

# 온도조건에 의한 도로하부 지반의 동결 및 지지력 특성

## Freezing and Bearing Capacity Characteristics of Road Foundations under Temperature Condition

신 은 철<sup>1</sup> Shin, Eun-Chul  
김 성 환<sup>2</sup> Kim, Sung-Hwan  
박 정 준<sup>3</sup> Park, Jeong-Jun

### Abstract

In the current design codes for anti-freezing layer, the thickness of anti-freezing layer is calculated by freezing depth against the temperature condition. Therefore, they have a tendency of over-design and uniform thickness without the considerations of thermal stability, bearing capacity and frost susceptibility of materials. So, it is essential for studying the appropriateness and bearing capacity of road foundation materials as well as their seasonal and mechanical properties to take an appropriate and reasonable design of the road structure system. In this paper, the freezing and bearing capacity characteristics of typical road foundation materials were evaluated in the large scale laboratory test. LFWD (light falling weight deflectometer) was used to determine the change of elastic modulus ( $E_{LFWD}$ ) caused by to the frost heave and thaw. Furthermore, the influence of crushed natural aggregate on the freezing of the subgrade soil was studied to verify the function and effectiveness of the anti-freezing layer.

### 요 지

현재 기존 동상방지층 설계법에 따르면, 동상방지층은 도로 노상토의 동상특성이 아닌 온도에 따른 동결깊이에 근거해 일률적으로 결정되어 포장설계의 부실 또는 과다설계 우려가 있다. 도로는 다양한 재료와 단면으로 구성된 구조물이기 때문에 환경성과 재료 물성 뿐만 아니라 포장체 각 층의 구조적 적정성 또는 지지력을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서 본 논문에서는 대형 냉동고내에 실내모형토조를 구성하여 포장하부구조재료(노상층, 쇄석 골재층)의 시간에 따른 온도 및 동상량 변화, 동결융해에 따른 지반의 지지력 변화를 통하여 포장하부구조체의 역학적 관계를 분석하였다.

**Keywords** : Anti-freezing layer, Bearing capacity, Frost heave, Large scale laboratory test, LFWD, Road foundation

### 1. 서 론

그림 1에 나타낸 바와 같이 지하수에 의한 노상토의

함수비 증가는 모세관 현상을 통하여 동상에 대한 활동 영역내의 함수비를 증가시킨다. 이렇게 상승된 동결영역의 함수비는 0°C 이하의 온도가 지속됨에 따라 아이

1 정희원, 인천대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Univ. of Incheon)

2 정희원, 인천대학교 건설환경공학과 박사과정 (주)장원, 기획실장 (Member, Planning Manager, Jangwon Engrg. Co., Ltd.)

3 정희원, 인천대학교 건설환경공학과 연구교수 (Member, Research Prof., Dept. of Civil & Environ. Engrg., Univ. of Incheon, frostjun@incheon.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

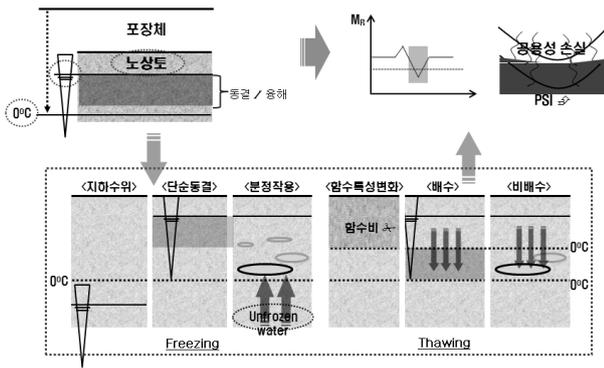


그림 1. 동결융해에 따른 포장체의 공용성 손실(권기철, 2002)

스렌즈를 형성하여 노상토의 불균등한 동결팽창을 초래하며, 결국 포장구조체의 손상을 가져온다. 이러한 동결융해로 인하여 도로 포장구조체의 지지력과 체적변화는 외부 온도 조건에 의해 변하게 되며 결과적으로 도로의 파괴를 야기하게 된다(권기철, 2002). 이러한 피해를 줄이기 위하여 노상의 일부 또는 노상 상부에 AASHTO 설계법과  $T_A$  설계법이 적용된 동상방지층 설계가 진행되고 있다.

그러나 기존 설계법은 각국의 기준에 맞추어 개발되었기 때문에 우리나라 실정에 잘 맞지 않아 설계수명이 실제 도로수명과 차이를 보이고 있으며, 동상방지층은 도로 노상토의 동상특성이 아닌 온도에 따른 동결깊이에 근거해 일률적으로 결정되어 포장설계의 부실 또는 과다설계가 우려되고 있다(남영국 등, 2002). 따라서 국내 기후와 도로 노상토의 조건에 맞는 합리적인 도로 동상방지층 설계 기술이 요구된다.

흙의 동상특성을 분석하기 위한 기준화된 실내시험은 미국 ASTM(American Society for Testing and Materials) 과 일본 JGS(Japanese Geotechnical Society) 등에서 제안하고 있다. 각 시험기준들은 동상시험에 적합한 장비를 제안하고 있으며, 1960년 이후부터 현재까지도 활용되고 있는 영국의 TRRL(Transport and Road Research Laboratory) 동상시험기는 시료 준비가 용이하고 온도와 수분공급 등 시험 관리가 간편한 특징이 있으나, 동결시 물드표면과 동결토 사이의 접촉면에서 동착력이 발생하므로 이를 최소화한 흙의 동상특성을 분석할 수 있는 요소 시험 방법이 제시되었다(신은철 등, 2010).

본 연구에서는  $-20^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ 의 온도 유지가 가능한 길이 3.2m, 폭 3.2m 높이 2.4m의 대형 냉동고내에 실내모형토조를 구성하여 포장하부구조재료(노상층, 쇄석골재층)의 시간에 따른 온도와 동상량 변화, LFWD(light

falling weight deflectometer) 장비를 이용하여 동결 전과 융해 후 지지력( $E_{LFWD}$ ) 변화를 통하여 포장하부구조체의 역학적 관계를 분석하였다.

## 2. 흙의 동결융해시 동상 및 지지력 거동

지중의 온도가  $0^{\circ}\text{C}$  이하로 장기간 계속되면 도로포장을 구성하는 노상재료의 간극수가 차츰 얼기 시작한다. 이때 모세관현상에 의해 얼지 않는 수분이 동결면으로 이동하면 아이스렌즈가 발생하고, 아이스렌즈가 확장되면서 포장체를 융기시키게 된다. 일반적으로 수분 공급이 없는 간극에 물이 동결할 때 그 체적은 최대 9%까지 팽창하게 되고, 지하수가 공급되는 상태의 경우에는 지속적인 팽창을 하여 체적이 50% 이상 팽창하기도 한다(김영진 등, 1998).

일반적으로 도로의 동상에 영향을 미치는 주된 요소는 토질, 수분, 온도의 3가지 조건으로 구분되며, 이러한 3가지 요인이 동시에 충족될 때 동상현상이 발생한다. 토립자의 표면에 흡착된 부동수분은  $0^{\circ}\text{C}$  이하에서도 얼지 않으며, 동결면으로 향하여 흐르는 물은 동결면에서 얼음층이 된다. 지반에 동상현상이 일어날 때 지하로부터 모세관 현상에 의해 올라온 간극수는 흙 속의 부동수막을 통하여 이동하는 것으로 알려져 있다(신은철과 박정준, 2003). 따라서 동결 시 부동수분을 많이 포함하고 있는 흙에서는 동상이 활발하게 발생하고, 적게 포함하고 있는 흙에서는 상대적으로 동상이 작게 일어난다. 또한, 부동수분이 많고 적음에 따라 동결토를 구성하는 흙입자와 얼음의 밀착관계가 달라지므로 동결토의 강도가 달라진다(Ohrai, 1986).

도로포장에서 노상토가 200체 통과량이 10% 이상이거나 0.02mm체 통과량이 3% 이상일 경우 동상민감재료로 판정하고 있다. 흙이 아이스렌즈를 형성하는 과정을 미시적으로 보면 대단히 복잡하다. 이는 지반내의 온도, 열전도율, 융해잠열, 흙입자의 피막수층 등 열역학적인 인자들에 의해 결정되기 때문이다. 이와 같이 모든 인자들을 망라하여 동결이론을 정립하려는 시도는 오래 전부터 행해졌고, 동결깊이를 추정하는 공식들도 여러 학자들에 의해 발표되었다(Takagi, 1980; Miller 등, 1960).

그림 2는 Akagawa(1983)가 제시한 것으로서  $t_0$ 에서  $t_1$  사이에 나타낸 첫 번째 동상양상은 흙이 동결되면서 얼음 결정체와 얼음 띠를 형성하는 일시적 동상영역(transient

frost heaving phase)이며, Takashi 등(1978)과 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 동상 영역에서 분리된 아이스렌즈가 성장하면서 나타나는 구간으로 이는 동결토의 온도경사 때문에 성장하는 것으로 가정할 수 있다. Akagawa 등(1985)은 비록 일시적으로 나타나는 동상량이 정상상태에서의 동상발현 양상 보다는 동상비가 매우 낮을 지라도 전체 동상 과정 중 한 부분으로서 장기적인 동상 영역으로 표현하였다. Goto & Takahashi(1982)는 이 과정에서의 증가비를 방정식으로 나타내었으나, Akagawa 등(1985)은 장기동상

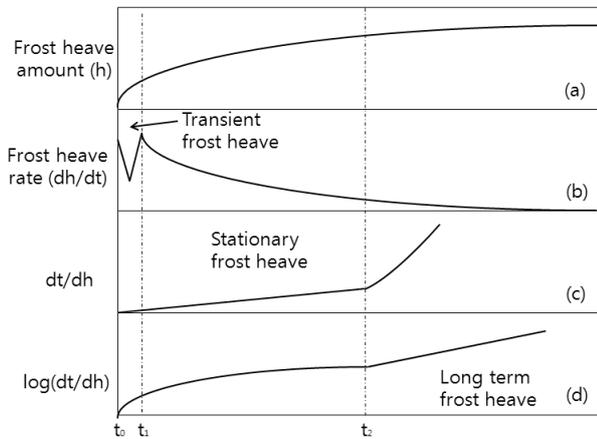


그림 2. 동상특성

영역에서 발생된 동상량은 공학적 관점에서 매우 작으므로 무시할 수 있다고 제시하였다.

도로 포장구조체의 용해시 지지력 거동은 노상재료에 상대적으로 세립분을 많이 함유할수록 함수특성에 대한 민감성이 크게 된다. 포장하부구조체는 차량으로부터 받는 접지압력을 지지, 분배하는 기능을 갖고 있으나, 용해시 함수특성에 민감하고 배수가 제한된 포장체 상부에 교통하중이 작용하면 간극수압 증가로 전단강도가 상실되어 포장체 표층 일부가 떨어져나가게 된다.

더욱이 안정된 포장하부구조체에서도 겨울철 동안 노상토층의 모세관현상에 의해 아이스렌즈가 형성, 동결영역이 확대된 후 동결용해와 차량하중으로 인해 영구적인 변형을 초래한다. 그림 3에 나타난 바와 같이 함수특성에 민감하지 않고 지표면 용해가 동상에 민감한 노상토층에 도달하지 않을 경우 하부구조의 지지력은 충분히 만족할 것이다. 그러나 노상토층이 용해되기 시작하면서 간극수압 증가로 지지력은 감소한다. 이러한 지속적인 용해로 인해 포화된 노상토층에 체적변화가 발생되고, 종방향 변위를 수반하면서 포장상부구조체에 침하가 야기되고, 반복된 교통하중으로 광범위한 변형이 발생된다(Simonsen and Isacsson, 1999).

### 3. 실험 방법 및 내용

#### 3.1 실내 모형실험 장치 구성

포장하부구조체의 동상 특성 및 지지력 변화를 측정하기 위하여 표 1과 같이 동결온도와 구성 단면의 종류에 따라 실험 조건을 구분하여  $-20^{\circ}\text{C} \sim +10^{\circ}\text{C}$ 의 온도 유지가 가능한 길이 3.2m, 폭 3.2m, 높이 2.4m의 대형 냉동고내에 모형토조를 구축하여 실내모형실험을 수행하

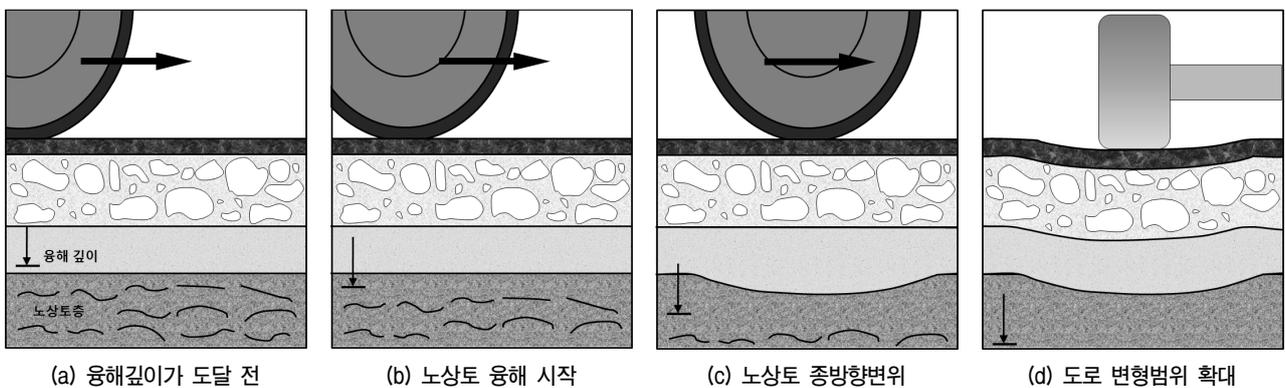


그림 3. 융해에 따른 포장체 손상(Simonsen and Isacsson, 1999)

표 1. 실내모형 실험의 구성조건

구 분		CASE 1	CASE 2	CASE 3
동결온도		-20℃	-15℃	-15℃
단면구성	쇄석 골재	0cm	0cm	5cm
	노상토	30cm	30cm	30cm
중량 함수비(%)	쇄석 골재	0	0	2.1
	노상토	15.3	15.2	15.2

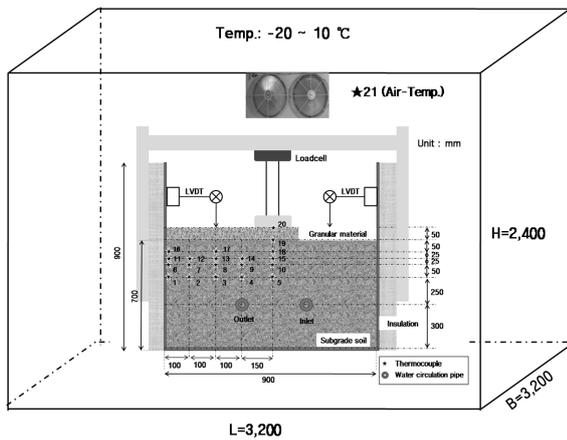


그림 4. 대형냉동고내 실내모형토조 및 계측기 구성도

였다.

이러한 실험 조건과 함께 그림 4에 나타낸 바와 같이 길이 0.9m, 폭 0.9m, 높이 0.9m의 실험 모형토조를 실제로 노상토의 형상과 유사하게 구성하여 실험 조건 및 시간에 따른 온도변화와 동상량을 측정하였고, 동결 전 지반과 융해 후 지반의 지지력( $E_{LFWD}$ ) 변화 특성을 도출하였다. 동결 온도가 실험용 철제 토조 벽면으로부터 시료에 전달하는 것을 방지하기 위하여 토조 외벽에 단열재를 설치하여 2차원 열전달 모델이 아닌 공랭식 1차원 동결 조건을 구현하였다. 또한, 대형냉동고 외부에 제작된 물순환 공급장치(water bath)에서 보온파이프를 통하여 모형토조의 30cm 높이에 ‘ㄷ’자 형태로 노상토 중간 다짐후 설치하여 인위적인 지하수위가 형성될 수 있도록 하였다. 변위계를 통해 측정된 동상 팽창량은 자동계측장비(TDS-301)를 통하여 30분 간격으로 동상발현시점부터 동상 완료시점까지 계측하였다.

또한, 동결 시 토조내 포장하부구조 재료의 온도 변화를 파악하기 위하여 총 21개의 온도센서(thermocouple)를 매설하여 30분 간격으로 계측하였다. 온도센서는 -50℃ ~ 1300℃ 범위까지 측정이 가능한 K-type을 사용하였으며, 대형냉동고 내부에는 냉기 영향에 의한 기온의 순간 저하를 방지할 수 있는 대기용 온도센서를 부착하였다.

측정범위는 0.1℃까지 측정할 수 있으며 설정된 시간마다 연결된 온도센서의 온도를 감지할 수 있고 매순간의 평균온도를 확인할 수 있다.

### 3.2 소형충격재하시험장치(LFWD)를 활용한 지지력 변화 측정

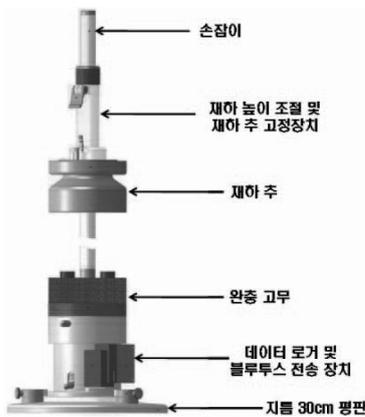
소형충격재하시험장치(LFWD, light falling weight deflectometer)는 덴마크의 Carl Bro사 제품의 Prima-100 모델로서 자유 낙하시킨 추로 인해 지표면에 작용하는 하중과 이에 의한 처짐량을 측정하여 탄성계수를 산출하는 방법이다. 낙하 추를 고정 손잡이에 고정시킨 후, 자유낙하시켜 등분포에 가까운 하중을 고무 완충기에 가한다. 이때 가해진 충격력은 재하판을 통해 표면에 전달되고, 표면에서 일어난 변형은 재하판 중앙에 위치한 변위계를 통하여 컴퓨터로 전송된다. 컴퓨터로 전송된 데이터는 내장된 프로그램에 의해 분석되어 탄성계수 등의 산출결과를 화면상에 출력시킨다.

그림 5에 나타낸 바와 같이 장치의 구성은 센서부와 낙하 추, 손잡이, 트리거, 고무완충기(rubber buffer), 재하판과 데이터 출력용 PDA로 이루어진다. 재하판의 크기는 100mm, 200mm, 300mm의 3가지로 구성되며 재하판의 선택은 시험 대상층을 구성하는 재료의 종류에 따라 결정된다.

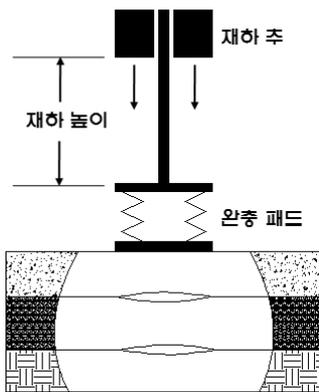
그림 5(b)는 장치의 기본원리를 나타낸 것으로서, 재하 추의 자유 낙하에 따른 지반의 탄성침하량을 시험기 중앙 판에 설치된 지오폰으로 측정하고, 이를 데이터 로거를 이용하여 탄성계수( $E_{LFWD}$ )로 환산한다(최준성 등, 2009). 시험장치는 발생 응력과 이로 인한 탄성침하량을 측정하여 탄성계수 값을 산출하므로 PDA나 노트북과의 블루투스를 통한 연결로 실험 현장에서 간편하게 데이터를 수정하고 삭제할 수 있다. 측정된 탄성침하량은 Timoshenko 등이 제안한 탄성이론을 이용하여 방정식 (1)에 대입하여 탄성계수로 환산한다.

$$E_{LFWD} = \frac{q_d}{w_d} r \frac{\pi}{2} (1 - \nu^2) \quad (1)$$

여기서,  $E_{LFWD}$ 는 LFWD로 계산된 탄성계수,  $q_d$ 는 하중판에 작용한 응력,  $w_d$ 는 처짐,  $\nu$ 는 포아송비,  $r$ 은 하중판의 반지름이다. 본 연구에서는 대상 지반이 실트질 모래지반에 지름 300mm 평판을 사용하였으므로  $\nu=0.35$ ,  $r=150\text{mm}$ 를 적용하여 결과를 산출하였다. 한편, 동결전과 용해후의 지지력 평가를 위하여 우선 모형토조내 하부 지반을 조성한 후 재하시켜 동결전 탄성계수( $E_{동결전}$ )를 구하였고, 각각의 실험조건에 따라 동결실험이 완료되면 토조내에 설치된 온도센서 중 노상토 최하부에 위치한 센서의 온도가  $0^\circ\text{C}$  이상으로 유지할 때 재



(a) 장치 구성 및 외형



(b) 시험 기본원리

그림 5. 소형충격재하시험장치(LFWD)의 장치 구성 및 기본원리(최준성 등, 2009)

표 2. 노상토의 공학적 특성

중량함수비 (%)	비 중	소성지수 (PI)	D-다짐		통일분류법 (USCS)	균등계수 ( $C_u$ )	곡률계수 ( $C_c$ )	#200체 통과율 (%)
			최대건조단위중량 ( $t_f/m^3$ )	최적함수비 (%)				
15.3	2.63	N.P	2.04	7.95	SM	45.6	5.3	17.6

하시험을 실시하여 동결후 탄성계수( $E_{동결후}$ )를 산정하였다.

### 3.3 노상재료의 공학적 특성

한국표준산업규격 시험법을 바탕으로 실시한 노상재료의 공학적 특성은 표 2와 같다. 체분석 시험 결과, 시료의 200번체(0.075mm) 통과율이 17.6%, 균등계수는 45.6, 곡률계수는 5.3으로서 통일분류법(USCS)상 실트질 모래(SM)로 분류하였다. 그림 6과 그림 7은 각각 노상재료의 입도분포 곡선과 수정 D-다짐시험 곡선을 나타낸 것이다.

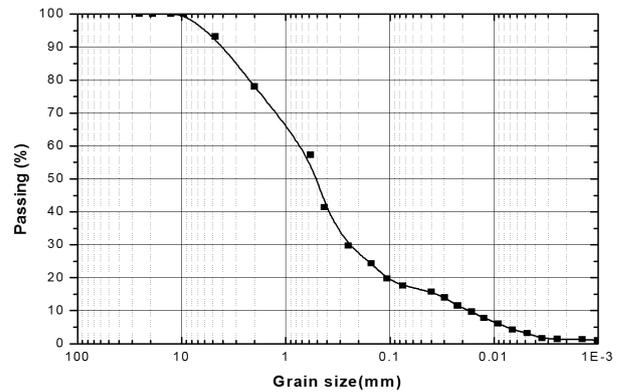


그림 6. 입도분포곡선

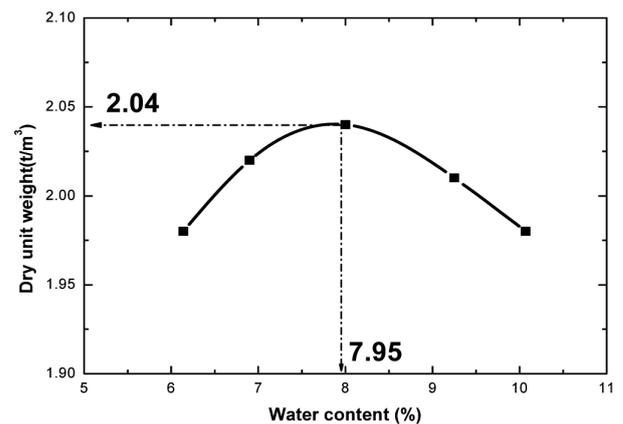


그림 7. 다짐곡선

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 온도변화 특성

실내 모형실험을 수행한 결과 그림 4와 같이 노상토층 최상부와 깊이 25mm, 50mm, 100mm 위치에 매설된 온도측정 센서를 통하여 심도별 온도 분포 변화를 도출하였다. 표 3은 노상재료 상부에 50mm의 쇠석골재층 포설 유무와 초기동결온도(-20°C, -15°C)에 따른 0°C 동결선에 도달되는 시간을 나타낸 것이다. 주어진 동결온도에 대하여 각 시료들의 열전달 흐름곡선은 유사한 양상을 보였지만 초기설정온도와 동상방지층 포설에 의한 단열효과로 동결속도는 확연한 차이를 나타내었다. 시료의 온도 변화 특성은 0°C를 기준으로 하여 열전달 속도의 차이를 나타내고 있다. 즉, 동결속도는 흙시료 표면이 외부 동결온도의 영향이 커 곡선 기울기가 급하게 나타나지만 심도가 깊어질수록 그 차이는 완만하게 나타나고 있다.

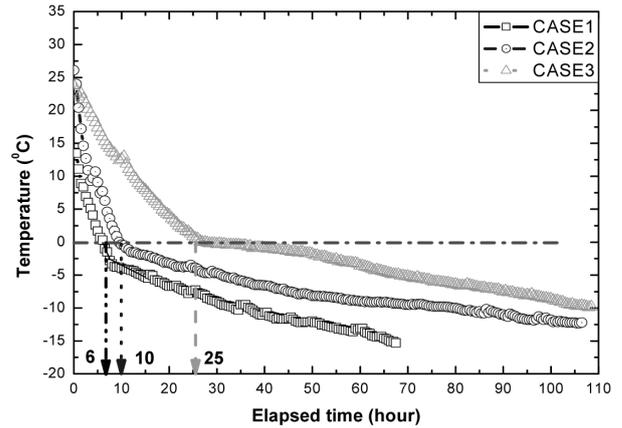
그림 8의 온도센서 매설깊이에 따른 온도변화를 살펴보면, CASE 1의 경우와 같이 초기동결 설정온도 조건을 -20°C로 하였을 때, 3개의 CASE 중 가장 빠른 시점에 0°C에 도달하였다. 그림 8(b)와 그림 8(c)에 나타난 바와 같이 심도 25mm까지 4.5시간 만에 0°C에 도달하였지만 50mm까지 9시간 후에 도달하였다. 이는 -20°C의 초기 동결온도의 영향으로 시료의 표면에서는 빠르게 온도가 전달되었지만 10시간 이후에는 노상재료 자체의 열전달 특성을 띄는 것으로 파악된다. CASE 1의 시료표면에서 깊이 25mm의 0°C 도달시점을 제외하고 다른 경우에는 시료 25mm의 열전달 시간은 평균적으로 9시간이 소요되었다. 이는 초기동결온도 및 상부의 쇠석골재의 영향을 받지 않는 노상재료의 고유 열전달 특성으로 판단된다.

### 4.2 동상팽창량 특성

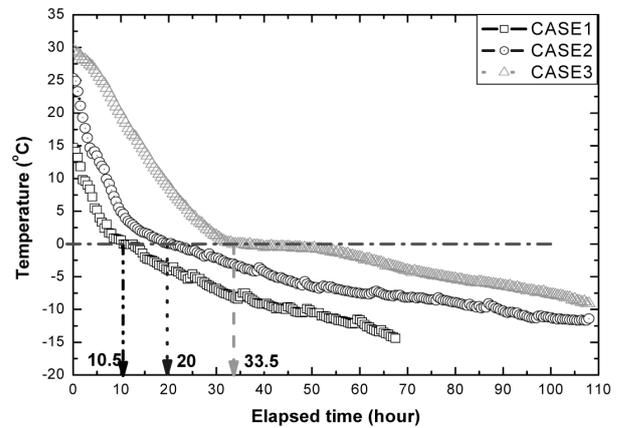
그림 9는 시간에 따른 동상 팽창량 변화를 나타낸 것

표 3. 시료의 깊이별 0°C(동결선) 도달 시간

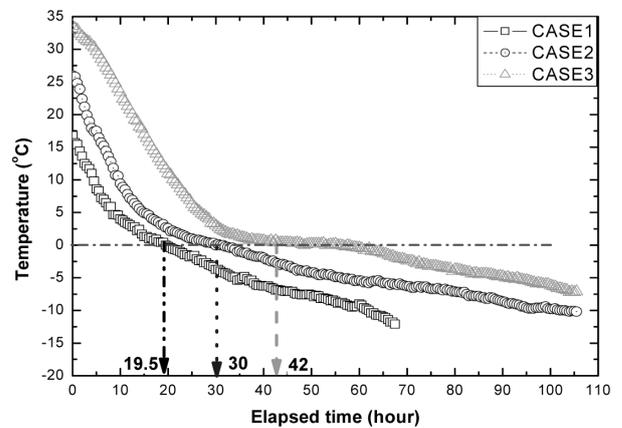
구분		CASE 1	CASE 2	CASE 3
실험조건	초기동결 설정온도	-20°C	-15°C	-15°C
	하부구조층 포설 조건	노상토 : 300mm	노상토 : 300mm	쇄석골재 : 50mm 노상토 : 300mm
온도센서 매설깊이	0mm	6 hr	10 hr	25 hr
	25mm	10.5 hr	20 hr	33.5 hr
	50mm	19.5 hr	30 hr	42 hr



(a) 노상토 최상부(지표면)



(b) 매설깊이 25mm



(c) 매설깊이 50mm

그림 8. 온도센서 매설깊이에 따른 온도변화

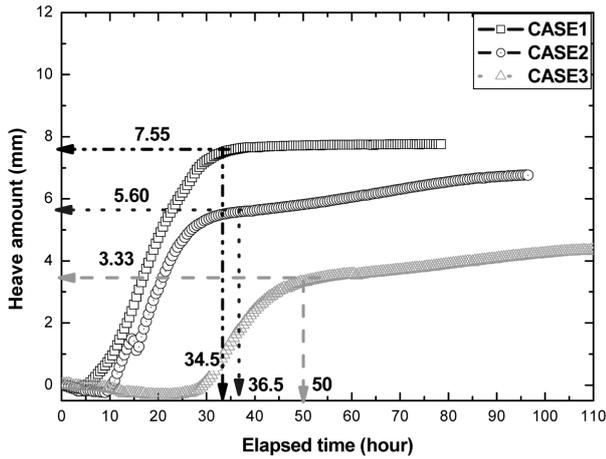


그림 9. 실험조건에 따른 동상 팽창량

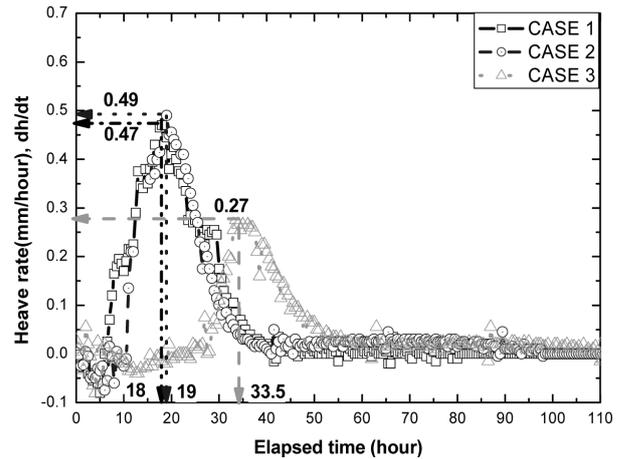


그림 10. 시험조건에 따른 동상비

이다. 앞서 2장에 나타난 바와 같이 시간에 따른 동상 팽창량은 크게 3단계로 분류할 수 있다. 시료의 온도가 외부 온도에 의하여 낮아지며 자체수축이 발생되어 부피가 감소하는 일시적 동상영역, 간극 내에 존재하는 수분의 결빙으로 인해 급격한 부피 팽창이 발생하는 동상 발현영역, 그리고 간극수의 결빙이 완료되고 흙 속의 동결이 평형을 이루는 장기동상영역으로 구분할 수 있다.

일시적 동상영역에서는 시료의 수축으로 인한 동상 팽창량 감소가 이루어지며 시료의 온도가 더 낮아지면 간극수의 결빙으로 인한 동상 특성이 발생하게 되며 이 시점까지의 구간을 의미한다. 동상발현영역에서는 간극수의 결빙이 점차 증가하고 시료 내부에 아이스렌즈가 증가하면서 동상 팽창량이 증가하게 된다. 이러한 동상 특성은 시료의 종류에 따라 단위시간 동안의 동상 팽창량을 의미하는 동상비(frost heave rate)에 의존하게 되며 이는 동상 민감성을 판단하는 지표로 사용된다. 장기동상영역에서는 시료 내의 간극수의 동결 특성이 평형을 이루는 단계로서 급격한 동상 거동의 특성 발현이 아닌 평형에 가깝거나 그 크기의 증가량이 미소한 특성을 띄게 된다. 이러한 동상거동 단계들이 발현 시점의 차이만 발생할 뿐 모든 실험 조건에서 확실히 나타났다.

실내모형실험을 통해 도출된 동상 팽창량은 CASE 1, 2, 3의 경우 각각 7.55mm, 5.60mm, 3.33mm로 나타났다. CASE 2와 CASE 3의 경우, 시료 상부에 50mm의 두께로 포설된 쇄석 골재층의 영향으로 동상 팽창량 발생 시점이 시험 시작 후 10시간이었던 CASE 2와는 다르게 CASE 3에서는 시험 시작 후 27시간으로 지연된 것을 확인할 수 있다. 또한, 4.1절의 온도 분포 결과와 비교한 결과 동상 팽창량의 발현 시점은 시료 표면의

온도가 0°C에 도달하는 시간과 일치한다는 것을 확인할 수 있다.

일반적으로 동상비는 흙의 동상민감성 판단의 기준으로 활용된다. 이러한 동상비의 개념은 단위 시간에 발생한 동상 팽창량의 가장 큰 기울기를 나타낸다. 국내 도로설계기준에서는 동상비를 바탕으로 0.1mm/hr 이하를 민감성 적음, 0.1mm/hr에서 0.3mm/hr 범위를 중간 정도의 동상 민감성, 그리고 0.3mm/hr 이상을 동상 민감성 높음의 단계로 분류하고 있다(도로설계편람, 2010). 그림 10은 단위시간당 동상비의 산출 결과이다. CASE 1이 CASE 2의 경우 보다 외부 온도조건 차이로 인하여 동상 팽창량의 크기가 2mm정도 크게 발생되었지만 동상비의 크기는 0.47mm/hr와 0.49mm/hr의 비슷한 값을 나타내어 동상비는 국내 도로설계기준상에 동상 민감성이 높은 흙으로 분류될 수 있으며 외부 온도조건과 무관하게 동일한 시료에서는 유사한 값을 나타낸다. 이는 200번체(0.075mm) 통과량이 17.6%로서 미립분 함량이 다소 높은 비율을 차지하는 입도분포의 영향이라 판단된다.

반면, CASE 2와 동일한 온도와 시료 조건을 바탕으로 쇄석 골재층을 포설한 조건으로 수행된 CASE 3의 경우 동상비가 0.27mm/hr로 그 기울기가 CASE 2 보다 42.5%가 감소하여 중간 정도의 동상 민감성을 띄는 것을 확인할 수 있다. 따라서 동상비를 통한 민감성 판단 시 동결온도와 시료조건을 영향인자로 하는 포장하부 구조체의 동상특성 뿐 아니라 상재하중, 열전도 등이 적용된 포장구조체 전체의 동결 기준이 제시되어야 할 것으로 판단된다.

### 4.3 지지력 변화

소형충격재하시험장치(LFWD)를 활용한 동결 전과

융해 후 지반의 탄성계수를 측정하였으며, 각 시험 조건 별 발생 응력과 침하량의 변화는 그림 11에서 그림 13에 나타난 바와 같다. 발생 응력과 침하량을 식 (1)에

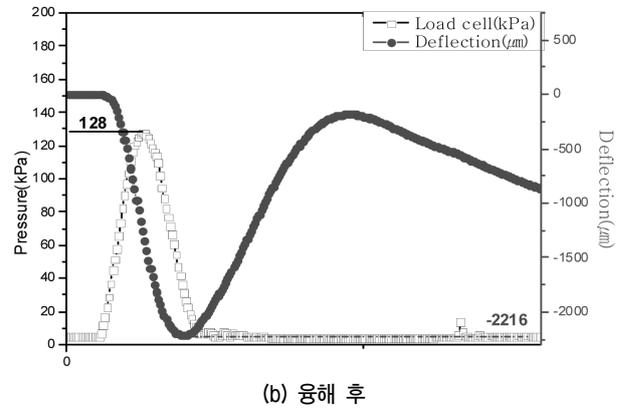
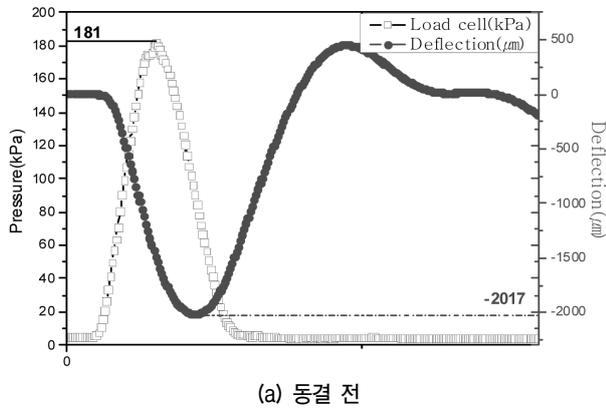


그림 11. CASE 1의 지지력 변화

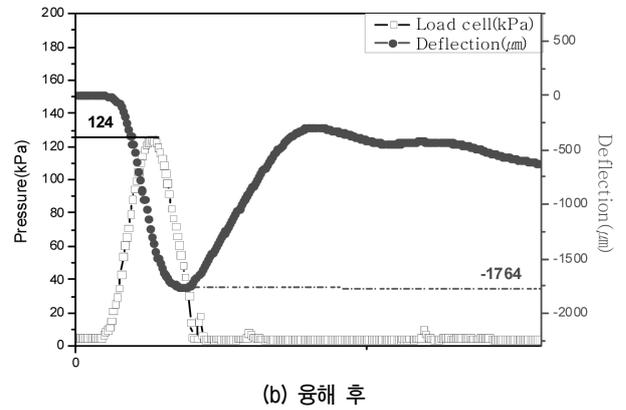
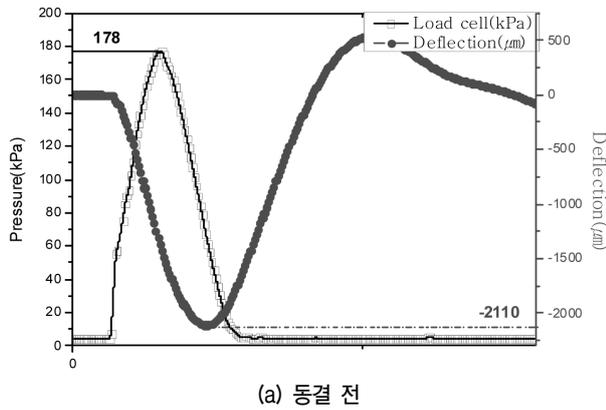


그림 12. CASE 2의 지지력 변화

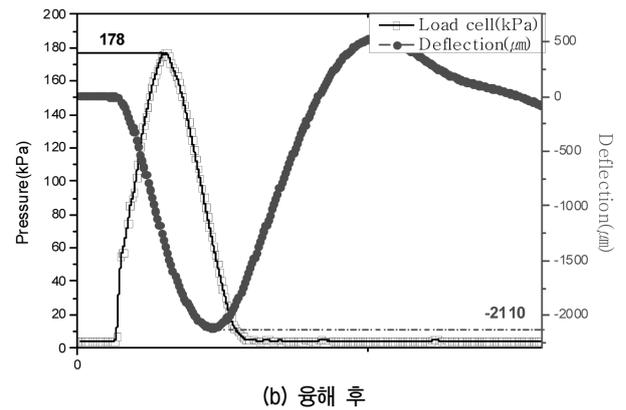
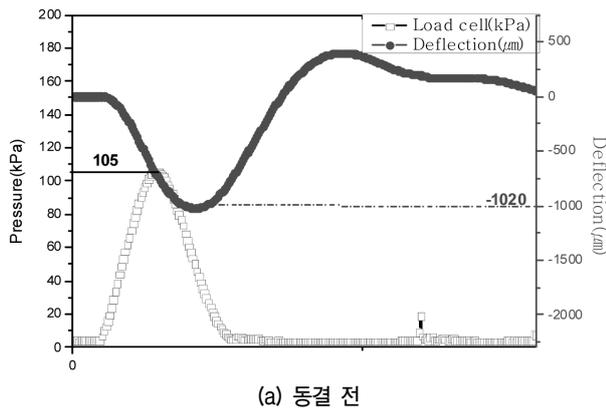


그림 13. CASE 3의 지지력 변화

표 4. 동결 전과 융해 후 강성도 변화

구 분	$E_{\text{동결 전}}$ (MPa)	$E_{\text{동결 후}}$ (MPa)	강성도 감소율(%)
CASE 1	19	12	36.8
CASE 2	17	15	13.3
CASE 3	21	16	23.8

대입하여 지반의 탄성계수를 산출하였으며 그 결과는 표 4와 같다.

계산된 지반 탄성계수로 식 (2)를 이용하여 강성도 감소율을 산정하였다. CASE 1의 경우 지반 동결로 인한 팽창량이 가장 크게 발생하였다. 이는 동결로 인한 지반의 용기가 가장 크게 발생하였으며 체적 변화가 가장 크게 발생하였다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 반영하여 강성도 감소율이 가장 큰 36.8%로 산출되었다. CASE 2의 경우, 강성도 감소율이 13.3%로서 지반의 동결 용해로 인한 체적변화로 지반의 지지력이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

$$\text{강성도 감소율(\%)} = \frac{E_{\text{동결전}} - E_{\text{용해후}}}{E_{\text{동결전}}} \quad (2)$$

그러나 노상토 시료 상부에 50mm의 쇠석골재층이 적용된 시료에 초기동결온도 -15℃의 실험조건(CASE 3)의 경우, 동결 전과 용해 후 지반 탄성계수가 가장 크게 산출되었지만 강성도 감소율에서는 23.8%로 다소 높은 감소율을 나타내었다. 이는 CASE 1과 CASE 2의 결과와 마찬가지로 동상에 의한 함수비 증가와 건조단위중량 감소 뿐만 아니라, 쇠석골재층 하부면과 노상토 상부면 사이에서 간극수 흐름의 체류로 동결시 더 커다란 아이스렌즈가 형성되어 불균질하고 큰 간극 발생이 강성도 감소에 영향을 미친 것으로 추정된다. 따라서, 동결-용해 과정에서의 강성도 변화는 동결과정의 체적 팽창과 함수비증가, 용해 후 배수에 의한 함수비 감소와 강성도 회복의 반복영향으로 알 수 있으며, 이에 포장구성층 재료 및 배수조건 등 보다 폭넓은 범위에서 동상과정 또는 동상시험 수행 후 강성도 변화를 통하여 상관관계를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 대형 냉동고내에 실내모형토조를 구성하여 포장하부구조재료(노상층, 동상방지층, 보조기층)의 깊이별 온도변화와 시간에 따른 동상량 변화, LFWD를 이용한 동결전과 용해후 지반의 지지력( $E_{LFWD}$ ) 변화를 통하여 포장하부구조체의 역학적 관계를 분석하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 실내모형실험을 통한 시간에 따른 동상팽창량 실험결과, 국내 도로설계기준에서 제시하고 있는 동상비를

통한 동상민감성 판단시 초기설정 동결온도가 다른 경우, 노상재료의 200번째 통과량에 따라 동상팽창량 크기가 발생하였으나, 동상비의 크기는 0.47mm/hr (CASE 1)와 0.49mm/hr(CASE 2)로 도출되어 동상민감성이 다소 높은 흙으로 분류되었다.

- (2) 반면, 동일한 초기동결 설정온도하에 쇠석골재층 포설유무에 따른 동상비 산정결과, CASE 3의 경우 동상비가 0.27mm/hr로서 CASE 2의 경우 보다 42.5%가 감소하여 동상민감성 기준 판단시 중간정도의 동상영향을 예측하였다. 이는 동상비를 통한 민감성 판단시 동결온도와 시료조건을 영향인자로 하는 포장하부구조체의 동상특성 뿐 아니라 상재하중, 열전도 등이 적용된 포장구조체 전체의 동결 기준이 제시되어야 할 것으로 판단된다.
- (3) LFWD를 활용한 동결전과 용해후 지반의 탄성계수를 측정된 결과, CASE 1(동결온도 -20℃, 쇠석골재층 무)의 경우 강성도 감소율이 36.8%, CASE 2(동결온도 -15℃, 쇠석골재층 무)의 경우 13.3%, CASE 3(동결온도 -15℃, 쇠석골재층을 5cm 포설)의 경우 23.8%로 나타났다. 이는 동상에 의한 함수비 증가와 건조단위중량 감소 뿐만 아니라 쇠석골재층 하부면과 노상토 상부면 사이에서 간극수흐름의 체류로 동결시 더 커다란 아이스렌즈가 형성되어 불균질하고 큰 간극 발생이 강성도 감소에 영향을 미친 것으로 추정된다.
- (4) 향후 연구를 통하여 포장구성체의 단면구성 변화에 따른 동상 거동 및 지지력 변화 특성 분석 그리고 상재하중과 배수조건 영향에 대한 연구가 요구된다. 이를 통하여 외부 온도에 의한 동상방지층의 거동과 경제적인 설계 기술을 확보할 수 있을 것이라 판단된다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

1. 국토해양부 (2010), 도로설계편람.
2. 권기철 (2002), 노상토의 종류에 따른 동결·용해 특성, 한국도로포장공학회지, 제4권 제1호, pp.33-39.
3. 김영진, 강병희 (1998), 페타이어를 이용한 지반동상방지, 한국지

반공학회지, 제14권 제1호, pp.49-58.

4. 남영국, 조규태, 진정훈 (2002), 도로포장의 동상방지층 실효성 검증에 위한 현장계측 및 실내시험 연구, *대한토목학회 논문집*, 제22권 제5D호, pp.913-921.
5. 신은철, 박정준 (2003), 동결토의 동상팽창압 특성에 관한 실험적 연구, *한국지반공학학회논문집*, 제19권 제2호, pp.65-74.
6. 신은철, 류병현, 박정준 (2010), 실내동결시스템을 이용한 노상토의 동상 특성, *한국도로학회논문집*, 제12권 제2호, pp.71-79.
7. 최준성, 김중민, 한진석, 김부일 (2009), 노상 및 보조기층의 소형 충격재하시험 활용방안 연구, *한국도로학회논문집*, 제11권 제2호, pp.85-98.
8. Akagawa, S. (1983), Relation between frost heave and specimen length, *Shimizu Tech. Res. Bull.*, 4:1-7
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Miller, R. D., Baker, J. H. and Kolaian, J. H. (1960), Particle size, overburden pressure, pore water pressure and freezing temperature of ice lenses in soil, *Transactions International Congress Soil science*, pp.122-128.
14. Ohrai, T. (1986), *Experimental studies on the effects of ice and unfrozen water on the compressive strength of frozen soil*, Ph.D. dissertation, Hokkaido University, Sapporo, Japan.
15. Simonsen, E. and Isacsson, U. (1999), Thaw weakening of pavement structures in cold regions, *Cold Regions Science and Technology*, 29, pp.135-151.
16. Takagi, S. (1980). The adsorption force theory of frost heaving, *Cold Region Science Technology* 3, pp.57-81.
17. 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. 37-742.

(접수일자 2011. 5. 20, 심사완료일 2012. 3. 14)