



시험도로 자료를 이용한 포장의 동결특성 연구

A Study on Freezing Characteristics of Pavements Using Data of Test Road

정진훈* 배성호** 권순민***
 Jeong, Jin Hoon Bae, Sung Ho Kwon, Soon-Min

Abstract

To prevent the lowering of structural capability due to freezing and thawing in cold winter, numerous researches on frost heaving have been performed. As the result, the freezing index contour map of the Korea peninsula has been made for the design of the anti-freezing layer of pavements. However, the validity of the anti-freezing layer needs to be evaluated because systematic investigations on the variation of freezing depth with the thickness and material types of pavement layers and the configuration of the ground have been rarely performed. The freezing index of the Korea Highway Corporation test road site was calculated and the freezing depths of the concrete and asphalt pavements of the test road were investigated using the ambient and pavement temperature and water content. In addition, the investigated freezing depths were compared to the values estimated by existing freezing depth models. This is the preliminary study on the freezing-related data measured at the test road. The results with higher reliability will be produced by the long-term accumulation of the data and the analysis on it.

Keywords : anti-freezing layer, freezing depth, freezing index, freezing duration, ambient temperature

요 지

동결기에 대기온도가 영하로 내려감에 따라 포장하부층의 동결 및 융해가 반복되어 포장체의 구조적 성능이 저하된다. 이를 방지하기 위하여 동상에 대한 많은 연구가 수행되었으며, 그 결과, 우리나라 전역의 동결지수선도가 작성되어 동상방지층 설계 등의 도로건설에 이용되고 있다. 하지만, 포장층의 두께와 재료, 그리고 지형에 따른 동결심도의 변화에 대한 조사가 체계적으로 이루어지지 않아 현행 동상방지층 설계의 유효성에 대한 평가가 시급한 실정이다. 본 논문에서는 한국도로공사 시험도로에서 측정되는 대기온도 자료와 콘크리트 및 아스팔트 포장의 깊이별 온도 및 함수량 자료를 이용하여, 시험도로의 동결지수 및 동결가능 깊이를 조사하였다. 또한, 조사된 결과를 기존의 동결심도 추정식에 의한 결과와 비교하였다. 본 연구는 시험도로에서 측정된 동결 관련자료에 대한 초기연구로서, 장기적인 자료의 축적과 분석을 통하여 보다 신뢰성 있는 결과가 도출될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 동상방지층, 동결심도, 동결지수, 동결지속기간, 대기온도

* 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 시험도로운영센터 책임연구원 · 공학박사
 ** 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 시험도로운영센터 연구원 · 공학박사
 *** 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 시험도로운영센터 연구원 · 공학박사



1. 서론

도로포장 노상에 0℃ 이하의 기온이 장기간 지속 되면 노상의 상부로부터 수분이 얼기 시작하여 얼지 않은 수분의 양이 감소하게 된다. 그로 인하여, 노상 하부의 아직 얼지 않은 수분이 모세관 현상에 의하여 동결이 일어난 주위로 이동하게 되며, 결국, 빙편(ice lens)을 형성하게 된다. 빙편이 커지면서 노상의 부피가 팽창하는 동상(frost heaving)이 발생하며, 빙편 주위의 함수량이 증가하게 되어 해빙이 되는 봄철에 지지력과 관련된 문제점을 발생시킨다. 일반적으로, 동상에는 흙의 입경, 비표면적, 상재압의 크기, 간극수의 정도, 선행하중에 의한 흙의 압밀정도, 그리고 동결융해 이력 등이 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(이경하 외, 2002).

도로포장의 동결심도를 추정하기 위한 대표적인 수단으로 동결지수가 사용되며, 이는 대기온도와 시간의 함수로서 표시된다. 동결지수는 한 동결기 동안 평균온도×단위시간을 누적한 그래프에서 최고점과 최저점의 차이이며 그 단위로 ℃·day(또는 °F·day)를 사용한다(Department of the Army and the Air Force, 1988). 하지만, 단순히 이와 같은 절차에 의해서만 산정된 동결지수는 표고가 높아짐에 따라 기온이 낮아지는 지형적 특성을 반영하지 못하기 때문에, 광범위한 지역의 기상을 대표하는 기상관측소의 대기온도를 이용하여 산정된 동결지수로 특정 지역의 동결특성을 나타내기에는 한계가 있다. 따라서, 설계 대상지역의 표고를 고려한 식 (1)의 수정된 동결지수가 제안되었다(한국도로공사, 2003).

$$\text{설계동결지수(℃·day)} = \text{동결지수} \pm 0.5 \times \frac{\text{동결기간} \times \text{표고차}}{100} \quad (1)$$

여기서, 표고차(m)는 기상관측소와 설계지역의 최대표고차를 의미하며, 설계지역의 표고가 기상관측소의 표고보다 높을 경우 양의 값을 갖는다.

동결심도를 결정하는 방법으로는 실측에 의한 방

법, 동결지수와와의 관계식을 이용하는 방법, 그리고, 도표를 이용하는 방법 등이 있다. 동상의 유무를 판단하기 위하여 현장답사를 실시하고 지역 내 도로 및 철도의 공사기록과 기존 동상피해 상황을 조사한 후 동상이 가장 심할 것으로 예상되는 시기에 굴착을 하여 동결심도를 관찰하는 것이 실측에 의한 방법이다. 또한, 동결지수를 이용하여 동결심도를 예측하기도 하며, 식 (2)와 (3)이 주로 사용된다(한국도로공사, 2003).

$$Z = C\sqrt{F} \quad (2)$$

$$Z = 14F^{0.33} \quad (3)$$

여기서, F(℃·day)는 동결지수이며, C는 계수로써 지역적 특성과 흙의 상태를 고려하여 3에서 5까지를 사용한다. 이 외에도, 노상의 건조밀도와 자연 함수비를 고려하여 설계동결지수에 의해 동결심도를 추정한 후 비동상 재료층의 두께에 따라 치환두께를 결정하는 도표를 이용한 방법도 사용될 수 있다(김상호 외, 1999).

본 논문은 동상에 의한 피해를 방지하고자 도로포장에 설치되고 있는 동상방지층의 유효성을 평가하기 위하여 한국도로공사 시험도로에서 수행되고 있는 연구의 초기결과를 보여준다. 본 논문에서는 시험도로에서 계측되고 있는 대기온도를 이용하여 시험도로의 동결지수 및 동결심도를 계산하여 콘크리트 포장 및 아스팔트 포장 깊이별 온도자료에 의한 실제 동결가능 깊이와 비교한다. 또한, 포장 각 층의 두께와 물성에 따른 하부층의 온도 및 동결심도의 변화 등을 조사하며 동결심도에 미치는 지형의 영향을 살펴보고자 한다.

2. 시험도로 포장의 온도분포

시험도로의 콘크리트 포장 25개 단면 2830m 구간과 아스팔트 포장 33개 단면 2710m 구간에는 총



250여 개의 온도계가 매설되어 있다. 그중 콘크리트 3개 단면(J4-0, J5-0, J6-0)과 아스팔트 4개 단면(A10, A15, A3, A9)에는 동결심도의 측정을 위하여 포장표면 근처에서 노상하부까지 그림 1과 같이 온도계를 매설하였다.

본 논문에서는 지난 2003년 7월부터 2004년 7월 까지 측정된 포장체의 온도자료를 분석하였으며, 그 기간 중 포장상부층 하단 근처의 온도가 가장 낮은 시간을 단면별로 선정하여 이때의 포장체 온도분포를 조사하였다. 여기서, 포장상부층은 보조기층 이상

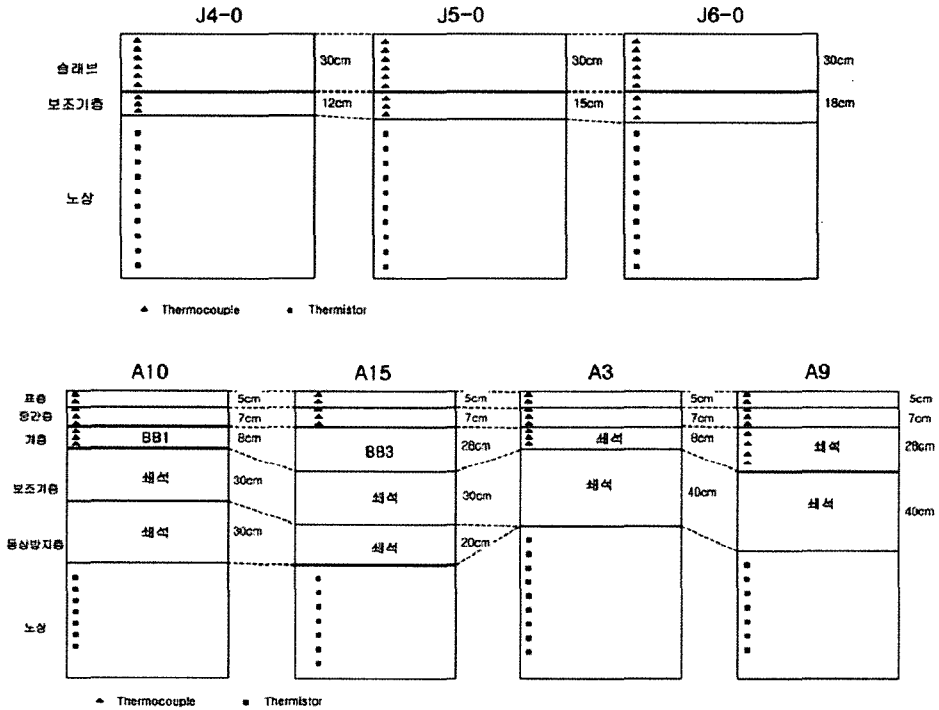
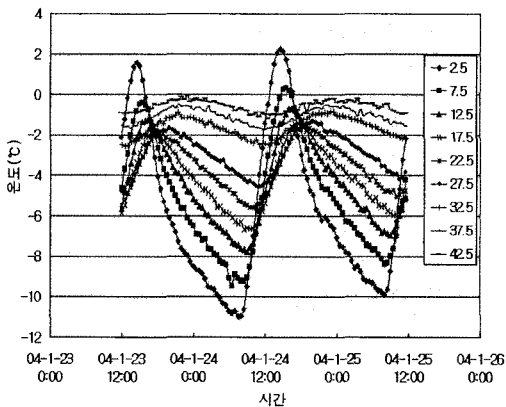
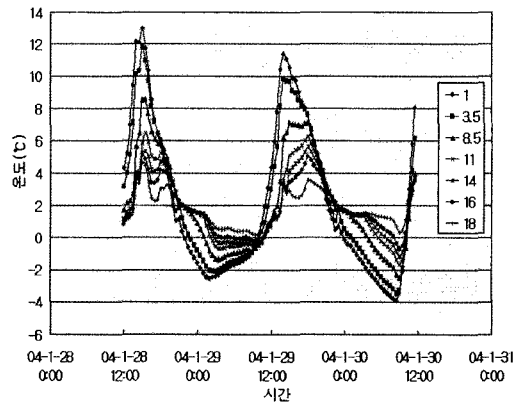


그림 1. 포장 단면별 온도측정 위치

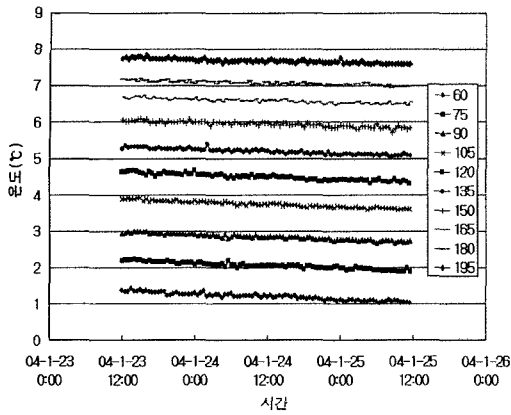


(a) 콘크리트 포장 (J5-0)

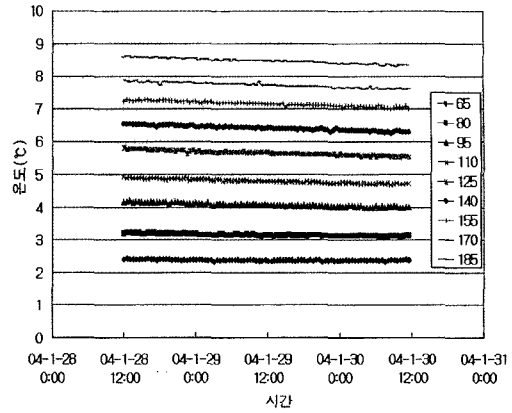


(b) 아스팔트 포장 (A3)

그림 2. 포장상부층(보조기층 이상)의 시간에 따른 깊이별 온도변화



(a) 콘크리트 포장 (J5-0)



(b) 아스팔트 포장 (A3)

그림 3. 포장하부층(노상)의 시간에 따른 깊이별 온도변화

의 층들을 통털어 일컬으며 포장하부층은 노상을 의미한다. 실제로는 열전도에 소요되는 시간 때문에 대기 최저온도 시점과 포장하부층의 최저온도 시점에는 포장의 층별 두께와 재료별로 차이가 있으며, 본문에서는 포장하부층에 비해 상대적으로 시간별 및 계절별 온도변화가 크게 나타나는 포장상부층 하단 근처의 온도가 연중 최저가 될 때의 포장체 온도 분포를 조사하였다. 그림 2는 이와 같은 방법에 의하여 콘크리트 포장 J5-0과 아스팔트 포장 A3에서 조사된 포장상부층의 깊이별 온도분포이다. 그림 3은 콘크리트와 아스팔트 포장 각 구간 포장하부층의 온도분포를 보여준다. 그림 2에서 보듯이 포장표면에 가까울수록 포장의 온도는 대기온도에 민감하게 반응하면서 변화하지만 포장하부로 갈수록 시간에 따른 온도의 변화가 작아지는 것을 그림 3에서 볼 수 있다.

2.1. 콘크리트 포장의 온도분포 분석

콘크리트 포장의 보조기층 하부에서 연중 최저온도가 나타나는 시점에 콘크리트 포장의 온도분포를 조사하였다. 대상구간인 3개의 콘크리트 포장단면은 각각의 단면의 특성에 따라 동일한 시간에 다양한 온

도분포를 보였다. 노상 상단에서의 온도를 추정하기 위하여 그림 4와 같이 각 단면별로 온도-깊이의 상관관계를 찾아내었다. 그 결과, 포장상부층(보조기층)의 두께가 상대적으로 얇은 J4-0의 깊이별 온도변화가 포장상부층의 두께가 두꺼운 J6-0의 온도변화보다 큰 것으로 나타났다.

그림 4의 콘크리트 포장단면별 온도-깊이 상관관계를 보면, 포장하부층의 온도분포는 포장상부층의 두께에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 가장 얇은 보조기층 두께(12cm)를 갖는 J4-0에서는 포장표면으로부터 가장 얇은 깊이(44.3cm)에서부터 포장체의 온도가 0°C 이상으로 올라갔으며, 가장 두꺼운 보조

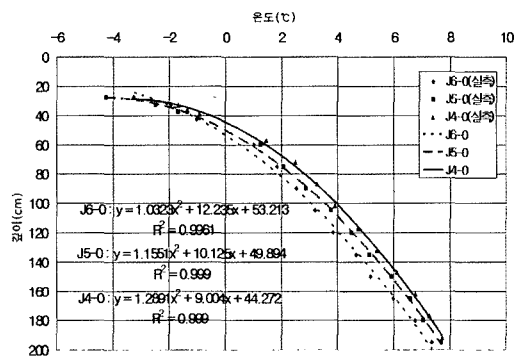


그림 4. 콘크리트 포장단면별 깊이에 따른 온도분포



기층 두께(18cm)를 갖는 J6-0에서는 53.21cm에서 0℃ 이상으로 올라갔다. 세 단면 모두 노상 상부에서 0℃ 이하의 온도를 나타내었다. 그림에서 보듯이 단면별로 노상온도의 차이가 발생하였으나 깊이에 따른 온도의 변화(기울기)는 유사하였다.

2.2. 아스팔트 포장의 온도분포 분석

아스팔트 포장에서도 보조기층 하부에서 연중 최저온도가 나타나는 시점에 포장의 온도분포를 조사하였다. 그림 5에서는 아스팔트 포장 단면별로 하부층 깊이에 따른 온도의 변화와 그 상관관계식을 보여준다. 아스팔트 포장의 경우는 콘크리트 포장과는 달리, 노상 또는 동상방지층 상부의 온도가 0℃ 이하로 내려가지 않았음을 알 수 있다. 그림에서 보듯이, 동일 깊이에서 각 단면의 온도는 A9, A15, A10, A3

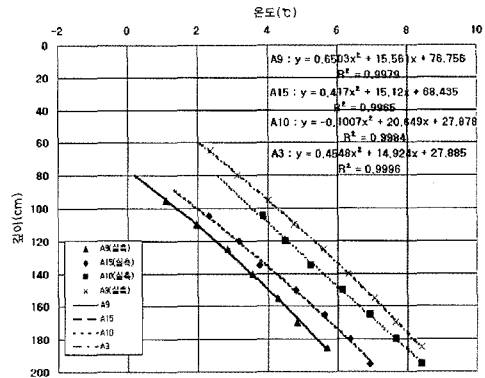


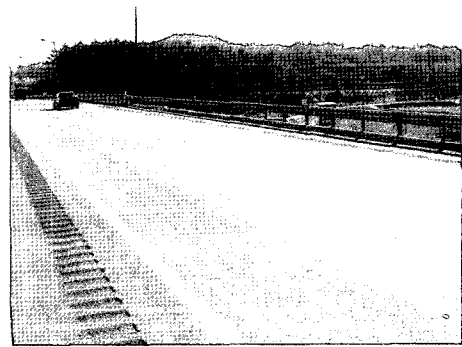
그림 5. 아스팔트 포장 단면별 하부층의 깊이에 따른 온도분포의 순서로 높아지는 것으로 나타났다. 여기서 주목할 점은, 상대적으로 높은 온도분포를 보인 A10과 A3 단면은 성토구간이었으며 낮은 온도분포를 나타낸 A9와 A15 단면은 절토구간이라는 것이다. 이는 지형적인 특성상 절토부가 성토부에 비해 일사량이 적

표 1. 단면별 아스팔트 포장두께 및 재료

단 면	토 공	층별 두께 및 재료				
		표 층	중 간 층	기 층	보조기층	동상방지층
A3	성토	5cm (밀입도)	7cm (밀입도)	8cm (BB3)	40cm (쇄석)	-
A10	성토	5cm (밀입도)	7cm (밀입도)	8cm (BB1)	30cm (쇄석)	30cm (쇄석)
A15	절토	5cm (밀입도)	7cm (밀입도)	28cm (쇄석)	30cm (쇄석)	20cm (쇄석)
A9	절토	5cm (밀입도)	7cm (밀입도)	28cm (BB3)	40cm (쇄석)	-



(a) 절토부(A15)



(b) 성토부(A3)

그림 6. 시험도로의 절토부와 성토부 전경



표 2. 포장재료별 온도특성(김상호 외, 1999)

재 료 명		열전도율(K)	열용량(Q)	융해잠열(L)
		cal/cm · s · °C	cal/cm³ · °C	cal/cm³
아스팔트 콘크리트		0.00346	0.448	0
시멘트 콘크리트		0.00224	0.480	0
쇄 석	$\gamma_d = 2.00\text{g/cm}^3$	0.00509	0.415	8.0
	$\omega = 5\%$			
자 갈	$\gamma_d = 1.65\text{g/cm}^3$	0.00600	0.445	11.2
	$\omega = 7\%$			
모 래	$\gamma_d = 2.00\text{g/cm}^3$	0.00470	0.466	19.8
	$\omega = 15\%$			
화산재	$\gamma_d = 0.95\text{g/cm}^3$	0.00275	0.518	38.0
	$\omega = 50\%$			
흙	$\gamma_d = 1.15\text{g/cm}^3$	0.00343	0.627	46.0
	$\omega = 50\%$			

어 포장의 온도가 전체적으로 낮아지며, 이에 따라 단면들 간에 누적온도의 차이가 점점 커졌기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 경향으로 볼 때, 포장재료나 두께보다도 지형에 의한 기상조건의 차이가 포장체의 온도분포에 더 큰 영향을 미칠 가능성이 있는 것으로 판단된다. 그림 6은 시험도로의 절토부와 성토부의 전경이다.

포장재료별 온도분포의 경우, 대상 단면들의 두께와 주변지형 등의 조건이 상이하여 비교가 쉽지 않았다. 김상호 외(1999)가 보인 표 2에 따르면, 쇄석의 열전도율이 다른 재료들에 비하여 큰 것으로 나타났는데, 이는 쇄석기층으로 이루어진 단면이 아스팔트 BB3기층으로 이루어진 단면보다 동절기에 열을 더 쉽게 빼앗겨 동결심도가 더 깊어진다는 것을 의미한다. 포장재료별 열전달에 관련해서는 추가적인 자료의 축적 및 분석을 통하여 연구가 이루어질 예정이다.

3. 대기온도에 의한 동결지수 결정

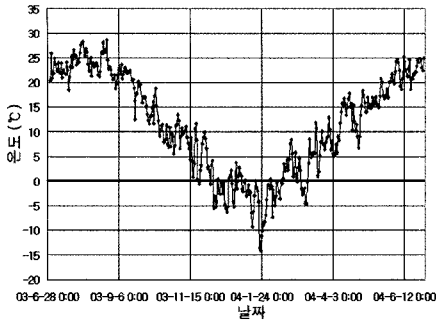
자동기상관측시스템을 통하여 2003년 7월부터

2004년 7월까지 수집된 시험도로 주변의 대기온도 데이터를 이용하여 시험도로의 일평균온도를 구하고, 이를 누적하여 동결지수를 산정하였다. 데이터의 보정 및 계산결과의 검증은 시험도로에 인접한 충주 기상관측소의 데이터를 이용하였다. 그림 7에서 보듯이 시험도로의 자동기상관측시스템을 통해 수집된 대기온도 데이터와 충주의 대기온도 데이터는 거의 유사한 결과를 보이고 있다.

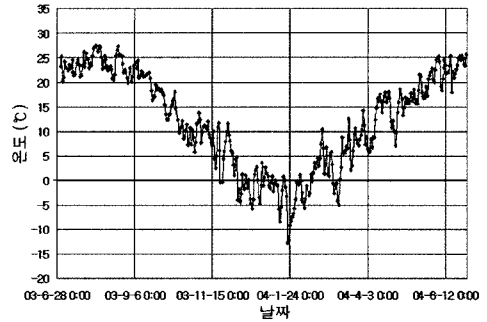
그림 7의 대기온도 데이터를 이용하여 일평균온도의 누적값을 계산한 후 그림 8과 같이 그래프로 나타내었다. 그래프의 최고값과 최저값의 차가 동결지수이며 그 대상기간이 동결지속기간이다. 표 3은 시험도로와 충주의 동결지수와 동결지속기간을 비교한 것이다.

표 3. 시험도로와 충주의 동결지수 및 지속기간 비교

위 치	동결지수 (°C-day)	동결지속기간 (day)	비 고
시험도로	200	69	2003~2004 데이터
충주 기상관측소	154	67	

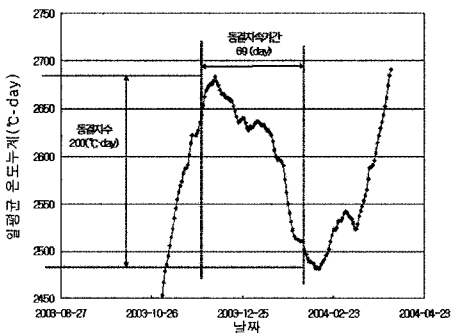


(a) 시험도로 대기온도

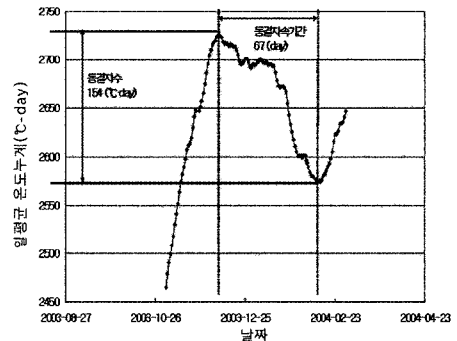


(b) 충주시상대 대기온도

그림 7. 시험도로와 충주의 대기온도 비교



(a) 시험도로 동결지수



(b) 충주 동결지수

그림 8. 동결지수 결정(2003~2004년도 자료 활용)

시험도로는 충주에 인접하지만 지리적으로 약간 더 북쪽에 위치하는데다가 국부적인 지형의 영향으로 시험도로에서 수집된 일평균 대기온도는 충주시상관측소에서 관측된 온도에 비하여 약 0.5℃에서 1℃ 가량 낮았다. 그 결과, 시험도로의 동결지수가 충주의 동결지수보다 46℃-day만큼 큰 것으로 계산되었다. 지난 2003년에서 2004년 사이의 1년간 기상자료로 계산된 충주의 동결지수는 전국의 동결지수도표(한국도로공사, 2003)에서 구한 충주의 동결지수인 522℃-day보다 훨씬 작은 것을 알 수 있다.

그림 9는 최근 30년 동안의 각 지역별 동결지수의 변화추이를 나타낸 것이다. 그림 9에서 보듯이 지구의 온난화와 각종 환경변화에 의해 전국의 동결지수가 해마다 점점 작아지는 것을 확인할 수 있으며, 충주의 경우 최근의 평균동결지수가 150℃-day 가량

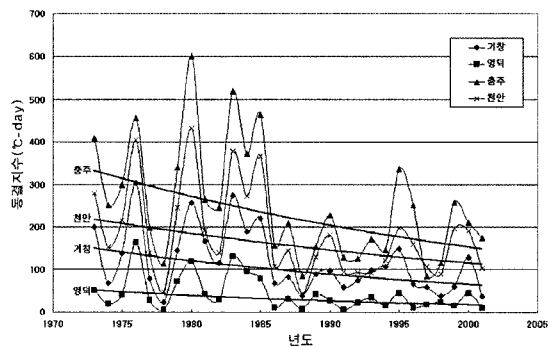
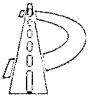


그림 9. 최근 30년간 지역별 동결지수 변화

임을 알 수 있다(홍원표 외, 2003). 게다가 동결지수선도는 최근 30년 가운데 가장 추웠던 3년을 골라 이들의 동결지수 평균값을 이용하여 작성되기 때문에 매우 큰 안전측을 갖는다. 따라서, 시험도로에서



측정된 동결지수는 시험도로 근처의 최근 동결특성을 매우 잘 나타내고 있는 것으로 판단된다.

4. 동결심도 산정 및 동결여부 조사

표 4는 식 (3)을 이용하여 계산된 시험도로와 총주의 동결심도로써, 그림 4와 5에서 보인 시험도로의 콘크리트 및 아스팔트 포장 각 단면에서 측정된 0℃ 깊이보다 더 크게 계산되었음을 알 수 있다.

표 4. 동결지수를 이용한 계산된 시험도로와 총주의 동결심도

위 치	동결지수 (°C-day)	동결심도 (cm)	비 고
시험도로	200	80.4	2003~2004 데이터
총주기상관측소	154	73.8	

노상의 상부가 가장 낮은 온도일 때의 함수량을 조사하여 그 변화를 관찰함으로써 노상상부의 동결여부를 조사하였다. 노상에 동결이 일어나면 그 주위의 공극 속에 포함되어 있는 수분이 모세관현상으로 인해 이동하여 빙편이 형성되며, 이로 인하여 빙편주위의 함수비가 갑자기 줄어든다. 함수량 자료를 통하여 이러한 변화를 관찰하여 실제 동결여부를 판단할 수 있다. 시험도로에 매설되어 있는 함수량계의 종류는 WCR(Water Content Reflectometer)이며, 이를 통하여 체적당 함수량을 추정하는 식은 다음과 같다.

$$WVC (\%) = C_0 + C_1T + C_2T^2 \quad (4)$$

여기서,

WVC : 체적당 함수량 (Volumetric Water Content)

C_0, C_1, C_2 : 보정계수

T : 주기(Microseconds)

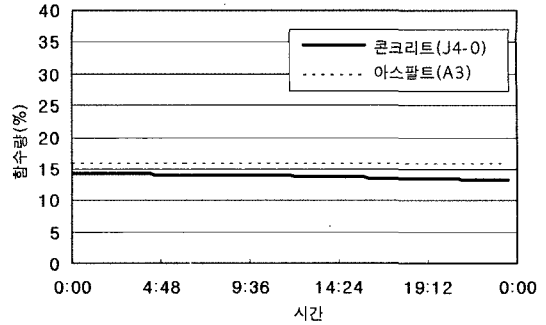


그림 10. 포장형식별 노상상부의 함수량 변화

콘크리트와 아스팔트의 각 단면 중 포장상부층의 두께가 가장 얇은 J4-0과 A3의 노상상부의 함수량을 비교하여 그림 10에 나타내었다. 일반적으로 동결이 진행되면 동결부의 함수비는 증가하고 그 주위의 함수비는 감소한다(이경하 외, 2002). 단면 J4-0 노상상부의 함수량계는 포장표면으로부터 57cm 아래에 위치하고 있으며, 단면 A3 노상상부의 함수량계는 75cm의 깊이로 식 (3)에 의하여 계산된 동결심도 내에 위치하지만, 실제로는 현장에서 측정된 0℃ 깊이의 아래에 위치한다. 그림 10에서 보듯이, 각 단면 노상상부의 온도가 가장 낮을 때의 함수량이 15% 내외로 일정하게 유지되어 실제로도 동결이 발생하지 않았음을 알 수 있다.

콘크리트와 아스팔트의 재료적인 특성에 의하여 노상상부에서 가장 낮은 온도를 나타내는 시간이 서로 다른 것을 알 수 있다. 그림 11에서 보듯이, 콘크

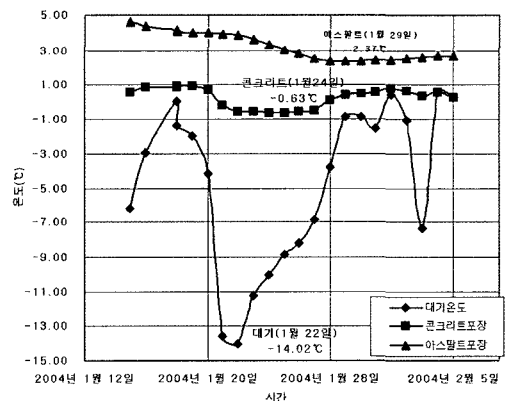


그림 11. 대기온도 변화에 따른 포장하부층(노상상부)의 온도변화 패턴



리트 포장 단면 J4-0의 경우는 대기온도가 최저로 내려간 1월 22일보다 2일 후에 노상상부에서 최저온도가 나타났으며, 아스팔트 포장단면 A3의 경우는 7일 후인 1월 29일에 노상상부에서 최저온도가 발생하였다. 이는 콘크리트 포장에 비해 아스팔트 포장상부층의 두께가 더 두꺼우며 콘크리트보다 열을 잘 전달하지 않는 재료로 구성된 것으로 추정된다. 재료의 열특성과 관련된 추가적인 연구가 계속하여 수행될 예정이다.

5. 결론

본 연구에서는 시험도로의 콘크리트 및 아스팔트 포장에 설치되어 있는 온도계 및 함수량계로부터 2003년 7월부터 2004년 7월까지 측정된 데이터를 이용하여 포장하부층의 온도분포 및 변화를 조사하였다. 또한 대기온도 데이터를 이용하여 동결지수를 산정하고 이를 이용하여 동결깊이를 추정하였다. 또한 함수량 데이터를 분석하여 실제 동결여부를 조사하였다. 이를 통한 본 연구의 주요결론은 다음과 같다.

- (1) 포장하부층의 온도데이터를 분석한 결과 노상상부의 온도가 연중 최저일 때의 0℃깊이는 포장상부층의 두께가 두꺼워질수록 깊어지는 것으로 나타났다.
- (2) 노상상부의 온도가 연중 최저인 시간에 콘크리트 포장단면의 노상상부에서 영하의 온도가 발생한 반면 아스팔트 포장단면의 노상상부는 영상의 온도를 유지하였다.
- (3) 아스팔트 포장은 단면재료와 두께별로 0℃깊이가 다양하였으며, 특히 성토부와 절토부에서의 온도차가 노상상부에서 2℃ 이상 발생하여 일사량이 포장온도에 미치는 영향이 크다는 것을 확인하였다.

- (4) 대기온도를 이용하여 계산한 시험도로의 동결지수는 약 200℃-day로서 국립건설시험소에서 발표한 동결지수선도와 비교했을 때 온난한 기후를 나타내는 해안지역과 거의 비슷한 크기였다. 하지만 온난화에 따른 최근의 동결지수 감소추이를 감안할 때 이 동결지수는 시험도로 근처의 최근 동결특성을 잘 나타내고 있다고 판단된다.
- (5) 기존의 동결심도 산정식을 이용하여 추정된 시험도로의 동결심도는 각 단면에서 실제로 측정된 0℃ 깊이보다 깊은 것으로 계산되었다.
- (6) 노상상부의 함수량 변화를 관찰한 결과 노상상부의 온도가 연중 최저인 날의 콘크리트 포장 노상상부와 아스팔트 포장 노상상부의 함수량에는 거의 변화가 없어 실제로 노상상부에 동결이 발생하지 않았음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 한국도로공사(2003), '동결지수 적용기준에 관한 연구', 연구보고서, PA-03-08
2. 한국도로공사(2002), '동결심도를 고려한 포장 하부구조 개선방안 연구', 연구보고서, 도로연 02-
3. 이경하, 김형배(2002), "도로포장에서 동상특성 및 동결심도", 도로포장공학회지, 4-1, pp. 6-18
4. 김상호, 김수삼(1999), "도로포장에서 동결심도 실측치와 포장재료의 열적정수를 고려한 심도비교", 대한토목학회논문집, 3-1, pp. 37-48
5. 홍원표, 박선수(2003), "최근 우리나라 기후변화에 따른 동결지수의 변화추이", 대한토목학회논문집, 제 23권, pp. 4134-4137
6. Department of the Army and the Air Force(1988), "Pavement Design for Seasonal Frost Conditions", AFM 88-6

(접수 : 2005. 1. 14)