

현장 계측자료를 이용한 아스팔트 포장체 온도 예측 연구

A Study on the Temperature Prediction for Asphalt Pavement Using Field Monitoring Data

안덕순* · 박희문** · 엄병식*** · 김제원****

An, Deok Soon · Park, Hee Mun · Eom, Byung Sik · Kim, Je Won

Abstract

Temperature prediction in asphalt pavements is the one of most important factors for estimating the pavement response and predicting the pavement performance in the mechanistic-empirical pavement design. A study on temperature prediction procedure with variation of time and depth in asphalt pavements was conducted using field monitoring data. After selecting the temperature monitoring sections, the temperature sensors have been installed in different depths and the temperature data have been collected in every one hour. The developed pavement temperature prediction model was calibrated using field monitoring temperature data. The predicted temperatures were compared with measured temperatures at different seasons in selected sections. The results showed that the solar absorptivity and emissivity values in the fall is different from the values in other seasons. The predicted temperatures agree well with the measured temperatures at a wide range of temperatures. The temperature differences between each other fall in the range of $\pm 3^{\circ}\text{C}$. It is also found that the regional characteristics did not affect the temperature prediction procedure.

Keywords : temperature prediction model, M-E design, heat equilibrium equation, t-test

요 지

아스팔트 포장체내의 온도예측은 역학적-경험적 포장설계법에서 포장의 거동해석 및 공용성 예측시 매우 중요한 요소 중 하나이다. 본 연구에서는 현장 온도 계측자료를 이용하여 아스팔트 포장체의 시간별, 깊이별 온도예측에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 전국의 대표 지점을 선정하여 깊이별로 온도계측 센서를 매설하고 주기적으로 대기, 포장표면 및 내부온도를 계측하였으며, 이 현장 자료를 이용하여 개발된 온도 예측 모델의 보정을 수행하였다. 보정된 온도예측 모델을 이용하여 포장체의 표면 및 중간깊이의 온도를 예측한 후에 현장 계측자료와 비교분석하였다. 본 연구의 결과, 온도예측 모델에 필요한 계수값 중 가을철의 경우 태양흡수율과 방사율(emissivity) 값이 다른 계절과 다르게 나타났다. 아스팔트 포장체 중간 깊이에서의 예측과 실측 온도차는 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 내이며, 온도 예측 모델이 현장 온도를 정확히 예측할 수 있음을 입증하였다. 또한, 온도예측에 있어서 지역별 특성의 영향은 받지 않는 것으로 증명되었다.

핵심용어 : 온도예측모델, 역학적-경험적 설계, 열평형방정식, T-test

1. 서 론

역학적-경험적 개념을 도입한 아스팔트 포장설계에 있어서 포장체의 온도는 반드시 필요한 환경인자 중의 하나이다 (Marshall et al., 2001; Park et al., 2001). 시간별, 계절별 아스팔트층 온도 변화를 파악하면 아스팔트 재료의 탄성계수 변화 또한 정확히 예측할 수 있다. 정확한 재료의 물성을 이용하여 포장체의 거동을 조사하고, 포장의 설계수명을 정확히 예측할 수 있다(FHWA, 2000, 2001). 이러한 이유로, 국내에서도 정확한 포장체의 온도를 예측할 수 있는 모

델의 개발이 필요하였다. 본 연구는 한국형 포장 설계법의 일환으로 대기온도와 온도 변화 특성을 이용하여 포장내부 온도를 예측할 수 있는 기법 및 절차를 소개하고 있다.

본 연구에서는 전국 11개 대표구간에 포장 깊이별로 온도 계측 센서를 매설하여 1시간 간격으로 1년동안 온도자료를 수집하였다. 열평형방정식, 열전도이론을 기초로한 온도예측 알고리즘을 이용하여 시간별, 계절별 포장체 내부온도를 예측하는 연구를 수행하였다. 현장 자료를 이용하여 기존 모델을 검증하였으며 보정 절차를 실시하여 정밀도를 향상시켰다. 연구 결과, 아스팔트 포장체 중간 깊이에서의 예측과 실

*한국건설기술연구원 도로연구부 연구원 (E-mail : dsan@kict.re.kr)

**정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원 (E-mail : hpark@kict.re.kr)

***한국건설기술연구원 도로연구부 연구원 (E-mail : bseom@kict.re.kr)

****정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원 (E-mail : jewonkim@kict.re.kr)

측 온도차는 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 내이며, 온도 예측 모델이 실제 계측온도를 정확히 예측할 수 있음을 입증하였다. 또한 온도예측에 있어서 지역별 특성의 영향은 받지 않는 것으로 증명되었다.

2. 온도계측 센서의 매설 및 자료 수집

본 연구에서는 포장체 내부온도의 정확한 현장 온도계측을 위해 포장형식, 포장두께, 지역조건, 기후조건을 고려하여 전국의 여러 지점을 대상으로 사전조사를 실시한 후 온도계측 센서를 매설하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 3개 지역, 11개 지점에 대하여 온도계측기를 매설하였다. 온도계측 센서의 매설깊이는 아스팔트층의 총두께(D)를 기준으로 표면, D/6, D/3, D/2, D로 하였다.

포장체 내부온도를 계측하기 위해 매설된 온도계측 센서를 이용하여 대기온도 및 포장체의 깊이별 온도를 매 1시

표 1. 온도계측 센서 매설 구간

지역구분		매설지역
고산지역	북부	진부령, 양구, 평창
	중부	추부
	남부	-
내륙지역	북부	신평
	중부	충주
	남부	영주, 산청
해안지역	북부	-
	중부	당진
	남부	성진, 통도사

간 간격으로 지속적으로 수집하였으며, 2004년 1월 1일 00시부터 온도자료를 수집하기 시작하여 현재까지 수집되고 있다. 또한 대기온도자료에 대해서는 백엽상을 이용하여 수집하였다.

3. 현장 온도계측 자료의 분석

현장에서 계측된 온도자료를 보면 기후가 양호할 때 시간에 따른 온도변화가 일정 sin 곡선의 형태로 나타났다가(그림 1의 A, Kim et al., 1996a). 그러나 강수, 강설 등의 기후변화가 나타날 때는 시간에 따른 온도변화 형태가 불규칙하게 나타났다가(그림 1의 B). 특히, 여름철의 경우에는 장마로 인해 온도의 패턴이 상당히 불규칙하게 나타났다. 본 연구에서는 약 5일간 온도변화 형태가 규칙적으로 나타나는 기간의 자료를 이용하였다(그림 2).

대기 및 표면의 최고온도는 계절에 상관없이 14~15시 사이에서 발생하는 것으로 나타났으며, 최저온도는 겨울의 경우 8시, 봄과 여름의 경우 6시, 가을의 경우 7시에 발생하는 것으로 나타났다. 포장체 내부 온도예측은 포장체 깊이별 온도가 동일한 시점에서부터 시작하였다(Crossing time). 그림 2는 일반적인 Crossing time의 시점을 나타내고 있다. 계측자료 조사결과, Crossing time은 지역에 따라서는 영향이 없고, 계절에 따라서만 변화하는 것으로 나타났다. Crossing time은 겨울의 경우 10시, 봄과 여름의 경우 8시, 가을의 경우 9시에 발생하는 것으로 나타났다. Crossing time은 하루에 오전과 오후 두 번 나타나는데 본 연구에서는 오전에 나타나는 Crossing time을 이용하였다.

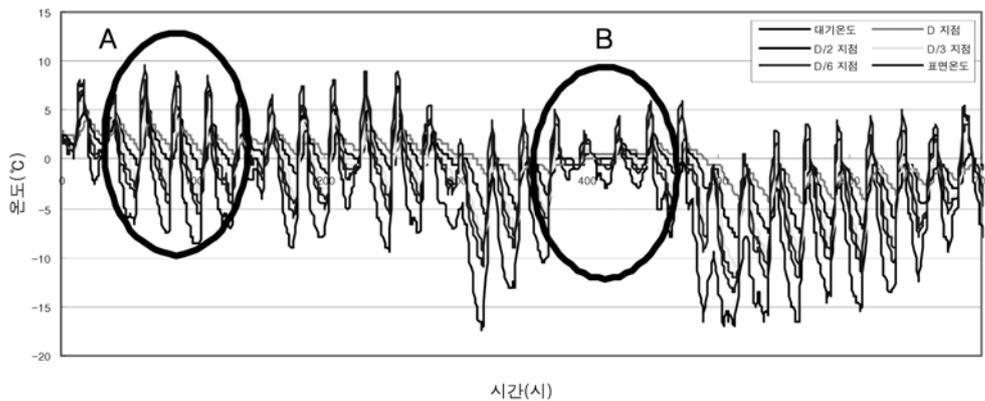


그림 1. 충주지역 1월의 온도분포

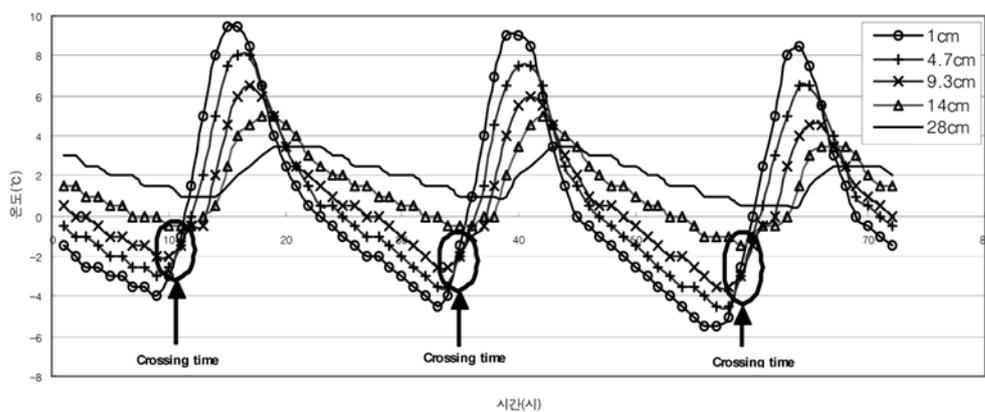


그림 2. Crossing time 분석

4. 포장체 온도예측

본 연구에서 아스팔트 포장체의 온도예측을 위해 열평형방정식과 열전도이론을 이용하였다. 이 이론은 포장체 깊이별로 온도가 동일해지는 시점을 기준으로 시간에 따라 온도가 변화하면서 포장체 내부로의 온도를 예측하는 것이다. 여기에 필요한 계수값들에 대해서는 국내의 온도분포를 잘 반영할 수 있는 값을 사용하였다.

4.1 포장체 온도예측모델의 논리

본 연구에서는 아스팔트 포장체 내부의 온도를 정확히 예측하고자 열전도이론을 도입한 모델을 적용하였다. 그림 3은 본 연구에 적용된 모델의 온도예측을 위한 흐름도를 나타내고 있다(인병억, 2003; Kim et al., 1996a; Kim et al., 1996b). 이 모델의 온도예측 절차는 먼저 대기온도로부터 포장표면의 최고/최저온도를 예측하고, 이 값을 이용하여 시간 변화에 따른 표면온도 profile을 생성한다(그림 3). 이렇게 생성된 profile을 통하여 Crossing time에서의 초기온도를 결정하고 포장 깊이별, 시간별로 포장체의 온도를 예측한다. 그리고 예측된 포장체 온도를 이용하여 표면온도(T_s)와 임의의 깊이온도(T_x)의 편차를 비교한 후 오차범위를 만족할 경우에 최종적으로 포장체 온도를 예측한다. 만일 오차범위를 만족하지 않는다면 오차범위를 만족할때까지 앞의 과정을 반복한다(그림 3).

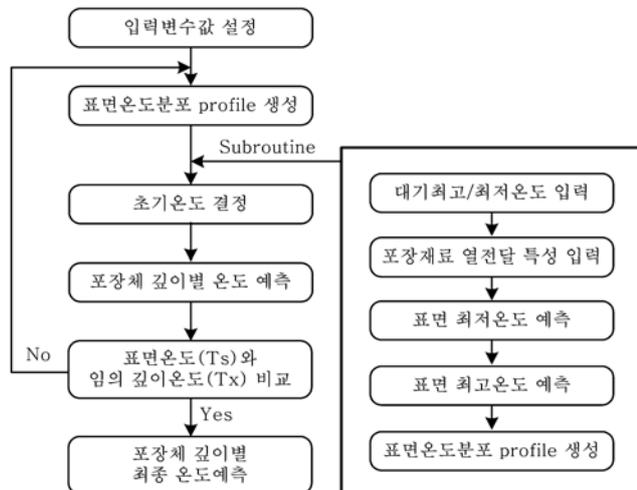


그림 3. 온도예측모델의 포장체 온도예측 과정

4.2 온도예측모델의 적용

본 연구에서는 그림 3의 논리에 따르는 모델을 적용하기 위해 먼저 포장체 온도예측에 필요한 계수값에 대한 분석을 실시하였다. 온도예측 모델 계수값들의 민감도 분석을 실시하여 아스팔트 포장체의 온도를 가장 적절하게 예측할 수 있는 값들을 결정하였다. 본 연구에서 이용되는 열평형방정식에 입력되는 기본 계수값은 표 2와 같다. 입력변수 중에서 특이한 사항은 가을철의 경우 다른 계절과는 달리 태양 흡수율과 방사율(Emissivity)의 값이 서로 반대로 나타났다. 가을철에 대해 다른 변수가 온도에 미치는 영향을 분석하였지만 현장의 온도를 가장 잘 표현하는 것은 태양흡수율과 방사율의 값을 변화시키는 것이었다. 이것은 가을철이 다른

표 2. 열평형 방정식 입력변수

구분	범위	적용된 입력값	
태양 흡수율(α_1)	0.85-0.93	겨울, 봄, 여름	0.85
		가을	0.93
Emissivity($\bar{\epsilon}_a$)	0.85-0.93	겨울, 봄, 여름	0.93
		가을	0.85
열확산계수(m^2/hr)	0.0035-0.0055	0.0037	
열전도율(k) ($Btu/hr \cdot ft \cdot ^\circ F$)	0.43-1.67	1.3	
		전달계수(τ_a)	맑음 : 0.81 흐림 : 0.62
대기복사계수($\bar{\epsilon}_a$)	낮 : 0.53-0.72 밤 : 0.61-0.83	0.7	
		표면열전달계수(h_c) ($Btu/hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$)	낮 : 3.0-4.0 밤 : 1.4-2.5
태양상수 ($Btu/hr \cdot ft^2$)	442	442	

계절에 비해 태양의 열을 많이 흡수하고 거의 방사하지 않는다는 것을 의미한다. 또한 각 지역별로 같은 계수값을 적용하였다. 전달계수(τ_a)는 날씨와 관련된 계수로 구름의 양(운량)에 따라서 변화되는 값이다. 현재 국내의 경우 각 측후소에서 운량을 측정하고 있지만 일부 지역에 대해서는 측정되지 않고 있다. 따라서 자료수집의 어려움으로 인해 이 값에 대해서는 평균값을 적용하였다.

앞에서 결정된 입력변수를 이용하여 아스팔트 포장체의 표면 최고/최저 온도예측을 위한 열평형 방정식은 식 (1), 식 (2)와 같다(Solaimanian and Kennedy, 1993).

4.2.1 표면 최고온도의 계산

$$R_0 \alpha_1 \tau_a^{1/\cos z} \cos z + \epsilon_a \sigma T_{air}^4 - h_c (T_s - T_{air}) - \frac{k}{x} (T_s - T_x) - \epsilon \sigma T_s^4 = 0 \quad (1)$$

여기서,

R_0 : 태양상수($442 Btu/hr \cdot ft^2$)

z : 천정각(the zenith angle)

α_1 : 태양 흡수율(solar absorbtivity, 아스팔트 콘크리트 = 0.85~0.93)

τ_a : 전달계수(transmission coefficient, 맑음 = 0.81, 흐림 = 0.62)

ϵ_a : 대기복사계수(the coefficient for atmospheric radiation)

σ : Stefan-Boltzman 상수($5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)

T_a : 대기온도(K)

T_s : 포장표면온도

h_c : 표면 열전달계수(the surface coefficient of heat transfer)

k : 열전도율(thermal conductivity)

T_x : 포장깊이 x 에서의 온도

ϵ : Emissivity

4.2.2 표면 최저온도의 계산

표면 최저온도의 예측에 필요한 변수는 최고온도 예측시에 필요한 변수와 동일하다. 그러나 최저온도의 경우에는 새

벽에 나타나기 때문에 식 (1)의 태양상수가 포함된 항의 값이 0이 된다. 따라서 최저온도의 계산을 위한 식은 식 (2)와 같다.

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

4.3 온도계측 결과 분석

4.3.1 계절별 · 지역별 온도예측 결과 비교

본 연구에서 적용된 모델을 이용하여 각 지역의 온도를 예측하였다. 온도계측 센서가 매설된 11개의 지역 중에 당진, 신평, 영주 지역의 센서는 파손되어 포장체 온도를 계측하지 못하였다. 따라서 나머지 8개 지역에 대해 온도를 예측하였다 (그림 4~그림 7). 본 논문에서는 진부령 지점에 한정해 계절별로 나타내었다. 또한 아스팔트 포장의 깊이별로 매설된 계

측센서 중 표면과 중간 지점의 온도예측 결과를 나타내었다.

전반적으로 최고 및 최저온도의 예측결과는 정확하였으나, 겨울과 가을철의 경우에는 온도 하강시 실측값과 예측값 온도편차는 봄이나 여름에 비해 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 모든 지역에서도 동일하게 나타났다. 이 연구에서는 지역특성이 포장체의 온도예측에 영향을 미치지 않는 것으로 파악되었다.

4.3.2 최고/최저 온도예측 결과 비교

각 지점에서 계측된 자료와 본 연구에서 적용된 모델을 이용하여 8개 지점에 대한 중간 깊이의 계절별 최고/최저 온도를 예측한 결과는 표 3, 표 4와 같으며, 그림 8, 그림 9와 같이 나타났다.

그림 8과 그림 9에서 보듯이 계절별 중간 깊이의 예측 온도는 최고/최저온도 모두 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 이내에서 예측이 가능하였

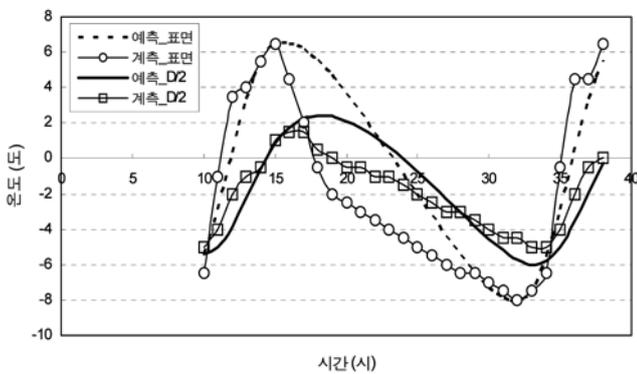


그림 4. 진부령지역의 겨울철 온도예측 결과(표면, 중간)

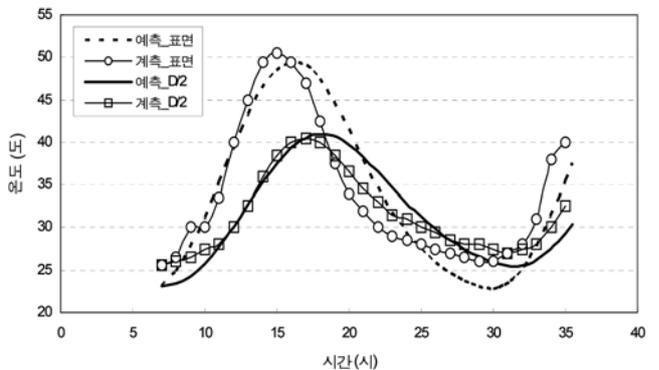


그림 6. 진부령지역의 여름철 온도예측 결과(표면, 중간)

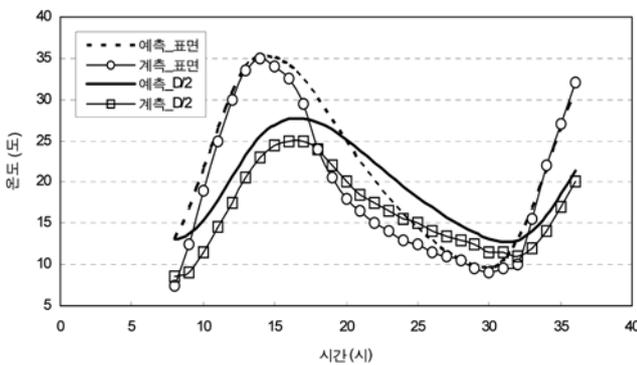


그림 5. 진부령지역의 봄철 온도예측 결과(표면, 중간)

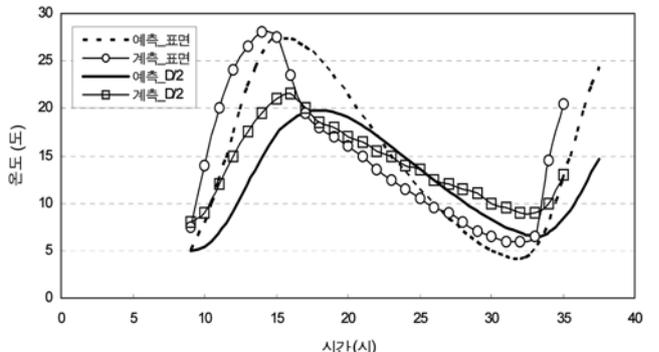


그림 7. 진부령지역의 가을철 온도예측 결과(표면, 중간)

표 3. 중간 깊이의 최고온도 예측 결과

지역	겨울(1월)		봄(4월)		여름(7월)		가을(10월)	
	Max(실측)	Max(예측)	Max(실측)	Max(예측)	Max(실측)	Max(예측)	Max(실측)	Max(예측)
진부령	1.50	2.43	25.00	27.73	40.50	40.97	21.50	19.81
양구	1.50	1.89	24.50	22.10	D/N	D/N	18.50	18.20
평창	D/N	D/N	30.00	26.04	41.50	40.12	D/N	D/N
추부	5.00	6.47	26.50	24.39	39.00	39.47	22.00	17.54
충주	5.00	5.48	25.00	25.57	40.50	38.95	D/N	D/N
산청	4.50	1.74	23.50	21.68	D/N	D/N	22.00	21.05
성전	8.50	8.71	25.50	26.52	40.50	39.39	29.00	28.06
통도사	7.50	7.67	28.00	27.78	40.50	39.27	23.50	22.92

* D/N : 온도계측 센서의 파손으로 인한 계측 불가

표 4. 중간 깊이의 최저온도 예측 결과

지역	겨울(1월)		봄(4월)		여름(7월)		가을(10월)	
	Min(실측)	Min(예측)	Min(실측)	Min(예측)	Min(실측)	Min(예측)	Min(실측)	Min(예측)
진부령	-5.00	-6.01	11.00	12.71	27.00	25.43	9.00	6.56
양구	-5.00	-6.17	10.00	9.46	D/N	D/N	10.00	8.41
평창	D/N	D/N	12.00	13.41	26.50	24.06	D/N	D/N
추부	0.50	0.84	16.50	13.44	30.50	28.29	12.00	9.77
충주	-0.50	-1.33	14.50	14.55	29.50	26.91	D/N	D/N
산청	-2.00	-4.04	12.00	10.64	D/N	D/N	12.50	10.76
성전	2.00	1.24	15.50	15.65	31.00	27.82	19.50	19.00
통도사	1.50	1.00	18.50	17.65	31.50	28.09	16.00	16.72

* D/N : 온도계측 센서의 파손으로 인한 계측 불가

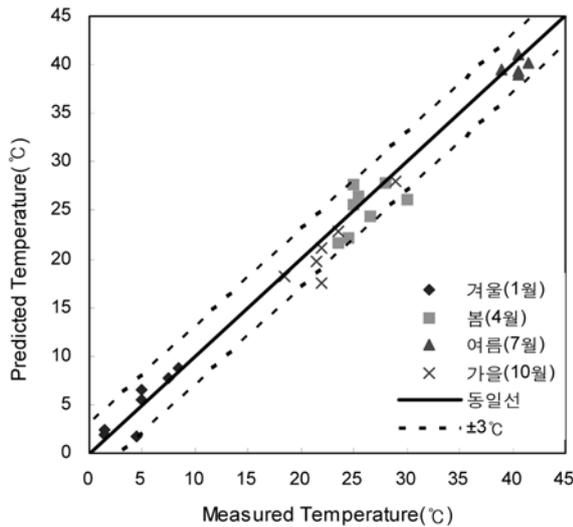


그림 8. 계절별 중간 깊이의 최고온도 예측 결과

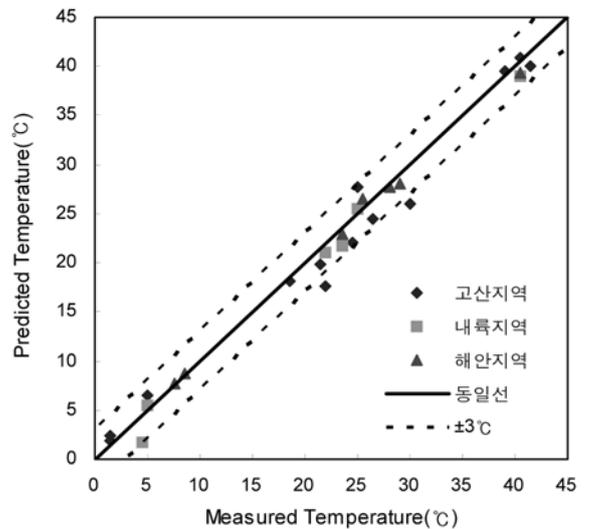


그림 10. 지역별 중간 깊이의 최고온도 예측 결과

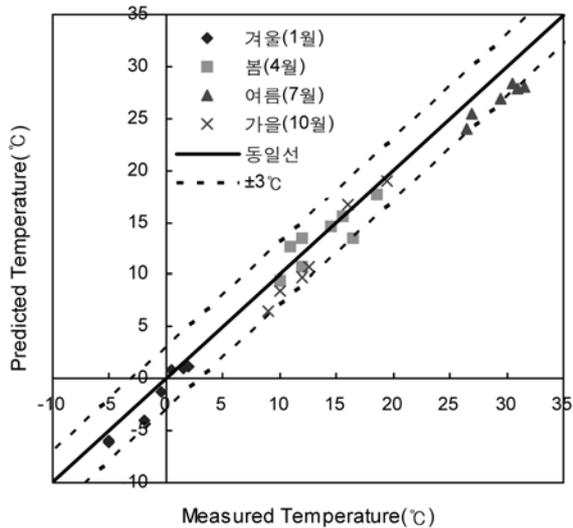


그림 9. 계절별 중간 깊이의 최저온도 예측 결과

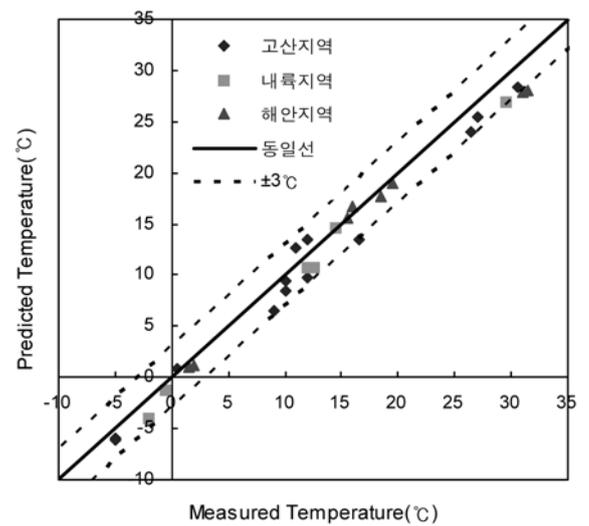


그림 11. 지역별 중간 깊이의 최저온도 예측 결과

다. 여름철 최저온도의 경우에는 과소 예측되는 것을 볼 수 있다. 국내 아스팔트 포장의 중간 깊이에서 여름철 온도는 최저온도는 27~30°C, 최고온도는 40°C 정도로 나타났다.

본 연구에서는 온도를 예측하는데 있어 지역별로 계수값의 변화가 있는지를 분석하였다. 이를 위해 지역별로 같은 계수값을 적용하여 온도를 예측하였다. 그림 10과 그림 11은 중간 깊

이의 예측결과를 지역별로 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 아스팔트 포장체의 온도변화는 지역적으로 열전도 특성이나 태양 흡수율 등의 계수값에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

4.3.3 T-test 검정

본 연구에서는 예측온도와 실측온도에 대하여 통계적 검증

표 5. 예측온도 vs 실측온도의 T-test 결과

t 통계량	t 기각치(양측검정)	자유도
2.193	2.379	26

표 6. 예측온도 vs 실측온도의 T-test 결과

항목	t 통계량	t 기각치(양측검정)	자유도
겨울	-0.249	2.969	6
봄	1.004	2.841	7
여름	1.891	3.163	5
가을	2.381	3.163	5

을 위해 유의수준 0.025로 T-test를 실시하였으며, 그 결과는 표 5와 같이 나타났다. t 통계량이 2.193으로 유의수준 0.025(양측검정)일 때, 예측온도의 값을 신뢰할 수 있다는 결론을 내릴 수 있다.

계절별로 통계적 검정을 실시한 결과, 계절별 t 통계량은 가을철이 2.381로 가장 크게 나타났다(표 6). 그러나 계절별로 유의수준 0.025에서의 T-test 결과, 예측온도의 값을 신뢰할 수 있다는 결론을 내릴 수 있다.

6. 결 론

본 연구는 전국에 온도계측 센서를 매설하고 여기에서 측정한 현장 온도자료와 열평형방정식, 열전도이론을 이용하여 아스팔트 포장의 온도예측에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에 대해 요약하면 다음과 같다.

1. 깊이별로 포장체의 온도가 동일해지는 Crossing time은 계절별로 다르게 나타났으며, 겨울에는 10시, 봄과 여름에는 8시, 가을에는 9시로 나타났다.
2. 아스팔트 포장의 중간 깊이에서의 온도는 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 내에서 예측되는 것으로 나타났다.
3. 여름철 중간 깊이에서 예측된 최저 온도는 실측온도보다 과소하게 나타났다.
4. 예측온도와 실측온도의 통계적 검증을 유의수준 0.025로 T-test를 실시하였다. 그 결과, 가을철 온도의 t 통계량이 다소 크게 나타났다. 4계절 예측온도와 실측온도의 T-test

결과(양측검정)는 t 통계량이 2.193으로 유의수준 0.025일 때, 예측온도의 값이 유효한 것으로 나타났다.

5. 본 연구에서 적용된 모델을 이용하여 겨울과 가을철 온도를 예측할 경우, 최고온도에서 최저온도로 변화할 때 온도가 급강하하는 것에 대해 예측이 정확하지 않았다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부에서 수행중인 한국형 포장설계법 성능 개선방안 연구과제와 관련한 연구수행 결과입니다.

참고문헌

- 인병익(2003) 교면포장의 온도예측 모형 개발, 석사학위논문, 세종대학교.
- FHWA (2000) *Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement*, Report No. FHWA-RD-98-085.
- FHWA (2001) *Development of A Procedure for Temperature Correction of Backcalculated AC Modulus*, Report No. FHWA/TX-02/1863-1.
- Kim, Y. R., Park, S. W., and Shao, L. (1996a) *Statewide Calibration of Asphalt Temperature Study from 1992 and 1993*, Volume 1, North Carolina State University, Raleigh.
- Kim, Y. R., Park, S. W., and Shao, L. (1996b) *Statewide Calibration of Asphalt Temperature Study from 1992 and 1993*, Volume 2, North Carolina State University, Raleigh.
- Marshall C., Meier, R. W., and Welsh, M. (2001) Seasonal Temperature Effects on Flexible Pavements in Tennessee, *Transportation Research Record 1764*, Transportation Research Board, Washington, D. C., pp 89-96.
- Park, D. Y., Buch, N., and Chatti, K. (2001) Effective Layer Temperature Prediction Model and Temperature Correction Using FWD Deflections, *Transportation Research Record 1764*, Transportation Research Board, Washington, D. C., pp 97-111.
- Solaimanian, M. and Kennedy T. W. (1993) Predicting Maximum Pavement Surface Temperature Using Maximum Air Temperature and Hourly Solar Radiation, *Transportation Research Record 1417*, Transportation Research Board, Washington, D. C., pp 1-11.

(접수일: 2005.2.16/심사일: 2005.7.28/심사완료일: 2005.11.18)