

# 아스팔트 교면포장의 온도예측 모형개발

## Temperature Prediction Model of Bridge Deck Pavement

인병역\* · 이정훈\*\* · 이현종\*\*\*

In, Byung Eock · Lee, Jung Hun · Lee, Hyun Jong

### 1. 서론

포장체의 변형거동에 영향을 미치는 요인으로서 크게 차륜에 의한 교통하중과 포장체의 온도변화를 들 수 있다. 아스팔트 콘크리트는 온도의 변화에 따라 탄성계수가 변하므로 포장의 구조해석에 있어서 온도에 따른 탄성계수의 산정과 Superpave에 의한 아스팔트의 등급 결정을 위해서는 포장체 내의 온도를 예측하는 것이 필요하다. 아스팔트 포장체의 온도예측을 위한 모형들은 이미 기존의 연구를 통해 많이 제안되어 있으나 교면포장은 혹독한 기상조건에 노출이 되어있어 일반 토공부 포장과 환경적인 조건의 차이가 있고, 이로 인해 포장체의 온도변화 양상이 토공부 포장과 다르게 나타나게 된다. 따라서, 교면포장의 온도예측을 위한 별도의 모형개발이 필요하다.

본 연구에서는 포장체 표면과 내부의 온도변화 특성을 파악하기 위하여 기상청의 월평균최고기온과 최저기온 자료를 기초로 지역적 동질성을 대표 할 수 있는 논산, 안동, 함평, 인제, 강화의 5개 지역을 선정하고, 포장체 표면온도와 내부온도를 계측하였다. 포장의 표면온도예측은 열평형방정식과 회귀식을 통하여 시간에 따른 표면온도의 분포를 예측하고, 이 결과로부터 열전도이론을 이용하여 내부 온도를 예측하는 수치모형을 도입함으로써 깊이에 따른 내부온도를 예측하였다.

### 2. 포장체 온도 계측

#### 2.1 계측지역 선정 및 계측방법

기상청자료를 바탕으로 지역적 동질성을 대표 할 수 있는 지점을 검토하여 표 1과 같이 5개 지역을 선정 하였으며, 포장내부의 온도와 대기온도 계측은 30분 간격으로 측정하였다. 아스팔트포장의 두께는 표 1과 같고, 그림 1에서 보는 바와 같이 기존 아스팔트포장에 코어를 채취하여 내부 측면의 1, 2.5, 5cm 깊이와 포장 표면에 Thermocouple을 매설하였다.

표 1. 포장온도 측정지역 및 포장두께

지역구분	측정위치	포장두께	바닥판 두께
충남 논산	계룡대교	5 cm	140 cm
경북 안동	· 대평교	5 cm	20 cm
강원 인제	가오작교	5 cm	24 cm
전남 함평	신동창교	5 cm	20 cm
경기 강화	초지대교	8 cm	30 cm

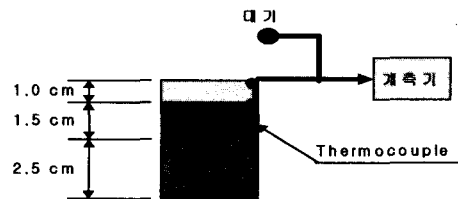


그림 1. 포장내부 Thermocouple 매설 단면

\*정회원 · 세종대학교 토목환경공학부 석사(E-mail:magic-4u@daum.net)

\*\*정회원 · 세종대학교 토목환경공학부 박사과정(E-mail:ugg97@korea.com)

\*\*\*정회원 · 세종대학교 토목환경공학부 조교수 · 공학박사 · 02-3408-3812(E-mail:hlee@sejong.ac.kr)



### 2.2 계측에 의한 포장체 내부온도분포

논산, 안동, 인제의 5월과 강화의 9월중 기상상태가 양호했던 날을 중심으로 포장내부온도분포를 나타 내면 그림 2~5와 같다. 각 지역의 계측 결과에서 공통적으로 포장표면에 가까울수록 온도변화의 폭이 크 고, 외부온도에 대한 포장체의 온도변화는 재료자체의 열이 전도되는 시간만큼 심도가 깊어질수록 시간지 연이 있음을 알 수 있다. 또한 각 측정 지점별 야간의 최저온도는 5시 30분, 주간의 최고온도는 14시경으 로 일정하게 발생함을 알 수 있다.

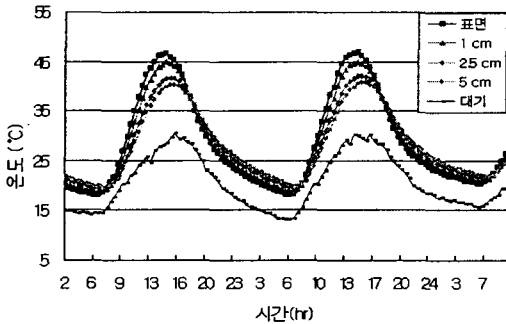


그림 2. 포장체 온도분포 (논산 5월)

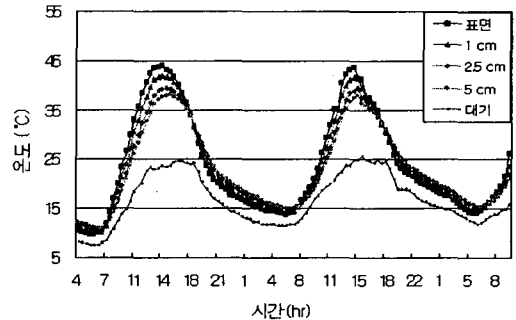


그림 3. 포장체 온도분포 (안동 5월)

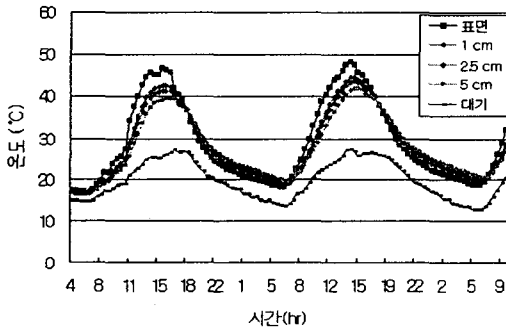


그림 4. 포장체 온도분포 (인제 5월)

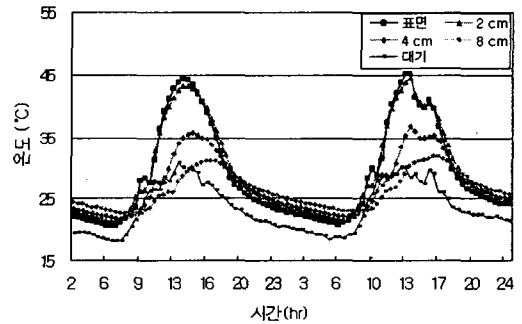


그림 5. 포장체 온도분포 (강화 9월)

### 3. 포장체 표면온도 예측

포장체의 온도는 일사량, 대기온도, 풍속, 운량, 강우량 등의 환경조건, 포장하부상태의 외부적인 조건 과 포장체 자체의 물리적 조건에 의하여 영향을 받는다. 이 중 특히 일사량과 대기온도는 포장체의 온도 변화에 영향을 미치는 가장 큰 요인이 된다. 본 연구에서 표면의 최고, 최저온도 예측은 열전달과 태양복 사의 원리에 기초한 Solaimaniam and Kennedy(1993)에 의해 제안된 열평형방정식을 적용하였다.

#### 3.1 포장표면의 최고온도 예측

포장표면의 최고온도예측에 사용된 식은 식 (1)과 같고, 이 식을 적용하여 대기온도로부터 아스팔트포 장의 표면온도를 예측하였다. 이 식에 사용된 물성과 변수는 표 1과 같이 Solaimaniam and Kennedy에 의해 제안된 범위 내의 값을 적용하였다.



$$422 \alpha_1 \tau_a^{1/\cos z} \cos z + \epsilon_a \sigma T_a^4 - h_c(T_s - T_a) - \frac{k}{x}(T_s - T_x) - \epsilon \sigma T_s^4 = 0 \tag{1}$$

여기서,  $T_a$  : 대기온도,  $T_s$  : 표면온도,  $T_x$  : 깊이  $x$ 에 해당하는 온도,  $\alpha_1$  : solar absorbtivity  
 $z$  : zenith angle,  $\epsilon_a$  : 대기복사계수,  $h_c$  : 표면전달계수,  $\tau_a$  : transmission coefficient  
 $\sigma$  : Stefan-Boltzman constant (  $5.68E-8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  ),  $k$  : thermal conductivity

표 2. 포장표면 최고, 최저온도 예측에 사용된 물성 및 변수

구분	범위	적용된 입력값
solar absorbtivity	0.85-0.93	0.9
emissivity	0.85-0.93	0.9
thermal conductivity (W/m·℃)	0.744-2.891	1.36
transmission coefficient	clear : 0.81	clear : 0.80
	cloudy : 0.62	cloudy : 0.65
coefficient for atmospheric radiation	day : 0.53-0.72	day : 0.7
	night : 0.61-0.83	night : 0.89
surface heat transfer coefficient (W/m <sup>2</sup> ·℃)	day : 17.04-22.72	day : 19.8
	night : 7.95-14.20	night : 8.3
solar constant (W/m <sup>2</sup> )	1349	1349

### 3.2 포장표면의 최저온도 예측

포장표면의 최저온도 예측에 있어서 야간 동안에는 태양복사가 발생하지 않고 표면보다 내부온도가 높게 된다. 이러한 관계를 식 (1)에 적용하면 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_a \sigma T_a^4 - h_c(T_s - T_a) - \frac{k}{x}(T_s - T_x) - \epsilon \sigma T_s^4 = 0 \tag{2}$$

### 3.3 포장표면의 시간별 온도 예측

시간에 따른 표면온도의 예측은 실측된 자료의 회귀분석을 통해 얻어진 식 (3)과 포장표면의 최고, 최저온도를 적용하여 시간에 따른 표면온도의 분포를 얻을 수 있다. 그림 6~8는 논산, 안동, 인제, 강화 지역의 표면온도 실측자료와 계산에 의해 얻어진 시간에 따른 표면온도의 분포를 비교하였다.

$$T_t = T_0 + Ae^B \tag{3}$$



여기서,  $T_t$  : 표면온도,  $T_0$  : 표면 최저온도,  $A$  : 표면의 최저, 최고온도차,  $B = -0.5 \left[ \frac{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)}{c} \right]^2$   
 $t$  : 현재시간(hr),  $t_0$  : 표면온도가 최고인 시간(hr),  $c$  : 계수값 (0.24~0.28)

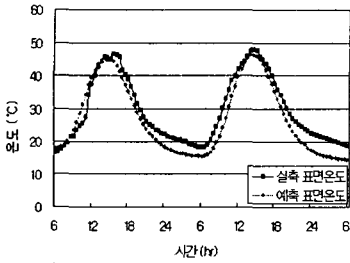


그림 6. 예측 표면온도(안동 5월)

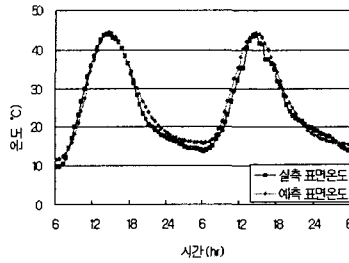


그림 7. 예측 표면온도(인제 5월)

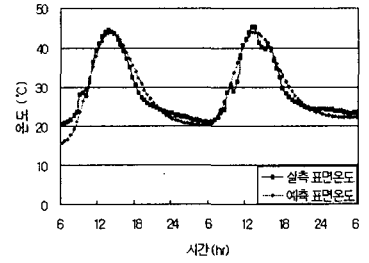


그림 8. 예측 표면온도(강화 9월)

#### 4. 포장체 내부온도 예측

##### 4.1 열전도이론

본 연구에서는 포장의 표면온도로부터 내부온도를 예측하기 위하여 다음의 식 (4)와 같은 1차원 열전도 방정식을 적용하였으며, 해석에 사용된 열전도 관련 물성을 정리하면 표 1과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \tag{4}$$

여기서,  $T$  : 온도,  $t$  : 시간,  $z$  : 지표면으로부터의 깊이,  $\alpha = \text{thermal diffusivity} = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$

$k$  : thermal conductivity,  $\rho$  : density,  $C_p$  : specific heat

표 3. 수치해석에 사용된 물성

물성종류	아스팔트	콘크리트
밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	2.4	2.3
열전도율 (cal/s·cm·°C)	0.00344	0.00375
비열 (cal/g·°C)	0.2	0.22

- Grid point involved in space difference
- × Grid point involved in time difference

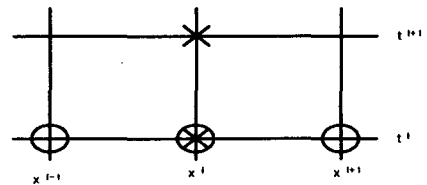


그림 10. explicit 형식의 계산분자

포장내부의 온도는 유한차분법의 하나인 Explicit 방법을 적용 하였으며, 이 방법은 현재 시간의 한 노드와 그 주변의 노드로부터 미래 각 노드에서의 값을 구하는 방법이다. 즉  $t=0$  에서의 온도분포를 알면 식 (5)로부터  $\Delta t$  에서의 온도를 산정할 수 있다. 해석에 있어서의 경계조건은 포장의 표면온도를 적용하며, 초기 포장내부 온도는 포장표면의 시작온도로 가정하며, 시간의 경과에 따라 초기 내부온도의 영향은 소멸하게 된다.



$$T'_i{}^{+1} = T'_i + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} (T'_{i+1} - 2T'_i + T'_{i-1}) \quad (5)$$

**4.2 실측치와 예측치의 비교**

실측한 포장체 내의 온도분포와 수치해석을 통해 예측한 포장체의 온도분포를 비교하였으며 대표적인 예 를 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 그림 9는 가장 예측이 잘된 경우이고 그림 10은 예측이 가장 오차가 큰 경우 이다. 그림에서 보는바와 같이 실측 및 예측온도간의 낮 최고온도의 차이는 2℃ 미만이었으나 야간동안 의 최저온도의 차이는 5℃ 미만으로 예측되어 최고온도 예측이 보다 정확함을 알 수 있다. 또한 포장의 심도 가 깊어질수록 실측 및 예측 온도의 차이는 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 포장체가 갖는 구조적인 요인 즉, 포장의 재료적인 성질이 일정하다고 가정한 것이 하나의 원인이 될 수 있다.

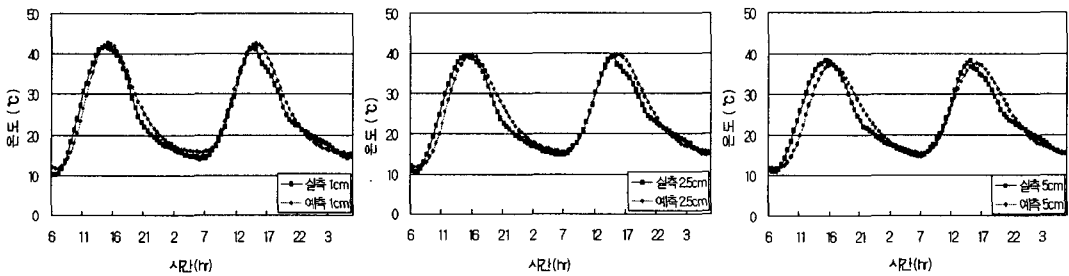


그림 9. 실측 내부온도와 예측 내부온도의 비교 (안동 5월)

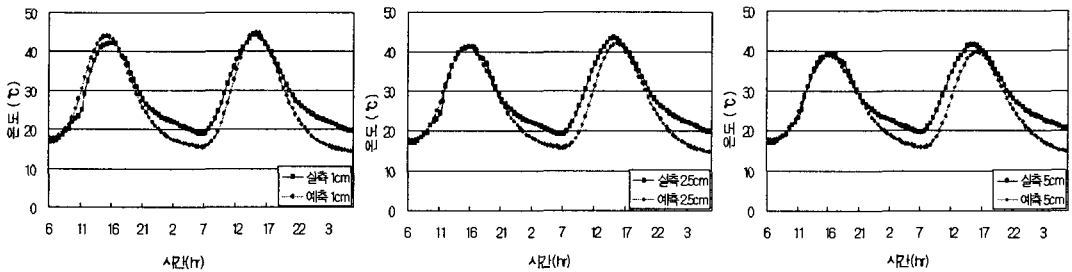


그림 10. 실측 내부온도와 예측 내부온도의 비교 (인제 5월)

**5. 결 론**

본 연구에서는 열평형식을 이용하여 대기온도로부터 교면포장의 표면온도를 예측하고, 이 표면온도를 수 치해석에 필요한 경계조건으로 하여 내부온도를 예측하였으며, 실측자료와 비교분석 하였다. 표면최대, 최소 온도의 예측결과와 계측한 결과를 비교할 때 오차가 ±2℃로 비교적 정확한 값을 얻을 수 있었고, 표면온도 예측의 오차를 최소화 하게 되면, 내부온도를 예측하는데 있어 좀더 정확한 값을 얻을 수 있을 것으로 판단 된다. 또한 본 연구에서 분석에 필요한 계측자료의 부족으로 겨울철에 대한 적용성의 문제가 될 수 있다. 따 라서, 좀더 정확하고 계절에 따른 온도변화의 특성을 고려하려면 1년 이상의 장기적인 계측결과가 필요하며, 추후 연구를 통해 본 연구에서 개발한 모형의 정확성을 검증하고 보정할 계획이다.



### 감사의 글

본 연구는 한국건설연구원의 2003년 기본연구과제 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. L. Shao, S. W. Park, Y. R. Kim , A Simplified Procedure for Prediction of Asphalt Pavement Subsurface Temperatures Based on Heat Transfer Theories.
2. S. W. Park, Assoc. Member, ASCE, and Y. Richard Kim, Member, ASCE , An Application of Heat Conduction to Predict Subsurface Temperature in a Pavement System.
3. H. S. Carlaw, J. C. Jaeger , (1957) Conduction of Heat in Solids. 2nd Ed.