

■ 論 文 ■

도로기상정보체계 활성화를 위한 노면온도예측 모형 개발

A Road Surface Temperature Prediction Modeling for Road Weather Information System

양 총 헌

(한국건설기술연구원
도로연구실 수석연구원)

박 문 수

((사)대기환경모델링센터 연구원)

윤 덕 근

(한국건설기술연구원
도로연구실 수석연구원)

목 차

- | | |
|----------------|----------|
| I. 서론 | 2. 자료 수집 |
| 1. 연구의 배경 및 목적 | 3. 모형 검증 |
| 2. 관련문헌 고찰 | III. 결론 |
| II. 본론 | 참고문헌 |
| 1. 모형 구축 | |

Key Words : 도로기상정보, 노면온도, 열에너지균형, 기상자료, 열교환

Road Weather Information, Road Surface Temperature, Heat Energy Balance, Meteorological data, Heat Transfer

요 약

본 연구에서는 지표면과 대기사이의 열-에너지 균형원리를 이용한 노면온도예측모형을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 노면온도예측모형은 두 가지 모듈로 구성되는데 Canopy 1은 지표면과 대기 간의 열 교환을 묘사하기 위한 것이고, Canopy 2는 열에너지 교환 과정에서 포장체 특성을 반영하기 위한 것이다. 모형 수행에 필요한 다양한 입력변수는 기상청으로부터 수집하였다. 개발된 모형의 성능을 평가하기 위해 청원-상주 간 고속도로 상 문의교 지점에 설치된 접촉식 노면온도측정센서로부터 수집한 노면온도자료와 모형 수행을 통해 나온 결과 값을 비교 하였다. 이러한 비교는 동절기(12월)와 동절기 외 기간(10월)에 걸쳐 수행되었다. 비교 결과, 두 온도의 평균오차 값이 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 범위 내에 있어, 모형의 성능이 매우 우수한 것으로 판단된다. 이러한 연구는 동절기 도로관리에 다양하게 사용될 것으로 사료되고, 특히 도로기상정보체계 운영에 핵심이 되는 노면온도 예측 알고리즘으로 사용될 수 있는 기초 연구가 될 것이다.

This study proposes a model for road surface temperature prediction on basis of the heat-energy balance equation between atmosphere and road surface. The overall model is consisted of two types of modules: 1) Canopy 1 is used to describe heat transfer between soil surface and atmosphere; and 2) Canopy 2 can reflect the characteristics of pavement type. Input data used in the model run is obtained from the Korea Meteorological For model validation, the observed and predicted surface temperature data are compared using data collected on MoonEui Bridge along CheongWon-Sangju Expressway, and the comparison is made on winter and other seasons separately. Analysis results show that average difference between two temperatures lies within $\pm 2^{\circ}\text{C}$ which is considered as appropriate from a micrometeorology point of view. The model proposed in this paper can be adopted as a useful tool in practical applications for winter maintenance. This study being a fundamental research is anticipated to be a starting point for further development of robust surface road temperature prediction algorithms.

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

도로기상정보체계(RWIS: Road Weather Information System)는 노면 결빙예방 및 제설작업수행 결정과 같은 동절기 도로관리업무를 보다 과학적이고 체계적으로 하기 위한 것뿐만 아니라, 운전자의 도로 주행 시 교통안전 향상을 위해 특정 도로구간의 노면상태에 대한 정보를 제공하는 것을 포함한다. (양충현 등, 2010) 즉, 포괄적인 의미에서 도로기상정보체계는 노면상태에 영향을 미치는 대기기상자료(대기 온·습도, 대기압, 풍향, 풍속, 강수량)를 도로변에서 직접 관측하여 도로관리주체나 도로관리자에게 실시간으로 전송하는 기술과 기상청에서 제공하는 기상예측자료를 입력 자료로 사용하여 노면온도 예측 모형 수행을 통해 장래 노면 상태, 예를 들어 현재 시점에서 최소 3~시간 후부터 최대 24시간 후까지의 노면온도변화 추이를 예측(nowcasting)하여 정확한 제설작업 시점 및 정도(degree)에 대한 도로관리자의 의사결정을 지원하는 것 모두를 포함한다.

이러한 체계 중 핵심적인 역할을 담당하는 부분이 바로 대기기상예측자료를 통해 장래 노면온도 변화 추이를 예측하는 것이다. 정확한 노면온도예측을 위해서는 다양한 기상자료와 도로 포장체(아스팔트 또는 콘크리트)의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 국내에 도로기상정보체계가 도입된 지 10년이 넘었으나, 아직까지 노면온도예측모형은 외국에서 개발된 모형에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 실제로 도로기상정보체계가 구축되어 운영 중인 국가 주요간선도로망(고속도로, 일반국도, 지방도, 그리고 민자도로 일부 구간)에 여러 가지 운영상의 문제가 발생해도 모형에 대한 자세한 정보나 모듈(module)에 대한 이해가 없어 예측 결과에 대한 신뢰성 확보가 어려우며, 문제점 파악 후에도 해당 구간의 지형 및 도로조건에 따라 모형에 필요한 자료의 보정이나 모형 구성 로직(logic)의 수정이 쉽지 않다.

본 연구는 국내 기상 및 포장체 특성을 고려한 노면온도예측모형을 개발하여 동절기 교통안전 향상을 위한 기초연구로써 수행되었다. 이는 향후 시스템 측면에서 국내 실정에 맞는 도로기상정보체계 구축과 운영의 효율성을 극대화하기 위한 목적도 있다. 본 연구에서 개발된 모형의 성능을 평가하기 위해 연구지점에 대해 동절기와 동절기외 기간 동안에 축적된 노면온도와 모형 수행을 통한 예측 값을 비교하였다.

2. 관련문헌 고찰

유럽, 일본, 미국, 캐나다와 같은 선진외국에서는 이미 1990년대 초반부터 노면온도와 노면결빙점예측을 위한 모형을 개발하였고 다양한 도로구간에 대하여 개발된 모형 성능을 검증하기 위한 연구가 많이 수행되고 있다.

Sass(1997)는 덴마크 기상청(Danish Meteorological Institute)에서 추진하던 노면 자동 예측 시스템에 내재되는 도로상태모형(Road Condition Model: RCM)을 개발하였다. 이 연구에서 예측모형의 민감도는 시스템에 입력되는 대기기상자료에 상당히 의존하는 경향이 크다고 밝혀졌으며, 적어도 현재 시점에서 장래 3시간 후 범위까지는 높은 예측 정확도를 나타내는 것으로 판명되었다. Shao and Lister(1996)의 연구에서는 특정 도로구간에 대해 짧은 시간동안(일반적으로 현재시점에서 향후 3시간 후) 노면 온도 그리고 상태(dry, wet, freezing)등에 대한 높은 정확도를 가진 정보를 산출하기 위해 자동화된 노면결빙 예측 모형을 개발하였다. 모형 수행 결과의 신뢰성을 입증하기 위해 유럽 7개국 41개 도로 구간을 대상으로 도로표면에 설치된 노면온도측정 센서로부터 취득한 관측 값과 모형을 통해 산출된 값을 비교하였다. 이모형의 가장 큰 특징은 노면 온도예측이 요구되는 지점으로부터 수집한 풍속, 이슬점, 대기온도, 노면온도를 자동으로 수집하는 것 외에 다른 외부 기상자료 없이 노면온도를 예측할 수 있다는 특징이 있다.

캐나다의 Louis-Philippe and Delage(2001)는 캐나다 기상청의 의뢰를 받아 연구 목적으로 METRo 시스템을 개발하였다. 이는 도로 기상정보체계로부터 수집된 기상 및 노면온도 관측 값과 캐나다 기상청 고유 모형으로부터 예측된 기상 자료를 사용할 수 있고, 또한 노면 위의 액체 그리고 고체 상태로 된 수분누적 상태를 설명할 수 있는 장점이 있다.

Sato(2009)의 연구에서는 일본 산악지역 중 강설량이 많은 지역에 적용하기 위한 노면온도예측 모형을 개발하였다. 일반적으로 노면온도는 지형 또는 지역조건에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 이것은 주로 각 도로 구간 주변의 환경요인들이 서로 상이하고 그 지역에 유일하다는 사실에 근거 하고 있는데 노면온도는 정오에 최고점에 도달하고 해질녘 바로 직전에 가장 낮은 점에 도달하나 바위가 높은 비율을 차지하고 있는 산과 같은 환경에서는 이러한 주간 온도변화추이가 다른 구간과 많이 다를 수 있음이 연구를 통해 밝혀졌다.

Fujimoto et al.(2009)의 연구에서는 black-ice¹⁾와 차량으로부터 발생하는 열과의 관계를 규명하기 위한 모형을 구축하였다. 연구결과, 차량으로부터 발생하는 열들은 노면결빙과 해빙에 일정부분 영향을 미치고 이러한 현상들이 결과적으로 도로 상에 black-ice 현상을 유발하는 것으로 파악하였다.

현재까지 살펴본 노면온도예측 모형들의 공통적인 특징은 대기와 노면사이의 열에너지 균형(heat energy balance)관계를 통해 예측 모형을 구성하였다는 점이다. 이는 태양으로부터 나오는 열이 도로표면에 미치는 영향과 도로표면에서 대기 중으로 방출되는 복사열을 계산하여 추정하는 것이 궁극적으로 모형의 정확도와 밀접한 영향이 있음을 시사하고 있다. 본 연구에서는 기존 연구에서 주로 노면온도예측을 위해 주로 사용하였던 파라메타의 수를 줄이는 반면, 정확도를 높이기 위한 방법을 선택하였다. 실제 예측에 필요한 모든 기상관련 파라메타의 현장 관측이 어려운 만큼, 실제 관측이 가능한 파라메타만을 이용하는 것이 보다 현실적인 접근인 것으로 판단된다.

II. 본론

1. 모형 구축

본 연구에서는 개발된 모형은 국내에서 이미 개발된 토양(지표면) 에너지 균형 이론을 바탕으로 한 지표면온도예측 모형(박순웅, 1994)을 기본 틀로 하는 모형(Canopy 1)과 본 연구에서 새롭게 개발한 포장체 특성을 고려한 모형(Canopy 2)으로 구성된다.

본 모형의 핵심적인 내용을 살펴보면 우선, Canopy 1 모형을 통해 지표면에서 대기 중으로 방출되는 열 에너지를 추정하게 된다. 동시에 Canopy2 모형을 통해 계산된 포장체에서 대기로 배출되는 열 에너지를 추정한다. 이는 지표면보다 포장체에서 대기로 발생시키는 열 에너지양이 훨씬 많다는 사실²⁾을 반영하기 위한 것으로 Canopy 1과 2를 거치면서 산출된 열에너지 양을 실제 노면에서 배출하는 양과 유사하게 보정하는 작업을 수행하는 역할을 한다. 이러한 보정을 통해 현 시간(t)에서 다음 시간(t+1)의 노면온도를 예측하게 된다. Canopy 1과 2의 모듈 구조는 기본적으로 유사하나, 각

각 지표면과 포장체 특성을 고려한다는 측면에서 큰 차이가 있다.

본 연구에서 개발된 모형을 수행하기 위해서 필요한 입력 자료는 기본적으로 연구지점 주변의 기상청 정주기 상관측소의 1시간 평균 대기기온, 상대습도, 기압, 풍속, 일사량 자료를 이용하였고 수학적 모형은 Fortran과 Matlab 프로그램을 이용하여 코딩하였다. 전체적인 모형의 개념은 <그림 1>에 나타난 것과 같다.

모형을 이와 같이 구성한 가장 큰 이유는 일반 지표면(토양) 온도예측 모듈을 통해 계산된 지면온도예측결과와 포장체 특성을 고려한 열에너지를 통해 결과적으로 노면온도를 예측하기 위함이다. 또한, 일반적으로 야간에 지표면에서 대기로 방출되는 열에너지 보다 포장체에서 방출되는 열에너지가 훨씬 크다는 점을 고려하기 위함이다.

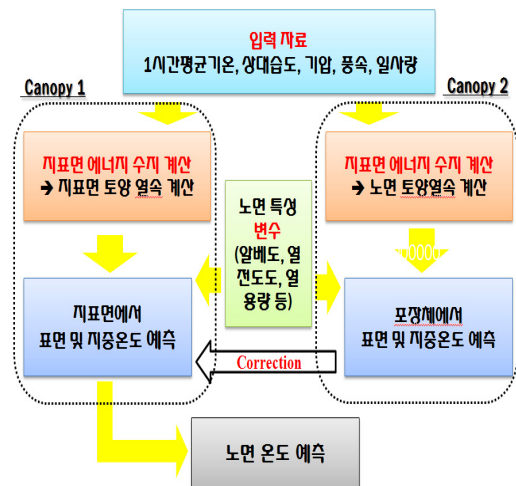
Canopy 1 모형은 크게 두 가지 부분으로 구분된다.

- 1) 지표면 기온을 예측하기 위해 필요한 지면열속을 (surface fluxes) 계산하는 부분
- 2) 계산된 지면열속(surface fluxes)을 이용하여 지표면 온도를 예측하는 부분

일반적으로 1)부분에 대한 계산을 위해서는 아래와 같은 총 5단계 과정을 거치게 된다.

○ 지면열속(Surface Fluxes)

$$\mu_s^2 = C_{DN} \cdot f_M(R_{qb}) \cdot \mu_a^2 \tag{1}$$



<그림 1> 전체 모형의 개념도

1) 도로결빙이 없는 것처럼 보이지만, 실제로 결빙이 되어 있는 상태
 2) 포장체의 알베도가 지표면보다 훨씬 작음

$$\mu_* \theta_* = C_{HN} \cdot f_H(R_{ib}) \cdot (\theta_a - \theta_g) \cdot \mu_a \quad (2)$$

여기서,

- μ_* : 마찰 속도(friction velocity)
- θ_* : 온도규모(scale temperature)
- μ_a : 풍속(wind speed)
- θ_a : 온위(potential temperature of the air)
- θ_g : 지면온위(potential temperature of the ground)
- R_{ib} : 총체 리차드슨수(bulk Richardson number)
- $f_M f_H$: 운동량과 열에 대한 총체 리차드슨수의 함수인 안정성 계수
- C_{DN} : 운동량에 대한 항력계수(drag coefficient for momentum)
- C_{HN} : 열에 대한 항력계수(drag coefficient for heat)

단계 ① 총체 리차드슨수(Bulk Richardson Number) 계산

총체 리차드슨수는 고도에 따른 풍속 차와 대기기온차를 적용하여 산출해낸 무차원수로서 동적인 대기 안정도를 판단하는 척도로 사용된다.

$$R_{ib} = \frac{g}{\theta_0} \frac{Z_u^2 (\theta_a - \theta_g)}{Z_T U_a^2} \quad (3)$$

여기서,

- Z_u : 바람 측정 높이(height where the wind is measured)
- Z_T : 온도 측정 높이(height where the temperature is measured)
- g : 중력가속도(acceleration of gravity)
- θ_0 : 기준 높이의 온도(air temperature)
- $\overline{U_a^2}$: 평균풍속(average wind speed)

만약 $R_{ib} < 0$, 이면

$$\mu_*^2 = C_{DN} \left[1 - \frac{10R_{ib}}{1 + b_M |R_{ib}|^{\frac{1}{2}}} \right] \cdot \mu_a^2 \quad (4)$$

$$b_M = b_M^* C_{DN} 10 (z/z_0)^{1/2} \quad (5)$$

$$b_M^* = -0.34 C_{DN}^{-1/2} + 13.7 \quad (6)$$

$$\mu_* \theta_* = C_{HN} \left[1 - \frac{10R_{ib}}{1 + b_H |R_{ib}|^{\frac{1}{2}}} \right] (\theta_a - \theta_g) \mu_a \quad (7)$$

$$b_H = b_H^* C_{HN} 10 (z/z_T)^{1/2} \quad (8)$$

$$b_M^* = -0.18 C_{DN}^{-1/2} + 6.3 \quad (9)$$

만약 $R_{ib} > 0$, 이면

$$\mu_*^2 = C_{DN} [(1 + 5R_{ib})^{-2}] \mu_a^2 \quad (10)$$

$$\mu_* \theta_* = C_{HN} [(1 + 5R_{ib})^{-2}] (\theta_a - \theta_g) \mu_a \quad (11)$$

여기서,

- C_{DN} : 운동량에 대한 항력계수(drag coefficient for momentum)
- C_{HN} : 열에 대한 항력계수(drag coefficient for heat)

단계 ② 항력 계수 (Drag Coefficient) 계산

항력 계수는 물과 공기에서의 물체의 저항을 표현한다.

$$C_{DN} = \frac{k^2}{\left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right]^2} \quad (12)$$

$$C_{HN} = \frac{k^2}{\left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right] \left[\ln\left(\frac{z}{z_T}\right) \right]} \quad (13)$$

여기서,

- z_0 : 거칠기 길이(aerodynamic roughness length)
- z_T : 온도표면 규모 길이(surface scaling length for temperature)
- k : 폰 카르만 상수 (0.41)

단계 ③ 현열속(Sensible heat flux)와 잠열 속(Latent heat flux)

현열속은 지표면과 대기 사이에 온도차가 있을 때 이동되는 열에너지를 의미하고, 잠열 속은 지표면 에너지 포함 허용치(budget)를 나타내는 중요한 요소이다. 앞에서 구한 $\mu_* \theta_*$ 와 공기밀도(ρ_a), 정압몰비열(C_p), 마찰 습도(q_e)를 이용해서, 현열속과 잠열속을 구한다.

$$\text{현열속} : H = (\rho_a C_p) \times -u_* \theta_* \quad (14)$$

$$\text{잠열속} : L = -u_* q_e \quad (15)$$

단계 ④ 복사에너지 관측을 통한 순복사속(Net radiative flux) 계산

이는 태양으로부터 나오는 복사에너지와 지표면이 대

기로 방출하는 에너지 사이의 관계를 나타낸다. 순 복사 에너지(R_N)은 태양으로부터 나오는 순 단파 복사에너지(R_{NS})와 대기로부터 나오는 장파 복사에너지와 지표면에서 나오는 장파 복사 에너지 사이의 차이를 나타내는 순 장파 복사에너지(R_{NL})고 구성된다.

$$R_N = R_{NS} + R_{NL} \quad (16)$$

$$R_{NS} = (1 - \alpha_p) \cdot S_0 \downarrow \quad (17)$$

여기서, α_p 은 Canopy 1에서는 지표면, Canopy 2에서는 도로포장면이 갖는 알베도³⁾ 값을 나타낸다.

$$R_{NL} \uparrow = \epsilon_p \sigma T_g^4 \quad (18)$$

ϵ_p 는 Canopy 1에서는 지표면, Canopy 2에서는 도로포장면이 갖는 표면 방사량 (surface emissivity)을 나타낸다. 위 식에 나타난 σ 는 Stefan-Boltzman 상수로써, $\sigma = 5.6695 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ 를 나타낸다. 본 연구에서는 단일 도로표면온도를 사용할 것이 때문에, 하향 장파 방사율은 아래 식에 의해 추정된다.

$$R_{NL} \downarrow = 1.08 [1 - \exp(-e_a^{\frac{T_a}{2016}})] \sigma T_a^4 (1 + aN^2) \quad (19)$$

여기서, e_a 는 증기압을 나타내고, N 은 구름의 양, 그리고 a 는 Bolz에 의해 제시된 상수, 그리고 T_a 는 대기 온도를 나타낸다.

단계 ⑤ 지면속(Ground heat flux)계산

이는 지표면이나 도로포장체가 보유하고 있는 열에너지를 나타낸다.

$$G_0 = R_N - H_0 - \lambda E_0 \quad (20)$$

여기서,

- H_0 : 마찰 속도와 마찰온도의 함수인 현열 속
- λE_0 : 잠열 속
- R_N : 순 복사에너지

최종적으로 위식을 통한 결과 값을 사용해서, 다음 시간

대(t+1)의 도로노면온도를 예측하게 되고, 이를 표면 에너지 균형 방정식(Surface energy balance equation)이라고도 한다.

○ 도로표면온도 및 지중 온도(Road surface temperature and subsurface temperature)

이 부분이 Canopy 1과 Canopy 2의 차이점을 분명히 나타낸다. 우선, Canopy 1의 지표면 온도를 산출하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = C_T G_0 - \frac{2\pi}{\tau} (T_g - T_2) \quad (21)$$

다음 식은 Canopy 2에 들어가는 식으로써, 포장체 특성을 고려하고 있다.

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = C_T G_0 - \frac{2\pi}{\tau} (T_g - T_2) - \frac{2\pi}{\tau} (T_{p,g} - T_{p,2}) \quad (22)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{\tau} (T_g - T_2) \quad \langle \text{Canopy 1과 2 공통} \rangle \quad (23)$$

여기서,

- C_T : 열계수(Road thermal Coefficient)
- τ : time scale as 24 hours
- T_g : 지표면 온도(Surface Temperature)
- $T_{p,g}$: 도로표면 온도(Subgrade Temperature)
- T_2 : 두번째 층의 온도(Second layer Temperature)

2. 자료수집

본 연구에서 개발된 모형의 노면온도 예측에 대한 성능을 검증하기 위해 다음 2가지 조건을 고려하여 연구지점을 선정하였다.

- 1) 모형 수행 결과 값과의 비교가 가능한 축적된 노면 온도자료의 풍부함
- 2) 기상청으로부터 모형수행에 필요한 기상예측자료 수집이 용이한 구간

위의 2가지 조건을 가장 잘 충족하는 지역은 우리나라

3) 빛을 반사하는 정도를 수치로 나타낸 것 (반사율)이라고도 함

라 중부내륙 지역을 관통하는 청원-상주 간 고속도로이고, 이 구간 중 접촉식 노면온도측정 센서와 도로변 기상 관측 장비가 설치·운영되고 있어 자료 수집이 비교적 원활한 지점인 문의교를 모형의 검증을 위한 연구지점으로 선정하였다.

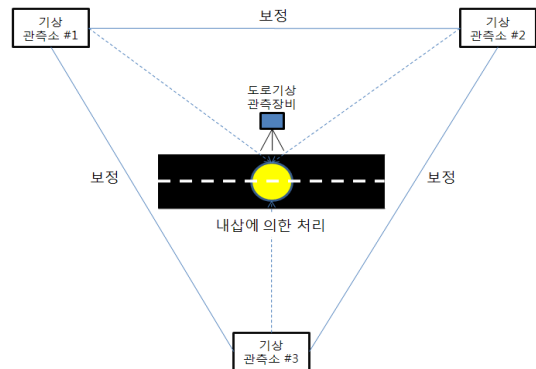
〈그림 2〉는 연구지점에 설치되어 있는 기상관측장비와 접촉식 노면온도측정센서를 나타내고 있다.

모형 수행에 필요한 주요 입력 자료인 대기 온·습도와 상대습도는 노면에서 2.8m 높이에 설치된 기상관측 장비로부터 매 30분마다 측정된 자료를 이용하였다. 또한, 모형 수행에 필요한 기상자료 즉, 대기압, 일사량, 풍향, 풍속 등의 자료는 청주, 상주, 구미, 추풍령에 있는 기상청 지상기상관측소의 관측 자료를 이용하였다. 일단 기상자료가 수집되면, 〈그림 3〉과 같이 해당 지점의 고도에 맞게 내삽 하여 모형 수행에 필요한 입력 값을 보정하는 작업을 수행하였다.

〈그림 4〉는 2009년 10월 1달 동안 연구지점과 가장 근접해 있는 청주 관측소에서 측정된 대기온도와 문의교에 설치되어 있는 도로변 기상관측 장비에서 측정된 대기온도의 일변화 경향을 나타낸 것이다. 청주 관측소와 문의교는 약 15km 가량 떨어져 있으며, 고도는 약 60m 차이가 있다.

〈그림 4〉는 청주관측소와 문의교의 월평균 기온의 일변화 경향을 나타낸 것인데, 문의교 주변 기상 관측 자료의 경우, 3일 간(10월 16일~19일) 자료 수집상의 문제(data missing)가 발생했던 것으로 파악되었다.

분석결과, 문의교 주변 기상 관측 장비에서 측정된 대기기온은 청주 관측소에서 측정된 것과 약간의 오차가



〈그림 3〉 기상청 기상관측소 데이터 처리방법

있으나, 전반적으로 유사한 월평균 일변화 경향을 보이고 있다. 특히, 야간에 문의교 주변 기상 관측 장비에서 측정된 대기온도가 약 2.0℃ 이내 범위 내에서 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 이는 일반적인 토층과는 다른 교량의 특성을 반영한 것으로 간주할 수 있는데, 교량구간의 노면온도는 일반토층보다 항상 낮은 경향이 있다.

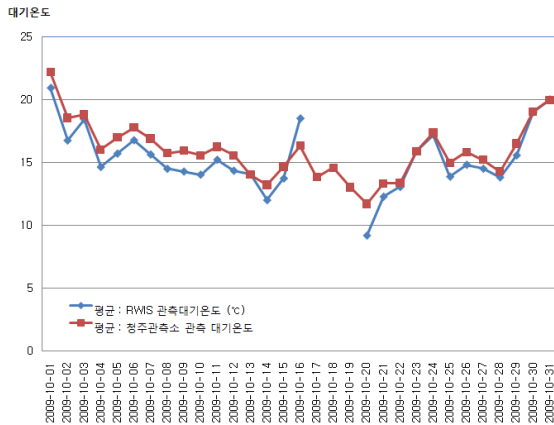
〈그림 5〉는 동절기 기간에 해당하는 2009년 12월 1달 동안 관측된 기상청 소속의 청주관측소와 문의교의 월평균 기온의 일변화 경향을 나타낸 것이다. 분석결과, 12월의 일변화 경향은 10월보다 두 관측 값의 차이가 더 없는 것으로 나타났다.

이와 같은 분석을 통해 현장에 설치되어 있는 기상관측 센서로부터 수집된 값이 기상청에서 관측한 값과 큰 차이가 없는 것으로 판단하였다. 이는 모형 수행 후 결과 값에 대한 신뢰성 검증에 매우 중요한 역할을 하게 된다.

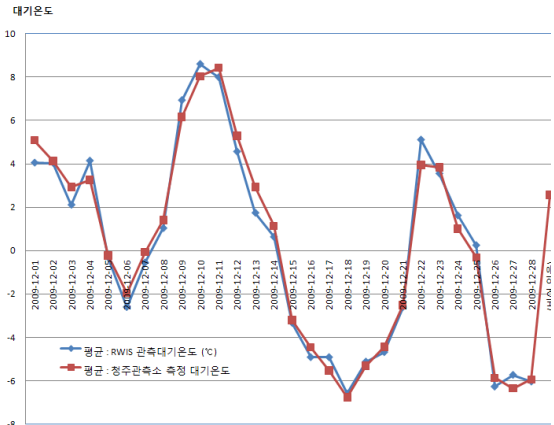
기상자료와 더불어 포장체 특성을 나타내는 다양한 변



〈그림 2〉 도로변 기상관측 장비 및 접촉식 노면 온도 측정센서



〈그림 4〉 청주관측소와 문의교의 일평균 기온의 시계열 (2009년 10월)



〈그림 5〉 청주관측소와 문의교의 일평균 기온의 시계열 (2009년 12월)

〈표 1〉 포장체 특성별 변수 값

	밀도	열전도도	열용량	열확산도
아스팔트	1,700	0.5	1.7×10^6	0.29×10^6
콘크리트 (light)	600	0.19	0.6×10^6	0.32×10^6
콘크리트 (medium)	1,400	0.51	1.4×10^6	0.36×10^6
콘크리트 (heavy)	2,300	1.63	2.3×10^6	0.71×10^6

수 즉, 밀도, 열전도도, 열용량, 열확산도 등도 매우 중요하다. 〈그림 6〉과 같이 실제 포장체에서의 연직구조는 아스팔트, 콘크리트 이외에 다른 층들이 포함되기 때문에 이에 대한 변수 값들을 조사할 필요가 있으나, 본 연구에서는 각종 문헌에서 나타난 포장체 특성별 밀도($\rho[kgm^{-3}]$), 열전도도($\lambda[Js^{-1}m^{-1}K^{-1}]$), 열용량($C[Jm^{-3}K^{-1}]$), 열확산도($K[m^2s^{-1}]$)는 〈표 1〉과 같고, 본 모형 수행을 위해 이 값들을 사용하였다.

3. 모형 검증

연구지점에 대한 기상특성과 일반적인 포장체특성을 파악한 후, 본 연구에서 개발된 Canopy 1과 2 모형 수행을 통해 모형의 성능을 파악하였다. 우선, 동절기의 기간에 해당하는 2009년 10월 1달 동안 노면에 부착된 집축식 노면온도측정센서로부터 수집한 노면온도 관측 값과 모형 수행 값을 plot 한 결과는 〈그림 6〉과 같다.

모형 수행 결과, 관측된 노면온도변화 추이와 변화범

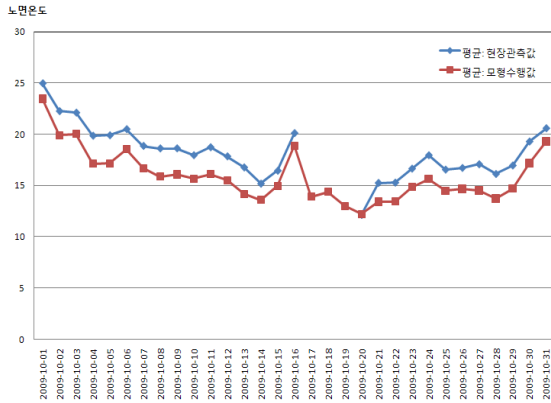
위를 잘 모사하고 있는 것으로 나타났다. 기상학적 관점에서 일반적으로 두 온도간의 오차가 평균 $\pm 2^\circ C$ 이면 정확하다고 판단하는데 본 결과에서 나타난 것 같이 현장 관측 값과 모형 수행 값에 대한 10월 1달 평균 온도 오차의 평균이 약 $2^\circ C$ 로 나타났다. 이 중 오차가 가장 클 때는 약 $2.75^\circ C$ 가장 작을 때는 $1.27^\circ C$ 로 나타났다.

시간대별로 현장관측 값과 모형 예측 값과의 차이를 알아보기 위해 10월 24일~25일 동안에 대해 〈그림 7〉과 같이 약 24시간 예측결과와 현장 관측 값과의 비교분석 하였다. 이 날의 기상특성은 우천이나 안개가 없는 양호한 기상상태를 가지고 있었다. 24시간 예측동안의 평균 노면 온도 오차는 약 $1.04^\circ C$ 로 나타났고, 최대 $2^\circ C$, 최소 $-0.1^\circ C$ 인 것으로 나타났다. 결과적으로 모형 수행 값이 현장 관측 값의 변화추이를 잘 모사하고 있는 것으로 판단된다.

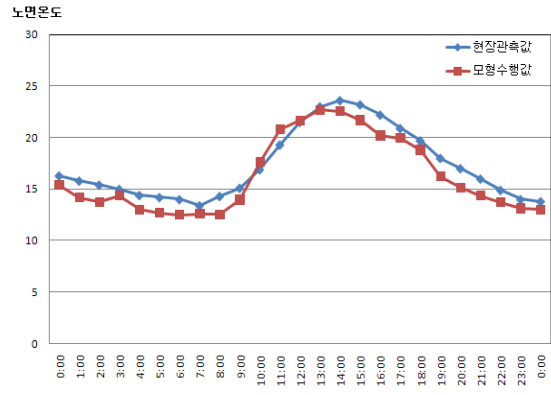
특히, 자정부터 오전 7:00까지의 오차의 평균이 오후 시간 보다 상대적으로 적는데, 이 시간대는 동절기 때에 노면 결빙이 가장 많이 발생하는 시간대로써, 매우 중요하다고 간주된다. 이 시간대의 노면온도예측 오차가 적은 것으로 나타났기 때문에 모형의 성능이 매우 양호한 것으로 판단된다. 그러나 위의 결과는 동절기의 기간 해당하기 때문에 보다 나은 검증은 위해 동절기 기간 동안에 수집된 노면온도 자료와의 2차 검증을 수행하였다.

본 연구에서 개발된 모형 수행을 통해 얻은 2009년 12월 1달동안의 모형 수행 값과 현장 관측 값과의 비교 결과는 〈그림 8〉과 같다.

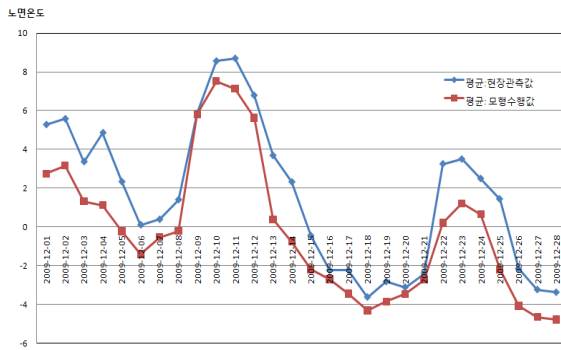
2009년 10월에 대한 결과 값과 마찬가지로, 두 온도



〈그림 6〉 2009년 10월 노면온도 현장관측 값과 모형 수행 결과 비교



〈그림 7〉 2009년 10월 24일부터 하루 (24시간) 노면온도예측결과



〈그림 8〉 2009년 12월 노면온도 현장관측 값과 모형 수행 결과 비교



〈그림 9〉 2009년 12월 24일부터하루 (24시간) 노면온도예측결과

변화의 패턴이 매우 유사하며, 한 달 평균오차는 약 $\pm 1.75^{\circ}\text{C}$ 로써, 오히려, 10월 결과보다 더 적은 것으로 나타났다.

12월 한 달 중 기상상태가 매우 양호한 날을 선택하여 24시간 노면온도예측을 수행하였고 그 결과는 〈그림 9〉와 같다.

마찬가지로, 자정부터 오전 7:00까지의 평균 오차가 오후시간 보다 낮는데, 이 시간대는 동절기 때에 노면 결빙이 가장 많이 발생하는 시간대로써, 모형의 노면온도예측 성능이 매우 양호한 것으로 판단된다. 야간시간보다 주간에 노면온도 오차가 상대적으로 큰 이유는 열-에너지 균형에 많은 영향을 미치는 일사량 값이 원인인 것으로 추정된다. 현재 국내에서 일사량에 대한 측정은 농업기상관측소에서만 하고 있으며, 비교적 넓은 지역에 대한 일사량 관측 값을 제공하기 있기 때문에 구체적인 관점에서 특정 도로구간에 대한 일사량 값을 측정하기 어려운 실정이다.

III. 결론

본 연구에서는 미시기상학에서 기본이 되는 지표면과 대기 사이의 열-에너지 균형이론을 바탕으로 한 노면온도예측모형을 개발하였다. 이는 도로 기상정보체계 운영에 필수적인 요소로써, 국내 도로교통분야에서 최초로 시도된 연구이다. 기존 모형을 근간으로 하였지만, 포장체의 특성을 고려하였고, 특정 지점을 대상으로 모형의 성능을 검증하였다.

현재는 모형 수행에 필요한 다양한 기상관련 입력 자료를 실시간으로 전송받는 시스템이 구축되어 있지 않기 때문에 과거 일정기간동안 축적된 노면온도를 현장 관측값으로 설정하여 모형 수행 값과 비교하였다. 전반적인 온도오차가 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 안에 있어 모형 수행 값이 현장 관측 값을 잘 모사하고 있다고 판단할 수 있다. 그러나 본 연구의 2가지 한계점이 존재하고 있다.

- 기상상태가 양호한 날에 대해서만 모형 수행을 실시하여 현장 관측 값과 비교하였음
- 특정 지점에 한정하여 연구를 진행하였기 때문에 모형 일반화에는 제약이 있음

위의 한계점을 극복하기 위해서 보다 다양한 기상조건 하에서 모형 수행이 필요하며, 모형의 일반화를 위해 모형 안의 파라메타에 대한 정확한 보정작업과 입력 자료를 실시간으로 수집할 수 있는 시스템 구축이 필요할 것으로 판단된다.

그러나 본 연구는 국내 노면온도예측모형 개발에 대한 최초 시도으로써, 향후 도로 기상정보체계구축과 그 활용성, 체계 유지 관리 효율성 극대화를 위한 기초연구로 충분한 가치가 있다고 판단된다. 궁극적으로 이러한 연구는 도로 교통 분야에 동절기 교통소통의 원활함 및 교통안전을 향상할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 국토해양부(2008), “한국형 포장설계법 개발과 포장 성능 개선방안 연구”, 한국건설기술연구원.
2. 박순웅(1994), “지표 물리적 조건이 대기경계층 성장에 미치는 영향”, 한국기상학회 Vol. 30, No. 1, 19.
3. 양충현 · 윤덕근 · 성정근(2010), “동절기 도로관리를 위한 도로기상정보체계 개요”, 한국도로학회 학회지 제12권 제1호, pp.47~52.
4. 한국건설기술연구원(2010), “고속도로기상정보체계 구축 연구” 1차년도 최종보고서, 한국도로공사.

5. Crevier and Delage(2002), “METRo : A New Model for Road-Condition Forecasting in Canada.” Journal of Applied Meteorology. Vol. 41 pp.1226~1240.
6. Fujimoto, Watanabe, and Fukuhara(2009), “Influence of Vehicle Related Heats on ‘Black-ice’” 13th Road Engineering Association of Asia and Australasia Conference.
7. Sass, B.H.(1997), “A Numerical Forecasting System for the Prediction of Slippery Roads.” Journal of Applied Meteorology. Vol.36, pp.801~817.
8. Sato(2009), “Road Surface Temperature Forecasting (Case Study in a Mountainous Region of Japan),” Preceedings of Cold Region Technology Conference, pp.382~388.
9. Shao and Lister(1996), “An Automated Nowcasting Model of Road Surface Temperature and State for Winter Road Maintenance.” Journal of Applied Meteorology. Vol. 35. pp.1352~1361.
10. Song and Lee(2002), “Prognosis of the Road Surface Condition in Korea using Surface Energy Balance Theory”, Journal of Korean Meteorological Society. Vol.1. No.2. pp.420~422.
11. Thornes, J.E and Shao, J.(1991), “A comparison of UK ice prediction models”, Meteorological Magazine 120: pp.51~57.

- ☞ 주 작성자 : 양충현
- ☞ 교신저자 : 양충현
- ☞ 논문투고일 : 2011. 2. 24
- ☞ 논문심사일 : 2011. 3. 23 (1차)
2011. 3. 31 (2차)
- ☞ 심사판정일 : 2011. 3. 31
- ☞ 반론접수기한 : 2011. 8. 31
- ☞ 3인 익명 심사필
- ☞ 1인 abstract 교정필