

# 변형된 동결-융해 시험장치를 이용한 동상민감성흙의 지반공학적 특성

## Geotechnical Characteristics of Frost-Susceptibility Soil Using Modified Freeze-Thaw Apparatus

신 은 철<sup>1</sup>      Shin, Eun-Chul  
류 병 현<sup>2</sup>      Ryu, Byung-Hyun  
박 정 준<sup>3\*</sup>     Park, Jeong-Jun

### ABSTRACT

A new system of modified freeze-thaw testing apparatus is introduced. This system is developed to evaluate the geotechnical parameters and their dependence upon freezing-thawing history of frost-susceptibility soil. A necessary condition for stationary frost heaving is clarified in this paper. The method changes the thermal boundary condition up to the net heat flow at the freezing frost becomes zero. The effectiveness of this method is verified by freeze-thaw tests. Frost heaving observed after the application of the method is found to be due to another frost heaving action called long-term frost heaving. This frost heaving has already been studied and is considered ignorable as engineering factor because of its small heaving amount.

### 요 지

본 연구에서는 변형된 동결-융해 시험장치를 이용하여 동상민감성흙의 동결-융해 과정시 지반공학적 특성을 평가하였다. 흙 시료의 정상상태에서 동상이 발생하는 양은 전체 동상량의 70~80% 정도로 정상상태의 동상이 일어나기 위한 열흐름 조건을 제안하였다. 즉, 동결시 동결전선에서 순열흐름을 0으로 하기 위해서 열적 경계조건을 변화시키는 방법이다. 제안된 방법으로 변형된 동결-융해 시험의 결과에 대하여 적합성을 평가하였다. 또한, 동상 발현중 제안된 방법을 적용 결과, 장기적인 동상현상을 제시하였으나, 장기적 동상은 매우 작은 동상량이 나타나기 때문에 공학적 요소에서는 무시할 수 있는 동상으로 판단하였다.

**Keywords :** Freeze-thaw apparatus, Frost-susceptibility soil, Heat flow, Frost heave amount, Thermal boundary condition

## 1. 서 론

국내 도로포장두께 설계는 미국에서 개발된 AASHTO 설계법, 일본에서 사용하고 있는 T<sub>A</sub>설계법 등을 주로 사용하고 있다. 그러나 이들 설계법은 각국의 기준에 맞추어 개발되었기 때문에 우리나라 실정에 잘 맞지 않아 설계수명이 실제 도로수명과 차이를 보이고 있다. 특히, 동결깊이의 결정에 있어 기온자료를 분석하여 만든 동결지수를 근간으로 하여 동결지수와 동결깊이의 상관관계식으로부터 동결깊이를 산정하고 있다.

우리나라는 겨울철 시베리아기단의 영향으로 한랭한 북서풍이 불기 때문에 지역별 기온차가 매우 크며, 봄철에는 그 영향이 약해져 기온이 상승 한다. 동토지역의 지역적 기후 조건 특성으로 국내 도로분야에서는 동결융해로 인한 피해를 줄이기 위하여 도로포장구조를 설계할 때 노상이 동결하는 것을 방지하기 위하여 동상방지층을 노상 위에 별도로 설치하도록 하고 있다.

그러나, 도로는 다양한 재료와 단면으로 구성된 구조물이기 때문에 계절적 및 재료 물성특성 뿐만 아니라 포장체 각 층의 구조적 적정성 또는 지지력 정도를 파악하는 것이

1 정회원, 인천대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Univ. of Incheon)  
2 학생회원, 인천대학교 토목환경공학과 석사과정 (Student Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Univ. of Incheon)  
3\* 정회원, 인천대학교 토목환경공학과 연구교수 (Member, Research Professor, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Univ. of Incheon, E-mail: frostjun@incheon.ac.kr)

무엇보다 중요하다. 현재, 기존 동상방지층 설계법에 따르면, 동상방지층은 포장체의 구조적 적정성과는 무관하게 온도조건에 따른 동결깊이에 따라 일률적으로 결정되고 있다. 이러한 동결깊이를 포장구조설계에 적용하다 보니 포장설계의 부실 내지는 과다설계의 우려가 있다.

이와 같이 동상 피해로 인한 문제들 특히, 동상으로 인한 용기 현상, 동결시 간극수의 움직임, 동결토의 물리적 역학적 특성에 대해서 선진외국의 경우에는 일찍이 많은 연구가 수행되었다(Hoekstra 등, 1965; Yong 등, 1975). 그러나 국내의 경우 김영진 등(1998), 신은철 등(2003) 외에는 거의 연구가 전무한 실정으로 동결토의 지반공학특성에 대한 전문적인 이해가 부족할 뿐만 아니라 우리나라보다 기후조건이 열악한 북한으로의 진출이 예상되는 바 이와 관련된 연구가 절실히 필요하다.

Hoekstra 등(1965)은 포화된 흙을 동결시켜 동상압이 증가하는 것은 얼음과 물 사이에서 작용되는 표면에너지 때문으로서 화학적 포텐셜과 표면 곡률 사이의 관계를 정의하고, 동상민감성 기준 평가에서 흙의 간극 크기에 따른 동상 특성은 투수계수와 모관력 등의 흙의 물리적 특성과 관련된 것으로 몇 가지 가정을 통하여 액체상태에서의 전단응력은 점성유체 흐름에 의해 지배되나, 표면인장력에 의해 발생된 형상 변화로부터 그 내부 변형에너지가 소실되는 관계를 설명하였다. 균질한 세립토층에서 얼음에 의하여 토립자 간극에 부분적으로 채워져 물이 스며드는 지역인 동결 영역에서의 온도구배와 수분공급비의 비율을 Segregation potential로 정의하여 토립자는 상재압과 토립자에 주어진 초기압력을 합한 것보다 얼음이 주는 압력이 더 클 때 팽창하게 되며, 얼음의 압력은 토립자를 분리시켜 새로운 얼음렌즈를 형성시킨다고 제시하였다(Konrad

등, 1982).

이에 본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 여러 동상특성 중 하나인 정상상태에서의 동상(stationary frost heave)에 관한 내용으로서 시간에 따른 열흐름, 동상량, 동상속도를 개발한 동결-융해 시험장치를 통하여 제시된 이론식과 함께 단계별 온도변화에 따른 동상 특성을 검증하였다. 동상특성은 크게 3가지 상태의 그룹으로 구분하며, 그 중 동상속도가 주된 특성이 된다(Akagawa, 1983).

Fig. 1은 Akagawa(1983)가 제시한 것으로서  $t_0$ 에서  $t_1$  사이에 나타난 첫 번째 동상양상은 흙이 동결되면서 얼음 결정체와 얼음 띠를 형성하는 일시적 동상영역(transient frost heaving phase)이며, Takashi 등(1978)와 Konrad & Mogenstern(1982)은 일시적 동상영역에서의 동상 변화를 결정할 수 있는 방정식을 제안하였다.

$t_1$ 에서  $t_2$  사이에 나타난 두 번째 동상영역은 동결시 아이스렌즈가 점점 성장하고 그 층이 두꺼워지는 최종 아이스렌즈 영역을 나타낸 것이다(Gilpin, 1982). 이 영역은 정상상태의 동상발현 구간이라고도 하며, Akagawa 등(1985)은 증가비와 증가량을 계산할 수 있는 방정식을 제안하였으며, 이 과정에서 발현된 동상량은 전체 동상량의 약 70% ~ 80%가 발생하는 것으로 제시하였다.

$t_2$  이후에 나타난 세 번째 동상 영역은 두 번째 동상영역에서 분리된 아이스렌즈가 성장하면서 나타나는 구간으로 이는 동결토의 온도경사 때문에 성장하는 것으로 가정할 수 있다. Akagawa 등(1985)은 비록 일시적으로 나타나는 동상양이 정상상태에서의 동상발현 양상 보다는 동상비가 매우 낮을 지라도 전체 동상 과정중 한 부분으로서 장기적인 동상 영역으로 표현하였다. Goto 와 Takahashi (1982)는 이 과정에서의 증가비를 방정식으로 나타내었으나, Akagawa 등(1985)은 장기동상영역에서 발생된 동상량은 공학적 관점에서 매우 작으므로 무시할 수 있다고 제시하였다.

## 2. 동결 이론

### 2.1 정상적으로 발현된 동상 구간

정상적으로 발현되는 동상구간에서의 동상량 산정방법을 결정하기 위해서는 얼음분정작용의 가정조건이 필요하다. 얼음분정작용의 조건은 동결선 상태에서 열흐름이 결정되어야 하며, 동결토의 순수 열흐름( $Q_f$ )는 비동결토의

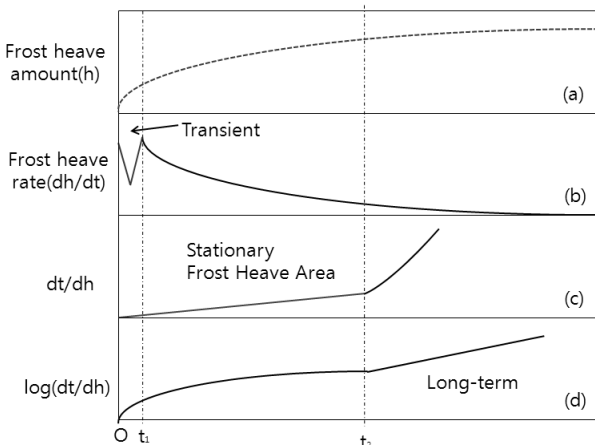


Fig. 1. Typical frost heave properties

열흐름( $Q_u$ )보다 커야한다.

최종 생성된 얼음분정은 비동결토의 두께 감소와는 관계가 없다. 즉, 비동결토의 두께와 열적조건은 얼음 분정 작용시에는 일정하다. 따라서, 동결선에서의 열 흐름은 식 (1)에 나타난 바와 같이 얼음 분정시 방출되는 잠열(latent heat)과 같다고 볼 수 있다.

$$Q = \frac{dh}{dt} \cdot \frac{L}{V_i} \quad (1)$$

여기서,  $V_i$ 는 얼음의 비체적( $\text{cm}^3/\text{g}$ ),  $L$ 는 잠열( $\text{cal/g}$ ),  $Q (=Q_f - Q_u)$ 은 동결선에서의 순수 열흐름( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ )이며, 식 (1)에 의하면,  $Q$ 은 동결선에서 얼음 분정시의 양의 값으로서 식 (2)와 같다.

$$Q = Q_f - Q_u > 0 \quad (2)$$

여기서,  $Q_f$ 는 동결토의 열흐름( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ )이고,  $Q_u$ 는 비동결토에서의 열흐름이다. 그러므로 식 (2)는 정상적인 동상발생을 표현하는데 있어 주요한 가정조건이 된다.

## 2.2 불안전상태의 동상발현 해석

정상적으로 발생하는 동상발생 구간안에서의 동상비는 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 완만한 감소 추세를 보이고 있고, 동결선에서의 순 열흐름 또한 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 식 (3)에서의 동결선에서 동상비와 순열흐름 사이의 상관관계를 통해 알 수 있다.

정상상태에서 동상이 발현되는 동안, 얼음 분정의 잠열에 의하여 순 열흐름이 방출되면서 아이스렌즈는 증가하게 된다. 즉, 식 (1)을 식 (2)에 대입하면 상호 필요조건이 만족되어 식 (3)과 같이 정상적인 동상발현구간에서의 동상비(frost heave rate)를 구할 수 있다.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{V_i}{L} \cdot (Q_f - Q_u) \quad (3)$$

그러므로, 정상적인 동상 발생구간에서 동상이 발현되지 않도록 하기 위해서는 얼음 분정을 일으킬만한 에너지를 감소시키면 순 열흐름이 감소되고, 이는 동상비 감소로 이어져 최종적으로 순 열흐름이 0이 되거나 (-)값이 된다. 이러한 조건들은 비동결토에서의 온도경사가 감소하거나

동결토에서 온도가 상승하면서 온도경사 감소에 의한 것으로 알 수 있다.

즉, 정상상태의 동상 발생을 정지시키기 위해 필요한 온도 상승은 다음과 같이 계산 할 수 있다. 정상적인 동상발현은 열적 안정조건 안에서 발생하는 현상으로서 식 (3)으로부터 동결선 상태에서 경계조건으로 열흐름의 연속방정식 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$k_f \frac{T_i - T_c}{l_f} - k_u \frac{T_w - T_i}{l_u} = \frac{L}{V_i} \cdot \frac{dh}{dt} > 0 \quad (4)$$

여기서,  $T_i$ 는 흙의 동결온도 ( $=0^\circ\text{C}$ ),  $T_c$ 는 차가운면의 온도( $^\circ\text{C}$ ),  $T_w$ 는 따뜻한면의 온도( $^\circ\text{C}$ )이고,  $l_f$ 는 동결토의 길이( $\text{cm}$ ),  $l_u$ 는 비동결토의 길이( $\text{cm}$ )이다.  $dh/dt = 0$  일 때, 따뜻한 면에서 온도가 상승하면 정상적인 발생하는 동상은 정지하게 되며, 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$dT_w = -\frac{l_u}{k_u} \left( k_f \frac{T_c}{l_f} + k_u \frac{T_w}{l_u} \right) \quad (5)$$

식 (5)로부터  $dT_w$ 의 온기 측면에 의하여 온도가 상승하면 동결선에 순 열흐름으로  $t_1$ 에서  $t_2$  구간은 0이 되고, 정상적으로 발생하는 동상발현은 정지하게 된다.

## 3. 동결-용해 시험장치 개발

본 연구에서는 2절에서 제안된 정상상태에서의 동상발현 현상을 이론적으로 증명하기 위하여 단계별 온도 변화에 따른 개방형 동결-용해 시험장치를 개발하여 검증하였다.

### 3.1 동결-용해 시험장치 구성

본 연구에서 개발된 동결-용해 시험장치의 모식도와 흐름도는 각각 Fig. 2와 Fig. 3에 나타난 바와 같다. 개발된 동결-용해 시험 장치에서 가장 주요한 것은 시험을 진행하는 동안 적용된 경계온도와 안정된 축하중을 유지할 수 있다는 것이다. 또한, 시험장치는 각각 독립된 두 개의 냉매 순환시스템에서 냉기와 온기를  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 의 범위에서 조절할 수 있다. 유압실린더를 통하여 상재하중을 구속과 함께 동상시 발생하는 압력을 측정할 수 있도록 로드셀을 장착하였고, 시료의 동결 용해 반복에 따른 간극수의 양을 측정하기 위하여 온도 조절이 가능한 상부 및 하부 다공판에

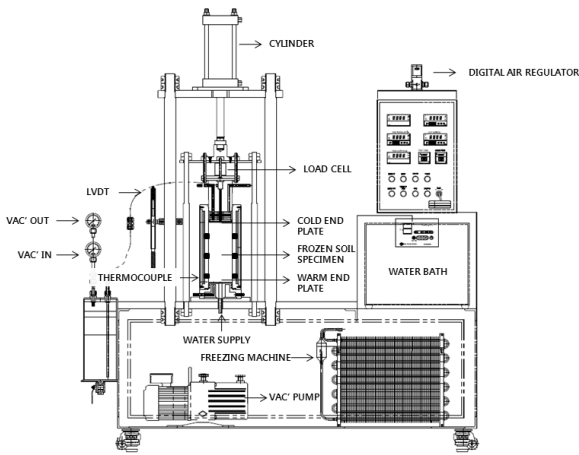


Fig. 2. Schematic diagram of modified freeze-thaw test apparatus

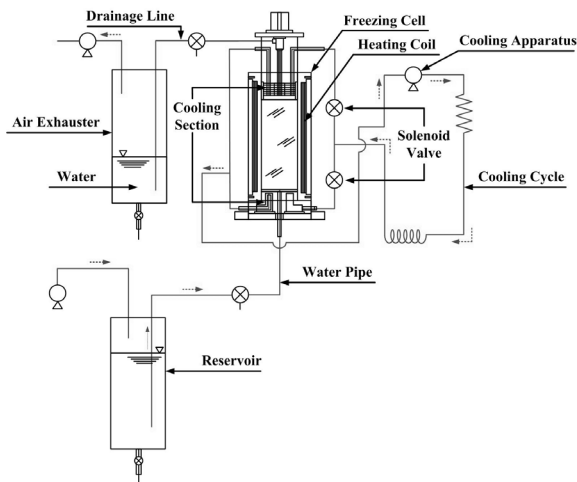


Fig 3. Concept of experimental set up

연결된 얇은 관을 통해 흡수 및 배수량을 측정이 가능하도록 하였다.

좀 더 상세한 시험장치에 대해서 설명하면, 시료 적재부는 상부 및 하부가 개방되어 적재부 내측에 흡 시료가 위치하고, 내주면과 외주면의 사이에는 히터가 설치되어 필요에 따라 내부에 위치한 시료에 열을 가하여 융해가 이루어지도록 하였다. 또한, 수분 공급은 일정량의 물이 저장된 물저장탱크, 탱크와 연결된 급기관관의 선단에 설치되어 공기를 공급하는 압축기의 작동에 의해 공급된 공기의 압력으로 흡 시료내로 공급하도록 제작하였다.

냉동사이클에서 냉각된 냉기를 공급하는 냉각부가 내측 가장자리에 위치하고, 중앙에는 수분 공급수단의 급수

관 및 배수관의 선단과 연결되어 물의 공급 및 배출이 이루어지도록 하였다.

### 3.2 시험방법

먼저, 준비된 시료를 시료 적재부에 안착하고 상측에는 승강 실린더를 작동시켜 압착부가 삽입되도록 한다. 이때 수분 공급수단을 작동시켜 시료로 물을 공급하게 되는데, 이는 압축기의 작동에 따라 발생된 공기가 물저장탱크의 내부에 압력을 가하게 되고, 이 압력은 물에 전달되어 급수관을 통하여 시료 적재부 내부의 흡 시료에 공급한다. 이후 진공펌프를 작동시켜 배기탱크 내의 공기를 배기하면 배수관을 통하여 흡 시료에 포함된 물이 배출되어 배기탱크 내에 저장된다. 이때 물 공급을 중단하고자 할 경우에는 절환밸브를 닫으면 물저장탱크로부터의 물 공급은 중단되고, 급수관으로 외기가 유입됨으로써 시료내의 물은 배수관으로 유입된다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 이렇게 준비된 흡 시료에 냉기를 공급하여 동결시키게 되는데, 이는 냉동사이클의 작동에 따라 생성된 냉매가 개방된 솔레노이드밸브를 통하여 압착부로 보내어 순환되면 내부의 시료는 동결되고, 동상량, 간극수 흐름, 흡시료의 온도, 동상압을 측정할 수 있다. 동상량은 매  $1\mu\text{m}$ 의 동상에 대하여 1번의 펄스를 관측할 수 있도록 디지털 변형트렌스듀서로 획득할 수 있다. 변환장치는 대형 냉동고의 온도 뿐만아니라 열적 흐름을 제어할 수 있도록 하였다. 간극수의 흡배수는 뷰렛에서의 수두를 자동계측 할 수 있도록 하였고, 흡시료의 온도 조건은 매우 얇은 써머커플을 시료의 10mm마다 설치하여 계측할 수 있다. 이후 동상량, 동상압과 온도 데이터는 매 시간 축적되고 자동수집장치에 저장된다.

### 3.3 동상민감성 흡 시료의 특성

본 실험에 사용된 흡은 동결-융해 특성을 정확히 분석하기 위하여 동상에 민감한 흡으로 분류되는 시료를 채취하여 변형된 동결-융해 시험장치의 적용성을 평가하였다. 사용된 시료의 공학적 특성은 Table 1과 같고, 각 시료의

Table 1. Summary of soil properties

Physical Properties	$G_s$	$LL$ (%)	$PI$	$\gamma_{dmax}$ ( $\text{tf}/\text{m}^3$ )	$w_{opt}$ (%)	$k$ (cm/sec)	Passing No. 200 (%)	USCS
Quantity	2.67	24.3	NP	1.71	16.3	$1.71 \times 10^{-5}$	75.2	ML

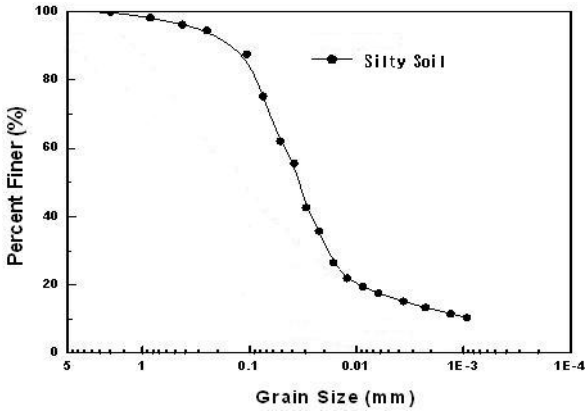


Fig. 4. Grain size distribution of soil used

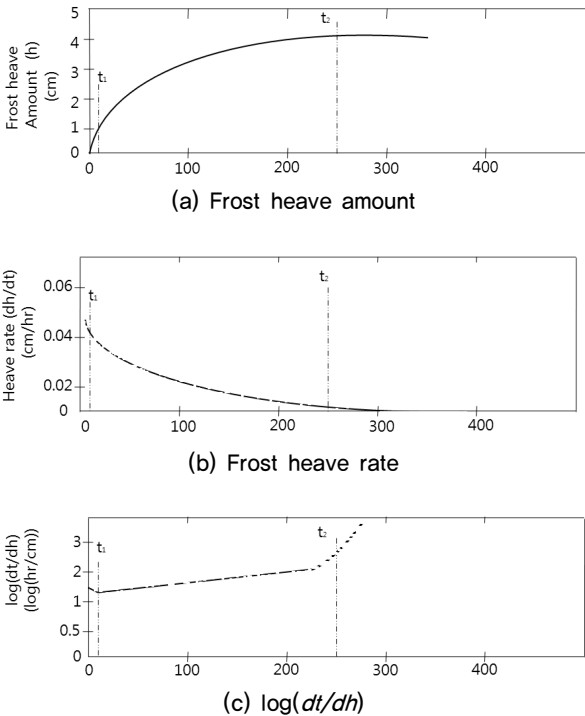


Fig. 5. Results of modified freeze-thaw test controlling method

입도분포곡선은 Fig. 4에 나타내었다.

## 4. 실험결과 및 평가

### 4.1 실험결과

Fig. 5는 동결-융해 시험장치에 의한 동상시험결과를 나타낸 것으로서, 초기 일시적 동상 구간에서는 4.8mm의 동상이 발생되었고, 정상상태의 동상발현구간에서는 32.5mm, 장기 동상구간에서는 1.5mm의 동상량이 발생되었다. 대략 10시간에서 248시간 사이에 정상상태의 동상 발현 양상을 나타내었으며, Fig. 5(b)에서와 같이 동상비는 완만

하게 감소함을 확인하였다.  $t=250\text{hr}$  이후 동상비는 0.0001 cm/hr 정도로 뚜렷히 감소함을 나타내어 이 영역을 장기 동상 발현구간으로 판단하였다.

### 4.2 제안된 방법의 평가

제안된 시험방법의 적용성을 평가하기 위하여 이론적 열흐름 방법을 사용하였으며, Fig. 5(a)를 살펴보면  $t_1$  전 (일시적 동상구간)과  $t_2$  이후(장기 동상구간)에서의 동상량은  $t_1$ 과  $t_2$  사이에 나타난 정상적으로 발생된 동상구간에서의 동상량 보다 작게 나타났다.

단계별 온도를  $0.1^\circ\text{C}$  증가 시켰을 때 비동결토에서의 열흐름에 의한 온도경사가 발생하여 동결전선에서의 순열흐름은 감소하게 된다. 결과, 동상비 또한 순열흐름 감소에 의한 값과 일치하기 위해서 감소함을 알 수 있다. 즉  $t_1, t_2$ 에서의 아이스렌즈 두께의 합은 각각 특정시간에 대한 동상비로서 결정할 수 있고, 동결토 두께는 원 시료의 길이로부터 비동결토의 두께를 빼서 알 수 있다.

그러나, 정확한 아이스렌즈의 두께와 온도경사를 알지라도 동결토의 열전도를 예측하기는 어렵다. 그러므로  $t_1$  상태에서의 동결토에 대한 열전도  $K_{fa}$ 는 동결토에서 분정된 아이스렌즈에 관한 방정식 (4)를 이용하여 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$K_{fa} \frac{T_i - T_c}{l_i + l_f} - K_u \frac{T_w - T_i}{l_u} = \frac{L}{V_i} \cdot \frac{dh}{dt} \quad (6)$$

여기서,  $K_{fa}$ 는  $12.0\text{cal/cm}\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}$ 이다. 가정된  $12.0\text{cal/cm}\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}$ 는 영하  $5.5^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$  범위의 온도이력에서 나타난 값이고, 아이스렌즈가 형성되는 영하  $5^\circ\text{C}$  상태에서 온도평형으로 조화된 열전도  $K_{fa}$  값으로 나타낸 것이다. 즉, 상기 온도범위에서의 동결토 보다 얼음의 열전도가 커져 동결토는 온도가 상승할수록 열전도는 더 낮게 되는 것이다.

이 같은 경우,  $Q_{fa}$ 와  $Q_{ua+}$ 는 식 (6)으로부터 구한  $K_{fa}$ 의 값으로부터 계산할 수 있다.

$$Q_{fa} = K_{fa} \frac{T_0 - T_c}{l_f + L_i} = 8.8 \text{ (cal/cm}^2 \cdot \text{hr)} \quad (7)$$

$$Q_{ua+} = K_u \frac{T_w - T_0}{l_u} = 6.0 \text{ (cal/cm}^2 \cdot \text{hr)} \quad (8)$$

여기서, 기호 ‘+’는 제시된 방법에서 온도상승전 열적조건을 나타낸 것이다. 온기 측면에서 0.1℃씩 단계별 온도를 증가시켜 적용한 후에 특히 얼지 않은 부분에 대한 흙시료의 열적조건은 식 (9)를 이용하여 구할 수 있다.

$$Q_{ua-} = K_u \frac{T_w + dT_w - T_c}{l_u} = 7.2 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{hr} \quad (9)$$

여기서,  $dT_w$ 는 0.1℃이고, ‘-’의 의미는 제시된 방법에서 온도 상승 후 결과값의 변화를 나타낸 것이다.  $l_u$ 는 가장 따뜻한 상태에서는 아이스렌즈가 없어지기 때문에 제안된 방법이 적용되기 전의 값과 같게 된다.

비동결토에서는 동결전선 상태에서 순열흐름의 감소로 인하여 제시된 방법에 의해 열 흐름이 증가된다. 즉,  $t_1$ 에서의 온도 상승전과 상승후의 열흐름은 각각 식 (10)과 (11)의 결과로 나타난다.

$$Q_{a+} = Q_{fa} - Q_{ua+} = 8.8 - 6.0 = 2.8 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{hr} \quad (10)$$

$$Q_{a-} = Q_{fa} - Q_{ua-} = 8.8 - 7.2 = 1.6 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{hr} \quad (11)$$

따라서, 순수한 열흐름의 감소는  $1.2 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{hr} (Q_{a+} - Q_{a-})$ 로서 이는 식 (13)의 동상비와 일치시켜 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta \frac{dh}{dt_a} &= \frac{dh}{dt_{a+}} - \frac{dh}{dt_{a-}} \\ &= (Q_{a+} - Q_{a-}) \frac{V_i}{L} = 0.0164 \text{ cm/hr} \end{aligned} \quad (12)$$

따라서, 식 (13)과 같이 이후의 동상비는 식 (13)에서까지의 동상비 결과값을 빼주게 되면 0.022로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dh}{dt_{a+}} - \Delta \frac{dh}{dt_a} = 0.038 - 0.016 = 0.022 \text{ cm/hr} \quad (13)$$

따라서, 앞서 제시된 이론식 (1)에 나타난 동결전선에서의 순열흐름  $Q$  과 동상비  $dh/dt$  사이의 관계를 확인 할 수 있다. 즉, 동결전선에서의 순열흐름의 감소에 의한 동상비의 감소는 변형된 동결-융해 시험장치를 이용하여 정상상태에서 동상발현되는 양상을 효과적으로 검증할 수 있는 것으로 평가되며, 이러한 조건에 의해서 온도에 대한

경계 조건이 증가할 때도 쉽게 평가할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 변형된 동결-융해 시험 장치를 고안-제작하여 시험장치의 검증을 위하여 Akagawa 등(1985)이 제안한 이론식으로 정상상태에서의 동상 양상을 비교하였다.

정상적인 동상이 발현되는 동안 동상속도는 동결전선에서 순열흐름에 의해 영향을 받는다. 특히, 순열흐름이 0에 도달할 때 정상적인 동상발생은 멈추게 되고, 다음 단계로 작은 동상량이 발생하는 장기적인 동상 양상이 나타났다.

단계별로 온도를 강하시키거나 상승시켰을 때, 본 시험장치를 이용하여 효과적으로 동상 발현을 감소시키거나 멈추게 할 수 있는 결과를 나타내었고, 이론적으로 제시한 순열흐름과 동결속도 사이에서의 예측은 실험적 방법을 이용하여 충분히 보정할 수 있을 것으로 판단된다. 이 연구에서 얻어진 시험결과로부터 단계별 온도에 따른 열흐름 분석과 동시에 상재하중에 따른 동상압과 배수조건에 따른 동상특성 등을 도출할 수 있어 다양한 조건에서의 동결융해 특성을 구명하고, 동결융해 반복에 의한 도로 노상의 공용성 저하에 따른 합리적인 대처방안을 연구하는데 유용한 장비라 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설기술혁신사업의 연구비지원(08기술혁신C01Q81)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 김영진, 강병희(1998), “페타이어를 이용한 지반동상방지”, *한국지반공학회지*, 제14권, 제1호, pp.49-58.
2. 신은철, 박정준(2003), “동결토의 동상팽창압 특성에 관한 실험적 연구”, *한국지반공학회논문집*, 제19권, 2호, pp.65-74.
3. Akagawa, S., Yamamoto, Y., and Hashimoto, S. (1985), “Frost heave characteristics and scale effect of stationary frost heave”, *Proc. of 4th Inter. Symp. On Ground Freezing*, pp. 137-143.
4. Akagawa, S. (1983), *Relation between frost heave and specimen length*, Shimizu Tech. Res. Bull., 4:1-7.
5. Gilpin R.R. (1982), “A frost heave interface condition for use

- in numerical modeling”, *Proc. of 4th Canadian permafrost Conf.*, The Roger J.E. Brown Memorial Volume.
6. Goto, S. and Takahashi, Y. (1982), “Frost heave characteristics of soil under extremely low frost penetration rate”, *Proc. of 3rd Inter. Symp. On Ground Freezing*, pp.261-268.
  7. Hoekstra, P., Chamberlain, E. and Frate, A.(1965), *Frost Heaving Pressures*, Cold Region Research Engineering Laboratory, Report 176.
  8. Konrad, J.M. and Mogenstern, N.R. (1982), “Prediction of frost heaving in the laboratory during transient freezing”, *Canadian Geotech. J.*, Vol(19), pp.250-259.
  9. Takashi, H., Yamamoto, Y., Ohrai, T., and Masuda, M. (1978), “Effect of penetration rate of freezing and confining stress on the frost heave ratio of soil”, *Proc. of 3rd Inter. Conf. On Permafrost*, 1:pp.737-742.
  10. Yong, R.N. and Warkentin, B.P. (1975), *Soil properties and behaviour*, Elsevier scientific Publishing Company, Chapter 11. Soil freezing and permafrost, pp.383-419.

(논문접수일 2009. 3. 12, 심사완료일 2009. 3. 22)