



# 국내 도로포장의 동상 특성에 대한 수치해석적 연구

## A Numerical Analysis on the Characteristics of Frost Heaving at Road Pavement in Korea

권 기 철\* · 오 세 봉\*\* · 김 형 배\*\*\* · 최 창 규\*\*\*\*

Kweon, Gi-Chul · Oh, Se-boong · Kim, Hyung-Bae · Choi, Chang-Gyu

### Abstract

The basic study was performed on the mechanical analysis of frost and heave using program FROST by CRREL, U.S. army corps of engineers. The characteristics of frost heaving in pavement was analyzed by considering climate, pavement sections and subgrade soil conditions in Korea. Water tables were located at the depth of 0.35m, 2m and 3.35m from subgrade. Inputs were evaluated inevitably from the existing references. As a result frost heave and depth were evaluated with respect time. Maximum frost heave decreased lowering the water table and maximum frost depth was less than 15cm from subgrade. Frost action did not affect seriously on the analysis sections.

*Keywords : pavement, frost heaving, freezing depth, FROST*

### 요 지

본 연구는 동결·융해 해석에 대한 역학적 해석에 대한 기초적 연구로서, 미공병단 CRREL에서 개발한 FROST 프로그램을 이용하였다. 국내의 기후조건과 포장단면, 그리고 노상토의 특성을 고려하여 동상특성을 분석하였다. 지하수위는 노상면으로부터 0.35m, 2m, 3.35m 깊이에 위치한 경우를 고려하였다. FROST 해석에 필요한 입력치는 불가피하게 기존의 자료를 이용하였다. 해석결과 시간에 따른 동상량과 동결깊이를 구할 수 있었다. 이러한 관계로부터 구한 최대 동상량은 지하수위가 낮아지면서 감소하는 경향을 나타내고 있다. 최대 동결깊이를 보면 노상은 15cm 이내 동결됨을 알 수 있다. 동상에 민감한 흙을 제외하고 국내 노상토는 동결 영향이 크지 않을 것으로 여겨진다.

*핵심용어 : 포장, 동상, 동결깊이, FROST*

\* 정회원 · 동의대학교 토목공학과 조교수  
 \*\* 정회원 · 영남대학교 토목공학과 부교수  
 \*\*\* 정회원 · 한국도로공사, 도로교통기술원  
 \*\*\*\* 정회원 · 동의대학교 토목공학과 박사과정



## 1. 서론

포장체의 동결은 지속적인 동결 온도조건이 유지되어야 하고 지하수위가 주변에 존재하는 경우에 발생한다. 아울러, 포장체에서 동결이 발생한 경우라 할지라도, 모든 경우에 공학적인 문제를 야기하는 것은 아니며, 동결에 민감한 재료(동상 민감 재료)가 동결 층 내부(동결 깊이 이내)에 포함된 경우에 동상(frost heaving)이 발생하여 포장체의 손상을 유발하게 된다.

포장체에서 동상작용에 대한 연구는 지난 70여 년 간 되어오고 있다. 이러한 연구가 지속적으로 진행되고 있음에도 불구하고 동상을 고려한 엄밀한 설계기법이 개발되어 있지 못하다(ref). 동상은 매우 다양한 요소에 영향을 받고 있어서, 대부분의 경우, 동상 설계기법은 주어진 조건에서만 합리적이다. 따라서 온도, 노상토, 지하수위 조건 등 특정한 조건에서의 동상특성을 평가하는 것은 매우 중요하다(권기철, 2002; 김영진, 1996; 남영국 등, 2002; 박성완 등, 2002; 이경하 등, 2002; 조규태 등, 2002). 그러나, 우리 나라가 동상지역으로 고려됨에도 불구하고 동상에 관한 연구가 매우 미약하다.

포장체에서 동상 매커니즘은 대단히 복잡하여 아직까지 만족할 만한 수학적 모델이 개발되어 있지 못하여, 각 지역의 환경특성, 포장 단면특성, 재료특성 등을 반영한 다소 경험적인 설계기법이 적용되고 있다. 한편, 우리나라는 동결·융해가 발생하는 지역적 특성에도 불구하고 포장체의 동상에 대한 연구가 대단히 미약하여 외국에서 개발된 설계기법을 특별한 검증절차 없이 현업에 적용하고 있다(한국도로공사, 2002). 따라서, 합리적인 설계기법 개발을 위해서는 국내에서 사용되는 노상토의 특성 및 환경조건을 고려한 동상특성 규명이 매우 중요하다.

본 연구에서는 미공병단 CRREL(Cold Regions Research & Engineering Laboratory)에서 제시하는 FROST 프로그램을 이용하여 국내의 기후조건과 포장단면, 그리고 노상토의 특성을 고려하여 동상 특성을 분석하였다.

## 2. 동결·융해의 역학적 해석기법 (FROST를 중심으로)

1975년 이후부터 미공병단 CRREL을 중심으로 다양한 환경조건서의 동상(frost heave)과 융해 약화(thaw weakening)을 평가하기 위한 수학적 모델 연구하고 다양한 포장설계법들을 개발하고 있다(Gary et al., 1993).

이러한 기법중에는 포장층의 동결·융해작용에 대한 수학적 모델인 FROST를 포함하고 있다. FROST 모델은 열(heat)과 수분(moisture)의 1차원적 연직 유동(flux)에 대하여 수치해석을 수행한

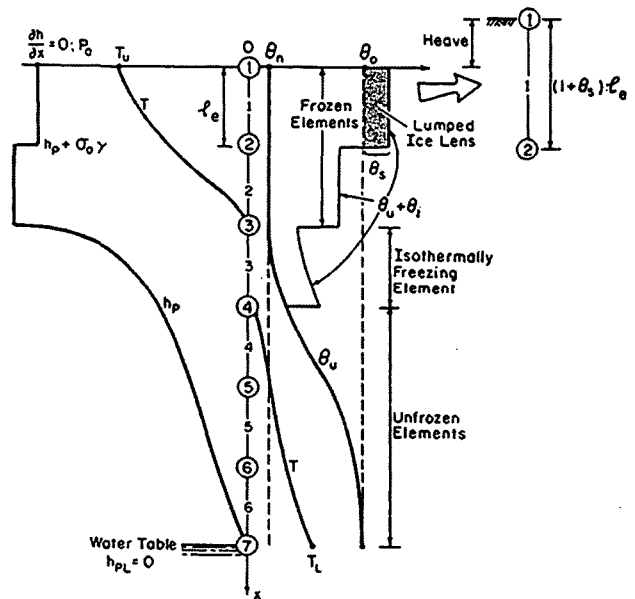


그림 1. 역학적 해석을 위한 동결 및 동상 모형도 (Gary et al., 1993)



다. 본 모델은 주로 실트에서 큰 자갈까지의 입자크기들을 가진 점성이 없는, 동결에 민감한 흙을 대상으로 한다. 또한 최대동결관입이 지하수위 상부와 포장체 사이에서 발생하고 계절적인 동결·융해가 일어나는 흙을 대상으로 한다. 그리고, 상재하중은 60kPa미만으로 그 효과가 크지 않은 경우에 적용할 수 있다(Gary et al., 1993).

포장체의 하부로의 동결이 이루어지는 동안, 동결에 따른 3개 층(완전 동결 영역, 동결 진행영역, 완전 비동결 영역)으로 구분한다. 동결 진행영역에서는 완전 비동결토가 유입되고 완전 동결토가 유출된다. 즉, 동결이 진행되면 완전 동결토는 최상부 영역으로 구분되고, 최하부의 완전 비동결토가 동결진행을 겪게된다. 융기(heaving)는 유출된 흙의 체적이 유입된 체적보다 클 때 발생한다 (그림 1).

수치해석 절차는 '절점(node)'을 적절한 간격으로 배치하여 수평 '요소(element)'로 구분된 흙에서 이루어진다. 시간은 해의 정확성을 확보하도록 세분화해야 한다. 각 주기에 대하여 동결 진행중인 요소들은 하부 경계로부터 상향 이동된 수분(liquid water)과 가측열(sensible heat)을 어느 정도 획득한다. 또한, 상부 경계를 통하여 확산되는 일부 가측열은 손실된다. 초기 및 최종 요소의 온도, 초기 함수비, 최종 함빙비(ice content)가 주어지면, 경과 시간동안 유출된 순 열에너지를 요소들로부터 구할 수 있다. 그리고, 초기 함수비와 하부로부터의 수분 유입량이 주어지면, 최종 함빙비를 구할 수 있다. 이때 최종 함빙비가 초기 간극의 체적을 초과하면, 요소는 팽창하여 상응하는 융기(heaving)가 일어난다.

이동하는 동결 진행영역의 열에너지의 순 유출량은 시스템의 열 경계 조건에 부합하도록 한다. 동시에 물의 유동과 간극 얼음 및 분리얼음(segregated ice)의 누적량은 수리경계조건과 융기 하중에 부합해야 한다.

FROST 프로그램에서 적용하는 동상모델의 주요 가정은 다음과 같다.

1) 포화 /불포화시 간극수의 이동은 연속 방정식과

Darcy's law가 적용된다.

- 2) 기체의 유동은 무시하고 액체의 유동만 고려한다.
- 3) 동결층에서의 수분(moisture)유동은 무시하고, 동결 흙 표면에서 물의 유/출입은 없다.
- 4) 비동결층에서의 흙의 변형은 무시한다.
- 5) 동결진행층에서의 흙의 간극수압은 비동결 함수비에 관한 인자(an unfrozen water content)에 의하여 지배된다.
- 6) 이력현상(hysteresis)이 일어나지 않는다.
- 7) 전체 흙 column에서의 열 유동(heat transport)은 열 이류(advective) 성분을 포함한 간극열 유동(sensible heat transport)방정식에 의해 지배된다.
- 8) 비동결상태의 함수비는 온도에 무관하다.
- 9) 상변화(phase change)효과 및 수분효과는 분리절차(decoupled process)로 모델한다.
- 10) 동결/융해는 등열상변화 과정(isothermal phase change)으로 가정한다.
- 11) 융해과정에서는 융해영역에서 침하가 지배적이며, 압밀효과는 무시한다.
- 12) 상수는 시간에 따라 일정하다.

흙의 간극수 유동에 대한 방정식은 Darcy 법칙을 일차원 연속방정식에 대입하여 구한다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \frac{\partial \theta_u}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (1)$$

여기서  $K_H$  = 비동결 영역의 투수계수 (hydraulic conductivity)

$$h = \text{전수두} \quad (h = h_p + h_e)$$

$$h_p = \text{압력수두} \quad (h_p = u / \gamma_w)$$

$$h_e = \text{위치수두} \quad (h_e = -x)$$

$$x = \text{깊이}$$

$$\theta_u = \text{비동결영역의 체적 함수비} \quad (\text{volumetric water content})$$



$\rho_i$  = 얼음의 밀도

$\rho_w$  = 물의 밀도

$\theta_i$  = 체적 함빙비(volumetric ice content)

$E$  = 무차원의 경험적인 상수

$\theta_i$  = 체적 함빙비

FROST에서 흙-간극수 특성은 Gardner 방정식의 형태에서의 관계를 이용하여 표현한다.

$$\theta_u = \frac{\theta_o}{A_w |h_p|^\alpha + 1} \quad (2)$$

여기서,  $\theta_u$  = 비동결영역의 체적 함수비

$\theta_o$  = 흙의 공극률

$h_p$  = 간극압력수두

$A_w$  = 수특성에 대한 Gardner 계수 (Gardner's multiplier)

$\alpha$  = 수특성에 대한 Gardner 지수 (Gardner's exponent)

불포화토의 투수계수는 Gardner의 방정식이 적합하였으며,  $K_H$ 와  $h_p$ 의 관계로 나타난다.

$$K_H = \frac{k_s}{A_K |h_{p\beta}| + 1} \quad (3)$$

여기서,  $K_H$  = 불포화토의 투수계수

$k_s$  = 포화토의 투수계수

$h_p$  = 압력수두

$A_K$  = 투수특성에 대한 Gardner 계수

$\beta$  = 투수특성에 대한 Gardner 지수

동결 진행 영역 내에서 얼음이 부분적으로 간극을 막고 있으므로, 불포화토 투수계수를 다음과 같이 감소시킨다.

$$K_F = K_H(h_p) \times 10^{-E\theta_i}, \quad E \theta_i \geq 0 \quad (4)$$

여기서,  $K_F$  = 동결 진행영역에서의 투수계수

$E$  인자는 포화토의 투수계수(cm/hr)에 대한 함수로 결정된다.

$$E = \frac{5}{4} (k_s - 3)^2 + 6 \quad (5)$$

동결/융해 상태에서 1차원 열전도 방정식(heat transfer equation)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_T \frac{\partial T}{\partial x}) - v C_w \frac{\partial T}{\partial x} = C_m \frac{\partial T}{\partial x} - L \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial x} \quad (6)$$

여기서,  $C_m = C_w \theta_u + C_i \theta_i + C_s (1 - \theta_o)$ , 체적 열용량

$K_T = K_w \theta_u + K_i \theta_i + K_s (1 - \theta_o)$ ,

흙 - 얼음 혼합물의 열전도도

$C_w$  = 물의 체적 열용량

$C_i$  = 얼음의 체적 열용량

$C_s$  = 흙의 체적 열용량

$K_w$  = 물의 열전도도

$K_i$  = 얼음의 열전도도

$K_s$  = 흙의 열전도도

$\theta_o$  = 간극률

$v$  = 유속(velocity flux) =  $K_H \frac{\partial h}{\partial x}$

$L$  = 융해잠열(latent heat of fusion of water),

비동결 체적 함수비  $\theta_u$ 의  $\theta_n$  최소값을(동결토에서 비동결체적 함수비와 일치함)으로 정의한다. 즉,

$$\theta_n \leq \theta_u \leq \theta_o \quad (7)$$

그리고 동결 진행영역에서 온도는 동결온도  $T_f$ 이다. 상부 동결토는 온도가  $T_f$ 보다 작고, 비동결토에서는  $T_f$ 보다 크다.



동상(Frost heave)은 동결영역에서 얼음 분리의 전체량에 상응한다. 분리 체적 함량량은 다음과 같다.

$$\theta_s = \theta_i - (\theta_o - \theta_n) \quad (8)$$

따라서 동상량을 계산할 수 있으며, 융해에 따른 침하는 그 반대과정으로 구한다.

동결진행영역(freezing zone)에서는 온도가 동결 온도( $T_f$ )를 이룬다. 계산된 온도변화에 따라 발생한 단위체적당 열량은 다음과 같다.

$$\Delta Q_1 = C_m(T - T_f) \quad (9)$$

동결로 인하여 상변화가 일어날 때 필요한 열량은 다음과 같다.

$$\Delta Q_2 = L(\theta_u - \theta_n) \quad (10)$$

$\Delta Q_1 \geq \Delta Q_2$  동결이 진행되고 온도를  $T_f$ 로 바꾸며 동결진행영역에서  $h_p = h_p(\theta_n)$ 로 물의 흐름은 없다.

융해시는 동결의 역과정이 일어나고 침하량은 다음과 같이 Terzaghi 1차원 압밀이론으로 구한다.

$$K_H \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{\partial \theta_u}{\partial t} - S m_v \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (11)$$

### 3. 해석모델 및 입력변수

국내의 고속도로에서 사용되는 단면 특성(건설교통부, 2002)을 고려하여, 그림 2와 같은 해석 단면을 결정하여 적용하였다. 노상은 사질토, 실트인 경우와 자갈이 1m 노상에 치환되고 이후 사질토 노상인 경우로 구분하였다. 이러한 자갈 노상의 경우는 극단적으로 동상이 방지된 경우를 설정한 것이다. 한편 노체의 특성이 동상특성에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 예상되나, 극한의 조건을 설정하기 위하여 노상 및 노체 모두가 실트인 경우를 포함하였다. 각

경우에 대하여 지하수위는 포장 표면으로부터 1m, 2.65m, 4m(노상면으로부터 0.35m, 2m, 3.35m) 깊이에 위치한 경우를 고려하였다.

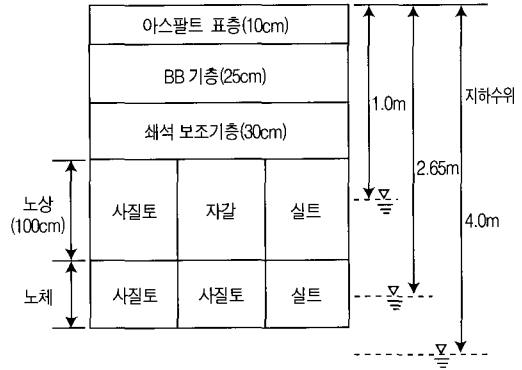


그림 2. 해석대상 포장 단면

FROST 해석에 필요한 입력치는 불가피하게 기존의 자료 (Guymon 등 1993)를 이용하였으나 그 값의 분포가 매우 다양하다. 특히  $A_w$ 와  $A_k$ 는 최소치와 최대치가 100,000배 이상 나타나기도 한다. 이러한 자료들에 대하여 국내 포장층의 #200 체 통과중량 백분율과 균등계수, 건조단위중량을 기준으로 구분한 결과 어느 정도 범위를 좁혀 입력치들을 추출할 수 있었다. 그 결과 표 1에서 보여지듯이  $A_w$ 와  $A_k$ 는 상한, 평균, 하한치로 추출하였고 나머지는 평균값과 통상적인 값을 대표값으로 설정하였다(한국도로공사, 2002).

FROST 해석시에는 지층을 구성하는 물, 얼음, 흙입자의 체적열용량과 열전도도가 필요하다. 이러한 계수들은 표 2에 나타난 통상적인 값을 이용하였다 (Susan et al, 1996).

해석시 요구되는 경계조건으로 상부표면의 경우에는 해석기간동안 기온과 강우량이 필요하다. 본 연구에서는 홍천 지역을 대상으로 2001년 11월에서 2002년 4월까지의 기후자료(일평균 온도 및 강수량)를 그림 3과 같이 조사하였다. 그러나, 2001년의 홍천 지역의 기상이 온난하여 그림 3(a)에 나타낸



표 1. 층별 모델계수

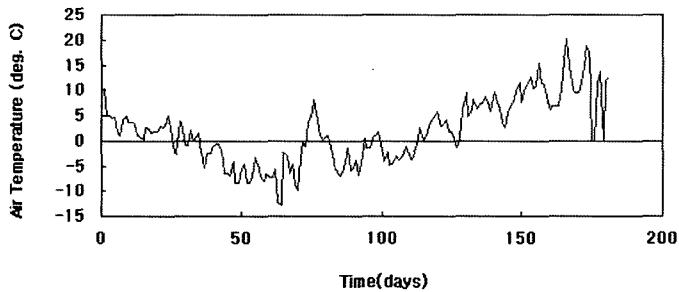
구분		$A_w$	$\alpha$	$A_k$	$\beta$	$k_s$	$\theta_0$	$\rho_0$
자갈	상한	1.0	0.35	0.1	2	1	0.3	1.98
	평균	0.5		0.01				
	하한	0.3		0.001				
사질토	상한	0.1	0.50	1.0E-3	3	1	0.4	1.76
	평균	0.05		1.0E-4				
	하한	0.01		1.0E-5				
실트		0.001	1.0	1.0E-5	3	1	0.5	1.76
아스팔트		0.31	0.32	0.035	2.65	2.1	0.14	2.3

$k_s$  = 포화 투수계수(cm/hr),  $\rho_s$  = 흙의 건조밀도(g/cm<sup>3</sup>),  $\theta_0$  = 흙의 간극율

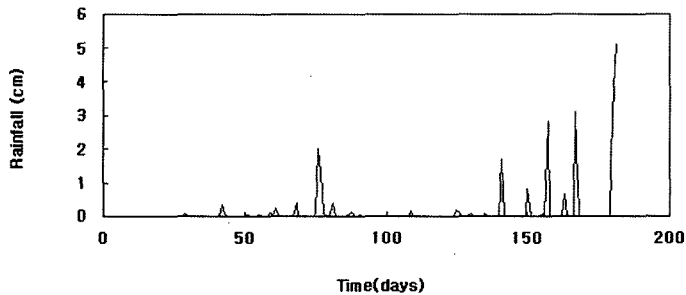
표 2. 기타 모델계수

E	$C_s$	$C_w$	$C_i$	$K_s$	$K_w$	$K_i$
0.000446	0.2	1.0	0.55	17.0	5.0	18.0

$C_w$  = 물의 체적 열용량, cal/cm · hour · °C  
 $C_i$  = 얼음의 체적 열용량,  $C_s$  = 흙의 체적 열용량  
 $K_w$  = 물의 열전도도,  $K_i$  = 얼음의 열전도도,  $K_s$  = 흙의 열전도도  
 E = 동결시 투수계수 감소를 고려하기 위한 함수를 구성하는 계수



(a) 일평균 온도의 변화



(b) 일별 강수량 분포

그림 3. 해석지역 환경특성 자료 (2001년 11월~2002년 4월 홍천 기후자료)



온도자료를 이용하여 동결지수를 결정하면  $279^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ 로, 도로설계편람(건설교통부, 2002)에 나타난 동결지수도에 의한 약  $600^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ 에 비하여 매우 작은 조건이다. 그러나 동결지수  $279^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ 는 대전, 영동 지역의 동결지수와 유사한 값으로 우리나라 기상조건의 범위에 합당하게 포함되는 자료이다.

최하부 저면에서의 온도와 수압은 시간에 따라 변화가 없다고 가정하고  $10^{\circ}\text{C}$  및 지하수위를 고려한 수두로 100~200cm로 가정하였다. 해석 초기의 깊이에 따른 압력수두는 지하수위에 따라 설정하였고 온도는 지표의 기온을 고려하여 그림 4와 같이 구하였다.

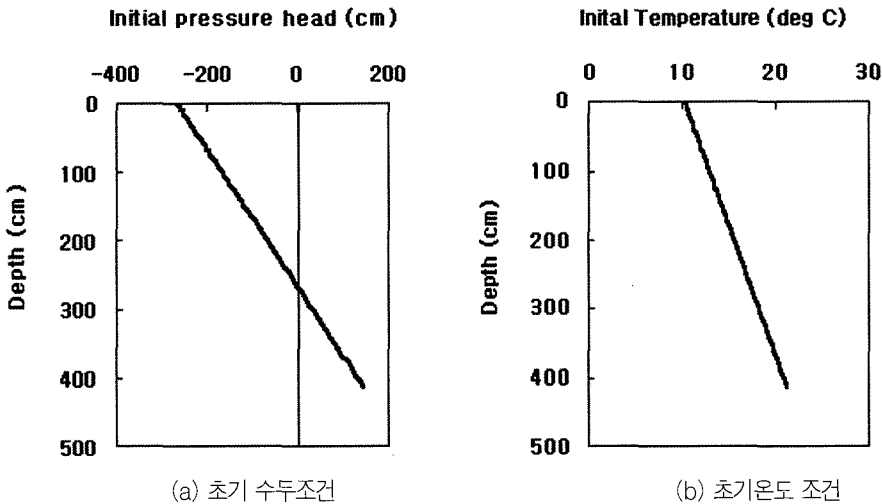


그림 4. 해석에 적용된 초기조건 일례 (지하수위 2.65m인 경우)

#### 4. 해석결과

FROST 프로그램을 이용한 해석의 결과로는 일별 동상량 및 동결깊이의 변화를 얻을 수 있다. 그림 5는 일별 동상량 해석결과의 일례를, 그림 6에는 일별 동결깊이 변화 결과 일례를 나타내었다.

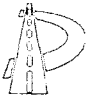
그림 5에 나타난 동상량 해석결과의 일례는 사질토 노상에 대한 것으로, 표 1에 나타난 계수들의 상한과 하한값의 조합으로 동상의 최대값과 최소값을 구하였다. 동일한 사질토라고 하여도 재료의 입력변수의 특성에 따라서 동상특성은 매우 큰 차이를 보이고 있다. 따라서, 역학적인 해석의 결과를 국내 포장재료에 대하여 직접적으로 결정하기 위해서는 해석에 필요한 입력 물성치를 국내의 노상토에 대하여 신뢰성 있게 결정하는 것이 매우 중요한 작업임을 확인 할 수 있

다. 한편 사용된 입력변수는 매우 극한의 경계에 해당하는 값이므로 실제 포장체에서는 최대와 최소 동상의 범주내에서 동상이 일어날 것으로 여겨진다.

한편, 사질토 노상인 경우 동결깊이에 대한 해석 결과(그림 6)를 살펴보면, 동상량이 입력변수의 범위에 따라서 매우 민감하게 변화하는 특성을 보인 결과(그림 5)에 반하여, 계수의 변화에도 불구하고 동결깊이는 동상에 비하여 크게 구분되지 않고 있다. 따라서 개략적인 동결깊이는 평균적인 물성치를 적용하여 결정하여도 큰 오차가 없을 것으로 생각된다.

표3에는 각 포장모델 및 지하수위에 따라 최대 동상 및 최대 동결깊이를 정리하였다.

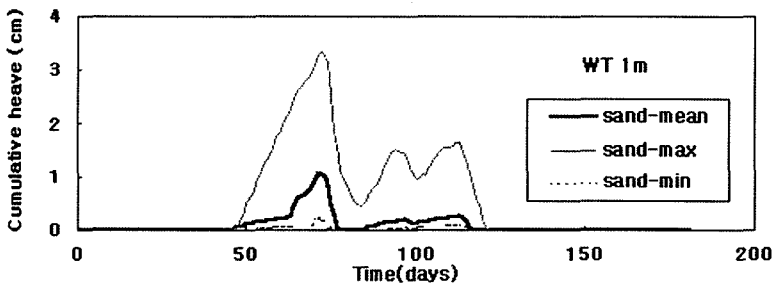
그림 7은 노상토의 종류 및 지하수위의 변화에 따른 최대 동결깊이를 나타내고 있다. 지하수위가 노상면에 가깝게 존재하는 경우 노상토의 특성에 거의 영



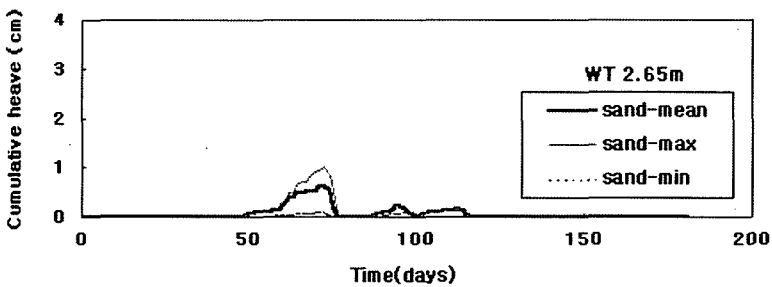
향을 받지 않고 작은 변화 범위(70.72cm~76.45cm)에서 결정되었다. 특히 동결이 발생하더라도 동상의 우려가 없는 자갈 노상의 결과를 제외한다면 노상의 종류에 따른 동결깊이의 변화 폭은 더욱 작게 나타났다. 한편, 본 해석에서 적용한 기상조건(동결지수 279°C·day)으로부터 국립건설시험소에서 제안한 대표적인 동결깊이 결정식( $Z=14F0.33$ )을 적용하여 동결깊이를 결정하면 89.8cm로, 본 해

석의 결과에 비하여 다소 크게 평가하고 있다.

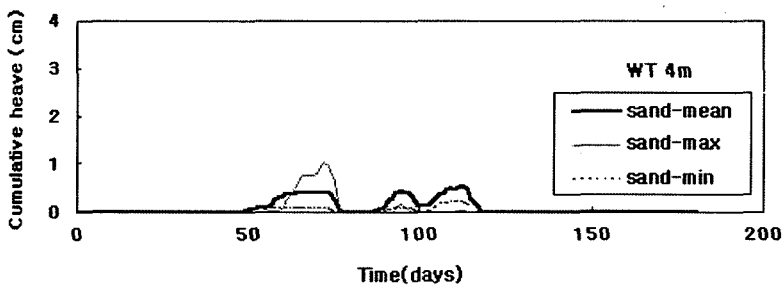
그림 8은 노상토의 종류 및 지하수위 변화에 따른 최대 동상량을 나타낸 것으로, 최대 동상량은 지하수위가 급격하게 작아지는 경향을 나타내고 있다. 자갈 노상의 경우 최대동상량은 지하수위의 영향을 거의 받지 않으면서 2~3mm 내외로 나타나는데, 이는 포장층 내부의 수분이 얼어서 팽창된 양에 불과하며, 이를 지속적인 수분의 공급에 의한 동상으로 간주할



(a) 지하수위 1m의 경우



(b) 지하수위 2.65m의 경우



(c) 지하수위 4m의 경우

그림 5. 지하수조건에 따른 동상해석 결과 일례 (사질토 노상의 경우)



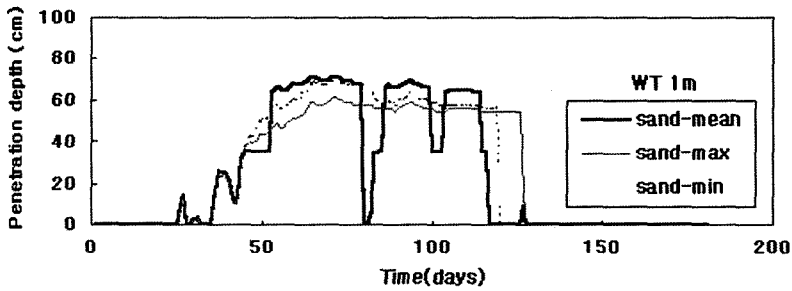


수 없다. 바꾸어 말하면, 해석 결과에만 따른다면, 3mm 정도의 동상은 동상방지층을 충분히 적용하는 경우에도 발생 가능하게 되는 동상량임을 의미한다.

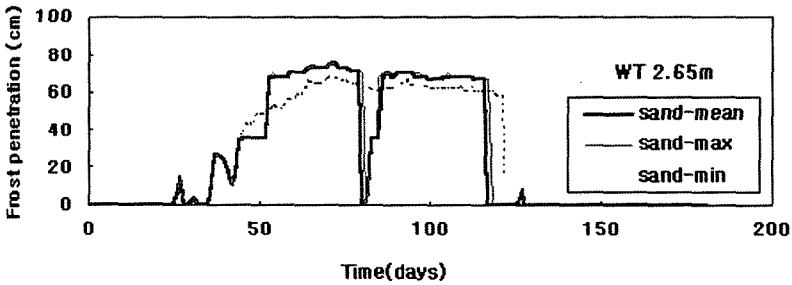
노상토가 사질토 및 실트인 경우에는 5mm에서 12mm 가량의 최대동상이 발생하였다. 한편 자갈이라는 극단의 경우를 제외하면 동상량은 노상의 종류에 따른 특성보다는 지하수위의 영향이 더욱 지배적인 것으로 나타났다. 또한 지하수위가 낮아짐에 따라

동상량이 급격히 감소하여 지하수위가 충분히 낮은 경우라면 노상의 종류에 무관하게 동상을 고려한 설계가 불필요하고, 향후 연구를 통해서 어느 정도의 지하수위이면 동상을 고려할 필요가 없는 것인가를 검토할 필요성이 있다.

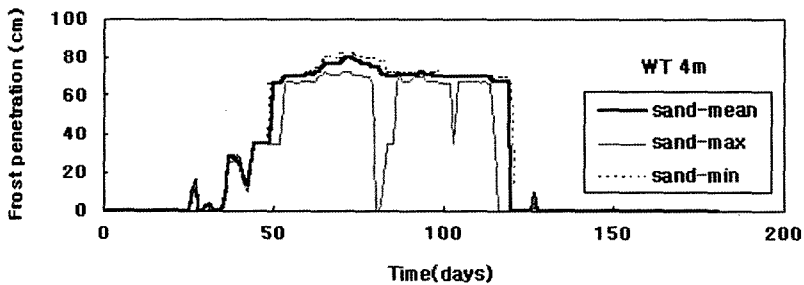
FROST의 해석 결과는 특정 시간에 대하여 깊이 에 따른 상태변수의 분포를 포함한다. 특 동결깊이, 함수비, 함빙비, 온도, 압력, 밀도, 간극률을 알 수



(a) 지하수위 1m의 경우

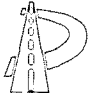


(b) 지하수위 2.65m의 경우



(c) 지하수위 4m의 경우

그림 6. 지하수조건에 따른 동결깊이 변화 일례 (사질토 노상)



있다. 따라서 포장구조의 역학적 설계에 적용할 수 있다. 특히 동결·융해에 따른 포장의 손상을 각 층의 강성(회복탄성계수)에 미치는 효과를 이용하여 고려할 때 주요한 역할을 할 수 있다. 이러한 측면에 대한

연구는 기존 자료로부터 추출한 계수를 이용한 해석으로는 분석 결과의 신뢰도가 떨어진다. 본 연구는 동결·융해 해석에 대한 역학적 해석에 대한 기초적 연구로서 추후 심화된 연구가 요구된다.

표 3. 최대 동상 및 동결깊이

지하수위 조건 (포장 표면에서의 깊이)	노상조건		Max. frost depth (cm)	Max. heave (cm)
1m	sand	mean	70.73	1.05
		max	62.00	3.32
		min	70.72	0.27
	gravel		76.45	0.29
	silt		70.72	1.24
2.65m	sand	mean	75.02	0.62
		max	75.02	1.00
		min	69.29	0.12
	gravel		35.00	0.13
	silt		72.16	0.93
4m	sand	mean	79.31	0.53
		max	72.16	1.00
		min	83.60	0.21
	gravel		35.00	0.22
	silt		75.02	0.69

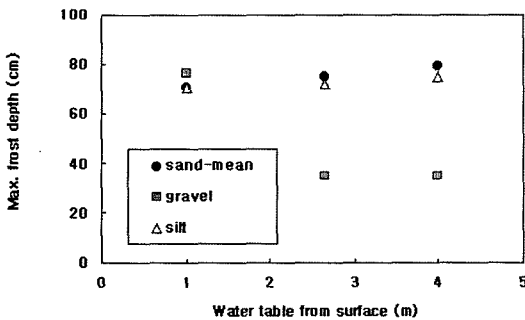


그림 7. 최대 동결깊이 변화

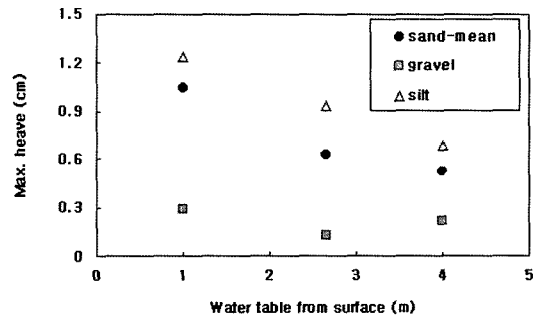


그림 8. 최대 동상량의 변화



## 5. 결론

본 연구는 동결·융해 해석에 대한 역학적 해석에 대한 기초적 연구로서 미공병단 CRREL에서 개발한 FROST 프로그램을 이용하여 국내의 기후조건과 포장단면, 그리고 노상토의 특성을 고려하여 동상특성을 분석하였다.

1. 지하수위가 노상면에 가깝게 존재하는 경우, 최대 동결깊이는 노상토의 특성에 거의 영향을 받지 않고 작은 변화 범위에서 결정되었다.
2. 자갈노상의 경우 최대동상량은 지하수위의 영향을 거의 받지 않으면서 2~3mm 내외로 나타나는데, 이는 포장층 내부의 의 수분이 얼어서 팽창된 양에 불과하며, 이를 계속적인 수분의 공급에 의한 동상으로 간주할 수 없다. 바꾸어 말하면, 해석 결과에만 따른다면, 3mm 정도의 동상은 동상방지층을 충분히 적용하는 경우에도 발생 가능하게 되는 동상량임을 의미한다.
3. 지하수위가 낮아짐에 따라 동상량이 급격히 감소하여 지하수위가 충분히 낮은 경우라면 노상의 종류에 무관하게 동상을 고려한 설계가 불필요하고, 향후 연구를 통해서 어느 정도의 지하수위이면 동상을 고려할 필요가 없는 것인가를 검토할 필요성이 있다.

### ■ 감사의 글

본 연구는 한국도로공사 연구비 지원으로 수행된 '동결심도를 고려한 포장 하부구조 개선방안 연구' 결과의 일부로 감사를 포함합니다.

### ■ 참고문헌

- 1) 건설교통부 (2002), "도로설계편람".
- 2) 건설교통부 (2002), "한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구:포장 하부구조 다짐관리 기준정립(동결심도연구)" KPRP-E-02
- 3) 권기철 (2002), "노상토의 종류에 따른 동결·융해 특성", 도로포장공학회, 4-1, pp. 33-39.

- 4) 김영진 (1996), "폐기물 혼합층의 지반동상방지 효과에 관한 연구", 인하대학교.
  - 5) 남영국, 박찬범, 조규태, 진정훈 (2002), "동상방지층의 거동특성에 대한 현장계측", 도로포장공학회지, 4-1, pp. 19-23.
  - 6) 박성완, 오재원 (2002), "국내 동결심도 자료와 포장설계에 관한 고찰", 도로포장공학회지, 4-1, pp. 24-32.
  - 7) 이경하, 김형배 (2002), "도로포장의 동상특성 및 동결심도", 도로포장공학회지, 4-1, pp. 6-18.
  - 8) 조규태, 진정훈, 남영국 (2002), "도로포장의 동상방지층 실효성 검증을 위한 현장계측 및 실내시험 연구", 대한토목학회논문집, 제22권, 5-D, pp. 913-921.
  - 9) 한국도로공사 (2002), "동결심도를 고려한 포장 하부구조 개선방안 연구"
  - 10) Berg, R.L., G.L. Guymon and T.C. Johnson (1980) "Mathematical model to correlate frost heave of pavements with laboratory predictions." *U.S.A. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Report 80-10*. Also U.S Department of Transportation, Fedral Aviation Administration Report FAA-RD-79-109.
  - 11) COE, (1985), "Pavement Design For Seasonal Frost Conditions", The U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
  - 12) Gary L. Guymon, Richard L. Berg and Theodore V. Hromadka(1993) "Mathematical Model of Frost Heave and Thaw Settlement in Pavements", *CRREL Report 93-2*.
  - 13) Susan R. B and Richard L. B.,(1996) "Modeling of Mn/ROAD Test sections with the CRREL Mechanicstic Pavement Design Procedure", *Special Report 96-21*, The U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- 〈접수 2003. 4. 21〉