, 황성춘, 목영진, 정재우(2004) **동결심도 결정을 위한 토질특성 연구**, 한국토지공사 연구보고서.
- DeVries, D.A. (1966) *Thermal Properties of Soils*, In Physics of Plant Environment (W.E. Van Wijk, Ed.), Amsterdam: North-Holland Publishing Co., pp. 210-235.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993) *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons.
- Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994) Equation for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, pp. 521-532.
- Gardner, W.R. and Fireman (1958) Laboratory studies of evaporation from soil columns in the presence of a water-table, *Soil Science*, Vol. 85, pp. 244-249.
- Guymon, G.L., Berg, R.L., and Hromadka, T.V. (1993) *Mathematical Model of Frost Heave and Thaw Settlement in Pavements*, CRREL Report 93-2.
- Kim, Suknam (2002) *Coupled Heat and Moisture Flow Analysis in Unsaturated Soil*, Ph.D. dissertation, University of Toledo.
- (접수일: 2008.6.10/심사일: 2008.8.4/심사완료일: 2008.12.3)