

투·보수성 시멘트 콘크리트 포장의 열물성 및 수분보유특성이 표면온도에 미치는 영향

류남형* · 유병림**

*진주산업대학교 조경학과 · **서울대학교 환경대학원

Effects of Thermal Properties and Water Retention Characteristics of Permeable Concrete Pavement on Surface Temperature

Ryu, Nam-Hyong* · Yoo, Byung-Rim**

*Dept. of Landscape Architecture, Jinju National University

**Graduate School of Environment Studies, Seoul National University

ABSTRACT

This study was undertaken to analyze the effects of pavement thermal properties and water retention characteristics on the surface temperature of the gray permeable cement concrete pavement during the summer. Following is a summary of major results.

1) The hourly surface temperature of pavement could be well predicted with a heat transfer model program that incorporated the input data of major meteorological variables including solar radiation, atmospheric temperature, dew point, wind velocity, cloudiness and the evaporation rate of the pavements predicted by the time domain reflectometry (TDR) method.

2) When the albedo was changed to 0.5 from an arbitrary starting condition of 0.3, holding other variables constant, the peak surface temperature of the pavement dropped by 11.5%. When heat capacity was changed to $2.5 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$ from $1.5 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$, surface temperature dropped by 8.0%. When daily evaporation was changed to 1 mm from 2 mm, temperature dropped by 5.7%. When heat conductivity was changed to $2.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ from $1.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, the peak surface temperature of the pavement fell by 1.2%. The peak pavement surface temperature under the arbitrary basic condition was 24.46°C (12 a.m.).

3) It accordingly became evident that the pavement surface temperature can be most effectively lowered by using materials with a high albedo, a high heat capacity or a high evaporation at the pavement surface.

The glare situation, however, is intensified by raising of the albedo, moreover if reflected light is absorbed into surrounding physical masses, it is changed into heat. It accordingly became evident that raising the heat capacity and the evaporative capacity may be the most acceptable measures to improve the thermal characteristics of the pavement.

4) The sensitivity of the surface temperature to major meteorological variables was as follows. When the daily average temperature changed to 0°C from 15°C, holding all other variables constant, the peak surface temperature of the pavement decreased by 56.1%. When the global solar radiation changed to 200 Wm⁻² from 600 Wm⁻², the temperature of the pavement decreased by 23.4%. When the wind velocity changed to 8 ms⁻¹ from 4 ms⁻¹, the temperature decreased by 1.4%. When the cloudiness level changed to 1.0 from 0.5, the peak surface temperature decreased by 0.7%. The peak pavement surface temperature under the arbitrary basic conditions was 24.46°C (12 a.m.)

Key Words: Pavement Surface Temperature Prediction Model, Sensitivity Analysis, Albedo, Heat Capacity, Daily Evaporation, Meteorological Variables

1. 서론

도시화와 더불어 지표면의 대부분은 아스콘이나 시멘트 콘크리트에 의해 포장되어 있으므로 도시 전체의 열환경을 악화시키고 있다. 더욱이 포장화에 의한 영향은 국소적인 열환경에 직접적으로 작용을 하여 생활환경을 악화시키고 있다. 구체적인 예를 들면 한 여름 낮의 콘크리트 포장의 표면온도가 50°C 이상이 되고, 노면으로부터의 반사가 보행자에게 큰 불편감을 주며, 이것에 인접한 건물의 실내 환경에도 악영향을 미친다. 또한 콘크리트 포장은 낮에 대량의 열을 축열하기 때문에 야간이 되더라도 기온보다 지표면 온도가 높아서 대기를 계속 가열한다. 이것은 실내 환경에 영향을 미치는 것뿐만이 아니고, 냉방 부하의 증가를 가져와 광역적으로는 열대야의 발생을 조장하는 요인이 되고 있다(伊藤 등, 1996). 옥외 콘크리트 상에서의 인체의 열수지 해석 결과 지면으로부터의 장파 복사가 가장 큰 부하를 주며, 이는 포장 표면온도가 이용자들에게 불편감을 주는 요인이 된다는 것을 의미한다(神田와 土屋, 1995).

포장의 고온화 억제대책으로서는 색채를 바꾸어 알베도를 높이거나, 포장이나 골재에 열전도성이나 비열을 높이며, 포장에 투수성이나 보수성을 가지게 하여 잠열을 높이고, 가로수 등의 그늘에 의한 입사량을 줄

이는 방법 등이 있다. 최대 지표면 온도에 영향을 주는 것은 포장의 알베도, 열용량, 열전도율 순이며, 각각이 기준상태의 5배로 되었을 때 최대 포장 표면온도는 각각 22%, 9%, 4% 증가한다는 것도 밝혀졌다(木内와 小林, 1999). 아스팔트 콘크리트 포장 표면의 최대온도는 알베도 값 0.1이 증가하면 -3.7°C 감소하며, 기온은 알베도 값을 0.1에서 0.3으로 높이면 약 0.6°C 감소하고 아스팔트 결합재를 살포한 후 굳기 전에 직경이 약 6mm 가량의 자갈을 뿌리고 전압을 함으로써 알베도 값을 자갈 알베도 값의 2/3까지 높일 수 있는 방안도 제시되었다(Pomerantz *et al.*, 2000). 하지만, 대부분의 투·보수성 포장 재료 및 공법에 대한 연구는 주로 투수성 아스콘 포장에 국한되어 있으며, 투수성 시멘트 콘크리트 포장을 대상으로 한 열환경 연구는 최소화하다. 그리고 현재의 투수성 포장재는 포장체 표면온도 상승 억제 효과가 작고, 포장체 표면온도 상승 억제 효과가 큰 보수성 포장은 투수성이 작은 포장재이다. 그리고 투·보수성 포장의 표층 재료에서의 증발량은 강우 후 1~3일이 경과하면 현저히 감소하여 표면온도 저감 기능이 미약하게 된다. 따라서 도시의 열환경 및 수환경의 양방을 개선하는 포장재의 개발이 급선무이다(越川 등, 2001).

따라서 본 연구는 도시의 열환경을 악화시키는 원인의 하나인 불투수성 포장의 대안으로서 주목을 받고 있

는 투수성 시멘트 콘크리트 포장의 열물성 및 수분보유 특성이 포장 표면온도에 미치는 영향을 파악함으로써, 도시 열환경 개선에 기여할 수 있는 투·보수성 시멘트 콘크리트 포장재료의 개발을 위한 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 우선 포장 표면온도 예측을 위한 모델링, 포장 표면온도 예측 모델의 타당성 검토, 포장 표면온도에 대한 열물성, 수분보유 특성 및 기상환경의 민감도 분석을 하였고, 이를 근거로 열환경 개선에 기여도가 높은 제어 가능한 물성을 도출하여 향후 열환경 개선을 위한 포장 재료 및 공법의 개발 방향을 제시하였다. 여기서 포장 표면온도는 포장의 열환경 개선을 위한 실마리를 도출하기 위해 구축된 예측 모델의 타당성을 평가하기 위한 지표일 뿐 그 자체가 목표치는 아니다.

본 연구의 결과는 경제성, 시공성, 강도, 내구성, 보행성이라는 기능성에만 치중해 왔던 포장에 보행자의 쾌적성, 환경의 보전이라는 기능을 부가시키는데 기여할 것이며, 특히 도시의 열환경을 개선시킬 수 있는 투·보수성 포장재료의 개발을 위한 유용한 근거 자료로 이용될 수 있을 것이다.

II. 포장체 표면온도 예측 모델링

포장 표면온도를 예측하기 위해서는 포장 표면을 중심으로 에너지 평형방정식을 세워 그 해를 구함으로써 가능하며, 에너지 평형방정식에는 전도, 대류, 복사, 잠열의 열전달 과정이 포함된다(Warrick, 2002). 포장 표면온도를 예측하기 위해 온도변수를 포함한 지배방정식을 정립하고 이를 유한차분법으로 차분화한 다음 컴퓨터 프로그램으로 코드화 하여 그 해를 구하였다.

완성된 예측 모델은 실측한 자료와 비교하여 검증하였고, 검증을 거친 프로그램으로 각 매개변수의 영향을 해석하기 위하여 민감도 분석을 수행하였다. 그리고 모델의 타당성 검증은 류남형과 유병립(2005)이 진주산업대학교 제 3공학관 4층 옥상에서 측정한 여름철 포장체 표면온도의 실측치와 모델에 의한 예측치와의 비교를 통해 수행하였다.

1) 포장체의 층구조

포장 표면온도 예측을 위한 모델은 그림 1과 같이 포장 표층이 있고, 그 아래로 여과층, 기층, 노상 등의 여러 층으로 이루어진 노반 구조에서 지표면의 온도를 계산하기 위한 것이다. 마지막 층의 하단 지하면의 온도는 변화가 없이 일정한 것으로 전제하되, 토심 5m의 지온 16.3℃를 적용하였다. 이는 부산지방의 경우 토심 5m에서의 지온이 14.3~18.0℃ 범위에서 변하고 있으며, 지중깊이 갈수록 그 변화는 줄어들어 지하수 온도로서 약 16.3℃ 정도가 된다는 것을 고려하였다(김영복 등, 2000). 포장 표면에서는 상·하향 장파 복사, 상·하향 단파 복사, 현열(대류), 잠열이 관계하는 것으로 보았다. 포장 표면에 작용하는 이러한 열전달은 계절 혹은 시간에 따라 방향과 크기가 변하는 것이 일반적인 현상이다(Desborough *et al.*, 1996).

2) 가정

(1) 각 층의 길이와 폭은 x 방향의 깊이에 비하여 크다. 따라서 길이 방향과 폭 방향의 열전달 효과는 무시할 수 있으므로 일차원으로 가정하였다.

(2) 온도가 시간적으로 변화하지 않는 열전도 문제는 정상열전도(steady heat conduction) 문제라 하며, 온도

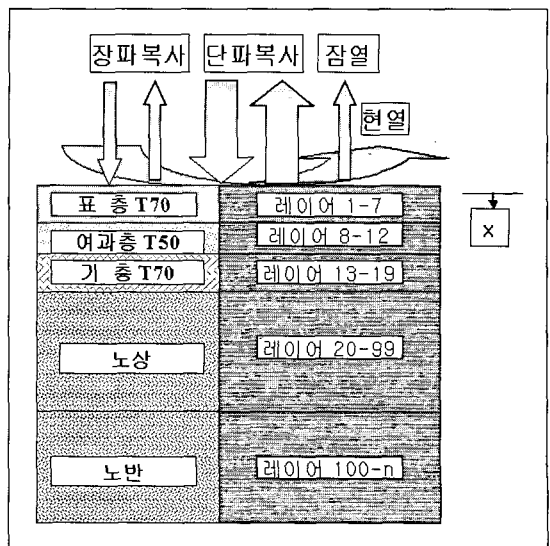


그림 1. 포장체 단면

1. 열전달 모델링

가 시간과 함께 변화하는 열전도 문제는 비정상열 전도 (unsteady heat conduction) 문제라 한다. 포장체의 각 층은 시간에 따라 온도 변화가 생기므로, 비정상 열전도 문제로 가정하였다.

(3) 마지막 층의 하단의 지하면의 온도는 변화가 없는 것으로 가정하되, 토심 5m의 지온 16.3°C를 적용하였다(김영복 등, 2000).

(4) 나지면과 같이 증발이 활발하게 발생하는 경우는 열과 수분의 동시 이동현상으로 다루는 것이 지중온도의 계산 정밀도에 영향을 준다(Asaeda *et al.*, 1996)고 판단하여, 木内 등(1999)과 Asaeda and Ca(2000)는 투수성 포장을 대상으로 열과 수분의 동시 이동을 고려한 모델을 제시하고, 이를 바탕으로 포장의 열수지를 해석하였다. 하지만, Qin *et al.*(2002)은 실용적인 측면을 고려한 토양수분 이동을 포함하는 완전한 토양온도 예측 모델은 수치해석의 난해성과 관련 요소들간 관계의 복잡성 때문에 제시되지 않고 있다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 모델의 단순성과 실용성을 고려하여, 단위시간당 수분 이동의 결과물인 토양 수분함량의 변화량 즉 증발량만 고려하였다.

(5) 시간 의존의 비정상 열전도 문제인 경우 어떤 특정한 시각에서의 온도 분포는 $T = T(x, y, z, t)$ 로 표현되고, 식 1과 같은 초기 조건이 주어진다.

$$T = T_0(x, y, z) \quad t = t_0 \tag{식 1}$$

가장 일반적인 경우는 시간 $t = 0$ 에서의 온도 $T = T_0$ 로서 나타내는 것이 보통이다(홍준표, 1991). 따라서 초기 ($t = 0$)에는 포장체 마지막 층의 하단면을 제외하고는 주위온도와 동일하다고 가정하였다.

2. 열전달 해석

1) 경계면(interface)에서의 열전달

(1) 지표면 ($x = 0$)

지표면에서 열유속을 구하는 방법에는 와상관법, 경도법, 벌크법을 이용한 공기역학적 방법과 Bowen 비법, Penman 법 등을 이용한 열수지적인 방법이 있다(竹内

와 近藤, 1981). 본 연구에서는 열수지적인 방법으로 포장 표면에서의 열유속을 구하였다.

포장 표면의 열수지는 식 2로 나타낼 수 있다(Mayocchi and Bristow, 1995).

$$0 = R_n - H - LE - G \tag{식 2}$$

여기서, R_n =순복사, H =대류열유속, LE =잠열유속, G =지중전도열유속

순방사는 그림 2와 같이 태양복사로서 전천일사와 반사일사 그리고 대기복사와 반사대기복사, 포장에서의 복사를 포함한다.

① 순복사

순복사는 입사(incoming radiation)와 방사(outgoing radiation)의 합으로서 식 3과 같이 나타낼 수 있다(Qin *et al.*, 2002).

$$R_n = R_{si}(1 - \alpha) + R_a \downarrow - R_{ar} \uparrow - R_p \uparrow \tag{식 3}$$

여기서, R_n =순복사(Wm^{-2}), R_{si} =포장면에서의 전천일사, α =알베도(표면반사율), $R_a \downarrow$ =대기복사, $R_{ar} \uparrow$ = 반사대기복사, $R_p \uparrow$ = 포장면에서의 복사

순복사는 순복사계(net radiometer)로 측정하거나, 전천일사와 반사일사는 일사계(pyranometer)로 측정하고 대기복사와 포장에서의 방사는 지구복사계(pyrgeo-

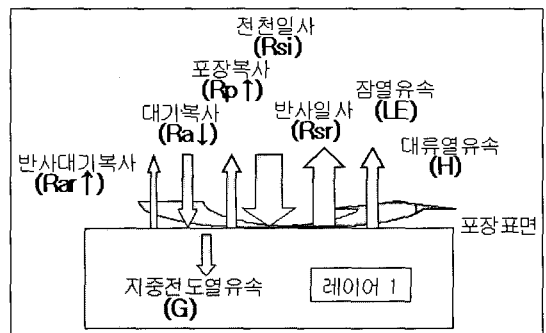


그림 2. 지표면에서의 열수지

meter)로 측정하여 산정할 수 있다. 하지만 본 연구에서 이용하고자 하는 기상대의 관측자료에는 전천일사량만 시간 데이터가 있으므로, 반사일사량이나 대기복사나 포장에서의 복사는 모델식 등을 이용하여 산정하도록 하였다.

포장 표면에서의 일사는 전천일사와 반사일사로 나타나며, 전천일사는 직달일사와 산란일사를 포함한다. 포장 표면의 전천일사와 반사일사는 일사계로 측정할 수 있다. 하지만 기상대의 관측자료를 이용하고자 할 경우에는 전천일사에 대한 시간 데이터가 있으므로, 흡수일사량은 포장재료의 알베도를 포함하는 식 4를 이용하여 구할 수 있다(Warrick, 2002).

$$R_{si}(1-a) = R_{si} - R_{sr} \quad (\text{식 4})$$

여기서, R_{si} = 전천일사, a = 알베도, R_{sr} = 반사일사

전천일사는 포장 표면에 입사하는 대부분의 에너지를 공급하기 때문에 알베도는 열수지에 있어서 주된 역할을 한다. 알베도는 태양고도가 낮은 아침, 저녁과 같이 입사하는 일사가 작을 때는 지표면이 거울같이 반사하여 높은 알베도를 나타내는 등 하루 중에도 변화한다. 그리고 토양의 알베도는 수분함량이 증가할수록 감소한다. 그리고 토양의 색상, 질감, 유기물 함량, 표면의 조도 등이 알베도를 좌우한다. 하지만 보다 단순하게 하기 위해 일평균 알베도를 사용한다. 일평균 알베도는 식 5와 같이 일 총 일사량에 대한 반사일사량의 비로 산정할 수 있다(Warrick, 2002).

$$a_m = R_{srt} / R_{sit} \quad (\text{식 5})$$

여기서, a_m = 일평균 알베도, R_{srt} = 일 총반사일사량, R_{sit} = 일 총일사량

포장 표면에서의 일사를 제외한 복사는 대기복사 ($R_a \downarrow$)와 반사대기복사 ($R_{ar} \uparrow$) 그리고 포장 표면 복사 ($R_p \uparrow$)로 구성되며, 일사를 제외한 순복사 ($R_a \downarrow - R_{ar} \uparrow - R_p \uparrow$)는 스테판 볼츠만의 법칙에 근거한 식 6을 이용하여 구할 수 있다(Qin *et al.*, 2002).

$$\begin{aligned} R_a \downarrow - R_{ar} \uparrow - R_p \uparrow \\ = \xi_a \sigma T_a^4 - (1 - \xi_p) \xi_a \sigma T_a^4 - \xi_p \sigma T_p^4 \\ = \xi_p \sigma (\xi_a T_a^4 - T_p^4) \end{aligned} \quad (\text{식 6})$$

여기서, ξ_p = 포장 표면방사율, ξ_a = 대기방사율, T_a = 기온(K), T_p = 포장 표면온도(K), σ = 스테판 볼츠만 정수 ($5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)

대기방사율 ξ_a 는 식 7, 8로 구할 수 있다(Bentz, 2000).

$$\xi_a = 0.787 + 0.764 \times \ln \left(\frac{T_{dew}}{273} \right) \times F_{cloud} \quad (\text{식 7})$$

여기서, T_{dew} = 노점온도(K), F_{cloud} = 운량인자

운량인자 F_{cloud} 는 식 8로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{cloud} = 1.0 + 0.024N - 0.0035N^2 \\ + 0.00028N^3 \end{aligned} \quad (\text{식 8})$$

여기서, N = 운량지수 (0.0~1.0)

표면온도를 정확하게 측정했다면 포장 표면의 방사율을 산정할 수 있다. 포장 표면온도는 열전대를 포장 표층 하에 얹게 매설하여 측정하거나 방사온도계 (infrared thermometer)로 측정한다. 열전대를 측정할 경우에는 일사가 직접 닿지 않도록 주의할 하야 하며, 방사온도계로 측정할 경우에는 포장 표면의 방사율을 정확하게 설정하여야 한다. 방사율 ξ_p 은 실측한 포장 표면온도로 계산한 열복사량과 지구복사계로 측정한 값의 상관관계를 분석하여 결정하였다(Warrick, 2002).

② 대류열유속

대류열의 실무적인(technical) 계산에 있어서는 대류 열전달계수를 포함하는 식 9와 같은 경험식을 사용하였다(Oliveti, 2003).

$$H = h_c(T_s - T_a) \quad (\text{식 9})$$

여기서, H =대류열유속, h_c = 대류열전달계수, T_s
=포장 표면온도(°C), T_a =기온(°C)

위의 경험식은 한정된 범위에서 타당성을 가지므로, 진주산업대학교 제3공학관 4층 옥상과 가장 유사한 Hagishima and Tanimoto(2003)의 일본 구주대학 내 건물 4층 옥상을 대상으로 한 식 10과 같은 연구 결과를 도입하여 사용하였다.

$$h_c = 2.28V + 8.18 \quad (\text{식 10})$$

여기서, h_c =대류열전달계수, V =풍속(m/s)

③ 잠열유속

포장재료별 1일 증발량은 2002년 8월 1일부터 8월 31일까지 진주산업대학교 제3공학관 4층 옥상에 설치된 포장 시험체(900×900×800)의 노상, 기층, 여과층에 매설한 TDR로 측정된 용적 수분함량의 15시간 이동평균 값의 변화량을 근거로 산정한 표 1의 누적증발량 회귀식을 이용하여 산정하였다.

그리고 시간증발잠열은 식 11을 이용하여 산정하였다(Agel *et al.*, 2000).

$$LE_i = E_a \times \frac{R_{ni} - G_i}{R_{nd} - G_d} \times L \quad (\text{식 11})$$

여기서, LE_i =시간 i 의 증발잠열(Wm^{-2}), E_i =1일 증발량(mm), $R_{ni} - G_i$ =시간 i 의 $R_n - G$ (순방사량-지중전도열량), $R_{nd} - G_d$ =1일 $R_n - G$, L =증발잠열(25°C에서 $678Wm^{-2}$)

표 1. 포장체의 누적증발량 회귀식(2002년 8월 1~31일)

포장의 종류	회귀식*	결정계수(r^2)
투수콘	$Y = 3.8(t - t_0)^{-1/2} - 2.3$	0.98
투수블록	$Y = 5.1(t - t_0)^{-1/2} - 2.1$	0.98
수밀콘	$Y = 0.798(t - t_0)^{-1/2} - 0.9$	0.62

* Y: 누적증발량(mm), $(t - t_0)$: 강우 후 경과일수(일)

증발잠열 L 의 값은 온도에 따라서 변하며, 식 12와 같이 나타낼 수 있다(Warrick, 2002).

$$L = 2.501 - 2.370 \times 10^{-3} T \quad (r^2 = 0.99995) \quad (\text{식 12})$$

여기서, T =온도(°C)

(2) 층과 층 사이의 경계면

층과 층 사이의 경계면에서의 열수지를 나타내는 그림 3의 들어오는 열전달($q_{cond, in}$)에 사용되는 물성이 나가는 열전달($q_{cond, out}$)에 사용되는 물성이 서로 다르며, 식 13과 같이 나타난다.

$$q_{cond, in} - q_{cond, out} = q_{stor} \quad (\text{식 13})$$

(3) 바닥면

마지막 층의 하단의 지하면의 온도는 그림 4와 같이 변화가 없는 것으로 하되, 가정에서 언급한 바대로 불변 지중온도로서 연평균지온 $16.3^\circ C$ 를 적용하였다(김영복, 1998).

2) 각 층 내부에서의 열전달

각 층의 내부에서는 대류나 복사에 의한 열전달은 없으며, 오로지 전도에 의한 열전달만 존재한다. 따라서 그림 5와 같이 지표면을 원점으로 하고 수직 아래 방향으로 x 좌표를 설정할 때, x 위치에 있는 dx 두께의

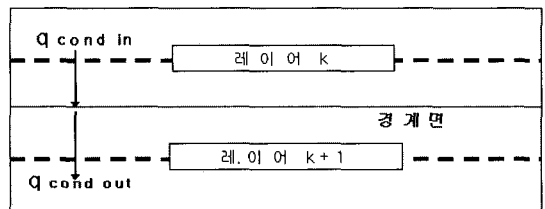


그림 3. 경계면에서의 열수지

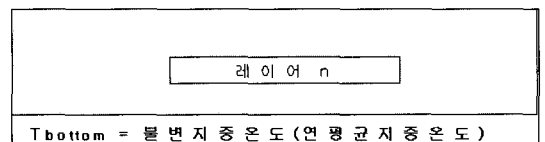


그림 4. 바닥의 온도

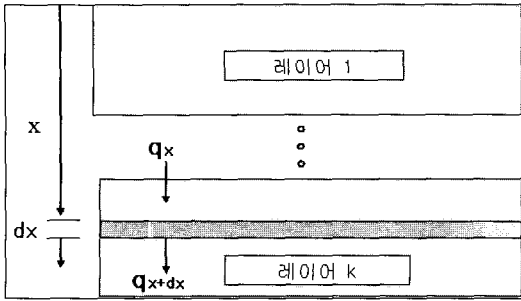


그림 5. 각 층 내에서의 열전도

부분에 대해 열수지를 고려하면 식 14와 같이 된다 (Myers, 1971).

$$q_x - q_{x+dx} = q_{stor} \quad (\text{식 14})$$

식 14에서 q_x, q_{x+dx}, q_{stor} 는 각각 x 위치에서 들어가는 전도열 전달(W), $x+dx$ 위치에서 나가는 전도열 전달(W), 물체 내부에 축적되어 온도변화를 일으키는 열량(W)을 나타낸다. 따라서 식 14는 에너지 보존 법칙이라고 할 수 있다. 식 14에서 각각의 항은 식 15~17과 같이 표현된다. 전도열 전달에 관하여는 Fourier 법칙을 적용하고 질량을 밀도로 나타내면 식 17과 같이 된다(Myers, 1971).

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{식 15})$$

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (\text{식 16})$$

$$q_{stor} = mc_p \frac{\partial T}{\partial t} = \rho c_p A dx \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{식 17})$$

여기서, A = 단면적(m^2), k = 열전도계수($W/m \cdot ^\circ C$), m = 질량(kg), ρ = 밀도(kg/m^3), C_p = 비열($J/kg \cdot K$), T = 온도($^\circ C$), t = 시간(s)

식 15~17을 식 14에 대입하여 정리하면 식 18과 같이 된다(Incropera and David, 1985).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{식 18})$$

여기서, $\lambda (= k / \rho c_p)$ = 열확산율(thermal diffusivity: m^2/s)

이 식은 물체 내부의 온도 변화를 나타내는 지배방정식이다.

3. 유한차분법

1) 경계면(interface)에서의 열전달

(1) 지표면($x = 0$)

지표면에서 차분방정식을 만들기 위하여는 그림 6과 같이 노드 0과 노드 1의 중간까지를 계산 셀로 잡는다. 그리고 열유속의 방향이 하향이면 플러스 값을, 상향이 면 마이너스 값을 부여하면, 식 19와 같은 열수지를 나타낼 수 있다.

$$q_s + q_{sr} + q_a + q_{ar} + q_p + q_{conv} + q_{lat} + q_{cond} + q_{stor} = 0 \quad (\text{식 19})$$

식 19에서 각각의 항은 식 20~25와 같은 차분식으로 만들어진다(Incropera and David, 1985).

$$q_s + q_{sr} = (1 - a) q_s \quad (\text{식 20})$$

$$q_a + q_{ar} + q_p = \xi_p \sigma A (\xi_a T_a^4 + T_p^4) \quad (\text{식 21})$$

$$q_{conv} = h_c A (T_{pc} - T_{ac}) \quad (\text{식 22})$$

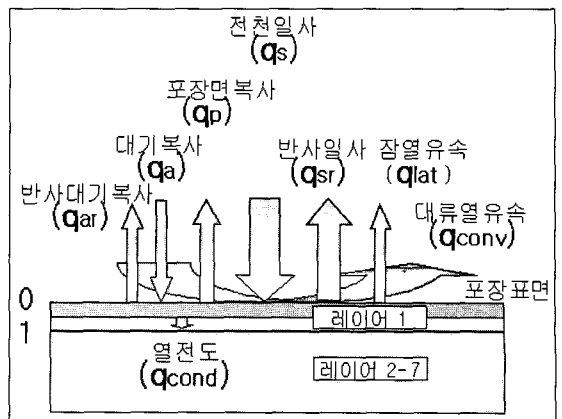


그림 6. 지표면에서 계산한 셀

$$q_{lat} = E_d \times \frac{R_{ni} - G_i}{R_{nd} - G_d} \times (2.501 - 2.370 \times 10^{-3} T_{pc}) \times \frac{10^6}{3600}$$

(식 23)

$$q_{cond} = kA \frac{T_0^j - T_{1/2}^j}{x_{1/2} - x_0} = kA \frac{T_0^j - T_1^j}{x_1 - x_0}$$

(식 24)

$$q_{stor} = \rho c_p A (x_{1/2} - x_0) \frac{T_0^{j+1} - T_0^j}{t_{j+1} - t_j}$$

$$= \rho c_p A \frac{x_1 - x_0}{2} \frac{T_0^{j+1} - T_0^j}{t_{j+1} - t_j}$$

(식 25)

여기서, q_s = 전천일사(Wm^{-2}), q_{sr} = 반사일사(Wm^{-2}), α = 알베도, q_a = 대기복사(Wm^{-2}), q_{ar} = 반사대기복사(Wm^{-2}), q_p = 포장면에서의 복사(Wm^{-2}), ξ_p = 포장면의 방사율, ξ_a = 대기방사율, σ = 스테판 볼츠만 정수($5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$), A = 포장면적(m^2), T_a = 기온(K), T_p = 포장 표면온도(K) q_{conv} = 대류열유속(Wm^{-2}), h_c = 대류열 전달계수, T_{pc} = 포장 표면 온도($^{\circ}C$), T_{ac} = 기온($^{\circ}C$), q_{lat} = 잠열유속(Wm^{-2}), E_d = 증발량($kgm^{-2}d^{-1}$), q_{cond} = 전도열유속(Wm^{-2}), k = 열전도율($Wm^{-1}k^{-1}$), q_{stor} = 저열량(Wm^{-2}) ρ = 밀도(kgm^{-3}), c_p = 비열($Wkg^{-1}^{\circ}C^{-1}$), T_0^j = 포장 표면온도($^{\circ}C$), t = 시간, j = 시간좌표 첨자

(2) 층과 층 사이 경계면에서의 유한차분방정식 그림 7과 같이 층 k 와 층 $k+1$ 사이의 경계면이 노드 라면 열수지는 식 26과 같이 된다.

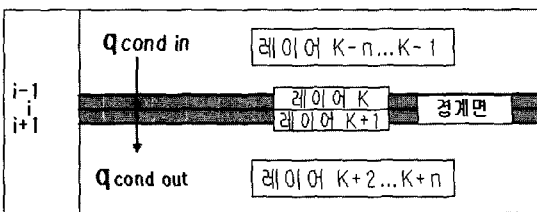


그림 7. 경계면에서의 계산 셀

$$q_{condin} - q_{condout} = q_{stor}$$

(식 26)

식 26에서 각각의 항은 식 27~29와 같다(Incropera and David, 1985).

$$q_{cond, in} = k_k A \frac{T_i^j - T_{i-1/2}^j}{x_i - x_{i-1/2}}$$

(식 27)

$$q_{cond, out} = -k_{k+1} A \frac{T_{i+1/2}^j - T_i^j}{x_{i+1/2} - x_i}$$

(식 28)

$$q_{stor} = \rho_{kc} \rho_{pk} A (x_i - x_{i-1/2}) \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{t_{j+1} - t_j}$$

$$+ \rho_{k+1c} \rho_{pk+1} A (x_{i+1/2} - x_i) \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{t_{j+1} - t_j}$$

(식 29)

상기 식에서 i 는 공간좌표에 대한 첨자이며, j 는 시간좌표를 나타내는 첨자이다. $i + 1/2$ 와 $i - 1/2$ 에서의 값을 각각 i 와 $i + 1$ 의 중간 값, i 와 $i - 1$ 의 중간 값으로 잡고, 식 27~29를 식 26에 대입하여 정리하면 식 30과 같은 차분식이 만들어진다.

$$T_i^{j+1} = T_i^j + \frac{2(t_{j+1} - t_j)}{\rho_{kc} \rho_{pk}(x_i - x_{i-1}) + \rho_{k+1c} \rho_{pk+1}(x_{i+1} - x_i)} \times \left[k_k \frac{T_{i-1}^j - T_i^j}{x_i - x_{i-1}} + k_{k+1} \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{x_{i+1} - x_i} \right]$$

(식 30)

만약 시간 증분과 공간 증분을 등간격으로 하였다면 위 식은 식 31과 같이 된다.

$$T_i^{j+1} = T_i^j + \frac{2\Delta t}{(\Delta x)^2} \frac{k_k(T_{i-1}^j - T_i^j) + k_{k+1}(T_{i+1}^j - T_i^j)}{\rho_{kc} \rho_{pk} + \rho_{k+1c} \rho_{pk+1}}$$

(식 31)

(3) 바닥면

바닥면의 노드가 N이라고 하면, 바닥면의 온도는 식 32와 같은 차분식으로 된다.

$$T = T_n \quad (\text{식 } 32)$$

단, T_n 은 불변지중온도로서 본 해석에서는 우리나라 남부지역 지중평균온도로서 16.3°C를 적용하였다 (김영복, 1998).

2) 각 층 내부의 유한차분방정식

그림 8과 같이 임의의 층 k 를 몇 개의 구간으로 나눈다. 온도는 이렇게 나누어진 구간의 경계점인 노드에서 구해진다. 물리적인 열평형을 고려하기 위하여 계산 셀은 노드 i 와 노드 $i-1$ 의 중간에서 노드 i 와 노드 $i+1$ 의 중간까지로 잡는다. 유한차분방정식을 얻기 위해서는 이 계산 셀에 대하여 열평형을 적용하면 된다.

내부의 유한차분식은 식 32를 그대로 유한차분식으로 변환해도 되고, 그림 8과 같은 셀에 대하여 열평형을 고려해도 된다. 여기서는 열평형을 고려하여 차분식을 만들어본다.

$$q_{cond, in} - q_{cond, out} = q_{stor} \quad (\text{식 } 33)$$

여기서 각각의 항은 차분관계식으로 나타낼 수 있는데 절점온도를 구하기 위한 계수 매트릭스의 복잡성을 피하기 위해 시간차분을 양적차분근사(Explicit finite difference approximation) 관계로 하여 나타내면 식 34~36과 같다.

$$q_{cond, in} = kA \frac{T_i^j - T_{i-1/2}^j}{x_i - x_{i-1/2}} \quad (\text{식 } 34)$$

$$q_{cond, out} = -kA \frac{T_{i+1/2}^j - T_i^j}{x_{i+1/2} - x_i} \quad (\text{식 } 35)$$

$$q_{stor} = \rho c_p A (x_{i+1/2} - x_{i-1/2}) \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{t_{j+1} - t_j} \quad (\text{식 } 36)$$

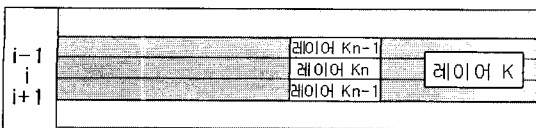


그림 8. 층 내에서의 계산 셀

또 $i+1/2$ 와 $i-1/2$ 에서의 값은 각각 i 와 $i+1$ 의 중간 값, i 와 $i-1$ 의 중간 값을 잡으면 된다. 식 34~36을 식 32에 대입하여 정리하면 식 37과 같은 차분식이 만들어진다.

$$T_i^{j+1} = T_i^j + \alpha \frac{2(t_{j+1} - t_j)}{(x_{i+1} - x_{i-1})} \left[\frac{T_{i-1}^j - T_i^j}{x_i - x_{i-1}} + \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{x_{i+1} - x_i} \right] \quad (\text{식 } 37)$$

만약 시간 증분과 공간 증분을 등간격으로 하였다면 위 식은 식 38과 같이 된다.

$$T_i^{j+1} = T_i^j + \alpha \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \times (T_{i-1}^j - 2T_i^j + T_{i+1}^j) \quad (\text{식 } 38)$$

3) 수치해의 수렴조건

온도에 대한 지배방정식을 양적차분근사식으로 차분화 하였을 경우에는 열역학 제 2 법칙을 위배하지 않도록 수치해의 안정성 조건을 만족하여야 한다(Holman, 1984). 이 조건은 층과 층 사이는 물론 경계층에서의 절점에서도 성립하여야 하는데 그것은 차분방정식 우변항에서 T_i^j 의 계수가 0보다 커야 한다는 것이다. 이 조건을 방정식 식 38에 적용하면 식 39와 같이 된다.

$$T_i^{j+1} = \left(1 - 2 \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \right) T_i^j + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} (T_{i-1}^j + T_{i+1}^j) \quad (\text{식 } 39)$$

즉, 식 39에서 $(1 - 2 \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2}) \geq 0$ 이 되어야 하며, 따라서 시간증분 Δt 는 식 40의 조건을 만족하여야 한다.

$$\Delta t \leq \frac{(\Delta x)^2}{2\alpha} \quad (\text{식 } 40)$$

한편, 같은 방법으로 정리하면 층과 층 사이 경계면에서의 유한차분방정식의 안정조건은 식 41, 42와 같다.

$$1 - \frac{2\Delta t}{(\Delta x)^2} \frac{k_k + k_{k+1}}{\rho_k c_{pk} + \rho_{k+1} c_{pk+1}} \geq 0 \quad (\text{식 } 41)$$

$$\Delta t \leq \frac{(\rho_k c_{pk} + \rho_{k+1} c_{pk+1})(\Delta x)^2}{2(k_k + k_{k+1})} \quad (\text{식 42})$$

III. 포장 표면온도 예측모델의 타당성 검토

1. 입력데이터 및 포장체의 물성

기상자료에 근거한 각종 포장체의 표면온도를 예측하기 위해 진주기상대의 2002년 6월 1일부터 8월 31일까지의 1시간 간격의 데이터인 일사량, 기온, 풍속은 직접 입력하였고, 3시간 간격의 데이터인 노점온도와 운량은 데이터를 가공하여 적용하였다. 즉 노점온도 자료는 3시간 간격으로 측정되었기에, 상대습도와 기온을 바탕으로 한 다음의 식 43, 44로 산정한 값을 적용하였다.

$$\begin{aligned} \text{LogEW} = & (0.66077 + (7.5 \times T / (237.3 + T))) \\ & + (\log 10(RH) - 2) \end{aligned} \quad (\text{식 43})$$

$$\begin{aligned} D_p = & ((0.66077 - \log EW) \times 237.3 / \\ & (\log EW - 8.16077)) \end{aligned} \quad (\text{식 44})$$

여기서, D_p = 노점온도(°C), T = 기온(°C), RH = 상대습도(%)

운량은 3시간 간격의 데이터를 전후 1시간의 데이터로 확대 적용하였다. 1일 증발량은 TDR 법에 의해 구한 포장재료별 누적증발량 회귀식으로 산정하였으며, 시간당 증발량은 1일 증발량을 구한 후 열수지분석시 산정된 시간당 $R_n - G$ (순방사량 - 지중전도열)에 따라서 배분하여 1시간 간격데이터로 사용하였다. 포장체 하단부의 온도는 토심 5m의 온도인 16.3°C를 적용하였는데, 이는 부산지방의 지하수 온도가 16.3°C라는 것에 근거하였다.

포장체 표층의 흡수율은 하루 중에도 변화하지만, 1일 총방사일사량을 총전천일사량으로 나눈 알베도 평균값을 적용하였다. 그리고 방사율은 장파복사계로 측정된 1일 총장파복사열량을 방사율 1로 본 포장 표면온도

표 2. 포장체 각 층의 열물성

포장의 종류	흡수율	방사율	열전도율 λ (W/m·K)	비열 c (kJ/kg·°C)	밀도 ρ (kg/m ³)
투수콘(표층)	0.79	0.97	2.8	1.2	1954
투수블록(표층)	0.78	0.98	2.8	1.2	1868
수밀콘(표층)	0.60	0.98	2.5	1.2	2200
자갈(기층)			0.6	0.6	1770
모래(여과층)			0.8	0.8	1541
토양(노상)			2.0	1.2	1524

로 계산한 장파복사량으로 나눈 방사율 평균값을 적용하였다. 프로그램에 설정된 포장체의 물성은 예측치가 관측치에 근접하도록 시행착오를 통해 구했으며, 그 결과는 표 2와 같다.

2. 각종 포장재료별 표면온도의 예측치와 관측치 비교

포장의 표면온도가 문제로 되는 계절은 주로 여름철이다. 여름철 포장 표면온도가 지나치게 높게 되면 포장 지역을 이용하는 사람들에게 열부하를 가져다 줌과 아울러 불쾌감을 주므로(神田과 土屋, 1998) 사람들이 포장지역을 기피하는 결과로 나타난다. 따라서 류남형과 유병림(2005)이 2002년 8월 1일부터 8월 31일까지 진주 산업대학교 제3공학관 4층 옥상에서 측정한 여름철의 포장 표면온도의 관측치와 모델에 의한 예측치를 비교 검토하였다.

여름철인 2002년 8월 2~3일의 각종 포장재료의 표면온도의 예측치와 관측치를 그림 9, 10, 11에 나타냈다. 전체적으로 보면 주간에는 큰 오차가 없으나, 야간 특히 새벽에 상대적으로 큰 차이를 나타내는 경향을 보이고 있다. 이는 새벽에 포장 표면의 결로와 포장체 내부의 응축에 의한 잠열을 방출하기 때문으로 판단된다. 또한 증발잠열이 주간에는 $R_n - G$ 와 높은 상관관계를 가지나 야간에까지 자기상관성을 적용시키기에는 한계가 있다고 판단된다. 그리고 지구복사계의 필터면이 결로로 막이 생겨 계측오차가 커지고(Kipp & Zonen, 2003)

결과적으로 증발량의 배분산정의 오차로 이어졌을 개연성이 있다. 그 밖에 입력 기상자료가 진주산업대학교 제3공학관 옥상의 기상자료가 아니라 진주기상대의 자료였다는 것 그리고 특히 포장시험체의 크기 즉 900×900×800(mm)이 열전달을 1차원으로 해석하는데 한계를 가진다는 점이 크게 영향을 주었다고 추측되어진다.

여름철 포장 표면온도의 예측치가 많은 오차요인이 있음에도 불구하고 실측치와 근접한 결과가 도출된 것으로 보아, 모델의 타당성에는 큰 문제가 없는 것으로 판단된다. 하지만 관측치와 예측치를 근접시키기 위해 시행착오로 구한 포장체의 각종 재료의 열물성 값이 실제 값과 크게 다를 수도 있으리라 판단되므로, 보다 정확한 시뮬레이션을 위해서는 현장에서 직접 측정된 열물성을 근거로 프로그래밍하는 것이 타당하다고 판단된다.

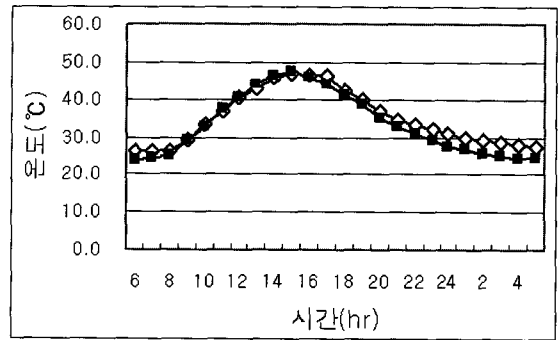


그림 11. 수밀콘포장 표면온도의 관측치와 예측치(2002년 8월 2~3일)

범례: ◇ 관측치 ■ 예측치

IV. 열물성의 표면온도에 대한 영향 검토

1. 열물성의 설정

본 연구에서는 포장체 표층의 열물성이 표면온도에 미치는 영향을 검토하기 위해, 여름철의 투수콘 포장을 대상으로 표층의 열특성을 나타내는 매개변수인 알베도, 열용량, 열전도율의 값을 다양하게 변화시켰을 경우의 포장 표면온도를 앞에서 제시된 모델에 의해 시뮬레이션하였다. 기층, 여과층, 노상 재료의 열물성 값은 시뮬레이션시 가장 높은 적합성을 보였던 표 2의 값을 적용하였다. 시뮬레이션에 사용한 열물성값은 표 3에 정리한 기존의 연구결과로부터 알베도(α)는 0.1~0.5, 열용량(C_p)은 $0.5\sim 2.5\text{kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$, 열전도율(λ_p)은 $0.5\sim 2.5\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 을 설정하였다.

2. 열물성의 민감도 분석

표 4와 같이 알베도(α), 열용량(C_p), 열전도율(λ_p), 포장 표면에서의 증발량(E)의 값을 달리하여 2002년 8월 2~3일의 투수콘 포장의 표면온도를 시뮬레이션한 결과, 그림 12, 13, 14, 15에 알베도(α_0) 0.3, 열용량(C_{p0}) $1.5\text{kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$, 열전도율(λ_{p0}) $1.5\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 를 기준상태로서 계산된 포장 표면온도 T_{s0} 와 열특성을 변

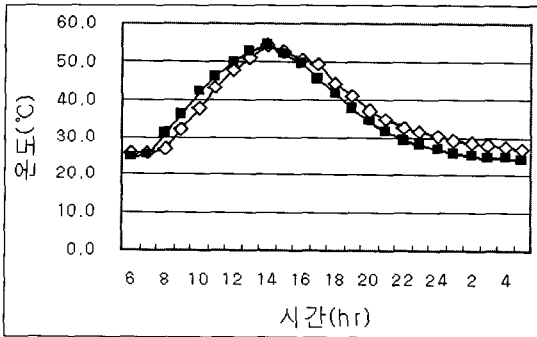


그림 9. 투수콘포장 표면온도의 관측치와 예측치(2002년 8월 2~3일)

범례: ◇ 관측치 ■ 예측치

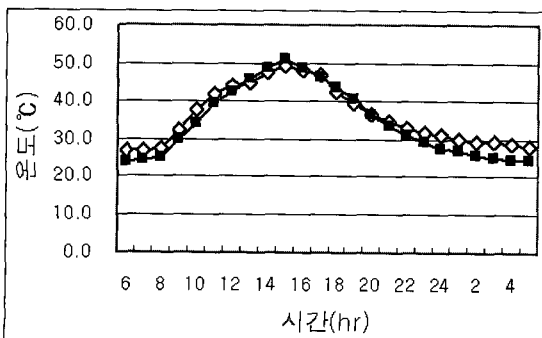


그림 10. 투수블럭포장 표면온도의 관측치와 예측치(2002년 8월 2~3일)

범례: ◇ 관측치 ■ 예측치

표 3. 각종 포장의 열물성

포장의 종류		알베도	열전도율 λ (W/m·K)	체적열용량 C (kJ/m ³ ·K)
밀립도 아스콘	成田와 關根 (1987)	-	0.73~1.26	0.84~2.51
	藤野 毅 등 (1994)	0.10	0.74	1.42
	木内와 小林 (1999)	0.10~0.20	0.91	1.22
	福田 등(1999)	0.08	-	2.16
	Asaeda and Ca (2000)	0.08	0.81	-
	杉村(2003)	-	-	1.98
투수성 아스콘	福田 등(1999)	0.05	-	1.80~2.31
	杉村(2003)	-	-	1.80
차열성 아스콘	吉中(2001)	0.43~0.48	-	-
보수성 아스콘	福田 등(1999)	0.11~0.26	-	1.67~2.15
시멘트 콘크리트	成田와 關根 (1987)	-	0.84~4.61	1.87~2.30
	淺枝 등(1991)	0.45	1.69	2.07
	木内와 小林 (1999)	0.20~0.25	0.60~0.70	1.23~2.36
	Bentz(2000)	0.35	1.50	1.00
투수성 시멘콘 (골재 大)	鍋島 등(2002)	0.32	0.76(0.71)	1.80
투수성 시멘콘 (골재 小)	鍋島 등(2002)	0.32	0.73(0.51)	1.80
투수블록	Asaeda and Ca (2000)	0.25	1.23	1.39
건조토	淺枝 등(1991)	-	0.12	1.15
	藤野 毅 등 (1994)	-	0.04	1.15
	Bentz(2000)	-	0.30	0.80
습윤토	藤野 毅 등 (1994)	-	0.17	1.94
	Asaeda and Ca (2000)	-	0.28	1.28

화시켰을 때의 포장 표면온도 T_s 와의 상대적인 차이를 $(T_s - T_{so})/T_{so}$ 로 나타냈다.

표 4. 표층재 열물성의 등급별 적용치

구분	1	2	3*	4	5
알베도	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
열용량 (kJ/m ³ ·K ⁻¹)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
열전도율 (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
증발량 (mm)	2.0	1.5	1.0	0.5	0.0

* 기준치

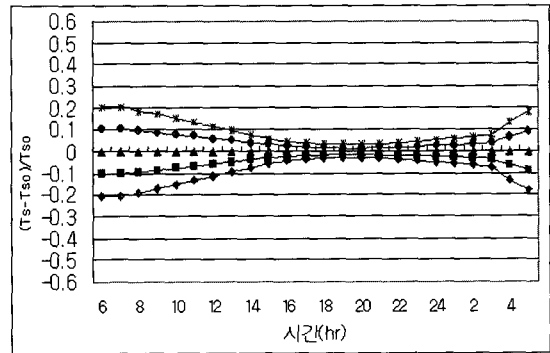


그림 12. 포장의 알베도에 따른 표면온도의 변화치

범례: $\alpha=0.5$ $\alpha=0.4$ $\alpha=0.3$ $\alpha=0.2$ $\alpha=0.1$

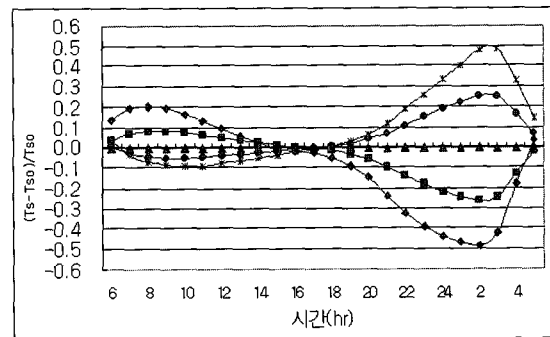


그림 13. 포장의 열용량에 따른 표면온도의 변화치

범례: $C_p=0.5$ $C_p=1.0$ $C_p=1.5$ $C_p=2.0$ $C_p=2.5$

포장 표면 알베도 0.3, 열용량 1.5kJm⁻³K⁻¹, 열전도율 1.5Wm⁻¹K⁻¹, 증발량 1mm일 때의 표면 최고온도 26.46 °C(낮 12시)를 기준으로 한 알베도 0.5, 열용량 2.5kJkg⁻¹K⁻¹, 열전도율 2.5Wm⁻¹K⁻¹, 포장 표면에서의 증발량 2mm의 포장 표면최고온도는 각각 11.5%, 8.0%

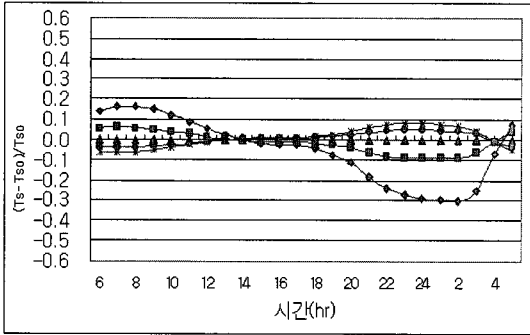


그림 14. 포장의 열전도율에 따른 표면온도의 변화치
 범례: $\lambda=0.5$ $\lambda=1.0$ $\lambda=1.5$ $\lambda=2.0$ $\lambda=2.5$

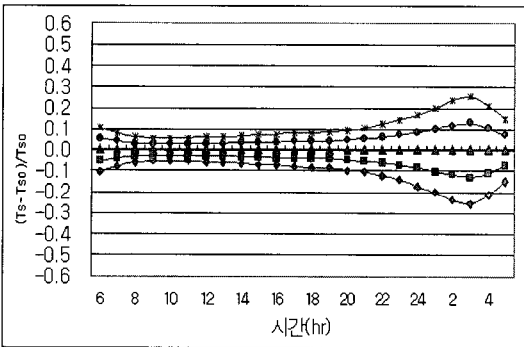


그림 15. 포장의 증발량에 따른 표면온도의 변화치
 범례: $e=2.0$ $e=1.5$ $e=1.0$ $e=0.5$ $e=0.0$

1.2%, 5.7%의 온도 저감 효과를 나타냈다(표 5 참조). 이 결과는 木内와 小林(1999)의 연구 결과인 알베도 22%, 열용량 9%, 열전도율 4%와 비슷한 경향을 보였다.

표 5. 표층재 열물성의 등급별 포장 표면최고온도 예측치 (단위: $^{\circ}\text{C}$)^a

구분	1	2	3 ^b	4	5
알베도	23.41 (-11.5)	24.90 (-5.9)	26.46	28.01 (5.9)	29.55 (11.7)
비열	29.44 (11.3)	27.76 (4.9)		25.29 (-4.4)	24.34 (-8.0)
열전도율	28.37 (7.2)	26.87 (1.5)		26.25 (-0.8)	26.14 (-1.2)
증발량	24.95 (-5.7)	25.70 (-2.9)		27.21 (2.8)	27.96 (5.7)

^a: () 내 수치는 26.46 $^{\circ}\text{C}$ 기준 온도 저감효과(%)

^b: 기준치

으나, 값에는 차이가 나타났는데, 이는 본 연구에서는 중간 값을 기준으로 설정하였기 때문이다. 본 연구에서의 열특성 변수 설정범위에서는 포장 표면 최고온도에 가장 큰 영향을 준 것은 알베도이며, 다음으로 열용량, 포장 표면에서의 증발량, 열전도율의 순이었다. 현실적으로 나타난 투수콘 포장의 표면 최고온도의 차이는 열전도율보다도 알베도, 열용량, 포장 표면에서의 증발량에 크게 의존하고 있다고 할 수 있다. 따라서 포장 표면 온도를 저감시키기 위해서는 포장재료의 알베도와 열용량을 높이고, 포장 표면에서의 증발량을 높이는 방안이 강구되어야 한다. 하지만 알베도를 높이면 포장 표면 온도는 낮아지지만, 눈부심 현상이 심화되고, 반사광이 주변의 지형지물에 흡수될 경우 열에너지로 변화되기 때문에 포장 주변의 열환경이 개선된다고 단정할 수는 없다. 이러한 측면을 고려하면 포장재료의 열용량과 포장 표면에서의 증발량을 높이는 것이 가장 현실적인 포장 지구 및 주변의 열환경을 개선할 수 있는 방안이라 할 수 있다. 그리고 기존의 투수성 포장은 강우 후 1일, 투·보수성 포장은 2~3일이 경과하면 포장 표면에서의 증발량이 현저히 감소하므로, 우수나 지하수 등 일시적 유한 물을 기층으로부터 급수하는 2층식 급수형 보수성 포장이나 노반 내에 직접 침투시킨 저류수를 포장 표면으로부터 증발시키는 포장구조 등의 검토가 필요하다고 판단된다.

3. 기상환경의 민감도 분석

포장 표면온도에 영향을 주는 것은 포장재료의 물성 외에 가장 큰 영향을 주는 것은 포장을 둘러싸고 있는 외부환경 즉 기상환경이라고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 표 6과 같이 일평균기온(T_a), 전천일사(sr), 풍속(ws), 운량(cd)의 값을 달리하여 2002년 8월 2~3일의 투수콘 포장 표면온도를 시뮬레이션한 결과를 그림 16, 17, 18에 일평균기온 15 $^{\circ}\text{C}$, 전천일사량 600 Wm^{-2} , 풍속 2 ms^{-1} , 운량 0.5를 기준상태로서 계산된 포장 표면온도 T_{so} 와 열특성을 변화시켰을 때의 포장 표면온도 T_s 와의 상대적인 차이를 $(T_s - T_{so}) / T_{so}$ 로 나타냈다.

표 6. 기상환경의 등급별 적용치

구분	1	2	3*	4	5
평균기온(°C)	0		15		30
일사량(Wm ⁻²)	200	400	600	800	1000
풍속(ms ⁻¹)	8	6	4	2	0
운량	1.00	0.75	0.50	0.25	0.00

* 기준치

기온과 일사의 시간별 자료는 식 45와 식 46에 근거하여 계산하였다(Mihalakakou *et al.*, 1997).

$$T_a(t) = T_{ma} + A_{sa}RE[\exp(i\omega t + \phi_a)] \quad (\text{식 45})$$

여기서, $T_a(t)$ = 시간대별 온도(°C), T_{ma} = 일평균 온도, A_{sa} = 기온 파동의 진폭, ϕ_a = 상변환 상수

$$SR(t) = S_m + S_aRE[\exp(i\omega t + \phi_a)] \quad (\text{식 46})$$

여기서 $SR(t)$ = 시간대별 전천일사(Wm⁻²), S_m = 년평균 전천일사, S_a = 일사 파동의 진폭, ϕ_a = 상변환 상수

일평균기온(T_a) 0°C, 전천일사량(sr) 200Wm⁻², 풍속(ws) 8m/s, 운량(cd) 1.0로 달리하였을 때 포장 표면온도에 대한 영향력은 $T_a = 15^\circ\text{C}$, $sr = 600 \text{ Wm}^{-2}$, $ws = 2 \text{ m/s}$, $cd = 0.5$ 일 때의 표면 최고온도 26.46°C(낮 12시)를 기준으로 하면, 평균기온, 전천일사

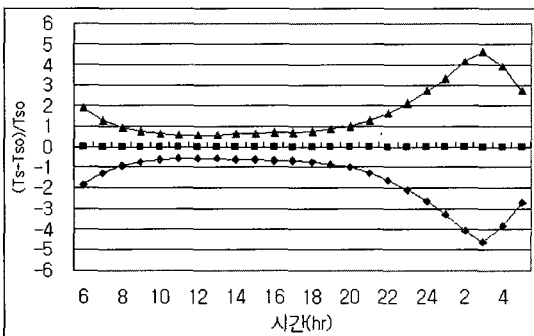


그림 16. 일평균기온에 따른 포장 표면온도의 변화치
범례: ● AT=0 ■ AT=15 ▲ AT=30

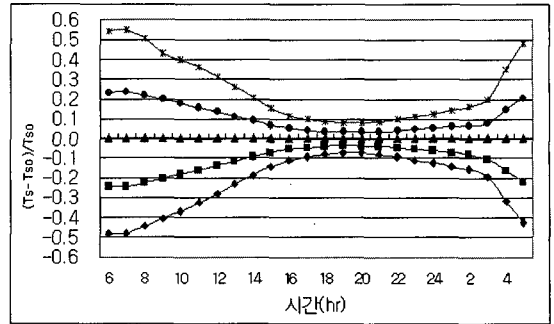


그림 17. 전천일사량에 따른 포장 표면온도의 변화치
범례: ● sr=200 ■ sr=400 ▲ sr=600 ◆ sr=800 ✕ sr=1000

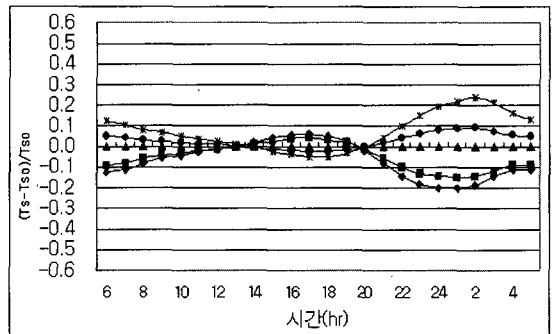


그림 18. 풍속에 따른 포장 표면온도의 변화치
범례: ● ws=8 ■ ws=6 ▲ ws=4 ◆ ws=2 ✕ ws=0

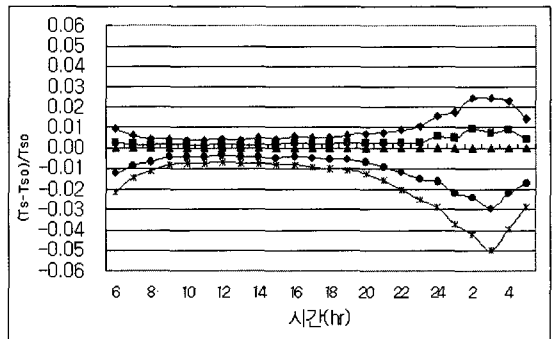


그림 19. 운량에 따른 포장 표면온도의 변화치
범례: ● cd=0.0 ■ cd=0.25 ▲ cd=0.5 ◆ cd=0.75 ✕ cd=1.0

량, 풍속, 운량이 각각 56.1%, 23.4%, 1.4%, 0.7%의 표면 최고온도 저감 효과를 나타냈다(표 7 참조).

이러한 결과로 볼 때 외부 기상환경 특히 기온과 전천일사가 포장 표면온도에 크게 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

표 7. 기상환경의 등급별 포장 표면최고온도 예측치 (단위 = °C)^a

구분	1	2	3 ^b	4	5
일평균기온	11.62 (-56.1)	-	26.46	-	41.40 (56.2)
일사량	20.27 (-23.4)	22.96 (-13.2)		30.07 (13.7)	35.32 (33.2)
풍속	26.08 (-1.4)	26.14 (-1.2)		26.71 (0.9)	27.20 (2.8)
운량	26.6 (0.4)	26.5 (0.0)		26.4 (-0.4)	26.3 (-0.7)

^a: () 내 수치는 26.46°C 기준 온도 저감효과(%)

^b: 기준치

V. 결론

본 연구는 투수성 시멘트 콘크리트 포장의 열물성 및 수분 보유특성이 포장 표면온도에 미치는 영향을 파악하기 위해 포장 표면온도 예측을 위한 모델링, 포장 표면온도 예측 모델의 타당성 검토, 포장 표면온도에 대한 열물성 및 기상환경의 민감도 분석을 하였다.

1) 예측모델에 근거한 프로그램에 일사량, 기온, 이슬점 온도, 풍속, 운량과 같은 기상자료와 TDR법에 의해 예측된 포장체의 증발량을 자료로 입력함으로써, 시간별 포장 표면온도의 관측치를 잘 예측할 수 있었다.

2) 포장체 열물성의 민감도 분석 결과, 열물성을 알베도 0.5, 열용량 2.5kJm⁻³K⁻¹, 포장 표면에서의 증발량 2mm, 열전도율 2.5Wm⁻¹K⁻¹까지 높였을 때 포장 포장 표면온도에 대한 영향력은 알베도 0.3, 열용량 1.5kJ·m⁻³K⁻¹, 증발량 2mm, 열전도율 1.5Wm⁻¹K⁻¹일 때의 표면온도 26.5°C를 기준으로 하면, 포장 표면에서의 알베도, 열용량, 포장 표면에서의 증발량, 열전도율이 각각 최대 11.5%, 8.0%, 5.7%, 1.2%의 온도 저감 효과를 나타냈다.

3) 따라서 포장 표면온도 저감을 위한 포장재료를 고려할 때는 알베도, 열용량, 포장 표면에서의 증발량을 높이는 방안을 강구할 수 있으나, 알베도를 높이면 눈부심 현상이 심화되고, 반사광이 주변의 지형지물에 흡수될 경우 열에너지로 변화되기 때문에 포장 주변의 열환경이 개선된다고 단정할 수는 없다. 이러한 측면을 고려

하면 포장재료의 열용량과 포장 표면에서의 증발량을 높이는 것이 가장 현실적인 포장지구 및 주변의 열환경을 개선할 수 있는 방안이라 할 수 있다.

4) 기상환경의 민감도 분석 결과, 평균기온 0°C, 전천일사량 200Wm⁻², 풍속 8ms⁻¹, 운량 1.0까지 하였을 때 포장 표면온도에 대한 영향력은 평균기온 15°C, 전천일사량 600Wm⁻², 풍속 2ms⁻¹, 운량 0.5일 때의 표면 최고 온도 26.5°C를 기준으로 하면, 평균기온, 전천일사량, 풍속, 운량이 각각 56.1%, 23.4%, 1.4%, 0.7%의 표면 최고 온도 저감 효과를 나타냈다. 이러한 결과로 볼 때 외부 기상환경 특히 기온과 전천일사가 포장 표면온도에 크게 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

5) 본 연구에서는 포장재 표층 재료에 대한 열물성에 주안을 두었기 때문에, 포장체 단면구성에 대한 검토가 누락되어 있다. 따라서 포장체 단면구성과 기층 등을 통한 저류수 공급 등의 포장공법에 중점을 둔 후속 연구가 추후 이루어져야 할 것이다.

인용문헌

- 김영복(1998) 엔진구동 지열 히트펌프의 성능분석(I) -부산·진주지방 지중온도 예측-. 한국농기계학회지 23(2): 135-146.
- 류남형, 유병림(2005) 투·보수성 시멘트 콘크리트 포장의 열환경 특성(I). 한국조경학회지 32(6): 82-94.
- 竹内清秀, 近藤純正著(1981) 微氣象學. 한영호(역), 미기상학. 서울: 지구문화사, 2001.
- 홍준표(1991) 熱傳導·擴散의 數值解析. 서울: 반도출판사.
- 淺枝隆, ウタンカ, 北原正代(1991) 道路鋪裝の熱環境に及ぼす影響. 環境システム研究 19: 89-93.
- 藤野 毅, 柴原千浩, 淺枝隆, 村瀬範芳, 和氣亞紀夫(1992) 浸透性鋪裝の水分·熱移動特性と冷却效果. 水工學論文集 38: 235-239.
- 伊藤幸廣, 松浦誠司, 辻 正哲(1996) 地表面溫度低減機能を有するインターロッキングブロック鋪裝に關する研究. 土木學會論文集 544(V-32): 11-20.
- 越川喜孝, 辻井 豪, 吉田健二(2001) 透水性を有する保水性鋪裝材に關する檢討. 土木學會第56回年次學術講演會 V-088: 176-177.
- 神田 學, 土屋信夫(1995) 微氣象に基つた屋外における人體の熱環境解釋. 土木學會論文集 509(II-30): 53-44.
- 木内 豪, 小林裕明(1999) 快適な都市環境創造のための鋪裝の高溫化抑制策に關する檢討. 土木學會論文集 622(VII-11): 23-33.
- 杉村 佳昭(2003) 保水材を注入した排水性(低騒音)鋪裝の冬期路面に關する研究. 福井縣·雪対策建設技術研究所年報 地域技術 16: 1-12.
- 成田健一, 關根 毅(1991) アスファルト鋪裝面の表面溫度と熱收支の解析. 地理學評論 64(A-2): 125-137.

13. 西岡 眞稔, 鍋島美奈子, 三木 信博, 津郷 俊二(2002) 保水性舗裝材料の熱的性能に関する實驗 -その2 屋外實驗-. 日本建築學會大會學術講演概要集(北 陸) 41268: 565-566.
14. 鍋島美奈子, 西岡 眞稔, 三木 信博, 津郷 俊二(2002) 保水性舗裝材料の熱的性能に関する實驗 -その1 屋内實驗-. 日本建築學會大會學術講演概要集(北 陸) 41268: 563-564.
15. 吉中 保, 根本信行(2001) 路面溫度のヒート抑制を目的とした機能性舗裝に関する一検討. 土木學會舗裝工學論文集 6: 29-38.
16. 福田萬大, 越川喜孝, 辻井 豪, 淺枝 隆, 藤野毅(1999) 夏季に給・散水した保水性舗裝の熱環境緩和特性に関する實驗的研究. 土木學會論文集 613(V-42): 225-236.
17. Agel, F. P., M. B. Parlange, A. T. Cahill, and A. Gruber (2000) Mixture of time scales in evaporation: Desorption and self-similarity of energy fluxes. *Agronomy Journal* 92: 832-836.
18. Asaeda, T., V. T. Ca, and A. Wakio(1996) Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. *Atmospheric Environment* 30(3): 413-427.
19. Asaeda, T. and V. T. Ca(2000) Characteristics of permeable pavement during hot summer weather and impact on the thermal environment. *Building and Environment* 35: 363-375.
20. Bentz, D. P.(2000) A Computer Model to Predict the Surface Temperature and Time-of-Wetness of Concrete Pavements and Bridge Decks. NisTir 651. U.S. Department of Commerce.
21. Desborough, C. E., A. J. Pitman, and P. Irannejad(1996) Analysis of the relationship between bare soil evaporation and soil moisture simulated by 13 land surface schemes for a simple non-vegetated site. *Global and Planetary Change* 13: 47-56.
22. Hagishima, A. and J. Tanimoto(2003) Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces. *Building and Environment* 38: 873-881.
23. Holman, J. P.(1984) *Heat Transfer*. New York: McGraw Hill.
24. Incopera, Y. P. and P. D. David(1985) *Introduction to Heat Transfer*. New York: John Wiley & Sons.
25. Kipp & Zonen(2003) *Instruction Manual -Pyrgeometer & Net Pyrgeometer-*. Delft: Kipp & Zonen.
26. Mayocchi, C. L. and K. L. Bristow(1995) Soil surface heat flux: some general questions and comments on measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 75: 43-50.
27. Mihalakakou, G., M. Santamouris, J. O. Lewis, and D. N. Asimakopoulos(1997) On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. *Solar Energy* 60(3): 181-190.
28. Myers, G. E.(1971) *Analytical Methods in Conduction Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill.
29. Oliveti, G., N. Arcuri, and S. Ruffolo(2003) Experimental investigation on thermal radiation exchange of horizontal outdoor surfaces. *Building and Environment* 38: 83-89.
30. Pomerantz, M., B. Pon, H. Akbari, and S. C. Chang(2000) *The Effect of Pavement's Temperatures on Air Temperature in Large Cities*. Berkley CA: Lawrence Berkley National Laboratory.
31. Porte-Agel, F., M. B. Parlange, A. T. Cahill, and A. Gruber(2000) Mixture of time scales in evaporation: desorption and self-similarity of energy fluxes. *Agronomy Journal* 92: 832-836.
32. Qin, Z., P. Berliner, and A. Karnieli(2002) Numerical solutions of a complete surface energy balance model for simulation of heat fluxes and surface temperature under bare soil environment. *Applied Mathematics and Computation* 130: 171-200.
33. Warrick, A. W.(2002) *Soil Physics Companion*. Boca Raton: CRC Press.

원 고 집 수: 2006년 1월 17일

최종수정본 접수: 2006년 3월 17일

3인의명 심사필