

실내동결시스템을 이용한 노상토의 동상 특성

The Frost Heaving Characteristics of Subgrade Soils Using Laboratory Freezing System

신은철 Shin, Eun Chul	비회원 · 인천대학교 건설환경공학과 교수 (E-mail : ecshin@incheon.ac.kr)
류병현 Ryu, Byung Hyun	비회원 · 인천대학교 건설환경공학과 박사과정 (E-mail : tnt306@nate.com)
박정준 Park, Jeong Jun	정회원 · 인천대학교 건설환경공학과 연구교수·교신저자 (E-mail : frostjun@incheon.ac.kr)

ABSTRACT

The influence of fines of the frost susceptibility of subgrade soils were established by laboratory freezing system test simulating closely the thermal conditions in the field. During the winter season, the climate is heavily influenced by the cold and dry continental high pressure. Because of siberian air mass, the temperature of January is $-6 \sim -7^{\circ}\text{C}$ on average. This chilly weather generate the frost heaving by freezing the moisture of soil and damage potential of the road structure. In the freezing soil, the ice lenses increase the freeze portion of soil by absorbing the ground water with capillary action. However, the capillary characteristics differ from the sort of soil on the state of freezing condition. 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 besides the seasonal and mechanical properties of pavement materials to take a appropriate and reasonable design of the road structure. In this Paper, the evaluation of frost susceptibility was conducted by means of the mechanical property test and laboratory freezing system apparatus. The temperature, heaving amount, heaving pressure and unfrozen water contents of soil samples, the subgrade soils of highway construction site, were measured to determine the frost susceptibility.

KEYWORDS

frost heaving, ice segregation, laboratory freezing system, subgrade soil, unfrozen water

요지

겨울에는 시베리아기단의 영향으로 한랭 건조한 대륙성 고기압의 영향을 받아 춥고 건조하여 1월 평균기온이 $-6 \sim -7^{\circ}\text{C}$ 의 영하의 온도로 낮아져 지반동결시 수분이동으로 동상현상이 발생하여 도로의 불균형 동결팽창을 초래하며, 결국 포장체를 파손시킨다. 동상 발생시 토립자는 모관력에 의해 지하수를 흡수하여 아이스렌즈를 형성하며, 이 모관 흡수력은 토립자의 크기에 영향을 받는다. 도로는 다양한 재료와 단면으로 구성된 구조물이기 때문에 환경성과 재료 물성뿐만 아니라 포장체 각 층의 구조적 적정성 또는 지지력을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 현재 기존 동상방지층 설계법에 따르면, 동상방지층은 포장체의 구조적 적정성과는 무관하게 온도 조건에 따른 동결깊이에 따라 일률적으로 결정되고 있다. 이러한 동결깊이를 포장구조설계에 적용함으로써 포장의 파다설계 우려가 있다. 따라서 본 논문에서는 도로 동상방지층의 효용성 검증 및 설치기준 확립을 위해 실내동결시스템을 활용하여 도로 노상토의 동상 특성에 대한 민감성을 판별, 도로건설 현장 노상토에 대한 역학적 특성과 실내 동결 시험을 수행하였으며, 외부 동결온도의 지속 조건에 대한 시료의 온도변화, 동상팽창압, 동상팽창량, 부동수분 등의 결과값을 통하여 동결 과정에 따른 지반공학적 특성을 평가하였다.

핵심용어

동상, 빙정분리, 실내동결시스템, 노상토, 부동수분

1. 서론

동절기 0℃ 이하의 온도가 지속되는 지역에서 포장체가 동상에 민감한 노상 상부에 건설될 경우 동결융해에 의한 손상 위험성을 가지게 된다. 일반적으로 지하수 및 강우에 의한 노상토의 함수비 증가는 모세관 현상에 의하여 지반내 동상에 대한 활동영역의 함수비를 증가시킨다. 이렇게 상승된 동결영역의 함수비는 0℃ 이하의 온도가 지속됨에 따라 아이스렌즈를 형성하여 노상토의 불균등한 동결팽창을 초래하며, 결국 포장 구조체의 손상을 가져온다(권기철, 2002).

이러한 피해를 줄이기 위하여 국내에서도 미국 AASHTO 설계법과 일본 TA 설계법을 바탕으로 도로 동상방지층 설계가 진행되고 있다. 그러나 이와 같은 기존의 설계법에 따르면, 동상방지층은 도로 노상토의 동상특성이 아닌 온도에 따른 동결깊이에 근거해 일률적으로 결정되고 있다. 이러한 동결깊이를 포장구조설계에 적용함에 따라 포장설계의 부실 또는 과다설계가 우려되고 있다(남영국 등, 2002).

본 연구에서는 도로 동상방지층의 효용성 검증 및 설치기준 확립을 위해 실내동결시스템을 활용하여 도로 노상토의 동상특성에 대하여 고찰하였다. 즉, 서울, 대전, 원주지방국도관리청 산하 도로 건설 현장 노상토에 대한 역학적 특성과 실내 동결 시험을 수행하였으며, 외부 동결온도의 지속 조건에 대한 시료의 온도변화, 동상팽창압, 동상팽창량, 부동수분을 측정함으로써 도로노상토의 동상특성을 규명하였다.

2. 흙의 동결 이론

2.1. 개요

동상은 도로 포장을 구성하는 노상층의 간극에 분포하는 수분의 응결과 함께 체적 팽창의 결과로 포장체가 융기하는 현상이다. 즉, 흙은 물을 함유하고 있는 다공성물질로 0℃ 이하의 온도에 노출되어서 표면의 일부분이 동결할 때 동결된 부분의 흙은 아직 동결되지 않은 부분으로부터 물을 흡수하게 되는데 동결의 진행과 물의 공급이 원활하게 이루어지면 체적 팽창이 일어난다.

그림 1은 노상층의 동결구조를 나타낸 것으로서, 동결부분에 있어 토립자 사이의 간극은 동결 전에 비하여 확장되며, 확장된 토립자 사이의 간극수는 동결된 얼음으로 상변환하게 된다. 물을 포함한 다공성의 물질이 동상을 일으킬 때에 각각의 입자사이를 넓히려는 힘의 평균치를 동상팽창압(frost heaving pressure)이라 한다. 일반적으로 수분 공급이 없는 간극에 물이 동결할 때 체적은 최대 9%까지 팽창하게 되고, 지하수가 공급되는 상태에서는 지속적인 동결영역 확장으로 체적이 50% 이상 팽창하기도 한다(김영진 등, 1999). 즉, 지중의 온도가 0℃ 이하로 장기간 계속되면 흙 속의 간극수가 동

결되면서, 모세관현상에 의해 얼지 않는 지중의 수분이 동결면으로 이동하여 아이스렌즈가 발생하고, 아이스렌즈가 확장되면서 포장체를 융기시키게 된다.

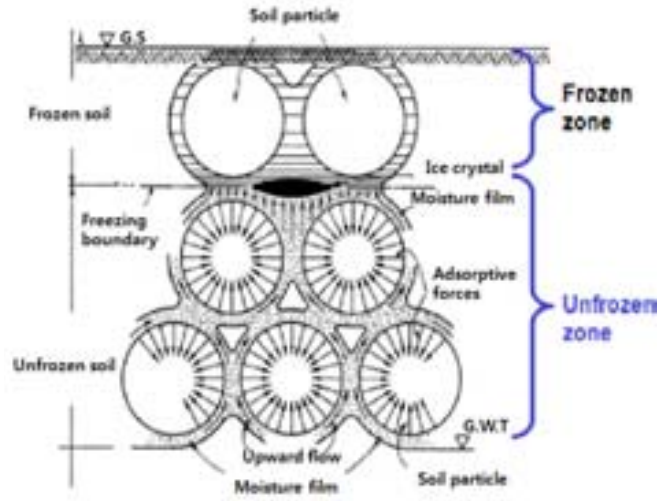


그림 1. 노상층의 동결 구조 (Takagi, 1965)

일반적으로 도로의 동상에 영향을 미치는 주된 요소는 토질, 수분, 온도의 3가지 조건으로 구분할 수 있다. 즉, 이러한 3가지 요인이 동시에 충족될 때 동상현상이 발생한다. 토립자의 표면에 흡착된 물 즉, 부동수분은 0℃ 이하에서도 얼지 않으며, 동결면으로 향하여 흐르는 물은 동결면에서 얼음층이 된다. 지반내 동상현상이 일어날 때 지하로부터 모세관 현상에 의해 올라온 간극수는 흙 속의 부동수의 막을 통하여 이동하는 것으로 알려져 있다(신은철 등, 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.

도로포장에서 노상토가 #200체 통과량이 10% 이상이거나 0.02mm체 통과량이 3% 이상일 경우 동상민감성 재료로 판정한다. 흙이 아이스렌즈를 형성하는 과정을 미시적으로 보면 대단히 복잡하다. 동결토에서 수분의 이동은 지반내의 온도, 지반의 열전도율, 융해잠열, 흙입자의 피막수층 등 열역학적인 인자들에 의해 결정되기 때문이다. 이러한 모든 인자들을 망라하여 동결이론을 정립하려는 시도는 오래전부터 진행되었고, 이 이론을 바탕으로 하여 동결깊이를 추정하는 공식들도 여러 학자들에 의해 발표되었다(Takagi, 1965; 1980; Miller 등, 1960).

2.2. 동결토의 수분특성

흙은 토립자, 공기, 물로 구분되어 3상으로 구성되어 있다. 그러나 0℃ 이하에서 흙은 토립자, 공기(불포화된 흙일 경우), 아이스렌즈에 부동수분을 추가하여 4상으로 구성된다. 간극내

에서의 얼음은 고체상태이지만, 부동수분은 강한 흡착수와 약한 자유수로 구분되는 두 가지 형태로 존재한다. 흡착수는 토립자를 얇은 수막으로 싸고 있으며 분자들 간에 당기는 높은 힘으로 매우 낮은 온도에서조차 얼지 않도록 억제한다. 그러나 자유수는 확산 이중층의 간극에 남아있는 수분이며 보다 쉽게 동결된다(Dillon과 Andersland, 1966; Anderson와 Morgenstern, 1973).

이 영역에서 물은 얼지 않은 흙으로부터 아이스렌즈 부동수막을 통하여 이동한다. 아이스렌즈 발달로 과냉각상태의 수분은 동결하여 얼음으로 변한다. 이때 동상압이 발생하여 상재압력에 저항하면서 아이스렌즈가 위로 올라감과 동시에 새로운 수분 이동이 일어난다. 흙은 포장체 상부부터 냉각하여 아이스렌즈의 성장이나 동결면의 진행과 함께 발생하는 동결잠열을 흡수한다. 이와 같이 동상현상은 열이동, 수분이동, 동상압의 발생, 부동수막의 존재, 과냉각수의 동결로부터 구성되는 현상을 말한다(Andersland와 Ladanyi, 1994).

토립자의 표면력은 구조단위 주변에 수분의 양과 특성에 의해 지배된다. 토립자 표면에 가까워질수록 표면력은 점점 더 증가되어 토립자 표면의 수분은 높은 표면력에 의해 물 분자가 이동하게 되거나 벗어나게 된다. 온도가 감소하여 수분이 동결됨으로써 토립자의 조직단위는 상호작용으로 변화하거나, 토립자와 물의 위치에너지로 변화하게 되어 전체 동결수분이 변화하게 되는 것이다. 물의 공급원이 동결면과 가까이 있으면 흙의 동상은 물의 영향으로 팽창한다. 물의 공급원은 지하수뿐만 아니라 동결면 아래의 물이 모세관작용으로 이동하기 때문에 물의 공급원이 동상에 영향을 미칠 수 있는 거리는 흙입자의 크기와 밀접한 관계가 있다. 사질토의 경우 동결선 아래 1.5m의 깊이에서 모세관작용으로 물을 끌어 올릴 수 있고 실트, 점토, 실트질의 대단히 미세한 모래는 동결선 아래 지하수의 영향을 받을 수 있다. 압축성이 큰 포화점토는 지하수가 깊은 곳에 위치하여도 점토의 압축성에 의해 간극에서 배수된 물로 인하여 얼음층을 형성할 수 있을 만큼 충분한 물이 공급될 수 있다.

McGaw와 Penner(1972)는 지하수위의 깊이와 동상팽창량과의 관계를 규명하기 위해 자갈질 모래부터 모래질 점토에 이르는 4가지 시료에 대하여 실내실험을 수행한 결과, 원시료 두께에 대한 동상팽창량은 모든 흙에 있어서 수위의 깊이는 물론 동상속도에도 의존한다고 발표하였다. 즉, 지하수를 일정하게 하였을 때, 동상비는 동결속도가 빠를수록 증가하였고 동결속도가 일정하게 되었을 때에는 수위를 낮출수록 감소하였다. 미동결토의 동결면까지 이동하는 물은 흙 입자 사이 모관을 통하여 이동하는 거리와 그 흙속에 있어서 물의 모관상승 높이와 같다. 미동결 흙의 모관상승 높이보다 지하수위가 깊으면 그 지하수는 수분 공급원이 되지 못한다. 흙속의 수분이 흙입자 표면에 흡착하려는 물의 양이 중요하며 특히 동결면(frozen

fringe)의 부동수의 거동이 중요하다. Hoekstra 등(1965)은 동토층에서도 수분이동이 생기며, 부동수가 존재하는 것을 감마선 수분계를 사용하여 입증하였다. Olhoef(1977)는 동토에 대한 유전율의 측정을 통해 토립자 표면에 흡착된 물이 -70℃까지 존재함을 밝혔다.

지반이 동결하여도 흙 속에서 일정한 온도까지 얼지 않는 상태로 존재하는 수분을 부동수분이라 말한다. 지반에 동상현상이 일어날 때 지하수의 유입으로부터 모세관현상에 의해 올라온 부(-)의 간극수는 흙 속의 부동수막을 통로로 하여 이동하는 것으로 알려져 있다. 따라서 동결 시 부동수분을 많이 포함하고 있는 흙에서는 동상이 활발하고, 적게 포함하고 있는 흙에서는 상대적으로 동상이 작게 일어난다. 또한 부동수분이 많고 적음에 따라 동결토를 구성하는 흙 입자와 얼음의 밀착관계가 달라지므로 동결토의 강도가 달라지고, 동결토의 열전도율, 전기비저항 등이 달라진다(Ohrai, 1986).

그림 2는 동결에 의한 아이스렌즈의 변화를 나타낸 모식도로써 얼음과 토립자의 경계면에는 미동결 피막수층이 존재하고 있어 토립자가 상승하는 동안에는 항상 주위로부터 물 분자가 피막수층으로 흘러 들어온다. 토립자와 얼음사이에서 작용하는 흡착력이 피막수층의 두께를 일정한 평균치로 유지한다. 피막수가 얼면, 흡수력을 유발하여 주위의 물을 끌어들이는다. 흡수력을 일으키는 물의 빙결을 석출빙결이라하고, 보통의 물과는 성질이 다른 토립자와 얼음의 경계면에 흡착되어 있는 피막수가 동결하는 것이다. 간극수의 빙결은 단순빙결로서 흡수력을 발생시키지 않는다(일본토목공학회, 1994).

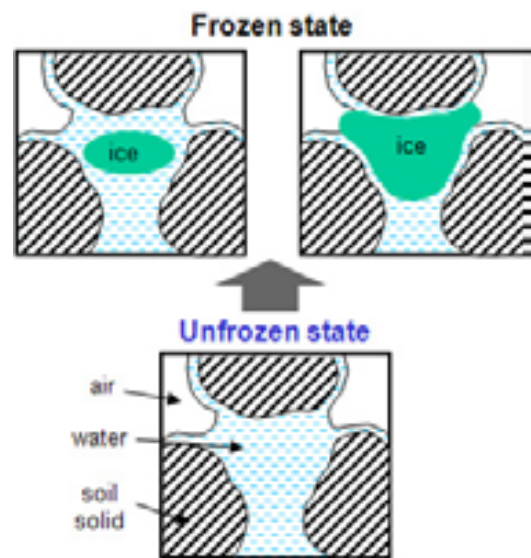


그림 2. 동결에 의한 아이스렌즈 변화 (Ohrai, 1986)

3. 동상실험 방법 및 내용

본 연구에서는 전국 도로 현장을 동결지수선도로 구분하여

서울, 원주, 대전지방국도관리청의 도로 현장에서 실제 시공하고 있는 4종류의 노상토 시료에 대하여 역학적 특성과 실내 동결 시험을 수행하였으며, 외부 동결온도의 지속 조건에 대한 시료의 온도변화, 동상팽창압, 동상팽창량, 부동수분을 측정 분석함으로써 도로 노상토의 동상특성을 규명하였다.

도로현장에서 채취한 노상토 시료에 대한 물리적인 성질을 파악하기 위하여 KS F에 명시된 표준시험방법으로 비중시험(KS F 2308), 액·소성시험(KS F 2303), 체가름 시험(KS F 2302), 다짐 시험(KS F 2301) 등을 수행하였다.

3.1. 시험 시료의 역학적 특성

현장 시료의 기본적인 역학적 특성은 표 1에 나타내었으며, 4개의 시료 모두 비중과 다짐시험을 통한 시료의 특성은 비슷하였다. 그림 3은 입도분포곡선을 나타낸 것으로서, 시료 대부분 넓은 범위의 입도분포로 구성되었고, 통일분류법으로 SP, SW로 판명되었다.

역학적 특성 시험을 위해서 시험시료는 도로 노상토 다짐 관리 시 사용되는 수정 D 다짐방법을 최대입경 19mm의 모델시

표 1. 시료의 역학적 특성

	Type-1	Type-2	Type-3	Type-4	
채취지역	서울지방 국도관리청	서울지방 국도관리청	대전지방 국도관리청	원주지방 국도관리청	
비중	2.64	2.70	2.68	2.68	
체 분 석	균등계수(Cu)	5.0	2.94	3.50	3.8
	곡률계수(Cg)	0.8	1.76	0.73	1.78
	#200체 통과율(%)	4.8	2.7	1.8	2.9
액성한계(LL)	30.64	27.3	28.7	N.P	
소성지수(PI)	N.P	1.35	N.P	N.P	
다 짐	$\gamma_{d\max}(tf/m^3)$	1.95	2.03	1.97	2.04
	$\omega_{opt}(\%)$	11.08	10.45	11.2	9.8
통일분류법(USCS)	SP	SP	SP	SW	
AASHTO 분류법	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-1-b	

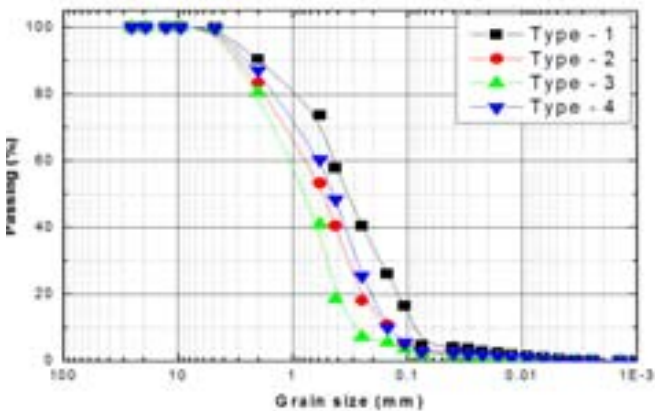


그림 3. 노상토 시료의 입도 분포 곡선

료를 사용하여 최대건조단위중량과 최적함수비를 산출 하였으며, 이를 바탕으로 한 시료 개량을 실시하였다. 일반적으로 알려져 있는 것과 같이 입도 배합이 좋은 조립토(GW, SW)가 노상토의 최적 재료이고, 입도 배합이 나쁘거나 세립토가 약간 함유한 조립토는 양호하고, 세립토는 보통으로 평가되고 있다. 그러나, 유기질 흙이나 압축성이 높은 흙은 노상토로 사용하지 않는 것이 좋다.

3.2. 동결시험장치 및 시험방법

현장 축소 및 재현하여 현장 조건에 맞게 흙의 동상성을 평가하는 방법으로 실내 동상실험에 의한 방법 ASTM D 5916-06(1996) 기준을 바탕으로 그림 4와 같이 실내동결시스템 실험 장치를 제작하여 채취된 시료의 동상 특성을 파악하였다.



그림 4. 실내동결시스템 시험 장치

동결 시험장치는 공시체 적재부, 물을 공급하는 수조부, 동상 팽창량과 동상팽창압 및 부동수분을 측정하는 계측기를 설치한 측정부로 구성되어 있다. 공시체를 적재하는 적재부에는 모두 4개의 공시체를 실험할 수 있으며, 적재부의 바닥에는 두께 10mm, 직경 100mm의 다공성 투수판을 놓는다. 측정부는 동상 팽창압 측정을 위해 로드셀(load cell)을 장착할 수 있는 거치대와 LVDT를 장착할 수 있는 거치대로 구성되며, 부동수분을 구할 수 있는 독일 IMKO사의 TDR(time domain reflectrometry) 함수량 측정기 모델인 TRIME-FM3을 사용하였다.

사용된 실내 동결 시험 시스템은 온도센서에 의해 온도를 제어하며 전기히터에 의하여 일정한 온도를 유지할 수 있게 제작하였다. 본 시험기는 온도의 범위가 -30℃~+30℃까지 설정이 가능하다. 챔버내의 시편위치에 따른 온도 차이를 줄이기 위하여 3차원 입체냉각 방식으로 구성하였다. 또한, 몰드 외벽에 일축 방향으로 동상이 진행되도록 이중보온재로 표면을 처리하였다. 또한 몰드와 시료 사이의 마찰을 최소화하기 위하여

몰드 내벽에 윤활유를 포설하였으며, 몰드 하부에 다공판과 거즈를 설치하여 실제 노상토의 모세관 현상을 재현하였다. -10℃에서도 몰드 외벽의 온도가 영상 1~3℃를 유지할 수 있도록 열선처리 하였다. LVDT를 장착한 시료에는 직경 98mm의 원형 아크릴판으로 LVDT 측정판을 만들어 시료 위에 올려놓아 최대한 적은 하중으로 동상 팽창량의 구속을 줄였으며, 시료가 팽창했을 때 가장 많은 팽창이 일어난 부위를 효과적으로 측정할 수 있게 하였다.

시료의 동결 온도는 상부, 중부, 하부로 나누어 설치한 온도측정기로 측정할 수 있다. 본 시험의 계측결과 동결시 시료의 온도 변화, 동상팽창압, 동상팽창량, 부동수분량 등의 결과값을 통하여 동결과정에서의 지반공학적 특성을 평가하였다. 실내동결시스템의 실험방법은 실제 도로 노상토의 다짐 조건인 다짐도 95%와 지하수 유입으로 인한 포화 조건을 만족시키기 위한 포화도 90%로 시료를 개량하였다. 또한 시료의 균일한 다짐과 예정된 위치에 온도센서를 설치하기 위하여 그림 5와 같은 시료 다짐기를 사용하였다. 여기서, 온도센서의 위치는 동결온도 지속에 대한 시료 내 열전달 속도를 확인하기 위하여 그림 6과 같이 시료 상부로부터 50mm, 100mm, 150mm 위치에 온도센서를 설치, 몰드의 크기는 지름이 100mm이며, 높이가 200mm로 구성하였으며 재질은 열전도가 낮은 우레탄 계열로 구성하였다.

수분 유입을 위한 저수조의 온도를 겨울철 지하수의 평균 온도인 4.0℃로 유지 시켰으며, 동결 온도의 유지는 상온에서 시작하여 동결 지속 온도인 -10℃까지 720분 동안 서서히 냉각시킨 후 -10℃ 하에서 7일간 유지한 상태에서 시료의 동결 특성을 파악하였다.



그림 5. 시료다짐기

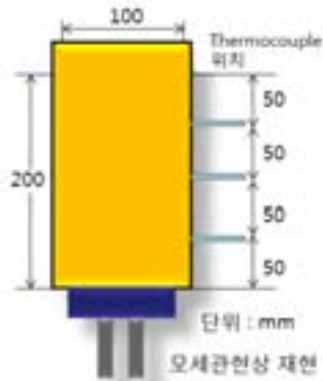
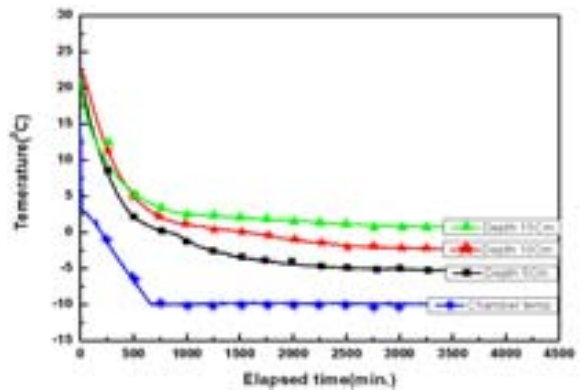


그림 6. 시험용 몰드의 구성

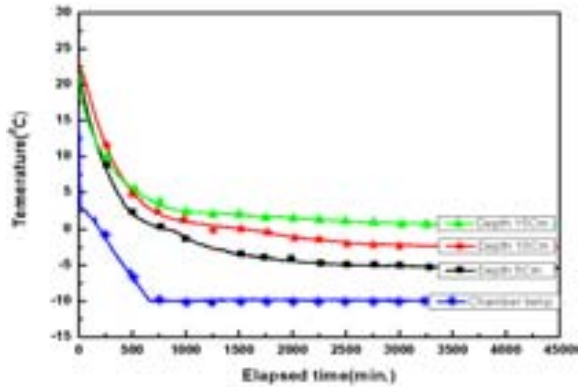
4. 실험 결과

4.1. 공시체 내부의 온도변화

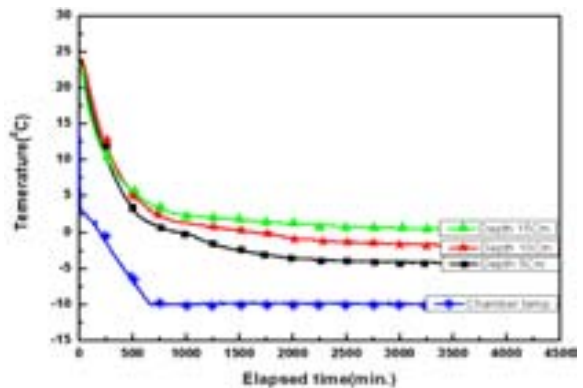
공시체 내부의 온도변화는 온도센서(thermocouple)를 이용하여 다져진 공시체 내부에 상, 중, 하로 매설하여 각 온도에서 동상이 시작될 시점부터 끝나는 시점까지 지속시간에 따른 온도를 측정하였다. 그림 7은 최적함수비 상태에서의 노상토 공시체



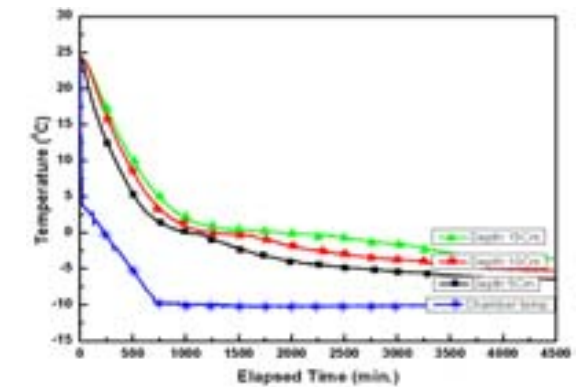
(a) Type-1



(b) Type-2



(c) Type-3



(d) Type-4

그림 7. 노상토 시료의 온도변화 특성

의 온도변화를 측정된 결과로써 온도가 하강함에 따라 공시체 내부의 온도와 대기의 온도와의 차이가 커짐을 알 수 있었다.

각각의 시료의 경우 동결온도 지속기간에는 열 전달속도는 비슷한 양상을 나타내었으며, 동결 시험기 내부 온도가 0℃ 이하의 온도로 떨어지면서 시료의 온도분포가 급격한 차이를 보이기 시작하였다. 약 3,200분 후 시료의 온도 변화가 일어나지 않으며 깊이별 지속온도는 표 2와 같다. 동결깊이는 겨울철 지하수의 평균기온 조건을 구현하기 위하여 저수조의 수온을 4.0℃로 유지하여 모관상승고로 인하여 공시체의 하부시료는 미동결토로 존재하는 것으로 판단된다.

표 2. 시료 깊이별 지속 온도 (℃)

	안정화 시각(min)	시료 깊이			동결깊이 (mm)
		50mm	100mm	150mm	
Type-1	3,150	-4.8℃	-2.7℃	0.9℃	127
Type-2	3,300	-5.0℃	-2.3℃	0.8℃	136
Type-3	3,100	-3.9℃	-1.6℃	0.6℃	138
Type-4	3,700	-4.5℃	-1.9℃	0.4℃	128

4.2. 온도변화에 따른 동상팽창압의 변화

동결시험은 우리나라의 겨울철 기온을 고려하여 3일 이상 -10℃로 온도를 유지하였다. 동상시험에 따른 동상팽창압의 측정결과, 동결온도 지속시간에 따른 동상팽창압 변화곡선은 그림 8에 나타낸 바와 같다. 시료의 온도가 0℃정도로 강하 할 때까지는 시료의 자체 수축으로 인하여 동상팽창압이 감소하는 양상을 보였으나, 이후 동상 발현 구간에서는 시료 내부에 아이스렌즈의 형성으로 발생되어지는 정상적인 동상 양상을 나타내었다. 노상토 시료가 동결되면서 도출된 최대동상팽창압은 Type-1의 경우 1.16kg/cm²이며, Type-3의 경우 0.5kg/cm²이다. 이는 Type-1 시료의 경우 200체 통과율이 4.8%로 다른 시료에 비하여 미립분 함유량이 약간 많고, 4.4절 온도변화에 따른 부동수분 결과에서와 같이 Type-1의 시료가 잠재되어져 있는 동결시 발생된 부동수분감소율이 커 상대적으로 더 큰 동상팽창압이 나타난 것으로 판단된다. 즉, 토립자에 접해있는 간극에서 수분이 많아 그 주변 간극으로부터 아이스렌즈로 진행되는 자유수가 다른 시료에 비하여 더 많아 동상팽창압이 더 큰 것으로 판단된다. 동상팽창압의 경향이 계단형식으로 일정 기간을 유지 후 짧은 시간동안 급한 경사로 상승하는 것은 시료 내부의 잠열로 인한 수분의 동결 잠복기의 현상이다.

노상토 시료의 경우 초기 지속시간이 크게 나타나고 있다. 이는 시료가 동결되면서 입자 채배열과 간극수가 얼음으로 상 변화되는 과정으로 판단된다. 즉, 포화된 노상토 시료의 초기 아이스렌즈의 성장은 다공성인 흙 체적의 간극수의 동결이 시작된다. 아이스렌즈의 성장과 전달되는 간극수내에서의 얼음

결정체가 얼음과 물 사이에서 얻어지는 에너지보다 더 크게 되는 이유는 열전달에 기인된 결과로 판단된다. 동결부분의 함수비는 증가되어 아이스렌즈로 발달하며, 미동결 부분에서의 함수비는 감소하는 결과가 나타난다. 시료가 동결되면서 미동결 시료에서는 느슨한 상태에서 조밀한 상태로의 변화됨을 의미한다.

노상토 동상팽창압의 크기는 그 위에 위치하는 도로 또는 구조물의 안정성에 문제를 일으킨다. 작게는 노상토 상부에 위치하는 구조물의 무게 중심과 힘의 분열에 문제를 일으키며, 크게는 구조물의 균열이나 파괴를 일으키기까지 한다. 토립자는 수분의 손실과 아이스렌즈의 성장으로 인하여 그 변위가 발생하고 열전달은 본질적으로 한 방향으로 전달되기 때문에 얼음 결정체는 열 손실 방향의 수평방향으로 렌즈 모양을 형성한다(신은철 등, 2009). 이는 토립자에 접해 있는 간극에 수분이 많을수록 그 주변간극으로부터 아이스렌즈로 진행되는 자유수는 더 많아질 것으로 판단된다. 그러나 비표면적을 작게 갖고 있는 조립토의 동결은 Yong과 Warkentin(1975)이 제시한 바와 같이 얼음의 초기 결정체 상태에서 물의 부피에 포함된 중력의 크기 때문에 물의 이동은 어렵고, 얼음결정체 성장에서 자체 물보다는 간극을 통한 물의 이동으로 결정되는 얼음의 성장이 더욱 쉽게 된다. 따라서 얼음으로 전달되는 에너지는 얼음생성면 전에 이동되는 수분보다 에너지가 작게 되고, 결과적으로 토립자의 간극을 통한 수분의 이동은 매우 적게 된다.

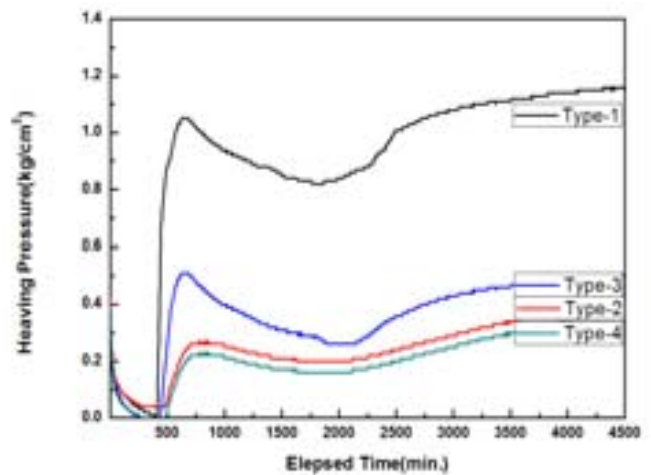


그림 8. 온도변화에 따른 노상토의 동상팽창압

4.3. 지속시간에 따른 동상팽창량

그림 9는 지속시간에 따른 동상팽창량의 변화를 나타낸 것이다. 동상의 진행이 모든 시료에서 1,000분 내에 완료되고 이 이후의 구간에서는 동상이 증가하지 않고 일정한 값으로 나타나고 있다. 즉, Akagawa 등(1985)은 이 구간에서의 동상량이 매우 낮을지라도 전체 동상 과정중 한 부분으로서 장기적인 동

상 영역으로 표현하였으며, 장기동상영역에서 발생된 동상량은 공학적 관점에서 매우 작으므로 무시할 수 있다고 제시하였다.

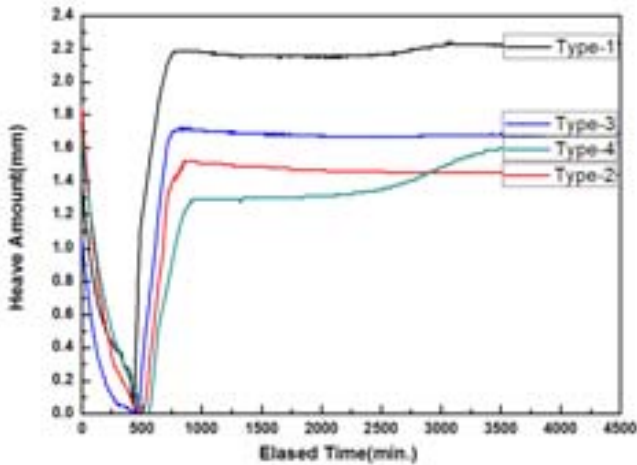


그림 9. 온도변화에 따른 노상토의 동상팽창량

노상토의 경우 동상 특성은 그림 9에 나타난 바와 같이 초기에는 동결시 상부시료의 수축으로 동상팽창량이 감소하면서, 원활한 수분공급과 함께 다시 일정한 비율로 동상팽창량이 증가하였다. 모세관 현상에 의한 자연환경의 지하수 유입으로 계속적인 물의 유입으로 부동수분을 제외한 일정한 수분의 동결로 동상이 더 크게 일어난 것으로 판단된다. 일반적인 흙의 성질은 일정한 영하의 온도에서 충분한 수분의 공급이 지속되면 동상팽창량은 점차 증가한다. 특히 0℃이하의 온도에서도 저면의 흡수에 부동한 상태의 물로 지하수가 존재하면 물은 모세관 현상에 의해 일정하게 흙의 표면을 따라 상승하여 0℃이하의 온도에 영향을 받아 상부로 유입되면서 동결을 일으킨다.

4.4. 온도변화에 따른 부동수분

동결된 시료의 부동수분량을 결정하기 위해서는 TDR 장비를 이용하여 실험을 수행하였다. TDR은 독일 IMKO 사의 TDR(Time Domain Reflectometry) 함수량 측정기 모델인 TRIME-FM을 사용하여 노상 시료의 함수비를 깊이에 따라 측정하였다. TDR의 원리는 15cm의 probe를 얇은 플라스틱 관 안으로 삽입시켜서 주변의 얼지 않은 부동 수분을 체적함수비로 측정하는 장비이다. 그림 10에 나타난 바와 같이 Type-1 현장시료 공시체 내의 하부온도가 감소함에 따라 약 -5℃까지는 시료의 함수비가 급격히 적어지나 그 이후로는 함수비의 기울기가 급격히 완만해진다. 이는 시료내의 부동수분의 변화가 거의 없다는 것을 의미한다.

즉, 얼지 않은 물인 부동수분의 현상유지라 할 수 있다. Type-1은 상온에서 28%의 함수량을 보이던 시료는 0℃이하의 온도에서 부터 동결 현상을 보인 뒤 약 25% 정도의 부동수분 감소량을 나타내었다. 이는 수분의 동결로 인하여 얼음의 상태

로 변한 것으로 보이며 이 양으로 인하여 체적 팽창을 야기한 것으로 보인다. 또한 이러한 수분의 동결로 인한 수분의 체적 팽창으로 시료의 동상팽창압이 발달하게 된 것으로 판단된다.

또한, Type-1과 Type-3을 비교하였을 경우, 동상팽창압 곡선과 마찬가지로 수분곡선 감소율이 초기단계에는 유사하다가 일정 온도 이후에는 Type-1의 감소폭이 크게 증가하는 것을 나타내고 있다. 이는 팽창압 결과에서와 같이 Type-1의 시료가 잠재되어져 있는 부동수분량이 더 많다는 의미이고, 더 큰 동상팽창압이 나타남과 일치한다.

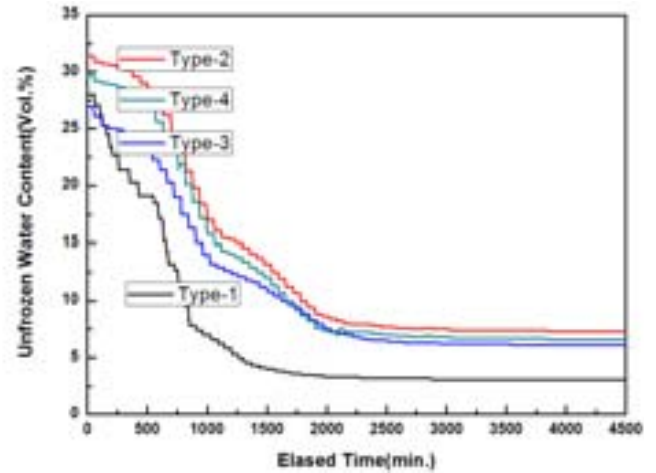


그림 10. 노상토 시료의 부동수분 곡선

즉, 흙의 동결과정에서 토립자를 둘러싼 부동수막은 수분이 동결점까지 이동하는 통로 역할을 하며 동결함으로써의 체적 팽창을 야기하므로 0℃ 이하의 온도에서 부동수분을 적게 포함하고 있는 흙에서는 동상이 활발하고, 많이 포함하고 있는 흙에서는 상대적으로 동상이 작게 일어난다. 또한 부동수분이 많고 적음에 따라 동결토를 구성하는 흡입자와 아이스렌즈의 밀착관계가 달라진다. 따라서, 동토에서의 부동수분은 매우 신중하게 취급되어야 한다.



그림 11. 동결시 아이스렌즈 형성 전경

그림 11은 동상 시험 과정중 동결에 의한 아이스렌즈 형성을 육안으로 확인한 전경으로 약 1.5mm로 측정되었다. 아이스렌즈가 성장하면 수분의 흡수를 더 많이 요구하기 때문에 열 평형 혹은 열적 비평형 상태를 이루게 된다. 이러한 과정은 간극

의 주위와 접촉면에서 토립자 표면으로 접근을 만족시키면 계속해서 진행하게 된다. 즉, 얼음 접촉면 주위에 점점 더 다다르게 되면 또 다른 얼음결정체를 형성시키게 되고, 자유수로부터 얼음결정이 형성된 후 열 평형조건이 만족되면 얼음 결정을 간극사이에 결정체의 성장으로 수분이동할 때까지 계속해서 성장하게 되는 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 도로 동상방지층의 효용성 검증 및 설치기준 확립을 위해 실내동결시스템을 활용하여 도로 노상토의 동상 특성에 대하여 고찰하였다. 즉, 서울, 대전, 원주지방국도관리청 산하 도로 건설 현장 노상토에 대한 역학적 특성과 실내 동결 시험을 수행하였으며, 외부 동결온도의 지속 조건에 대한 시료의 온도변화, 동결팽창압, 동결팽창량, 부동수분 등의 실험 결과 다음과 같이 결론을 도출하였다.

1. 실제 현장에서의 온도조건으로 설정된 동상시험조건에서 도로 노상토 시료의 경우 동결 온도의 시간이 지속되면서 시료의 온도 분포, 그리고 동상팽창압에 대한 비교 분석 결과, 시료의 온도 분포는 약 3,100분 이후로 안정화되는 양상을 보였지만 팽창압 발생량은 3,100분 이후에도 증가 및 감소하였다. 이는 3,100분 이후 시료의 온도가 동일하게 유지되는 조건하에서도 아이스렌즈부분의 증가와 지하수의 유입으로 인한 동상팽창량의 증가로 인한 것으로 판단된다.
2. 동상팽창압 실험결과, 초기 지속시간이 나타나는 것은 시료가 동결되면서 입자 재배열과 간극수가 얼음으로 상변화되는 과정으로 판단된다. 즉, 포화된 노상토 시료에 동결된 부분의 함수비는 증가되어 아이스렌즈로 발달하며, 미동결 부분에서의 함수비는 감소하는 결과가 나타난다. 시료가 동결되면서 비동결 시료에서는 느슨한 상태에서 조밀한 상태로의 변화됨을 의미한다.
3. 동상팽창량 변화를 살펴보면, 초기에는 동결시 상부시료의 수축으로 동상팽창량이 감소하면서, 원활한 수분공급과 함께 다시 일정한 비율로 동상팽창량이 증가하였다. 또한, 동상의 진행이 모든 시료에서 정상적인 동상발현 구간 이후에는 동상이 증가하지 않고 일정한 값으로 나타나고 있다. 즉, Akagawa 등(1985)은 이 구간에서의 동상량이 매우 낮을 지라도 전체 동상 과정중 한 부분으로서 장기적인 동상영역으로 표현하였으며, 장기동상영역에서 발생된 동상량은 공학적 관점에서 매우 작으므로 무시할 수 있다고 제시하였다.
4. 온도변화에 따른 부동수분 측정결과, Type-1은 상온에서 28%의 함수량을 보이던 시료는 0℃이하의 온도에서 부터 동결 현상을 보인 뒤 약 25% 정도의 부동수분 감소량을 나

타내었다. 이는 수분의 동결로 인하여 얼음의 상태로 변한 것으로 보이며 이 양으로 인하여 체적 팽창을 야기한 것으로 보인다. 동상팽창압 곡선과 마찬가지로 수분곡선 감소율이 초기단계에는 유사하다가 일정 온도 이후에는 Type-1의 감소폭이 크게 증가하는 것을 나타내고 있다. 이는 팽창압 결과에서와 같이 Type-1의 시료가 잠재되어져 있는 부동수분량이 더 많다는 의미이고, 더 큰 동상팽창압이 나타남과 일치한다.

5. 동결에 의한 아이스렌즈 형성을 육안으로 확인한 전경(그림 11)로 약 1.5mm로 측정되었다. 아이스렌즈가 성장하면 수분의 흡수를 더 많이 요구하기 때문에 열 평형 혹은 열적 비평형 상태를 이루게 된다. 즉, 얼음 접촉면 주위에 점점 더 다다르게 되면 또 다른 얼음결정체를 형성시키게 되고, 자유수로부터 얼음결정이 형성된 후 열 평형조건이 만족되면 얼음 결정을 간극사이에 결정체의 성장으로 수분이동할 때까지 계속해서 성장하게 되는 것이다.

감사의 글

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

참고 문헌

- 권기철(2002). "노상토의 종류에 따른 동결·융해 특성", *한국도로포장공학회지*, 제 4권, 제 1호, pp. 33-39.
- 김영진, 유 준, 김현민(1999). *동결심도 및 포장체 온도분포조사*, 한국건설기술연구원, pp. 5-25.
- 남영국, 조규태, 진정훈(2002). "도로포장의 동상방지층 실효성 검증을 위한 현장계측 및 실내시험 연구", *대한토목학회논문집*, 제 22권, 제5D호, pp. 913-921.
- 신은철, 박정준(2003). "동결토의 동상팽창압 특성에 관한 실험적 연구", *한국지반공학학회논문집*, 제19권, 제2호, pp. 65-74.
- 신은철, 강정구, 박정준(2009). "지반동결에 따른 지하구조물의 열적 안정성", *한국지반공학학회논문집*, 제25권, 제3호, pp. 65-74.
- 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.
- America Society for Testing and Material(1996). "Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils", *Annual Book of ASTM Standard Designation : D 5916-06*, pp. 823-834.
- Anderson, D. M. and Mogenstern, N. R.(1973), "Physics, chemistry, and mechanics of frozen ground", *North American Contribution to the Second International Conference on Permafrost*, U. S. National Academy of Science, pp. 257-288.
- Andersland, O. B. and Ladanyi, B.(1994). *An Introduction to Frozen*

- Ground Engineering*, Chapman & Hall.
- Dillon, H.B., and Andersland, O. B.(1966). "Predicting unfrozen water contents in frozen soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 3(2), pp. 53-60.
- Hoekstra, P., Chamberlain, E. and Frate, A.(1965). *Frost heaving pressures*, Cold Region Research Engineering Laboratory, Report 176.
- McGaw, R. and Penner, E.(1972). *Frost heaving versus depth to water table*, Highway Res. Record, 393, pp. 45-55.
- 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.
- 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.
- Olhoef, F. R.(1977). "Electric Prosperities of Clay Permafrost", *Canadian Journal*, Earth Science Vol. 14, pp. 16-21.
- Takagi, S.(1965). *Principles of frost heaving*, US Army CRREL Res. Rep. 140: 24 p.
- Takagi, S.(1980). *The adsorption force theory of frost heaving*, Cold Region Science Technology. 3, pp.57-81.
- Yong, R. N. and Warkentin, B. P.(1975). *Soil properties and behaviour*, Elsevier Scientific Publishing Company, pp. 383-419.
- 日本土質工學會(1994), "土の凍結-その理論と實際-", 土質工學會編, 第一改訂版.

접 수 일 : 2010. 1. 8
 심 사 일 : 2010. 1. 8
 심사완료일 : 2010. 4. 15