

UM 자료를 이용한 노면온도예측모델(UM-Road)의 개발

박문수^{1)*} · 주승진²⁾ · 손영태³⁾

¹⁾(재)기상기술개발원 차세대도시농림융합기상사업단, ²⁾(사)대기환경모델링센터,
³⁾명지대학교 교통공학과

(접수일: 2014년 8월 22일, 게재확정일: 2014년 10월 29일)

Development of Road Surface Temperature Prediction Model using the Unified Model output (UM-Road)

Moon-Soo Park^{1)*}, Seung Jin Joo²⁾, and Young Tae Son³⁾

¹⁾Weather Information Service Engine, Center for Atmospheric Science & Earthquake Research, Seoul, Korea

²⁾Center for Atmospheric and Environmental Modeling, Seoul, Korea

³⁾Department of Transportation Engineering, Myongji University, Gyeonggi-do, Korea

(Manuscript received 22 August 2014; accepted 29 October 2014)

Abstract A road surface temperature prediction model (UM-Road) using input data of the Unified Model (UM) output and road physical properties is developed and verified with the use of the observed data at road weather information system. The UM outputs of air temperature, relative humidity, wind speed, downward shortwave radiation, net longwave radiation, precipitation and the road properties such as slope angles, albedo, thermal conductivity, heat capacity at maximum 7 depth are used. The net radiation is computed by a surface radiation energy balance, the ground heat flux at surface is estimated by a surface energy balance based on the Monin-Obukhov similarity, the ground heat transfer process is applied to predict the road surface temperature. If the observed road surface temperature exists, the simulated road surface temperature is corrected by mean bias during the last 24 hours. The developed UM-Road is verified using the observed data at road side for the period from 21 to 31 March 2013. It is found that the UM-Road simulates the diurnal trend and peak values of road surface temperature very well and the 50% (90%) of temperature difference lies within $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2.5^{\circ}\text{C}$) except for precipitation case.

Key words: Monin-Obukov similarity, road surface temperature, road weather information system (RWIS), UM-Road, unified model.

1. 서 론

노면온도 예측은 도로기상정보체계(Road Weather Information System, RWIS)의 한 부분으로 겨울철 노면 결빙에 의해 발생할 수 있는 교통 사고를 예방하

는데 매우 중요한 역할을 한다(Crevier and Delage, 2001). 노면온도가 강수, 안개 등의 기상 변수와 같이 분석될 때 노면 결빙 또는 어는 비의 정보를 얻을 수 있다.

일반적으로 노면온도예측모델은 노면에서 에너지수지와 지중열전달 과정이 포함된 물리 접근법과 기존 관측 변수와의 상관 관계를 이용한 통계 접근법이 있다(Shao, 1998). 물리 모델을 이용하여 노면온도를 예측하기 위해서는 태양복사에너지, 기온, 기압, 바람 등의 기상 변수뿐 아니라 노면의 재질에 따른 열적 특

*Corresponding Author: Moon-Soo Park, Weather Information Service Engine, Center for Atmospheric Science & Earthquake Research, Sang-Am IT building 12th Fl., 434 World cup buk-ro, Mapo-gu, Seoul 121-835, Korea.
Phone : +82-70-4617-3769, Fax : +82-2-6922-2930
E-mail : ngeograph2@gmail.com

성 변수, 광학 특성 변수들에 해당하는 정보를 입력 받아 복사에너지수지, 지표에너지수지, 물의 응결 및 증발, 지중으로 열과 수증기의 전달 과정 등을 필요로 한다(Rayer, 1987; Sass, 1992; Song and Lee, 2004). 한편, 통계 모델을 이용하여 노면온도를 예측하기 위해서는 노면온도 관측 자료와 이와 상관 관계를 찾을 수 있는 과거 관측 변수들을 필요로 한다(Shao, 1998; Bodri and Cermak, 2003). 물리 모델은 복잡하기는 하지만 지면 특성 변수들과 기상 변수들이 확보될 경우 다른 지점으로 확장이 용이한 반면, 통계 모델은 관측이 수행되었던 지점에서는 비교적 정확하게 예측할 수 있지만 특이한 경우와 다른 지점으로 적용할 경우 확장성이 떨어지는 단점이 있다.

미국, 영국, 일본, 스위스, 덴마크 등 중위도 또는 고위도에 위치한 많은 나라 또는 기관에서는 노면온도와 결빙 예측을 위한 모델을 개발해 왔다. 예를 들면, 미국 연방도로관리청에서는 도로와 기상 자료를 수집하여 노면온도예측모델과 제설제 살포 알고리즘 등을 개발하였으며(Atallah et al., 2012), 영국 기상청에서는 OpenRoad를 개발하여 도로 기상에 대한 예보를 하고 있다(<http://www.metoffice.gov.uk>). 또한, 일본 기상청과 교통성에서는 일본의 도로에 1000여 개의 도로기상관측장비를 설치하여 노면온도와 더불어 노면마찰력 정보를 제공하고 있다.

우리나라의 경우에는 한국도로공사에서 도로기상정보체계의 노면온도 관측망에 포함된 50여 지점에서의 관측을 통해 노면온도를 실시간 감시하고 있으며, 노면온도모형을 개발하기도 하였다(Yang et al., 2011). Yang et al. (2011)이 개발한 노면온도모형은 지중열전달 과정이 2층으로 이루어져 있어 현실적이지 않으며 도로에서 직접 관측한 기상 자료가 있어야만 모의가 가능하여 실시간 예측에 적용하기에는 한계가 있다.

한편, 기상청에서 운영 중인 통합모델(Unified Model, UM)은 12 km의 수평해상도로 72시간까지 3시간 마다 기온, 습도, 바람, 기압 등의 일반 기상 변수뿐 아니라, 복사에너지 등 다양한 변수들에 대한 예측 결과치가 제공되어 이를 노면온도예측모델의 기상 변수의 입력 값으로 활용이 가능한 실정이다.

이에 본 연구에서는 기상청에서 현업으로 운영 중인 UM 예측 결과와 노면의 물리적 특성 변수를 입력 자료로 활용하여 도로에 손쉽게 적용할 수 있는 노면온도예측모델 UM-Road를 개발하고, 이를 실제 노면에서 관측한 결과를 이용하여 검증하고자 한다.

2. UM-Road의 구성

2.1 UM-Road의 개요

UM-Road는 기상청 생성 UM 기상자료와 노면 특

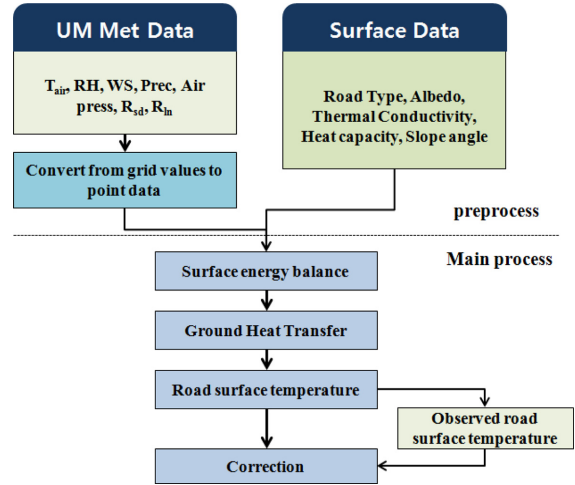


Fig. 1. Flow chart of the UM-Road.

성 자료를 입력 받아 복사에너지수지 계산, 지표면에너지수지 계산, 지중열속 계산 과정을 통해 노면온도를 계산하도록 하였다(Fig. 1).

입력 기상자료로는 기상청에서 현업으로 운영하고 있는 UM 지역모델로부터 12 km의 수평해상도로 생성되는 3시간 간격의 72시간 단일면 예측 변수 중 기온, 상대습도, 풍속, 하향단파복사에너지, 순장파복사에너지, 강수량, 기압 자료를 활용하였다(Lee et al., 2012). 하향단파복사에너지와 더불어 순장파복사에너지를 사용한 이유는 야간에 운량의 효과를 포함시킬 수 있기 때문이다. 격자 형태의 기상 자료를 예측하고자 하는 지점에서의 값으로 변환하기 위해 관심 지점을 포함하는 격자 자료에 역제곱 내삽법을 적용하였다(Goodin et al., 1979). 3시간 간격의 자료는 선형 내삽법을 이용하여 1시간 간격의 자료로 변환하여 노면온도예측모델의 입력 자료로 활용하였다.

예측하고자 하는 노면의 특성 자료로는 노면의 종류, 알베도, 열전도도, 열용량, 열확산계수, 동서방향과 남북방향의 경사각을 사용하였다. 노면 내부는 7층까지 구별 가능하도록 하였으며, 각 층의 두께와 종류를 입력하면, 그에 맞는 열전도도, 열용량, 열확산계수를 설정하도록 하였다.

노면 특성 자료와 UM 기상 자료가 완성된 후 이를 입력 자료로 활용하여 먼저 지표복사에너지수지를 통해 노면에서의 순복사에너지를 산출하고, 다시 지표에너지수지를 계산하여 지중열속을 산출하고, 마지막으로 이를 지중열전달 과정에 적용하여 노면온도를 산출하였다. 만일 노면온도가 관측되는 지점이라면 관측된 노면온도와 모델에서 수행된 노면온도를 비교하여 예측 노면온도를 보정하도록 하였다.

2.2 노면온도에측모델

노면온도에측모델은 전처리과정에서 생성된 UM 기상장과 노면 특성 변수를 입력 받아 노면온도를 예측하기 위해 입력 자료의 변환 모듈, 지표복사에너지수 계산 모듈, 지표에너지수지 계산 모듈, 지중열전달 모듈들로 구성되어 있다.

2.2.1 입력 자료의 변환

1시간 단위로 입력된 변수는 노면온도에측모델 내부에서 10분 단위로 변환하였으며, 하향단파복사에너지를 제외한 나머지 변수는 선형내삽법을 사용하였다.

하향단파복사에너지의 경우에는 UM 자료가 3시간마다 예측한 자료를 다시 선형 내삽할 경우 12시와 13시 사이에 나타나야 할 최대값을 제대로 표현할 수 없기 때문에 주간 동안 태양의 천정각과 UM 자료를 이용하여 다시 계산하였다.

노면의 남북 방향 경사를 고려한 위도 ϕ' 는 위도 ϕ 와 남북 방향의 경사각 $slope_{SN}$ 을 고려하여 $\phi' = \phi - slope_{SN}$ 과 같이 계산하였다. 또한 태양의 적위 δ_{sun} 은

$$\delta_{sun} = 23.45 \sin \left\{ \frac{360}{365} (d_{jul} + 284) \right\} \quad (1)$$

로 계산하였다(ASHRAE, 2003). 여기서 d_{jul} 은 일년 중 날수로 1월 1일을 1로, 12월 31일을 365 또는 366으로 표현된다. 태양의 시간각 h_r 은

$$h_r = \cos^{-1}(-\tan \delta_{sun} \tan \phi) \quad (2)$$

으로 계산하였다. 동서방향 경사각($slope_{EW}$)이 고려된 시간각 h'_r 을 $h_r - slope_{EW}$ 로 정의할 때 태양의 천정각 ψ 는

$$\cos \psi = \sin \phi' \sin \delta_{sun} + \cos \phi' \cos \delta_{sun} \cos h'_r \quad (3)$$

를 이용하여 계산되었다(Pielke, 2002). 일반적으로 하향단파복사에너지는 $\cos \psi$ 에 비례하기 때문에 예측된 일사량의 모양은 $\cos \psi$ 를 따르며, 절댓값은 모델값을 반영하도록 하였다. 즉, 수정된 하향단파복사에너지는 천정각이 90°보다 큰 경우에는 0 W m⁻²으로 설정하였으며, 작은 경우의 진폭은 9시, 12시와 15시의 $\cos \psi$ 와 UM 하향단파복사에너지 값의 평균비율로 환산하여 만들었다.

2.2.2 지표복사에너지수지

노면에서의 순복사에너지 R_{net} 은

$$R_{net} = (1 - \alpha)R_{S, down} + R_{L, net} \quad (4)$$

을 이용하여 계산하였다. 여기서 α 는 알베도를, $R_{S, down}$ 은 하향단파복사에너지를, $R_{L, net}$ 은 순장파복사에너지

를 각각 나타낸다.

2.2.2 지표에너지수지

지표에서 지중으로 전달되는 에너지 G_0 는

$$G_0 = R_{net} - H_0 - L_0 \quad (5)$$

에 의해 결정된다. 여기서, H_0 는 지표에서의 현열속을, L_0 는 지표에서의 잠열속을 각각 나타낸다. 현열속과 잠열속은

$$H_0 = -\rho c_p u_* \theta_s, \quad (6)$$

$$L_0 = -\rho L_v u_* q_s \quad (7)$$

을 이용하여 계산된다. 여기서 ρ 는 공기의 밀도를, c_p 는 공기의 정압몰비열을, u_* 는 마찰속도를, θ_s 는 마찰온도를, L_v 는 수증기의 잠열을, q_s 는 마찰수증기량을 각각 나타낸다. 마찰속도, 마찰온도, 마찰수증기량을 계산하기 위해 리차드슨수 Ri_b

$$Ri_b = \frac{g}{T_0} \frac{\Delta \theta}{(\Delta u)^2} \frac{z_u}{z_T} \quad (8)$$

를 사용하였다. 여기서, g 는 중력가속도를, T_0 는 평균 대기 온도, $\Delta \theta$ 는 지표와 대기의 온도차, Δu 는 풍속을, z_u 는 풍속을 측정된 고도를, z_T 는 기온을 측정된 고도를 각각 나타낸다. 또 다른 안정도 변수인 z/L 은

$$\frac{z}{L} = \frac{Ri_b}{1 - 5Ri_b} \quad 0 \leq Ri_b \leq 0.2, \quad (9)$$

$$\frac{z}{L} = Ri_b \quad Ri_b < 0 \quad (10)$$

와 같이 리차드슨수를 이용하여 계산하였다.

대기가 불안정할 때에는($z/L < 0$) 운동량, 현열, 수증기에 대한 무차원 난류함수 ϕ_m, ϕ_h, ϕ_q 를 각각

$$\phi_m = 2 \ln \left(\frac{1+x}{2} \right) + \ln \left(\frac{1+x^2}{2} \right) - 2 \tan^{-1} x + \frac{\pi}{2}, \quad (11)$$

$$\phi_h = \phi_q = 2 \ln \left(\frac{1+x^2}{2} \right) \quad (12)$$

를 이용하여 계산하였다. 여기서, $x = (1 - 15(z/L))^{1/4}$ 를 나타낸다. 대기가 안정할 때에는($z/L > 0$) 운동량, 현열, 수증기에 대한 무차원 난류함수는

$$\phi_m = \phi_h = \phi_q = -5 \frac{z}{L} \quad (13)$$

를 이용하여 계산하였다. 마찰속도 u_* , 마찰온도 θ_s , 마찰수증기량 q_s 는

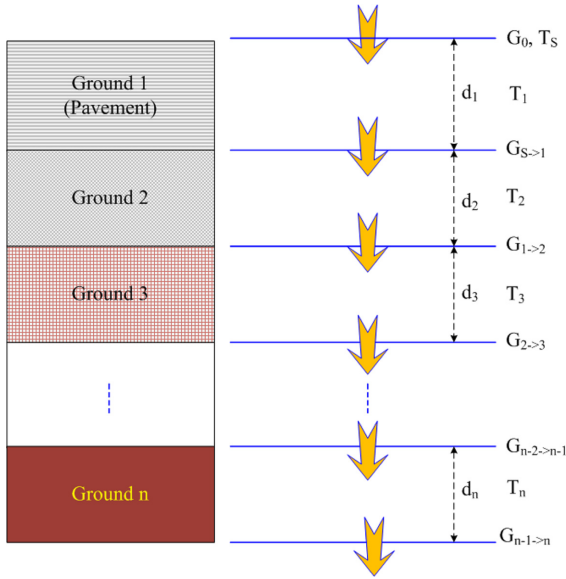


Fig. 2. Schematic diagram of the ground structure to compute the ground heat flux and temperature.

$$u_* = \frac{kU}{\ln\left(\frac{z_u}{z_0}\right) - \phi_m\left(\frac{z}{L}\right) + \phi_m\left(\frac{z_0}{L}\right)} \quad (14)$$

$$\theta_* = \frac{k\Delta\theta}{\ln\left(\frac{z_T}{z_{0T}}\right) - \phi_h\left(\frac{z}{L}\right) + \phi_h\left(\frac{z_{0T}}{L}\right)} \quad (15)$$

$$q_* = \frac{k\Delta q}{\ln\left(\frac{z_q}{z_{0q}}\right) - \phi_q\left(\frac{z}{L}\right) + \phi_q\left(\frac{z_{0q}}{L}\right)} \quad (16)$$

를 이용하여 계산하였다. 여기에 사용된 z_0 , z_{0T} , z_{0q} 는 운동량, 온도, 수증기에 대한 거칠기길이를 각각 나타내고, z_q 는 습도 측정 높이를 나타낸다.

2.2.4 지중열전달

노면온도의 시간에 따른 변화는

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = C_{Ts}(G_s - Q_{R,1}^{s \rightarrow 1}) \quad (17)$$

에 의해 결정된다(Dupont and Mestayer, 2006). 여기서, C_{Ts} 는 지표층의 $C_{Ts} = 1/d_s C_s$ 로, d_s 는 층의 두께를, C_s 는 체열용량을, G_s 는 대기에서 지표로 유입되는 열속으로 G_0 를, $Q_{R,1}^{s \rightarrow 1}$ 는 지표에서 첫 번째 층으로 유출되는 열속을 각각 나타낸다.

마찬가지로 층에서의 온도는 층으로 유입되는 열속과 층으로 유출되는 열속에 따라

$$\frac{\partial T_k}{\partial t} = C_{Tk}(Q_{R,k}^{k-1 \rightarrow k} - Q_{R,k+1}^{k \rightarrow k+1}) \quad (18)$$

로 계산된다. k 층에서 $k+1$ 층으로의 열속은

$$Q_{R,k}^{k \rightarrow k+1} = \frac{d_k + d_{k+1}}{d_k/\lambda_k + d_{k+1}/\lambda_{k+1}} \frac{T_k - T_{k+1}}{0.5(d_k + d_{k+1})} \quad (19)$$

을 이용하여 계산하였다. 여기서, d_k 는 k 층의 두께이며, λ_k 는 k 층의 열전도도를 나타낸다. 맨 아래층에서의 열속 $Q_{R,n}^{n \rightarrow \infty}$ 은

$$R_{R,n}^{n \rightarrow \infty} = -\frac{\lambda}{d}(T_n - T_\infty) \quad (20)$$

을 사용하였다. 포장체 내의 열전달 과정을 Fig. 2에 모식적으로 나타내었다. 본 연구에서는 최대 7층까지 고려할 수 있도록 하였다.

2.2.6 노면온도 예측 값의 보정

노면에서의 실측 값이 있는 경우 실측 값에 대한 단순편차보정법을 이용하여 노면온도 예측 결과를 보정하였다. 모델의 수행은 현재로부터 48시간 이전부터 수행되도록 한 후 과거 24시간의 모델 수행 노면온도와 실측 노면온도의 평균 편차를 미래의 24시간 예측 값에 더하여 보정하였다. 즉,

$$\bar{T}_d = \frac{1}{24} \sum_{t=-24}^{-1} (T_p(t) - T_o(t)), \quad (21)$$

$$T_s(t) = T_p(t) + \bar{T}_d, \quad t = 0, \dots, 23 \quad (22)$$

여기서, T_p 는 모델 수행 노면온도를, T_o 는 관측 노면온도를, T_s 는 보정된 노면온도를, \bar{T}_d 는 과거 24시간 동안의 모델의 노면온도와 관측 노면온도의 평균 편차를 나타낸다.

3. 결 과

UM-Road를 콘크리트 노면인 문의교 관측점에 적용하여 2013년 3월 23일 0000 LST부터 30일 2100 LST까지 수행하였으며 이 결과를 실측 자료와 비교하였다. 노면온도를 예측하기 위하여 과거 48시간과 미래의 24시간의 UM 자료를 사용하였으며 UM 자료의 생성 시각에 맞춰 3시간마다 수행되도록 하였다.

Figure 3은 문의교 관측점의 위치와 설치된 노면온도관측시스템의 사진을 나타낸 것이다. 문의교 관측점은 당진상주 고속도로 위에 위치하며 위·경·고도는 각각 35.5°N, 127.5°E, 150 m이고, 동서방향 경사는 1.6°, 남북방향 경사는 -0.6°이다. 2007년에 도로가 설치되었으며, 2009년 5월부터 노면온도 관측을 시

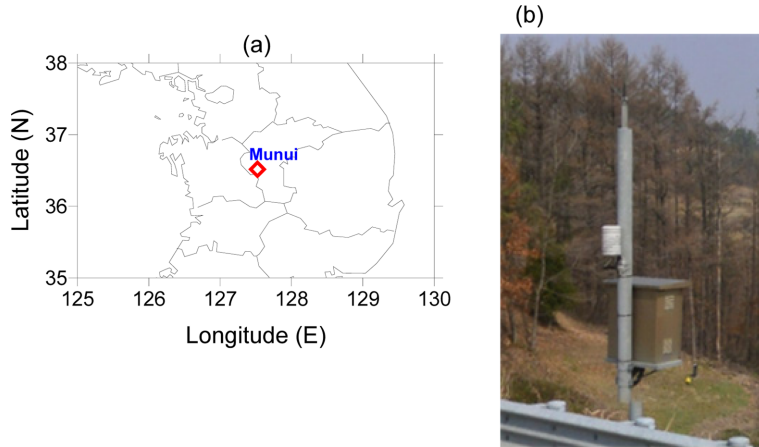


Fig. 3. (a) Geographical location of the Munui road surface temperature measurement site and (b) the photos taken at the Munui site.

Table 1. The physical properties of the road at the Munui site.

Material	Depth	Variables	Value
Surface		Albedo (concrete)	0.38
		Slope angle (S-N)	-0.6°
		Slope angle (E-W)	1.6°
Concrete	0.45 m	Density (kg m ⁻³)	1,400
		Conductivity (J s ⁻¹ m ⁻¹ K ⁻¹)	0.51
		Heat capacity (J m ⁻³ K ⁻¹)	1.4 × 10 ⁶
Gravel	0.40 m	Density (kg m ⁻³)	2,000
		Conductivity (J s ⁻¹ m ⁻¹ K ⁻¹)	1.60
		Heat capacity (J m ⁻³ K ⁻¹)	1.7 × 10 ⁶
Soil	2.00 m	Density (kg m ⁻³)	1,600
		Conductivity (J s ⁻¹ m ⁻¹ K ⁻¹)	0.51
		Heat capacity (J m ⁻³ K ⁻¹)	1.32 × 10 ⁶

작하였다. 온습도계는 1.8 m 높이에, 노면온도계는 5 mm 깊이에 설치되었다. UM-Road를 수행하기 위해 사용된 노면의 물리적 특성값들을 Table 1에 제시하였다(Yang et al., 2011).

3.1 노면온도의 초기 값 결정

일반적으로 노면온도와 기온의 차 T_{diff} 는 하향단파복사에너지와 강수 등의 변수에 의해 결정된다. 예를 들어, T_{diff} 는 맑은 날 야간에 거의 일정한 값을 보이지만, 주간에는 하향단파복사에너지의 값에 따라 다른 값을 보인다. 두 변수 사이의 상관 관계를 분석하여 콘크리트에서의 대푯값으로 정하였다.

Figure 4는 2013년 3월 6일부터 4월 9일까지 문의교 관측점에서의 하향단파복사에너지와 T_{diff} 의 산포도를 나타낸 것이다. 이 결과 강수가 있는 경우에는 평

균 1.4°C의 T_{diff} 를, 하향단파복사에너지가 0 W m⁻²인 경우에는 평균 3.0°C의 T_{diff} 를, 하향단파복사에너지가 0 W m⁻²보다 큰 경우에는 $T_{diff} = 0.011R_{s,down} + 3.0$ ($R^2 = 0.58$)와 같이 하향단파복사에너지가 증가함에 따라 T_{diff} 가 선형적으로 증가함을 보였다.

3.2 UM 입력 기상 변수

Figure 5는 문의교 관측점에서 2013년 3월 21일부터 31일까지 UM에서 생산된 기온, 상대습도, 풍속, 기압, 하향단파복사에너지, 순장파복사에너지, 강수량의 시계열을 나타낸 것이다. 모델 수행 기간 중 기온은 -4.7°C에서 15.7°C 사이의 값을 보이며 낮에 높으며 새벽에 최소를 보이는 일변화 경향을 보였다(Fig. 5a). 상대습도는 기온과는 반대로 낮에 낮으며(최솟값 25%) 야간에 높은(최댓값 100%) 일변화 경향을 보였

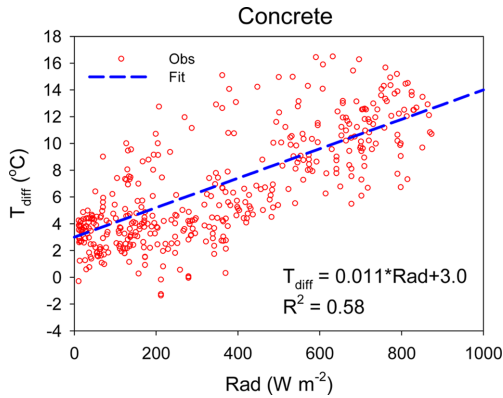


Fig. 4. Scatter diagram between the downward shortwave radiation and T_{diff} (difference of surface temperature from air temperature) over the concrete surface at the Munui site for the period from 6 March to 9 April 2013.

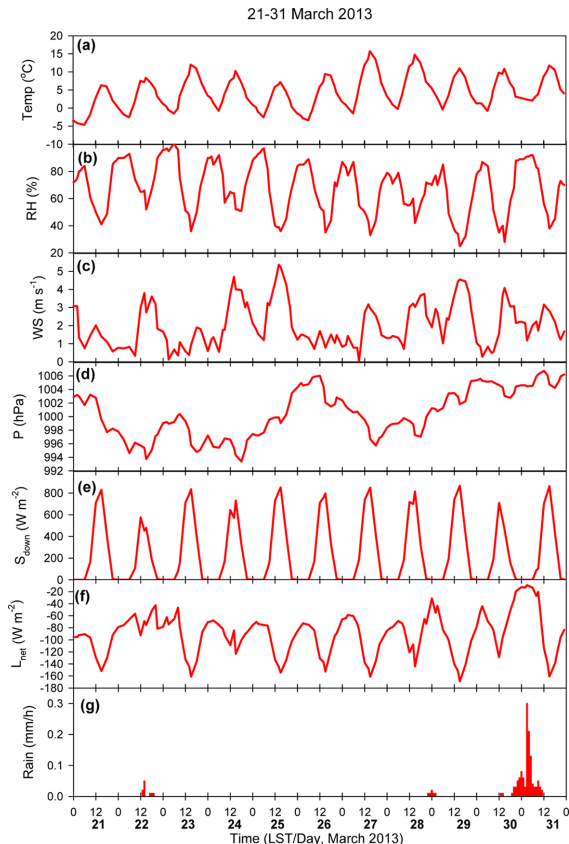


Fig. 5. Time series of (a) air temperature, (b) relative humidity, (c) wind speed, (d) air pressure, (e) downward shortwave radiation, (f) net longwave radiation, and (g) precipitation rate predicted from the UM model at the Munui site from 21 to 31 March 2013.

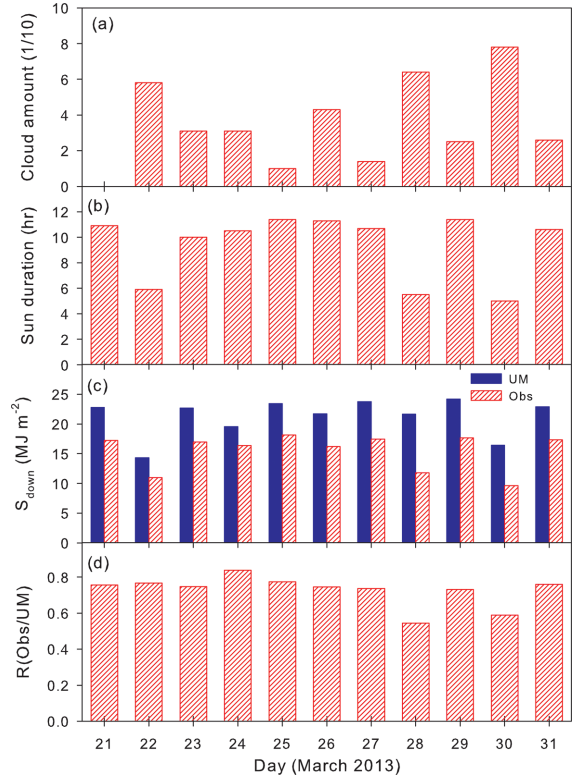


Fig. 6. Time series of (a) cloud amount, (b) sun duration, (c) UM estimated and observed daily total downward shortwave radiation, (d) the ratio of downward shortwave radiation by observation and UM at the Cheongju meteorological station from 21 to 31 March 2013.

다(Fig. 5b). 풍속은 3월 25일 14시에 5.4 m s^{-1} 의 최대값을 보였으며(Fig. 5c), 기압은 994~1006 hPa 사이의 값을 보였다(Fig. 5d). 하향단파복사에너지는 3월 29일에 최대 867 W m^{-2} 의 값을 보였으며(Fig. 5e), 순장파복사에너지의 값은 기온이 높을 때 작은 값을 보이며 $-9 \sim -169 \text{ W m}^{-2}$ 사이의 값을 보였다(Fig. 5f). UM에서 생산된 강수량은 3월 22일에 0.1 mm, 28일에 0.06 mm, 30~31일 사이에 1.21 mm였다(Fig. 5g).

UM 자료와 실제 관측 값과 비교하기 위해 문의교에서 가장 가까운 정규기상관측소인 청주의 자료 중 운량, 일조시간, 하향단파복사에너지를 Fig. 6에 나타내었다(KMA, 2013). 운량은 3월 22일 5.8, 28일 6.4, 30일 7.8이었으며 나머지 날에는 5.0 이하였으며(Fig. 6a), 이에 따라 일조시간은 3월 22일 5.9 h, 28일 5.5 h, 30일 5.0 h를 제외하면 10 h 이상이였다(Fig. 6b). 청주 관측소의 하향단파복사에너지는 3월 28일과 30일을 제외하면 UM 하향단파복사에너지의 약 75%로 UM이 과대모의하는 것으로 나타났다(Figs. 6c~d). 모델

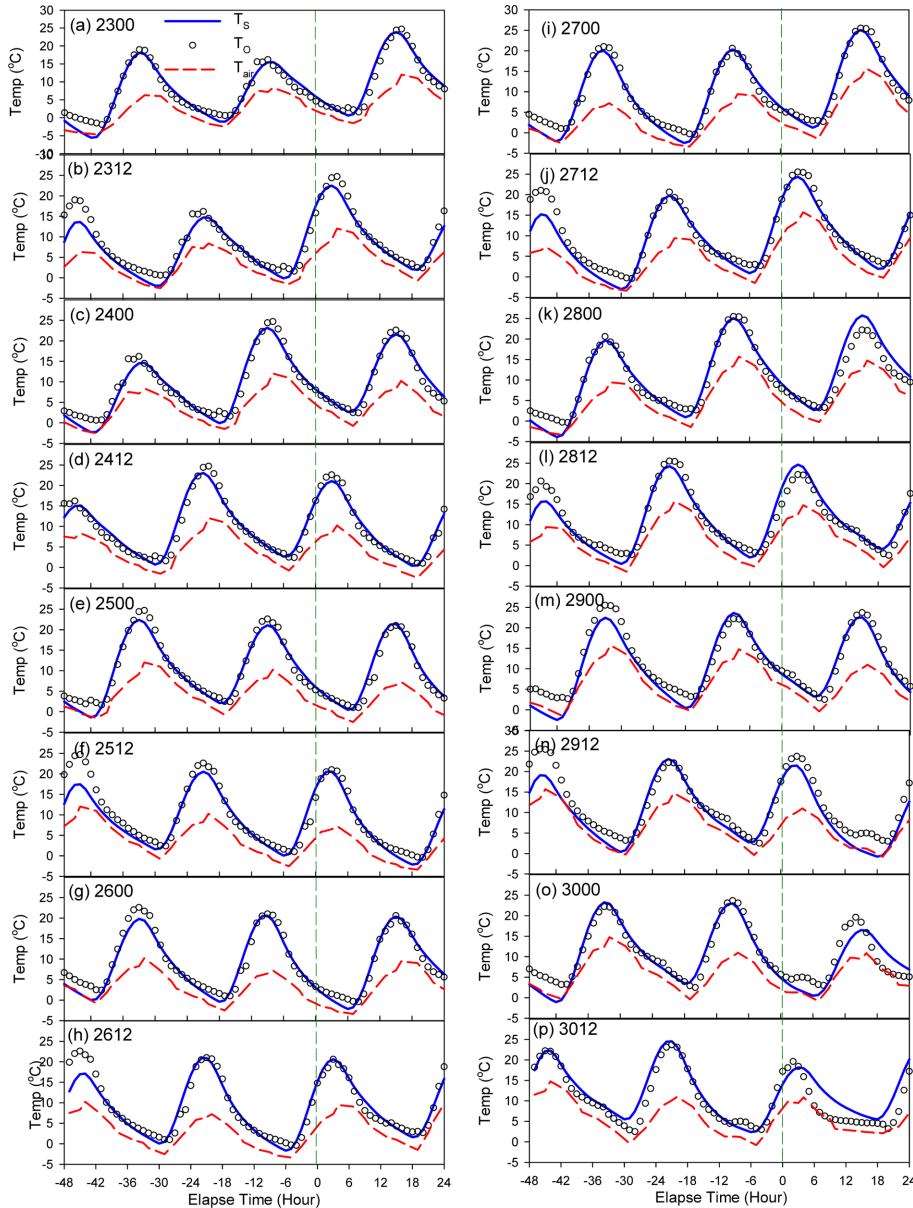


Fig. 7. Time series of modeled surface temperature (blue solid line), observed surface temperature (black open circle), and UM air temperature (red dotted line) from (a) 0000 LST 23 to (p) 1200 LST 30 March 2013 at 12 hour interval at the Munui site.

수행 기간 중 청주 관측소에서는 3월 30일에 2.5 mm 와 31일에 0.3 mm의 강수량만 기록되었을 뿐 UM에서 예측한 22일과 28일의 강수는 실제 나타나지 않은 것으로 나타났다.

3.3 모델 수행 결과

Figure 7은 3월 23일 0000 LST부터 30일 1200 LST 까지 모델을 수행하여 얻은 결과를 12시간 간격으로

나타낸 것이다. Figure 7에서 초록색 파선의 왼쪽은 모델 수행 시각 앞의 48시간의 자료를 나타내며, 오른쪽은 UM-Road를 수행하여 예측한 24시간 자료를 나타낸다. 3월 30일과 31일 강수가 있었던 기간을 제외한 나머지 기간 동안에는 노면온도의 일변화 경향을 잘 모의하고 있다. 3월 25일 1200 LST(Fig. 7f)와 26일 0000 LST(Fig. 7g)에 모의한 26일 오전의 과소 모의는 관측된 운량이 4.3으로 구름이 약간 있었으며

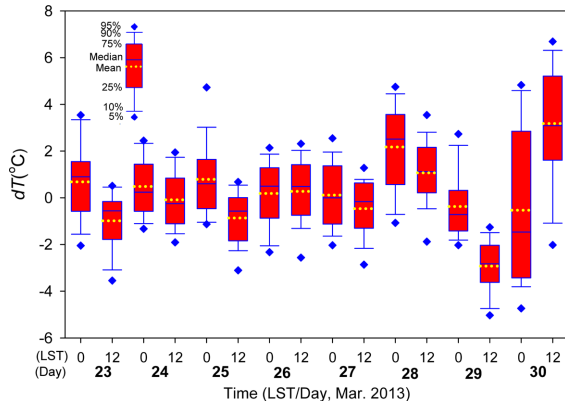


Fig. 8. Box plot of the hourly temperature difference between the UM-Road modeled and the observed ones for 24 hours from 0000 LST 23 to 1200 LST 30 March 2013 at 12 hour interval at the Munui site. Upper and lower sides of rectangle, bars outside of rectangle, blue diamonds outside of bars, solid and dotted line inside of rectangle indicate 25 and 75%, 10 and 90%, 5 and 95% percentile, median and mean, respectively.

그 경우 일반적으로 순장파복사에너지가 0에 가까워지는 경향이 있는데 UM에서 이를 충분히 반영되지 않았기 때문에 판단된다(Fig. 6a). 또한 3월 28일 0000 LST(Fig. 7k)에 예측한 28일 오후의 노면온도는 과다모의되었는데, 이는 UM에서의 하향복사에너지가 관측된 값보다 크게 모의되었기 때문에 판단된다(Figs. 6c~d). 3월 29일 1200 LST부터 30일 1200 LST까지(Figs. 7n~p) 예측한 30일 오전과 오후, 31일 오전의 노면온도를 과소 또는 과다 모의한 것은 강수와 관련된 것으로 판단된다(Fig. 5g).

Figure 8은 각 모델 수행 시각에서 예측된 24시간 노면온도와 관측 노면온도의 차(dT)에 대한 중앙값을 포함하여 5, 10, 25, 75, 90, 95% 값을 각각 나타낸 것이다. 강수가 없었으며 날씨가 맑았던 3월 23일부터 27일까지 0000 LST에 예측한 dT 의 중앙값(25%, 75%)은 0.4°C (-0.7°C , 1.5°C), 1200 LST에 예측한 dT 의 중앙값은 -0.2°C (-1.4°C , 0.6°C)를 각각 보여 0000 LST에 예측한 노면온도가 과다모의한 반면, 1200 LST에 예측할 경우에는 과소모의한 것으로 나타났다. 날씨가 맑은 날의 경우 dT 의 50%는 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 이내에 포함되며, 90%는 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ 이내에 포함되는 것으로 나타났다.

3월 28일 0000 LST에 예측한 dT 의 중앙값은 2.5°C 로 매우 높게 나타났으며, 이는 UM의 하향복사에너지가 실측 값보다 크게 모의되었기 때문에 판단된다(Figs. 6c~d). 또한 3월 29일 1200 LST에 예측한 dT

의 중앙값은 -2.8°C 로 매우 낮게 나타난 것과 30일 0000 LST와 1200 LST에 예측한 dT 의 분포가 크게 나타난 것은 강수의 정확한 시간 때문으로 판단된다(Fig. 5g).

4. 요약 및 결론

이상에서 기상청에서 생산되는 UM 기상장과 노면 특성 자료를 이용하여 노면온도를 예측할 수 있는 UM-Road를 개발하였으며, 이를 실제 노면에 적용하여 그 결과를 비교하였다.

UM-Road는 기상청 생성 UM 기상자료 중 기온, 상대습도, 풍속, 하향단파복사에너지, 순장파복사에너지, 강수량, 기압 자료와 노면의 종류, 알베도, 열전도도, 열용량, 열확산계수, 동서방향과 남북방향의 경사각과 노면 내부의 최대 7층까지의 열적특성을 입력자료로 활용하였다. 노면온도를 예측하기 위해 먼저 UM 자료를 사용하여 지표복사에너지수지 모듈을 통해 순복사에너지를 계산하고, 지표에서의 Monin-Obukhov 상 사이론을 적용하는 지표에너지수지 모듈을 통해 노면에서의 지중열속을 계산하고, 이 결과에 열전도에 의한 열전달 모듈을 적용하여 노면온도와 지중에서의 온도 및 열속을 계산하도록 하였다.

개발된 UM-Road를 2013년 3월 21일부터 31일까지 문의교 관측점에 적용하여 모델 예측 값과 관측 값을 비교하였다. 강수가 없을 때에는 UM-Road는 노면온도의 변화 경향이나 최댓값, 최솟값 등을 매우 잘 모의하였다. 또한 강수가 없거나 UM 입력 값이 정확한 경우에는 UM-Road 예측 값과 실측 값의 편차의 50%는 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 이내에 들며, 90%는 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ 이내에 드는 것으로 나타났다. UM 입력 값 중 가장 민감한 변수들은 강수와 복사에너지이며, 이는 강수와 관련된 물리과정을 포함시키지 않았기 때문이며 하향단파복사에너지와 순장파복사에너지가 정확하지 않으면 순차적으로 지표열속에 영향을 미치기 때문이다.

REFERENCES

- Atallah, D., P. Bridge, M. DeVries, and P. Leviäkangas, 2012: Road weather information system & maintenance decision support system economic value tool. *Standing international road weather commission* ID0025.
- Bodri, L., and V. Cermak, 2003: Prediction of surface air temperature by neural network, example based on three-year temperature monitoring at Sporilov station. *Stud. Geophys. Geod.*, **47**, 173-184.
- Crevier, L.-P., and Y. Delage, 2001: METRo: A new model

- for road-condition forecasting in Canada. *J. Appl. Meteorol.*, **40**, 2026-2037.
- Dupont, S., and P. G. Mestayer, 2006: Parameterization of the urban energy budget with the submesoscale soil model. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **45**, 1744-1764.
- Goodin, W. R., G. J. McRae, and J. H. Seinfeld, 1979: A comparison of interpolations methods for sparse data: Application to wind and concentration fields. *J. Appl. Meteorol.*, **18**, 761-771.
- KMA, 2013: Monthly weather report 2013.03. Korea Meteorological Administration, Publication number 11-1360000-000002-06, 118 pp.
- Lee, J., S.-O. Han, and, K.-Y. Chung, 2012: The improvement of forecast accuracy of the Unified Model at KMA by using an optimized set of physical options. *Atmosphere*, **22**, 345-356.
- ASHRAE, 2003: ASHRAE Handbook Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications. *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers Research*.
- Park, S.-U., 1994: The effect of surface physical conditions on the growth of the atmospheric boundary layer. *J. Korean Meteor. Soc.*, **30**, 119-134.
- Pielke, R. A., 2002: *Mesoscale meteorological modeling* (2nd Edition). Academic Press, 676 pp.
- Rens, L., 2009: *Concrete roads: a smart and sustainable choice*. European Concrete Paving Association, Brussels, 32 pp.
- Sass, B. H., 1992: A numerical model for prediction of road surface temperature and ice. *J. Appl. Meteorol.*, **31**, 1499-1506.
- Shao, J., 1998: Improving nowcasts of road surface temperature by a backpropagation neural network. *Wea. Forecasting*, **13**, 164-171.
- Rayer, P. J., 1987: The meteorological office forecast road surface temperature model. *Meteorol. Mag.*, **116**, 180-191.
- Yang, C.-H., M.-S. Park, and D.-G. Yoon, 2011: A road surface temperature prediction modeling for road weather information system. *J. Korean Soc. Transport.*, **29**, 123-131.