

## 현장 모형 도로 축소 실험을 이용한 포장구성층의 동결 특성 분석

### Analysys on Freezing Characteristics of Pavement Layer Using the Field Pavement Model test

신은철<sup>1)</sup>, Eun-Chul Shin, 류병현<sup>2)</sup>, Byung-Hyun Ryu, 문용수<sup>3)</sup>, Yong-Soo Moon, 박정준<sup>4)</sup>, Jeong-Jun Park

<sup>1)</sup> 인천대학교 공과대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Incheon

<sup>2)</sup> 인천대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Incheon

<sup>3)</sup> 인천대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Incheon

<sup>4)</sup> 인천대학교 공과대학 토목환경공학과 연구교수, Research Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Incheon

**SYNOPSIS** : Korea is considered to be a seasonal frozen soil area that is thawed in the spring, and most of the area is frozen in winter as to the characteristic of geography. 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 research, the evaluation of frost susceptibility on subgrade, ant-freezing layer, sub base was conducted by means of the mechanical property test and laboratory field road model downed scale experiment. The temperature, heaving amount, heaving pressure and unfrozen water contents of soil samples, the subgrade, anti-freezing layer, sub base soils of highway construction site, were measured to determine the frost susceptibility.

**Keywords** : anti-freezing layer, pavement, frost-heaving, unfrozen water contents, field pavement model test

## 1. 서 론

지리학적인 특성으로 인하여 국내 기후 조건은 4계절이 뚜렷하고, 여름철에 강수량이 집중되는 현상을 보이며, 겨울철 도로 동상 피해에 대한 고려로 도로 동상방지층을 설계에 반영하는 등의 안전대책을 현장에 반영하였다. 그러나 최근에 들어오면서 지구의 온난화 현상 등에 의해 국내 겨울철 온도가 차차 증가하는 현상을 보여 도로 동상방지층의 설계에 대한 기준에 의문의 제기가 증가하고 있는 추세이다. 하지만 이러한 일반적인 의식의 전환에 반대로 2008년 12월의 아침 평균 최저 기온은 1.8℃였으나, 2009년 12월 아침 평균 최저 기온은 -1.1℃로 매년 겨울철 국내 기온이 일정하게 증가만 한다고 단정을 지을 수는 없다(기상청, 2010). 따라서 도로포장의 하부구조는 겨울철 영하 온도에 안정성을 도모하기 위해 적절한 포장 설계 기준을 위해 정밀한 연구가 필요하다. 도로 포장 하부구조는 여러 조건들에 따라 겨울철에는 냉각되어 동결이 발생하고, 봄철에는 동결된 포장 하부의 형성 재료들이 녹으면서 포화되어 지지력이 약화되는 현상이 발생한다. 이러한 영하기온의 동결과 영하에서 영상으로의 융해 과정을 통하여 기후적인 요소에 의한 공용성 저하가 발생하기도 한다. 포장공용성에 영향을 미치는 중요한 요소들 중의 하나는 온도변화에 의한 동결과 강우를 포함하는 기후 조건이다. 포장체에서 동결융해작용은 노상의 동결에 의한 동상(frost-heaving)과 융해에 의한 노상의 역학적 특성치 저하로 나눌 수 있다. 동결

과정의 체적팽창은 포장체 표면의 거칠기를 증가시키고, 융해과정의 노상의 역학적 특성치 감소는 포장체의 구조적 능력을 감소시켜 도로포장 파손의 원인으로 작용한다. 본 연구에서는 국내의 이러한 겨울철의 추위에 의한 도로포장구조의 동결발생을 억제하여 융해에 따른 도로의 지지력이 약화되는 현상을 방지하고자 현장도로의 시공되어진 포장구조에 대하여 모사하여 실험을 실시하였다. 특히, 동상을 일으키는 3요소인 온도의 지속적인 조건과 노상토의 함수비 변동, 도로의 포장 형태 조건에 비중에 맞추어 실험을 실시하였다.

## 2. 동결 이론

동결토는 토립자, 얼음, 물, 공기의 4상 구조로 구성되어 있다. 대기의 온도가 0°C이하로 되면 지표면의 간극수가 동결을 시작하여 동결면이 서서히 땅속으로 이동되며, 이때 토질이나 지하수의 조건에 따라 물이 이동되고, 부동수분이라는 영하의 온도에서도 동결되지 않는 얼음 형태가 형성되고, 이에 따라 지반이 팽창, 상승하는 현상을 동상이라고 한다(박정준, 2003).

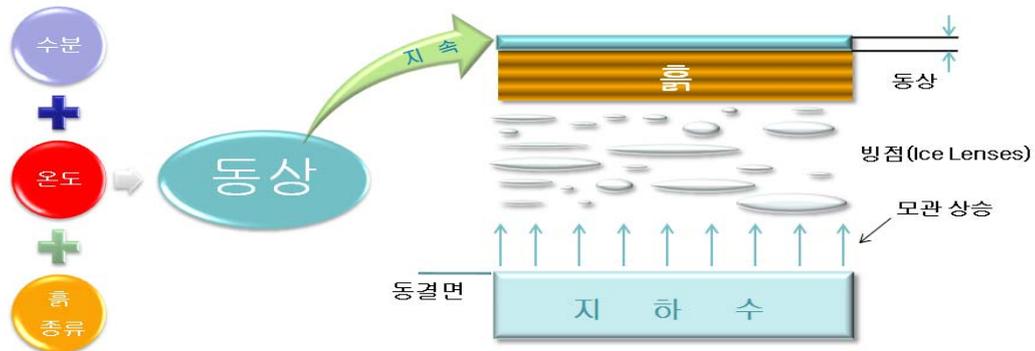


그림 1. 지반의 동결 원리

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 융기하기도 하는 피해를 일으킨다(남영국, 2002).

## 3. 옥외 동상시험 시스템을 통한 현장 도로 모사 시험

본 연구에서는 동상방지층의 설치 유무에 따른 동상거동을 평가 하기위해 지하수위를 일정하게 유지하여 노상토의 함수 상태를 변하지 않게 제어 하였다. 또한 동상에 따른 부동수분의 변화량을 계측하여 동상 현상에 따른 부동수분의 거동 특성을 파악하였다. 그리고 대기온도의 겨울철 온도 변화에 따른 각 층별 온도변화 및 지지력을 측정하여 동상현상의 특성을 분석하였다.

### 3.1 기본 물성 실험결과

흙의 종류에 따라 같은 온도에서 다른 특성을 나타낸다. 본 연구에 사용된 현장 대체용 시료는 그림 2와 같이 기본물성 시험에 따른 결과를 나타낸다.

구분	노체	노상	구분	동상방지층	보조기층
비중	2.73	2.64	밀도(g/cm <sup>3</sup> )	2.724	2.728
균등계수(Cu)	4.29	5.0	0.08mm 통과율	3.5	3.3
곡률계수(Cg)	0.46	0.8	함수율(%)	0.71	0.66
#200체 통과율	18.3	4.8	E-다짐 $\gamma_{smax}(t/m^3)$	2.261	2.267
액성한계(LL,%)	N.P.	30.64	$W_{opt}(\%)$	5.8	5.7
소성지수(PI)	N.P.	N.P.	모래당량(%)	66	68
D-다짐 $\gamma_{smax}(t/m^3)$	1.939	1.903			
$W_{opt}(\%)$	11.6	12.64			
등질분류법 (USCS)	SM	SP			

그림 2. 옥외동상시험 시스템 내 시료의 기본물성 시험결과

### 3.2 옥외 동상시험 시스템의 구조

본 연구를 위해 제작한 옥외 동상시험 시스템은 3m × 6m × 3m의 직사각형 철제 토조로 그림 3, 4 5와 같이 계측장비를 설치하였다. 실험은 도로의 세 가지 경우를 예상 모의 시험을 위하여 3개의 섹션을 각각 노상과 노체, 노상과 노체와 동상방지층, 노상과 노체와 동상방지층과 보조기층으로 구분하여 현장 도로 형태를 구성하였다. 각 섹션에는 노체를 제외하고 침하량을 측정하기 위한 침하판을 각 층마다 설치하였고, TDR관과 동결심도계를 매설하여 온도의 변화에 따른 부동수분의 량과 동결 깊이를 측정하는데 활용하였다. 또한 32개의 LVDT 온도 측정계를 설치하여 각 층별 심도별 그리고 대기의 온도를 측정할 수 있게 하였다. 온도는 현장에 설치한 TDS 측정기를 통하여 5분 간격으로 실시간 온도의 변화를 확인 할 수 있도록 구성하였다. 또한 TDR 시험기를 통하여 신뢰성 있는 부동수분의 온도에 따른 변화 특성을 측정하였다.

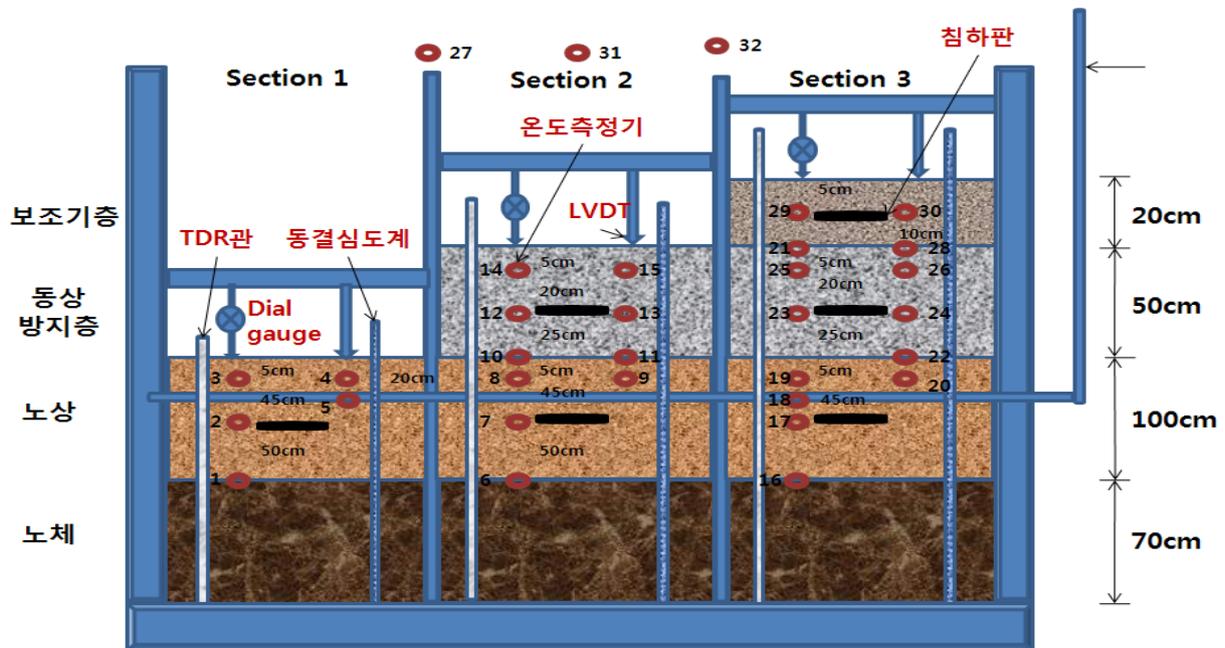


그림 3. 옥외동상시험 시스템 모식도



그림 4. 옥외동상시험 시스템 전경

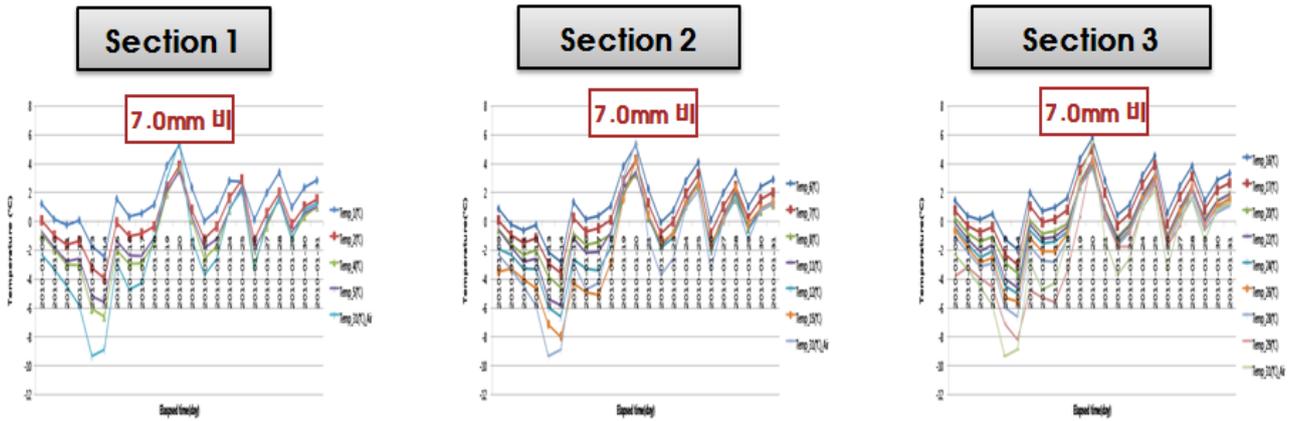


그림 5. 옥외동상시험 시스템 구축현황

#### 4. 옥외 동상시험 시스템을 이용한 포장구성층의 온도 분포 분석

도로의 포장 구성층을 모사한 옥외 동상 시험에서 노상의 유무, 도로 동상방지층의 유무, 보조기층의 유무에 따른 겨울철 영하 온도에 따른 동결 특성 분석을 위한 시험을 하였다. LVDT와 동결심도계를 이용하여 각 층의 동결 깊이에 따른 온도 분포를 측정하였다.

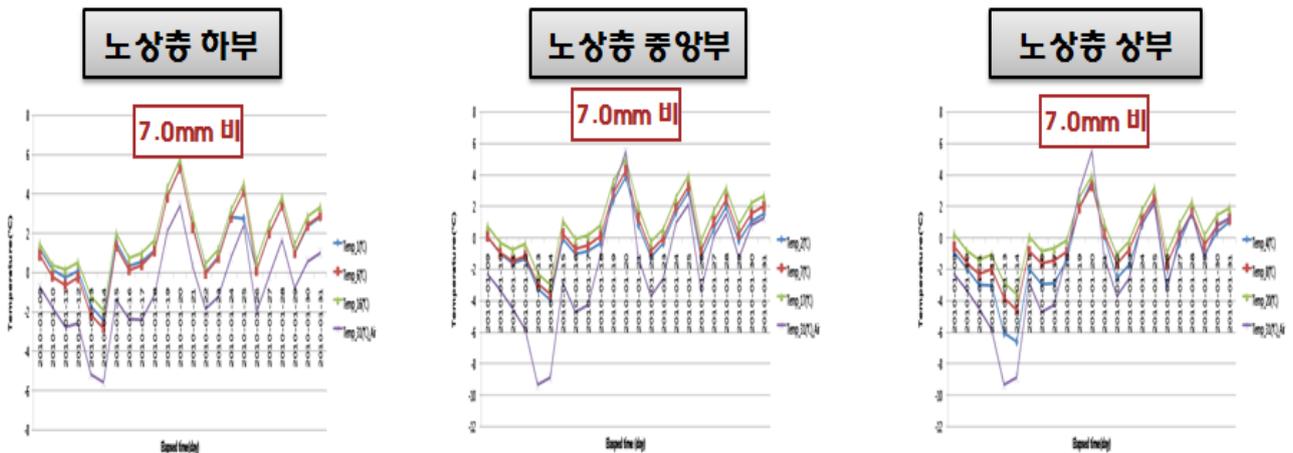
그림 6은 각 섹션에 따른 깊이별 온도의 변화를 나타낸 것이다. 국내 기후 조건에서 가장 추운 1월 한 달동안의 대기 온도 변화에 따른 포장구성층의 온도변화를 확인할 수 있다. 옥외 동상시험 시스템 외부에 LVDT를 이용하여 현장의 대기 온도를 측정하였으며, 신뢰성을 높이기 위해 인천 기상청의 기후 변화 데이터를 확보하여 비교 하였다. 시스템 주변의 대기온도는 1월 평균  $-1.94^{\circ}\text{C}$ , 기상청의 계측온도는  $-2.14^{\circ}\text{C}$ 를 나타내었다. 또한 1월 최고 기온은 시스템 주변  $5.48^{\circ}\text{C}$ , 인천 기상청  $6.90^{\circ}\text{C}$  값을 나타 내었으며, 1월 최저 기온은 시스템 주변  $-9.36^{\circ}\text{C}$ , 인천 기상청  $-11.20^{\circ}\text{C}$ 의 값을 나타내었다.



구분	인천 기상청	인천대학교 실험현장
1일 평균기온	-2.14 °C	-1.94 °C
1일 최고기온	6.90 °C	5.48 °C
1일 최저기온	-11.20 °C	-9.36 °C

그림 6. 단면구성에 따른 온도변화

그림 7은 도로의 포장 방법에 따른 차이를 나타낸다. 그 중 노상층 상중하에 따른 온도의 변화를 살펴 볼 수 있다. 대기 온도에 가장 영향을 받을 노상층 상부의 온도변화를 관찰할 때 보조기층과 동상방지층을 매설하지 않은 섹션 1이 최저온도 -6.63°C로 가장 낮은 온도를 나타냈으며, 동상 피해를 줄이고자 동상방지층만을 매설한 섹션2는 최저온도 -4.60°C, 동상 피해를 줄이고자 섹션 2에 보조기층까지 매설한 섹션 3은 최저온도 -3.60°C의 온도 분포를 나타내었다.

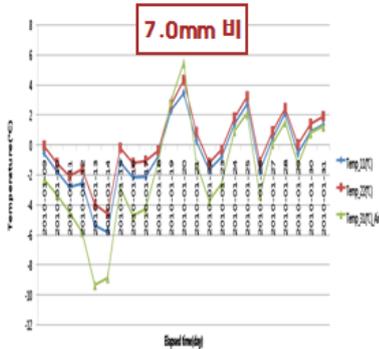


구분(최저온도)	노상층 하부	노상층 중양부	노상층 상부
Section 1	-2.45 °C	-3.95 °C	-6.63 °C
Section 2	-2.83 °C	-3.61 °C	-4.60 °C
Section 3	-1.95 °C	-3.01 °C	-3.60 °C

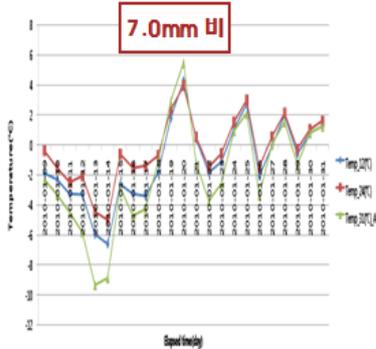
그림 7. 노상층 단면구성에 따른 온도변화

그림 8은 동상방지층 상중하에 따른 온도의 변화를 나타낸다. 대기 온도에 가장 영향을 받을 동상방지층 상부의 온도변화를 관찰할 때 보조기층을 매설하지 않은 섹션 2가 최저온도 -8.01°C로 가장 낮은 온도를 나타냈으며, 동상 피해를 줄이고자 보조기층까지 매설한 섹션3은 최저온도 -5.56°C 온도 분포를 나타내었다.

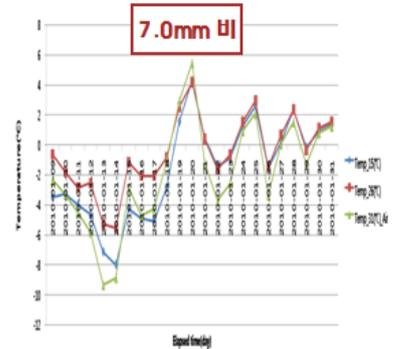
**동상방지층 하부**



**동상방지층 중앙부**



**동상방지층 상부**

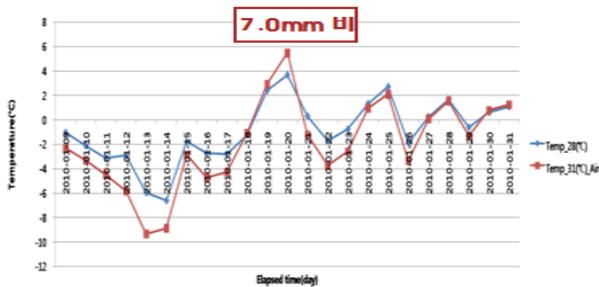


구분(최저온도)	동상방지층 하부	동상방지층 중앙부	동상방지층 상부
Section 2	-5.81 °C	-6.61 °C	-8.01 °C
Section 3	-4.60 °C	-5.00 °C	-5.56 °C

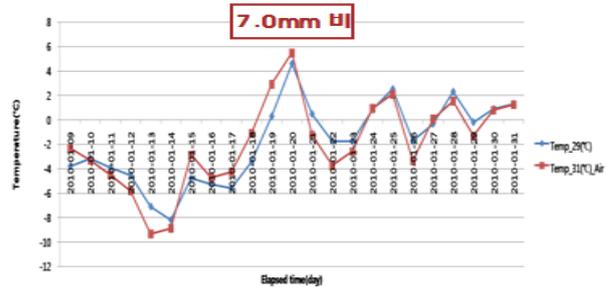
그림 8. 동상방지층 단면구성에 따른 온도변화

그림 9는 보조기층 중하에 따른 온도의 변화를 나타낸다. 대기 온도에 가장 영향을 받을 보조기층의 중앙부의 온도변화를 관찰할 때 최저온도 -8.21°C로 나타냈으며, 최고온도는 4.66°C의 온도 분포를 나타내었다.

**보조기층 하부**



**보조기층 중앙부**



구분	보조기층 하부	보조기층 중앙부
Section 3	최저기온	-8.21 °C
	최고기온	4.60 °C

그림 9. 보조기층 단면구성에 따른 온도변화

## 5. 옥외 동상시험 시스템을 이용한 포장구성층의 부동수분 분포 분석

부동수분은 동상량에 가장 큰 변화매체인 물의 양을 측정하는 것으로 이 부동수분의 양을 통하여 동상량과 동상압에 대하여 상관관계를 통한 그 값을 예측 할 수 있다(신은철,2009). 부동수분을 측정하기 위한 TDR 관입 관에 TDR Probe를 삽입하여 그림 10과 같은 값을 측정하였다. 동상방지를 위해 아무 층도 매설하지 않은 섹션 1의 노상층 내 부동수분은 최대 14.7% 최소 11.7%의 값을 나타냈으며, 동상방지층을 매설한 섹션2의 노상층 부동수분은 최대 21.6%, 최소 21.3%, 동상방지층과 보조기층을 매설한 섹션3의 노상층 부동수분은 최대 22.9%, 최소 19.5%의 값을 나타냈다. 또한 섹션 2의 동상방지층의 부동수분은 최대 11.7%, 최소 3.9%, 보조기층을 매설한 섹션 3의 동상방지층 부동수분은 최대 13.2%, 최소 4.4%의 값을 나타냈다. 섹션 3의 보조기층 내 부동수분은 최대 6.0%, 최소 1.1%의 값을 나타냈다.

Section 1

Section 2

Section 3

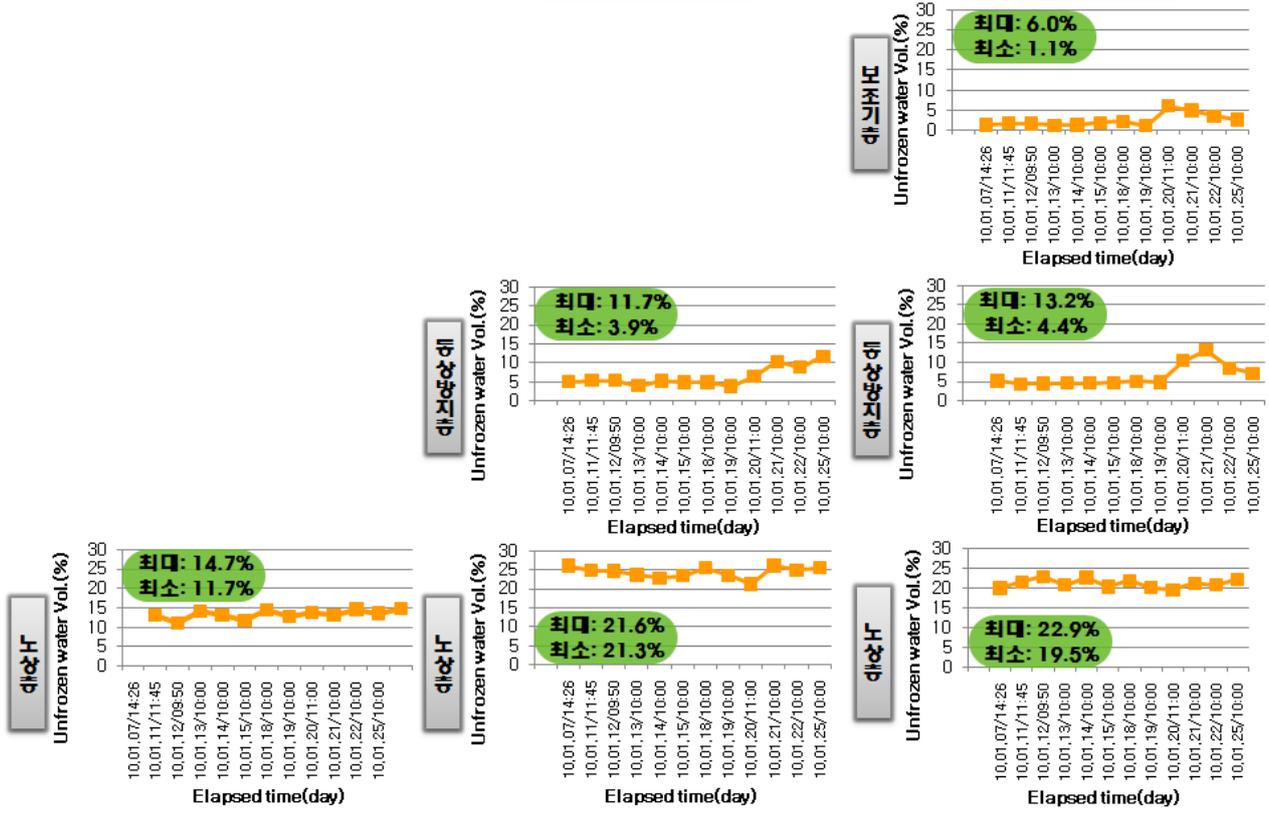


그림 10. 단면구성에 따른 부동수분 변화

6. 결론

본 연구에서는 도로 포장체의 동상 피해에 따른 동상 특성을 파악하기 위하여 옥외 동상시험 시스템을 제작 및 매설하여 국내의 겨울철 가장 추운 1월 달 온도 분포 변화를 측정하였다. 도로의 동상피해 방지를 위해 매설하는 동상방지층 유무와 동상방지층과 보조기층의 유무에 따른 각 층별 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 모사 시험을 위한 옥외 동상시험에 따라 겨울철 대기에 노출되어 있는 노상토의 상부 최저 온도는  $-6.63^{\circ}\text{C}$ 였으며, 노상토에 동상방지층을 매설한 노상층 상부의 최저온도는  $-4.60^{\circ}\text{C}$ , 동상방지층과 보조기층을 매설한 노상층의 상부는 최저온도  $-3.60^{\circ}\text{C}$ 으로 동로 동상 방지층과 보조기층은 동상에 대한 피해를 상당부분 줄일 것으로 판단하였다.
2. 동상방지층의 상부의 최저 온도는  $-8.01^{\circ}\text{C}$ 이며, 보조기층을 매설한 섹션 3의 최저 온도는  $-5.56^{\circ}\text{C}$ 를 보였다. 동상방지층과 보조기층은 동결 온도 변화에 대한 영향을 충분히 보이며, 섹션 1과 2의 동상방지층 유무에 따른 차이와 섹션 2와 3의 보조기층 유무에 따른 온도 변화를 비교하면 보조기층의 온도 차감 효과가 클 것으로 판단된다.
3. 부동수분은 영하의 온도가 지속됨이 적은 곳에서 큰 값을 나타낸다. 섹션1의 노상토 부동수분이 섹션 3의 노상층 부동수분의 양보다 2배 가까이 적은 값을 나타낸다. 이에 따라 노상층의 동상작용으로 인해 섹션 1에서 큰 동상현상으로 더 큰 피해가 생길 것으로 판단된다. 또한 섹션 2의 동상 방지층에서의 부동수분이 섹션 3의 부동수분 보다 더 적은 값을 나타내며, 이에 따른 동상의 피해도 섹션 3보다 섹션 2가 클 것으로 판단된다.
4. 포장구조체의 온도 분포 변화와 부동수분의 변화는 섹션과 포장체 매설 종류에 따라 비슷한 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 공식화 하기위하여 다양한 두께의 모사시험에 대한 더 다양한 연구를 진행하고 있다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

1. 신은철, 박정준(2003), “동결토의 동상 팽창압 특성에 관한 실험적 연구”, **한국지반공학회** 논문집 제 19권 제2호. pp 65~74.
2. 남영국, 조규태, 진정훈(2002), “도로포장의 동상방지층 실효성 검증을 위한 현장계측 및 실내시험 연구”, **대한토목학회 논문집**, 제22권, 제5D호, pp. 913~921
3. 신은철, 류병현, 박정준(2009), “변형된 동결-융해 시험장치를 이용한 동상민감성흙의 지반공학적 특성”, **한국토목섬유학회 논문집**, 제8권, 제1호, pp. 53~59