

현장도로 모형실험을 이용한 포장구성층의 동결 특성 분석

The Freezing Characteristics of Pavement Layer Using the Field Road Model Test

신 은 철¹ Shin, Eun-Chul
류 병 현² Ryu, Byung-Hyun
박 정 준³ Park, Jeong-Jun

Abstract

Korea is considered to be a seasonal frozen soil area that thaws in the spring, and freezes in winter. In the current design codes for anti-freezing layer, the thickness of anti-freezing layer is calculated by the depth frozen due to the temperature condition. Therefore, there is a tendency of over-design and applying uniform thickness without the consideration of thermal stability, bearing capacity and frost susceptibility of materials. So, it is essential to study the structural appropriateness of pavement layer and bearing capacity besides the seasonal and mechanical properties of pavement materials to take an appropriate and reasonable design of the road structure. In this paper, the evaluation of frost susceptibility on subgrade, anti-freezing layer, subbase was conducted by means of the mechanical characteristics and model experiment. The temperature, heaving amount, unfrozen water contents and freezing depth of soil samples, the subgrade, anti-freezing layer, subbase soils of road construction site were measured to determine the frost susceptibility.

요 지

지리학적 특성으로 국내는 계절 동토지역으로 겨울철에는 동상현상이 발생하고 봄철에는 지반이 해빙된다. 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 온도조건에 따른 동결깊이에 따라 일률적으로 결정되고 있다. 이러한 동결깊이를 포장구조설계에 적용함으로써 포장의 과다설계 우려가 있다. 따라서 본 논문에서는 노상층, 동상방지층, 보조기층의 역학적 실험을 실시하여 동상민감성을 판단하고 실규모 현장도로 모형축소 실험을 실시하였다. 동상민감성을 판단하기 위하여 토층별 온도, 동결팽창량, 부동수분 및 동결깊이를 측정하였다.

Keywords : Anti-freezing layer, Field road model test, Frost-heaving, Frost susceptibility soil, Unfrozen water contents

1. 서 론

국내 기후조건은 지리적으로 북반구의 극동지역에

위치하여 온대성기후의 특성으로 4계절이 뚜렷하고, 겨울에는 시베리아기단의 영향으로 한랭 건조한 대륙성 고기압의 영향을 받아 춥고 건조하다. 이에 1월 평균

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

2 정희원, 인천대학교 건설환경공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Const. & Environ. Engrg., Univ. of Incheon)

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

기온이 $-6\sim-7^{\circ}\text{C}$ 의 영하의 온도로 낮아져 지반 동결시에 수분이동으로 동상현상이 발생하여 도로의 불균형 동결 팽창을 초래하며, 결국 도로 포장체를 파손시킨다. 즉, 겨울철 도로 동상 피해에 대하여 동상방지층을 설계에 반영하는 등의 안전대책을 시공현장에 적용하고 있다. 최근 지구 온난화 현상 등으로 국내 겨울철 온도가 증가하는 현상을 보여 도로 동상방지층 설계 기준에 대한 효용성 문제가 제기되고 있다. 따라서 도로포장의 하부구조는 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 과다설계 우려가 있다.

포장공용성에 영향을 미치는 중요한 요소들 중의 하나는 온도변화에 의한 동결과 강우를 포함하는 기후 조건이다. 포장체에서 동결융해작용은 노상의 동결에 의한 동상(frost heaving)과 융해(thawing)에 의한 노상의 역학적 특성치 저하로 구분할 수 있다. 동결 과정의 체적팽창은 포장체 표면의 거칠기를 증가시키고, 융해과정의 노상의 역학적 특성치 감소는 포장체의 구조적 능력을 감소시켜 도로포장 파손의 원인으로 작용한다(신은철 등, 2009). 따라서, 본 연구에서는 겨울철 추위에 의한 도로포장구조의 동결발생을 억제하여 융해에 따른 도로의 지지력이 약화되는 현상을 구명하고자 국내 현장의 도로 포장구조를 모사하여 축소 모형실험을 수행하였다. 즉, 도로 포장체의 동상 피해에 따른 동상 특성을 파악하기 위하여 실규모 현장도로 모형축소 시스템을 구축하여 온도 분포 변화 및 동결특성을 도출하였다. 도로의 동상피해 방지를 위해 매설하는 동상방지층 유무와 동상방지층과 보조기층의 유무에 따른 각 층별 온도 분포 변화와 동상 현상의 주요 요소인 수분의 거동에 따른 부동수분의 측정을 통하여 포장구성층의 동결 특성을 분석하였다.

2. 동결 이론

동결토는 토립자, 얼음, 물, 공기의 4상 구조로 구성되어 있으며, 도로의 동상에 영향을 미치는 주된 요소는 토질, 수분, 온도의 3가지 조건으로 구분할 수 있다. 즉,

이러한 3가지 요인이 동시에 충족될 때 도로 포장을 구성하는 노상층 간극수의 응결과 함께 체적 팽창의 결과로 포장체가 용기하는 동상현상이 발생한다. 토립자의 표면에 흡착된 물 즉, 부동수분은 0°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(신은철 등, 2003). 따라서 동결 시 흙은 아직 동결되지 않은 부분으로부터 물을 흡수하게 되는데 동결의 진행과 물의 공급이 원활하게 이루어지면 체적 팽창이 일어난다(Taber, 1929). 즉, 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.

그림 1은 도로포장의 노상토에 결빙이 생겨 동결이 발생하는 개념도를 나타내고 있다. 물은 얼면 단지 9%의 체적팽창을 일으키지만 간극수가 동결할 때 하부로부터 모관수가 계속 공급되면 그 체적이 50%이상 팽창하기도 한다. 이로 인해 도로 포장이 파손되기도 하고 철도, 매설관, 주택 등이 용기하기도 하는 피해를 일으킨다(남영국 등, 2002).

흙의 종류에 따른 동상성을 판정하기 위하여 입경에 따른 동상실험 결과, 0.02mm 보다 작은 입경을 가진 흙의 함량이 중량비로 전체 흙의 3%가 넘으면 포장설계를 목적으로 하는 경우 그 흙은 동결가능한 흙으로 규정한다. 그러나 입경이 균등한 모래질의 흙이 0.02mm 이하의 입경을 가진 흙에 함량이 10%가 넘어도 동상이 일어나지 않을 수 있다고 제시하였다(Linell and Kaplar, 1966). 흙이 아이스렌즈를 형성하는 과정을 미시적으로 보면 대단히 복잡하다. 동결토에서 수분의 이동은 지반내의 온도, 지반의 열전도율, 융해잠열, 흙입자의 피막수층

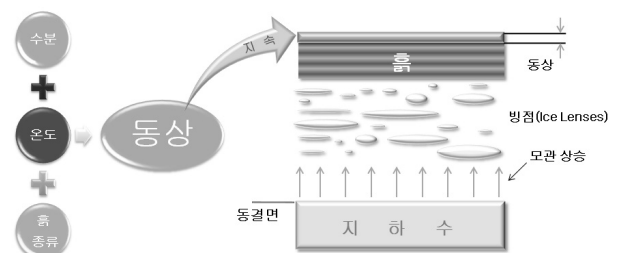


그림 1. 지반의 동결 원리

등 열역학적인 인자들에 의해 결정되기 때문이다. 이러한 모든 인자들을 망라하여 동결이론을 정립하려는 시도는 오래 전부터 진행되었고, 이 이론을 바탕으로 하여 동결깊이를 추정하는 공식들도 여러 학자들에 의해 발표되었다(Takagi, 1965; 1980; Miller et al., 1960).

3. 도로 모형실험 내용 및 방법

도로 현장의 동상 메커니즘을 규명하기 위해 현장계측과 실내 동상 모사 시험을 통한 도로 구성 재료들의 동상 특성을 파악하는 것은 필수적이다. 따라서 현장 모형 도로 축소 실험에서는 실제 현장계측중인 도로 현장과 동일한 조건으로 모형 도로를 구성하여 제한된 조건 하에서 겨울철 도로 하부 지지층의 특성 변화를 계측 및 분석 하였다. 이를 위하여 동결 발생을 위한 다양한 현장의 조건 중 지하수위를 일정하게 유지하였다. 또한 일정하게 유지된 지하수위 조건 하에서 상부층의 강우와 강설에 의한 수분 공급의 조건을 허용함으로써 보다 현장 조건에 맞는 실험 조건을 구성하였다.

실규모 현장도로 모형축소 실험은 학교 부지 내에 구축하였고, 시험부지의 기후는 해양성 기후로서 연 평균 기온은 12.3℃, 겨울철 최저기온은 -12℃이다. 또한 동결지수는 355℃일이며 시험현장이 바닷가에 위치하여 해양성 기후의 영향을 받고 있다.

동상방지층 설치 유무와 그 두께에 따른 동상 거동 평가와 지하수위 유지 및 노상토의 함수 상태를 유지한 조건에서의 부동수분 변화량, 대기온도에 따른 각 층별 온도 변화와 침하량을 계측하기 위하여 그림 2와 같이 Section 1, 2, 3으로 구분하여 3m(B)×6m(L)×3m(H) 크기의 모형 도로를 구성하였다.

Section 1은 순수한 노상토 조건을 구현한 것이다. 하부 70cm의 노체를 형성하고 100cm의 노상토를 포설하였다. 노상토의 포화 조건을 유지하기 위하여 노상토 상부로부터 45cm 깊이에 급배수관을 설치하였다. 이 급배수관은 외부로부터 수분의 주입 및 배출을 할 수 있도록 설계되었다. 또한 외부 온도로 인한 동상의 영향을 판별하기 위하여 부동수분을 측정하기 위한 TDR관, 동결심도계, 각 층별 온도측정센서 및 변위계를 설치하였다. 또한 각각의 포장체에 동결심도계를 설치하여 온도분포와 실측된 동결심도를 비교하였다. 동결 과정에서 노상층과 노체층의 환경변화에 따른 침하를 예상하여 각 층별 지중 침하계를 설치하였다.

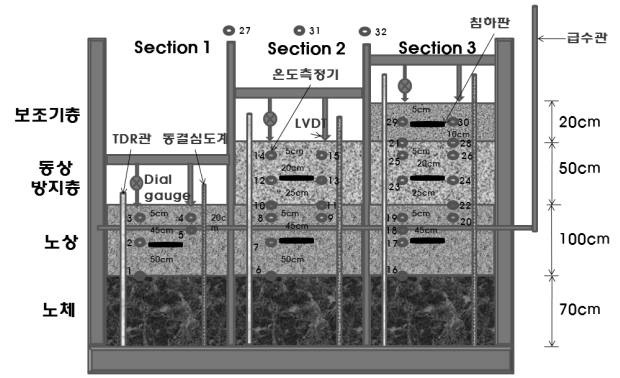


그림 2. 모형 도로 토조 단면 구성 현황

Section 2는 Section 1과 동일한 노체와 노상토층 상부에 동상방지층 50cm를 포설한 조건을 구현한 것이다. 본 단면 구성에서도 Section 1과 동일하게 각 깊이별 온도측정센서를 설치하여 외부 온도에 의한 단면 내 온도 변화를 측정하였다. 이러한 단면 구성을 통하여 Section 1과 Section 2로부터 도출된 결과값들의 비교 분석을 통하여 동결온도 조건하에서의 동상방지층의 영향과 동상 거동을 평가하였다.

Section 3의 구성은 Section 2와 동일한 하부 구성층 상부에 20cm의 추가 보조기층을 설치하였다. 이는 실제 도로 단면의 구성을 모사함으로써 보다 실제 도로의 조건에 유사한 실험 조건을 구현하였다. 그러나 실제 도로에서는 포장층의 영향으로 보조기층과 동상방지층 그리고 노상에 상부로부터 수분의 유입 가능성이 적다. 즉, 기존 지하수위 변화에 따른 모형실험 결과(남영국 등, 2002)를 바탕으로 상부에서의 열흐름과 수분 조건을 구현하여 발생할 수 있는 영향인자를 고려 할 수 있도록 구축하였다.

실규모 현장도로 모형축소 실험에 사용된 시료의 기본적인 역학 특성은 표 1에 나타내었으며, 4개의 시료 모두 도로 현장에 적합한 시료를 사용하였다.

그림 3은 현장모형 도로 축소 실험의 구성을 위한 부지 조성 과정을 나타낸 것이다. 모형토조를 구축하기 위하여 계획한 시공 위치를 중장비를 이용하여 굴착하였다. 도로 축소 실험시 토조의 크기와 토조 매설 후 급수 시스템 및 부속설비 구축을 위한 작업 공간 확보 등을 고려하여 굴착 너비를 확보하였다. 지반 굴착 후 지반 정리 및 다짐을 통하여 시험용 토조에 예정위치에 설치될 수 있도록 조정하였다.

또한, 그림 4는 부지조성 완성 후 동결특성 측정을 위한 계측장치를 나타낸 것이다. 실내 실험을 통하여 결정

표 1. 현장 모형 도로 단면 구성 시료의 역학적 특성

구분	노체	노상	구분	동상방지층	보조기층
비중	2.73	2.64	비중	2.72	2.73
균등계수(Cu)	4.29	5.0	0.08mm 통과율	3.5	3.3
곡률계수(Cg)	0.46	0.8			
#200체 통과율	18.3	4.8	흡수율(%)	0.71	0.66
액성한계(LL, %)	NP	30.6	E- 다짐 γ_{dmax} (tf/m ³) w_{opt} (%)	2.26 5.8	2.26 5.7
소성지수(PI)	NP	NP			
D- 다짐 γ_{dmax} (tf/m ³) w_{opt} (%)	1.94 11	1.90 12	모래당량(%)	66	68
통일분류법	SM	SP			



그림 3. 현장도로 모형실험 부지조성



그림 4. 현장도로 모형실험 계측

된 노체, 노상층, 동상방지층 그리고 보조기층 재료의 역학적 특성을 고려하여 시료를 층별 다짐과 동시에 현장 들밀도시험을 실시하여 다짐도를 관리하였다. 여기

서, 적용된 다짐도의 기준은 실제 도로 노상토의 다짐기준인 90% 이상으로 규정하여 각 층의 상대다짐도를 90% 이상으로 하였다. 실제 도로에서 겨울기간 동안 지하수

의 유입으로 인하여 동상의 최적조건을 구현해주는 상황을 모사하고자 배수설비와 외부급수설비를 설치하여 정기적으로 노상층에 수분을 공급하였다.

실제 도로 현장을 모사하여 제한된 조건에서의 실험 결과를 도출하기 위하여 대기 온도 변화 특성 및 지반 거동 특성을 파악하는 과정의 실험계획을 수립하였다. 일반적으로, 시료의 온도가 0℃ 이하로 내려간 시점부터 간극의 수분이 동결되며 점차 아이스렌즈를 형성해 가는 과정으로 동결이 시작된다. 또한 대기온도의 변화에 따라 실제 열전도도가 낮은 흙에서는 약간의 시간차를 두고 온도 변화가 나타난다. 이러한 실험용 토조 내의 동상 거동을 판단하기 위하여 온도계측센서(thermocouple) 총 33개를 노체, 노상층, 동상방지층 그리고 보조기층의 중간위치와 각 층의 경계 지점에 설치하여 토조 내의 온도변화를 측정하였다. 온도계측센서는 -50℃ ~ 1300℃ 범위까지 측정이 가능한 K 형식을 사용하였다. 외부 온도 변화에 의한 각 층별 부동수분 변화와 지표 침하 및 팽창 거동 그리고 전체 토층의 침하량을 측정하였다.

현장도로 모형토조를 구축하여 2009년 12월부터 2010년 3월 까지 계측을 수행하였으며 강우와 강설에 의한 단면 상부의 수분공급이 수행되었다. 즉, 도로의 포장체가 겨울철 기온변화에 따른 동상특성을 분석하기 위하여 동상팽창량, 동결깊이, 각층별 온도 계측을 실시하였다.

4. 실험 결과 분석

4.1 포장구성층의 온도 분포 분석

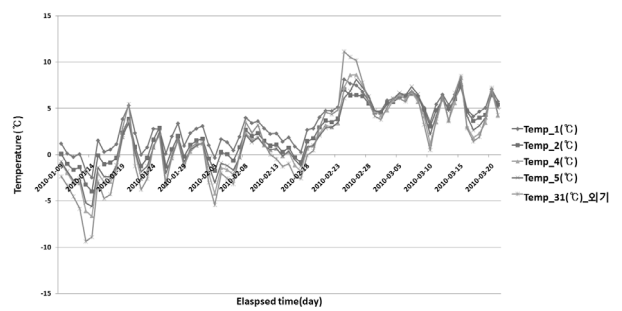
도로의 포장 구성층을 모사한 도로모형 축소 실험에서 도로 동상방지층의 유·무, 보조기층의 유·무에 따른 겨울철 영하 온도에 따른 동결 특성 분석을 위한 시험을 하였다. 변위계와 동결심도계를 이용하여 각 층의 동결 깊이에 따른 온도 분포를 측정하였다.

그림 5는 각 Section의 깊이별 온도의 변화를 나타낸 것이다. 국내 기후 조건에서 가장 추운 1월부터 2월까지 두 달 동안의 대기 온도 변화에 따른 포장구성층의 온도 변화를 확인할 수 있다. 모형 도로 외부에 온도측정기를 이용하여 현장의 대기 온도를 측정하였으며, 신뢰성을 높이기 위해 기상청의 기후 변화 데이터를 확보하여 비교 하였다. 그림 5에서부터 그림 7에 나타낸 범례는 그림 2에서와 같이 토조 내의 온도계측센서(thermocouple)

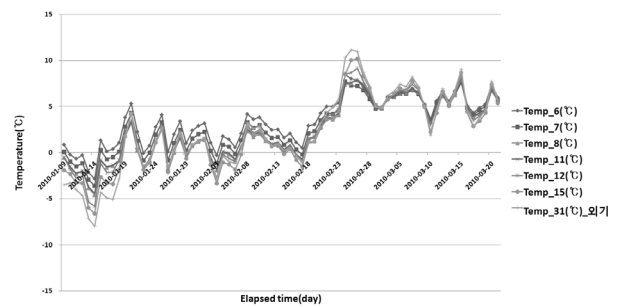
를 노체, 노상층, 동상방지층, 보조기층에 각각 설치하여 표시한 것이다. 모형 도로 주변의 대기온도는 1월 평균 -1.94℃, 기상청의 계측온도는 -2.14℃를 나타내었다. 또한, 1월 최고 기온은 5.48℃, 1월 최저 기온은 -9.36℃의 값을 나타내었다.

그림 6은 도로의 포장 방법에 따른 차이를 나타낸 것이다. 그 중 노상층 상·중·하에 따른 온도의 변화를 살펴 볼 수 있다. 즉, 대기 온도에 가장 영향을 받을 노상층 상부의 온도변화를 관찰할 때 보조기층과 동상방지층을 매설하지 않은 Section 1이 최저온도 -6.63℃로 가장 낮은 온도를 나타냈으며, 동상 피해를 줄이고자 동상방지층만을 매설한 Section 2는 최저온도 -4.60℃, 동상 피해를 줄이고자 Section 2에 보조기층까지 매설한 Section 3은 최저온도 -3.60℃의 온도 분포를 나타내었다.

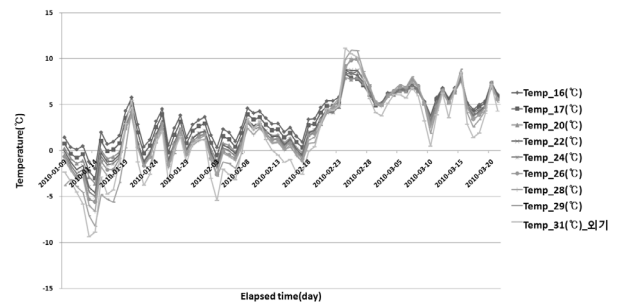
그림 7은 동상방지층 상·중·하부 위치에 따른 온도



(a) Section 1 단면

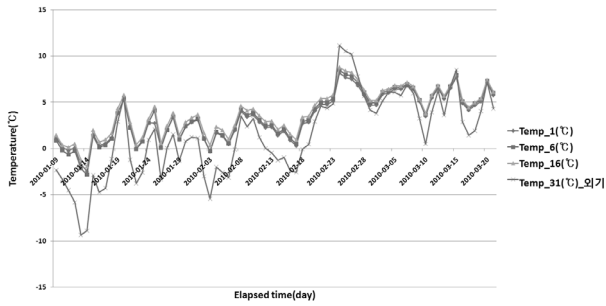


(b) Section 2 단면

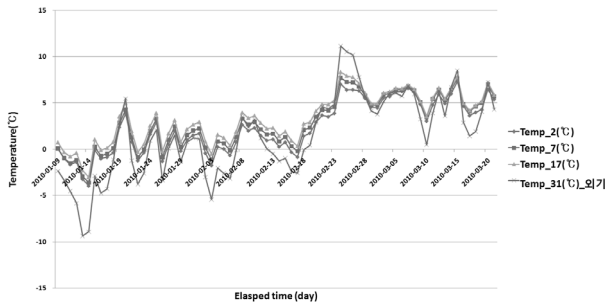


(c) Section 3 단면

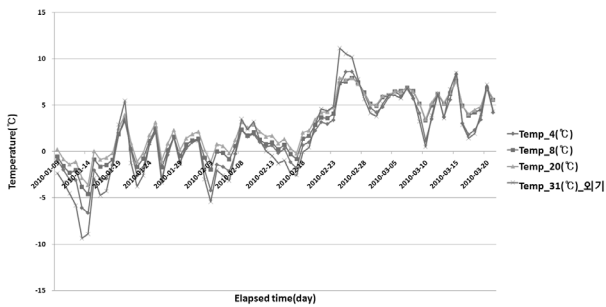
그림 5. 각 단면별 층별 온도 변화



(a) Section 1 단면

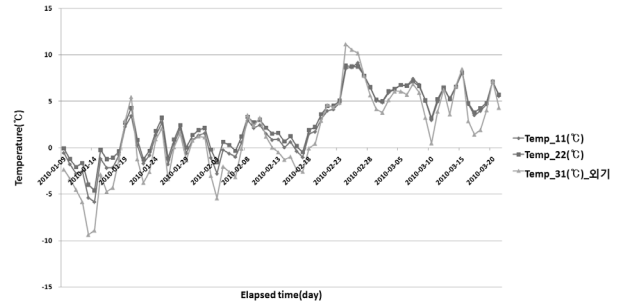


(b) Section 2 단면

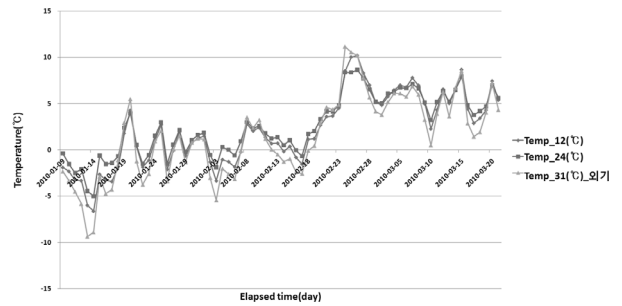


(c) Section 3 단면

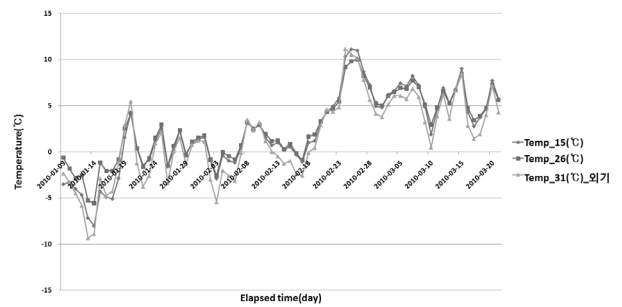
그림 6. 각 단면별 노상층 하부온도 분포



(a) 동상방지층 하부층 온도



(b) 동상방지층 중앙부층 온도



(c) 동상방지층 상부층 온도

그림 7. 동상방지층 내 온도 변화

의 변화를 나타낸 것이다. 대기 온도에 가장 영향을 받은 동상방지층 상부의 온도변화를 관찰할 때 보조기층을 매설하지 않은 Section 2가 최저온도 -8.01°C 로 가장 낮은 온도를 나타냈으며, 동상 피해를 줄이고자 보조기층까지 매설한 Section 3은 최저온도 -5.56°C 의 온도를 나타내었다. 지중의 온도는 대기온도의 영향에 따라 온도가 점진적으로 낮아졌으며 지표에 가까울수록 대기온도의 영향으로 온도가 낮게 관측되었다.

노상층이 동결되기 위해서는 영하온도의 강도와 지속시간 등의 영향이 있지만, 노상층이 0°C 를 나타낸다는 것은 그 지점에서 동결이 일어날 가능성이 있다는 것이고, 그 이상에서는 동결 발생 가능성이 전혀 없다는 것을 의미한다. 따라서 동결 발생이 예측되는 0°C 를 기준으로 동결이 가능한 시점으로 구분하였다(김부일 등, 2009).

온도 계측기가 위치한 층별 온도 분포 자료로 동상방지층의 유·무에 따른 온도 변화를 관찰한 결과 동상방지층 포장 상부층은 대기의 온도 변화에 따라 민감한 온도 변화 반응을 보이는 반면 노상층은 상대적으로 온도변화의 변화의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. Section 2와 Section 3에서와 같이 동상방지층 및 보조기층의 구성 재료는 자갈질 흙으로 구성되어 있어 노상층보다 대기의 온도변화에 비하여 급격한 온도변화를 보이며 이는 부동수가 집중적으로 분포된 노상층 상부에 존재하여 수분의 영향으로 인한 동결현상이 큰 것으로 보인다. 자갈층인 보조기층 및 동상방지층의 경우 투수계수가 큰 포장층으로 구성되어 있어 수분 조건 및 모세관현상으로 인한 동상 현상이 적은 것으로 판단된다.

4.2 포장구성층의 동상 팽창량 분석

Section 1의 경우 노체층과 노상토층으로 구성되어 있으며 일반적인 도로 노상토의 경우 모세관 현상에 의한 자연환경의 지하수 유입으로 지속적인 물의 유입으로 부동수분을 제외한 일정한 수분의 동결로 동상이 더 크게 일어난 것으로 보인다. 그림 8에 나타낸 바와 같이 Section 1의 경우 2010년 2월 8일 6.7mm의 팽창량을 보였으며 2010년 3월 2일에 동결된 노상층이 모두 용해되었다. Section 2의 경우 노체와 노상토, 보조기층 순으로 구성되어 있으며 2010년 2월 8일 3.2mm의 팽창량을 나타내었다. Section 3의 경우 노체층과 노상토층, 보조기층, 동상방지층 순으로 구성되어 있으며 2010년 2월 8일 1.8mm의 팽창량을 나타내었다.

Section 2와 Section 3은 자갈층으로 포설되어 있어 노상토로부터의 충분한 수분이 모세관현상에 의하여 자갈층까지 상승하지 않으며 겨울철 강우와 강설로 인하여 포장층 표면에서의 수분의 동결로 여겨진다. 일반적인 흙의 성질은 일정한 영하의 온도에서 충분한 수분의 공급이 지속되면 동상량은 점점 커진다. 특히 영하의 온도에서도 저면의 흡수에 부동한 상태의 물로 지하수가 존재하면 물은 모세관 현상에 따라 일정하게 흙의 표면을 따라 상승하여 영하의 온도에 영향을 받는 상부로 유입되면 동결을 일으킨다.

흙의 공극 내 수분이 어는 동상이 발생되면 공극의 부피 팽창으로 인하여 흙은 팽창하게 되며 그 양은 영하의 온도 지속 조건하에서 점차 증가하게 된다. 포장체의 노상토가 동상의 피해를 입은 경우, 자체의 부피가 팽창하여 상부 구조물 및 포장체의 표면에 균열을 일으키거나 파괴를 일으킨다. 이러한 도로 포장체의 동상 메커니즘으로 인하여 도로의 수명이 단축되고 있으며 이러한 문제에 대한 명확한 답을 제시해야 할 것으로 판단된다.

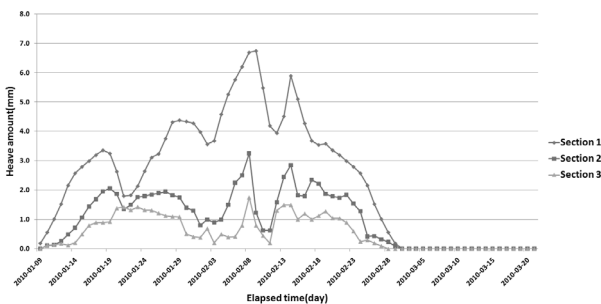
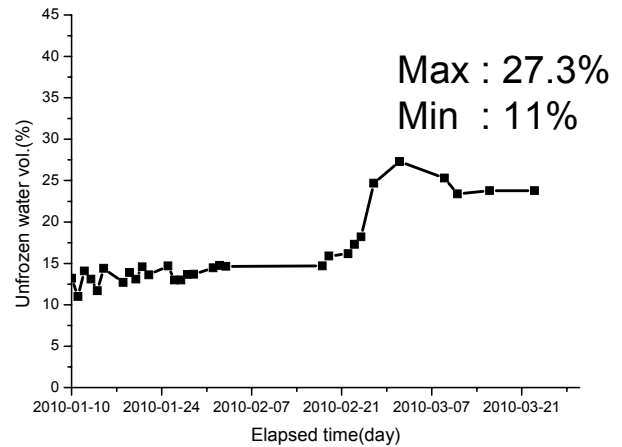


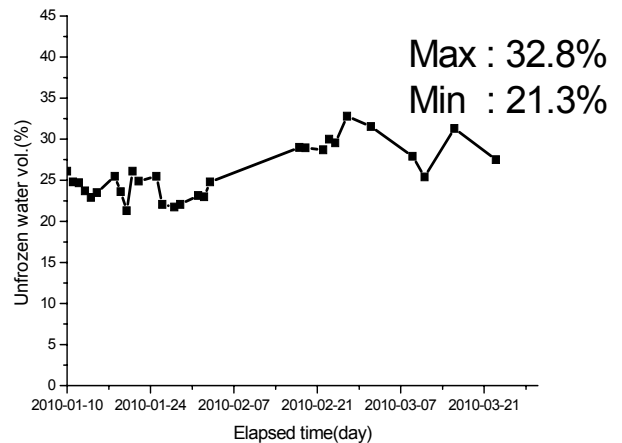
그림 8. Section별 동상 팽창량 변화

4.3 포장구성층의 부동수분 분포

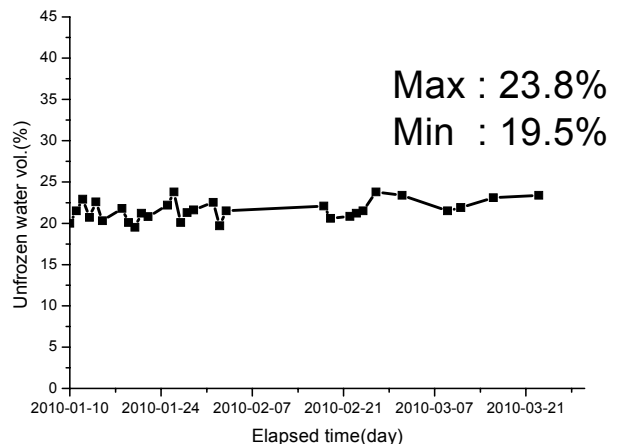
동결된 시료의 부동수분량을 결정하기 위해서는 TDR (time domain reflectometry)장비를 이용하여 실험을 수행하였다. TDR 장비는 독일의 IMKO사 제품(Trime FM-



(a) Section 1 노상토층

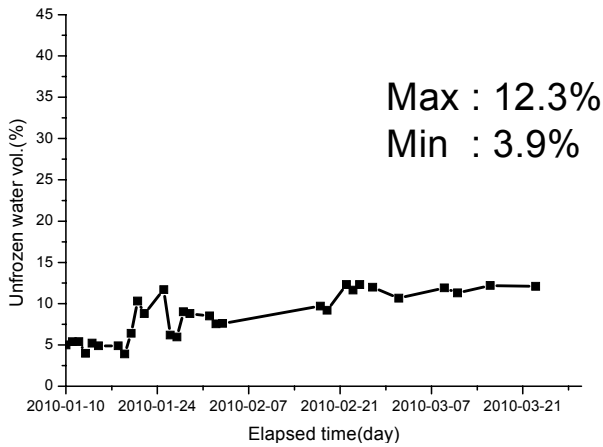


(b) Section 2 노상토층



(c) Section 3 노상토층

그림 9. 노상토층내 부동수분 변화



(a) Section 2 동상방지층

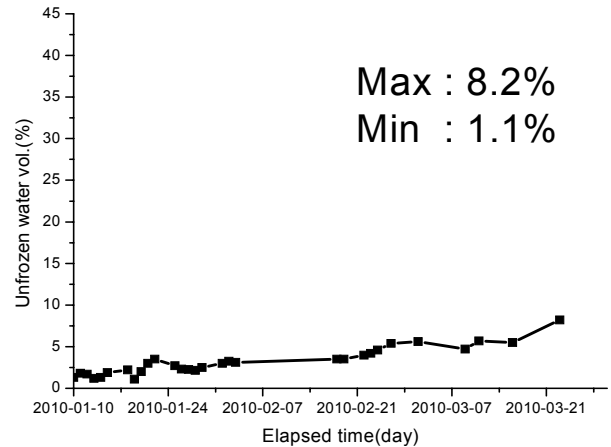
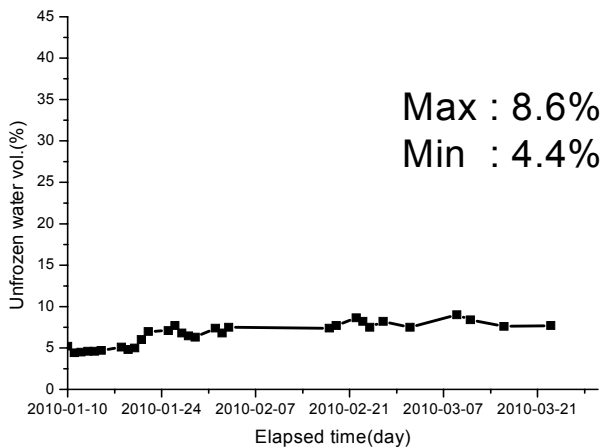


그림 11. Section 3 보조기층 내 부동수분 변화



(b) Section 3 동상방지층

그림 10. 동상방지층 내 부동수분 변화

동상방지층을 포설한 Section 2의 노상층 부동수분은 최대 32.8%, 최소 21.3%, 동상방지층과 보조기층을 매설한 Section 3의 노상층 부동수분은 최대 23.8%, 최소 19.5%의 값이 도출되었다. 또한 Section 2의 동상방지층의 부동수분은 최대 12.3%, 최소 3.9%, 보조기층을 포설한 Section 3의 동상방지층 부동수분은 최대 8.6%, 최소 4.4%의 값이 나타났으며, Section 3의 보조기층 내 부동수분은 최대 8.2%, 최소 1.1%의 값으로 도출되었다.

흙의 동결과정에서 토립자를 둘러싼 부동수막은 수분이 동결점까지 이동하는 통로 역할을 하며 동결함으로써의 체적 팽창을 야기하므로 부동수분이 많은 흙일수록 동상 팽창압도 커지게 되는 것이다(Yong et al., 1975). 따라서, 동토에서의 부동수분은 매우 신중하게 취급되어야 할 것이다. 즉, 겨울철 도로, 철도, 비행장 활주로 등의 기초지반에 외부의 찬 기온이 침투하여 발생하는 동상현상을 정확히 이해하여 국내 기후 조건, 지반 조건에 적합한 동결깊이 산정식을 개발, 도로 동상방지층의 두께를 최적화하여 적절한 공사비의 집행과 도로 시설의 동파에 의한 보호를 통해 내구성을 향상 시킬 필요성이 있다.

version P3)이고, 측정용 probe를 동토 속에 넣고, 시험기 내에서 전자파를 발생시키면 전자파는 probe의 길이를 따라 왕복하면서 전자파의 속도를 계산함으로써 흙의 유전율 상수를 측정하게 된다. 동토를 구성하는 요소인 토립자, 얼음, 간극수, 공기 등의 유전율이 서로 다른 원리를 이용하여 동토의 체적함수비(부동수분량)를 환산해 낸다. 부동수분의 값은 동일온도에서 10회 측정하여 평균값을 취한다.

부동수분은 동상량에 가장 큰 변화매체인 물의 양을 측정하는 것으로 이 부동수분의 양을 통하여 동상량과 동상 팽창압에 대하여 상관관계를 통한 그 값을 예측할 수 있다(신은철 등, 2009).

그림 9에서 그림 11은 각각 노상도, 동상방지층, 보조기층내의 부동수분 변화를 나타낸 것으로서 부동수분을 측정하기 위한 TDR 관입 관에 TDR Probe를 삽입하여 결과를 도출하였다. 동상방지층을 포설하지 않은 Section 1의 노상층의 부동수분은 최대 27.3% 최소 11%,

4.4 동결심도 변화

메틸렌블루(Methylene Blue) 동결심도계는 직경이 25.4 mm의 아크릴 외관, 직경 15mm의 아크릴 내관, 직경 10mm의 고무튜브로 구성된다. 아크릴 외관 속에 설치하는 아크릴 내관은 청색의 메틸렌블루 용액이 채워져 있다. 이 용액은 상온에서 청색을 유지하지만 기온이 0°C 이하가 되면 무색으로 변한다. 따라서 동결기 지표가 얼기 시작하면 아크릴 내관을 외부로 꺼내어 용액이

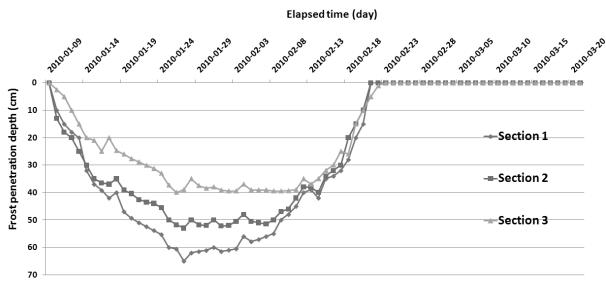


그림 12. 동결심도 변화

표 2. 동결심도 측정결과

구 분	최대 동결 심도(cm)
Section 1 - 노상층	65
Section 2 - 동상방지층	53
Section 3 - 보조기층	40

얼어 무색으로 변한 곳까지의 깊이를 측정하여 동결심도를 결정한다.

대기온도는 그림 12와 같이 다른 층의 온도 보다 낮게 분포하였고, 일별 온도변화가 심하게 나타났다. 측정심도가 깊을수록 온도는 높았으며 대기의 찬 공기가 지속적으로 유입되면서 지중 온도는 점진적으로 감소하였다. 보조기층 하부의 온도 변화는 대기온도의 영향을 민감하게 받고 있다.

표 2에 나타난 바와 같이 Section 1 노상층 구간의 최대동결심도는 65cm, Section 2 동상방지층구간은 53cm, Section 3 보조기층구간은 40cm로 측정되었다. 보조기층 동상방지층 구간에 비하여 노상층 구간이 동결심도가 큰 것으로 측정되었다. 이는 대기온도에 따른 포장 내부 온도변화는 포장 내부 재료의 열전도에 소요되는 시간 때문에 대기 온도가 최저 일 때와 노상층의 최저온도 시점이 포장체의 층별 두께와 재료별로 차이가 있다(정진훈 등, 2005). 즉, 열의 흐름이 정상상태흐름임을 가정하면 온도 강하가 클수록 그리고 재료의 열전도율이 클수록 동결진행은 빠르게 되고, 재료의 열용량이 클수록 동결진행은 서서히 발생하게 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 도로 포장체의 동상 피해에 따른 동상 특성을 파악하기 위하여 실규모 현장도로 모형축소 시스템을 구축하여 온도 분포 변화 및 동결특성을 도출하였다. 도로의 동상피해 방지를 위해 매설하는 동상방지층 유무와 동상방지층과 보조기층의 유무에 따른 각 층

별 온도 분포 변화와 동상 현상의 주요요소인 수분의 거동에 따른 부동수분의 측정을 통하여 포장구성층의 동결 특성을 분석 하였다. 2009년 1월 계측 데이터를 이용하여 겨울철 단면별, 깊이별 온도분포의 상관관계를 분석하고 현장 동결깊이와 비교 하였으며, 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 현장 도로 모사시험에 따라 겨울철 대기에 노출되어 있는 노상토의 상부 최저 온도는 -6.63°C 였으며, 노상토에 동상방지층을 매설한 노상층 상부의 최저 온도는 -4.60°C , 동상방지층과 보조기층을 매설한 노상층의 상부는 최저온도 -3.60°C 으로 도로 동상방지층과 보조기층은 동상에 대한 피해를 상당부분 최소화 시킬 수 있다.
- (2) 동상방지층의 상부의 최저 온도는 -8.01°C 이며, 보조기층을 매설한 Section 3의 최저 온도는 -5.56°C 를 보였다. 동상방지층과 보조기층은 동결 온도 변화에 대한 영향을 충분히 보이며, Section 1과 2의 동상방지층 유무에 따른 차이와 Section 2와 3의 보조기층 유무에 따른 온도 변화를 비교하면 보조기층의 온도 차감 효과가 크게 나타났다.
- (3) 부동수분은 영하의 온도가 지속됨이 적은 곳에서 큰 값을 나타낸다. Section 1의 노상토 부동수분이 Section 3의 노상층 부동수분의 양보다 2배 가까이 적은 값을 나타낸다. 이에 따라 노상층의 동상작용으로 인해 Section 1에서 큰 동상현상으로 더 피해가 발생할 수 있다. 또한 Section 2의 동상 방지층에서의 부동수분이 Section 3의 부동수분 보다 더 적은 값을 나타내었다.
- (4) 포장구조체의 온도 분포 변화와 부동수분의 변화는 포장층 종류에 따라 다른 양상을 보이며, 동상방지층과 보조기층은 동상 피해를 예방하는데 크게 기여한다고 판단된다. 본 연구에서도 일정한 두께의 단면으로 실험값에 따른 동상 피해 차감 효과 관계를 더욱 신뢰성 있게 공식화하기 위하여 다양한 두께의 모사시험에 대한 다양한 연구를 진행하고 있다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. 김부일, 전성일, 이문섭, 임광수 (2009), 국내 LTPP 온도 자료를 이용한 동결지수와 동결 깊이 검증 연구, *한국도로학회논문집*, 제11권 제4호, pp.143-151.
2. 남영국, 조규태, 진정훈 (2002), 도로포장의 동상방지층 실효성 검증을 위한 현장계측 및 실내시험 연구, *대한토목학회 논문집*, 제22권, 제5D호, pp.913-921.
3. 신은철, 강정구, 박정준 (2009), 지반동결에 따른 지하구조물의 열적 안정성, *한국지반공학학회논문집*, 제25권, 제3호, pp.65-74.
4. 신은철, 류병현, 박정준 (2009), 변형된 동결-융해 시험장치를 이용한 동상민감성흙의 지반공학적 특성, *한국토목섬유학회논문집*, 제8권, 제1호, pp.53-59.
5. 신은철, 박정준 (2003), 동결토의 동상 팽창압 특성에 관한 실험적 연구, *한국지반공학학회논문집*, 제19권, 제2호, pp.65-74.
6. 정진훈, 배성호, 권순민 (2005), "시험도로 자료를 이용한 포장의 동결특성 연구", *한국도로학회논문집*, 제7권, 4호, pp.87-95.
7. Linell, K. A. and Kaplar, C. W. (1966), Description and classification of frozen soils, *U.S. Army Cold Reg. Res. Eng. Lab. Tech. Rep.* 140.
8. 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.
9. Taber, Stephen (1929), Freezing, *Journal of Geology*, Vol.37, No.5, pp.428-461.
10. Takagi, S. (1965), Principles of frost heaving, *U.S. Army Cold Reg. Res. Eng. Lab. Tech. Rep.* 140: 24 p.
11. Takagi, S. (1980), The adsorption force theory of frost heaving, *Cold Region Science Technology*, 3, pp.57-81.
12. Yong, R. N. and Warkentin, B. P. (1975), *Soil properties and behaviour*, Elsevier Scientific Publishing Company, pp.383-419.

(접수일자 2010. 4. 26, 심사완료일 2010. 7. 5)