

열전달 및 물질전달을 이용한 공극 발열도로에서의 융설 해석에 대한 이론적 연구

Theoretical Study on Snow Melting Process on Porous Pavement System by using Heat and Mass Transfer

윤 태 영 Yun, Taeyoung | 정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 · 교신저자 (E-mail : tyun@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : A finite difference model considering snow melting process on porous asphalt pavement was derived on the basis of heat transfer and mass transfer theories. The derived model can be applied to predict the region where black-ice develops, as well as to predict temperature profile of pavement systems where a de-icing system is installed. In addition, the model can be used to determine the minimum energy required to melt the ice formed on the pavement.

METHODS : The snow on the porous asphalt pavement, whose porosity must be considered in thermal analysis, is divided into several layers such as dry snow layer, saturated snow layer, water+pavement surface, pavement surface, and sublayer. The mass balance and heat balance equations are derived to describe conductive, convective, radiative, and latent transfer of heat and mass in each layer. The finite differential method is used to implement the derived equations, boundary conditions, and the testing method to determine the thermal properties are suggested for each layer.

RESULTS : The finite differential equations that describe the icing and deicing on pavements are derived, and we have presented them in our work. The framework to develop a temperature-forecasting model is successfully created.

CONCLUSIONS : We conclude by successfully creating framework for the finite difference model based on the heat and mass transfer theories. To complete implementation, laboratory tests required to be performed.

Keywords

Heat Transfer, Mass Transfer, Finite Difference Method, Deicing

Corresponding Author : Yun, Taeyoung, Senior Researcher
Highway Research Division, Korea Institute of Civil Engineering
and Building Technology, 283, Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu,
Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea
Tel : +82.31.910.0445 Fax : +82.31.910.0161
E-mail : tyun@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Apr. 28, 2015 Revised Apr. 29, 2015 Accepted Oct. 02, 2015

1. 연구배경 및 목적

도로는 빈번하게 바뀌는 대기조건과 교통조건에 노출되어 있으며, 이에 따라 동결 및 융빙이 발생하는 도로포장 상부의 온도 및 상태를 예측하는 것은 매우 어렵다. 그러나 국내에서는 최근 운전자에게 쉽게 발견되지 않는 아스

팔트 포장 상부층의 동결(블랙 아이스, black ice)에 의한 빈번한 사고가 겨울철 사회적 이슈가 되었으며, 이를 예방하거나 해결할 수 있는 대안이 요구되고 있는 실정이다. 도로면 온도 예측 및 융설에 관한 연구로서 국내에서는 융설제 또는 열배관 시스템, 발열도로, 탄소나노튜브 및 발

열매쉬 등에 대한 연구(Lee and Lee, 2003, Kim et al., 2003, Yun and Jeong, 2006, Kim et al., 2010, Heo et al., 2013, Seo et al., 2010, Seo et al., 2013)가 진행된 바 있는데, 이들 연구에서는 용설재료 또는 용설시스템의 적용 타당성 검증이 주요 연구 목적이었다. 그러나 오래전부터 도로동결의 예측에 대한 중요성을 인식한 영국, 폴란드, 일본 및 미국 등에서는 통계적 자료와 역학적 이론을 활용한 도로포장 표면에서의 동결을 체계적으로 예측하고 예보하기 위한 연구를 지속해왔다. 기상학자들이 중심이 된 이들 연구에서는 대기의 영향을 도로포장 표면의 동결에 영향을 미치는 가장 큰 인자로 설정하였으며, 도로포장 표면의 온도를 예측하기 위한 수치해석모형을 개발하고 향상시키는 도로 기상학(road meteorology) 분야로 세분화하여 지속적인 연구를 진행하고 있다.

도로포장에서의 용설을 이론적으로 설명하기 위한 열평형방정식은 영국의 Champman(1952)에 의하여 최초로 제시된 것으로 알려져 있는데, 추가적인 연구를 거쳐 도로포장에 대한 일반 열평형 방정식을 제시하기도 하였다(Champman and Katunich, 1956). 이후 영국에서는 Champman의 동결 감지 장치, 열지도(thermal mapping), 저비용 대기 온도 측정기 등에 관한 지속적인 연구를 바탕으로 도로 동결에 대한 지점 예보시스템을 지역 예보시스템으로 확대한 바 있으며, 최근에는 사물 인터넷(internet of things, IoT)을 활용하여 실시간 예보 시스템으로의 전환을 통한 겨울철 도로의 유지관리의 효율성 증대 노력을 지속하고 있다. 덴마크의 Sass(1992)는 열역학에 기반한 포괄적인 도로 상태 모형(road condition model, RCM)을 제시하기도 하였는데, 도로포장에서의 자연적 용설을 보다 명확하게 설명하기 위하여 현열(sensible heat)과 잠열(latent heat)을 구분하여 모형에 고려하였다. 이를 바탕으로 200개의 도로에 대하여 5시간 전에 동결을 예보할 수 있는 예측 시스템을 제시하기도 하였다(Sass, 1997). 이외에도 기상학 측면에서의 도로포장 온도예측을 위한 노력으로 독일의 Jacobs and Raatz(1996)는 교통량, 응달지역 및 도심부의 영향을 고려한 복합적인 모형을 제시하였으며, 체코의 Dejmál and Repal(2009)는 습도와 이슬점 등에 대한 영향을 고려한 회귀모형을 제시하기도 하여 도로포장 표면에 대한 온도 예측 정밀도를 향상시키고자 하였다. 도로의 표면 온도 예측 모형 개발과 관련된 국내 연구는 해외에 비하여 활발하지는 못하지만 외국의 모형을 적용(Yang et al., 2011)하거나 통합모형(unified model)을 활용한 노면온도예측모형(Park et al., 2014) 등이 있다. 일본

에서는 교통량이 많은 도심부의 동결 및 용설을 평가하기 위하여 타이어와 지면 사이에서 발생하는 마찰열(Fujimoto et al., 2006), 주행차량에서 발생하는 복사열과 헤드라이트에 의하여 생성되는 열(Fujimoto et al., 2009, Fujimoto et al., 2013)을 고려한 것이 특징이다. 앞서 언급된 바와 같이, 국내에서도 도로표면의 용설을 위한 연구를 지속해왔는데, 발열도로(Lee and Lee, 2003), 아스팔트 혼합물(Kim et al., 2003), 지열을 활용한 용설시스템(Lee et al., 2010), 진동형 열배관(pulsating heat pipe, PHP), 발열 매쉬(Seo et al., 2013)를 이용한 연구 용설포장(Kim et al., 2010) 등이 있다. 이외에도 최근 원적외선, 열선, 탄소섬유 및 불완전 연소 탄화수소를 활용한 연구(carbon black)을 활용한 용설방법도 제시되고 있다.

공항포장에서의 인위적인 용설 또는 용빙에 관련된 연구는 대표적으로는 폴란드 Zwarycz(2002)의 지열(geothermal heat)을 활용한 공항 용설 시스템이 있으며, 이와 유사한 형태의 공항 용설 시스템으로 아이슬란드(Ragnarsson, 1997), 일본(Morita and Tago, 2000) 및 미국(Lund, 1999)의 사례가 있다. 도로포장에서의 동결 및 용설의 거동을 역학적으로 가장 세분화하여 모형화한 Liu et al.(2007)는 열을 발생하는 파이프를 내재한 콘크리트 슬래브 상부에서의 용설을 설명하기 위하여 포장 상부의 적설 상태를 Ree et al.(2002)와 같이 7가지로 구분하였으며, 정상조건(steady)이 아닌 비정상(transient) 열전달(heat transfer)뿐만 아니라 물질전달(mass transfer)의 개념과 유한체적법(finite volume method, FVM)을 적용하여 조건에 따라 다수의 내부 모형으로 구성된 열전달 또는 물질전달 모형을 이용하여 이에 대한 예측을 수행하였으며 이는 모형개발 분야에서 상당한 발전을 이루었다.

그러나 이상의 도로포장 표면에서의 온도 예측과 용설에 관련된 연구는 대부분 기상학의 관점이나 용설 재료 및 용설 시스템의 평가 관점에서 이루어져, 도로포장 내의 수분침투로 인한 열역학적 특성의 변화를 반영하고 있지 못하여 일부지역에서만 특정적으로 온도를 예측한다거나 지역별 용설을 위한 최소조건을 제시하고 있지 못하여 용설 재료나 용설 시스템에 대한 객관적인 평가에 적용하기 어렵다는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 대기조건 및 경계조건을 고려한 도로포장 표면의 온도예측과 용설 조건제시를 위한 체계적 모형 개발을 위한 연구의 일환으로서, 공극이 존재하는 도로포장에 대하여 물질전도 및 열전도 모형을 합리적인 가정을 통하여 유도하고자 하였다.

2. 일차원 비정상 결빙 및 용설 모형

2.1. 에너지평형 방정식

에너지 보존법칙을 설명하는 열역학 제 1법칙은 주어진 시스템으로 유입된 에너지, 시스템에서 유출된 에너지, 시스템 내부적으로 발생한 에너지의 합이 시스템 자체의 에너지 변화와 같음을 나타내며, 이는 다음 Eq. (1)의 에너지 평형 방정식(energy balance equation)으로 표현된다. 이때, 에너지는 일(work), 질량(mass), 열(heat) 등을 모두 포함한다.

Energy Balance Equation

$$\dot{E}_x - \dot{E}_{x+\Delta x} + \dot{E} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (1)$$

where, \dot{E}_x = rate of net energy transfer in by heat, work, and mass,

$\dot{E}_{x+\Delta x}$ = rate of net energy transfer out by heat, work, and mass,

\dot{E} = rate of energy generation (= $\dot{e} V$),

\dot{e} = energy generation rate per unit volume,

V = unit volume,

ΔE = change of energy content, and

Δt = time step.

2.2. 물질평형 방정식

물질의 상변화(phase transition)은 상대적으로 큰 에너지를 요구하는 변화로서, 일반적인 도로포장의 깊이별 시간에 따른 온도를 정확하게 예측하기 위해서는 열류(heat flux)의 이동과 함께 수분의 상변화 및 이동이 예측모형에 고려되는 것이 바람직하다. 특히 용설을 목적으로 하는 도로포장 구조에서는 수분의 이동 및 상변화가 반드시 고려되어야 하는데, 이는 각 층에서의 Eq. (1)에서 유도될 수 있는 물질평형 방정식(mass balance equation)을 이용하여 고려될 수 있다. 다음 Eq. (2)는 일반적인 물질평형 방정식을 나타낸다.

General Mass Balance Equation

$$\dot{m}_x - \dot{m}_{x+\Delta x} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (2)$$

where, \dot{m}_x = rate of mass transfer in

per unit area, mass flux (= \dot{M}_x/A),

$\dot{m}_{x+\Delta x}$ = rate of mass transfer out

per unit area (= $\dot{M}_{x+\Delta x}/A$), and

Δm = change of mass per unit area (= \dot{M}/A).

용설포장으로 Liu et al.(2007)에 의하여 고려된 시멘트 콘크리트 포장과는 달리, 공극에 의한 온도의 변화를 무시할 수 없는 용설형 아스팔트 포장구조는 포장층에서의 수분의 이동이 고려되어야 한다. 용설을 고려하는 포장에서의 열전달 및 물질(수분)전달 해석이 필요한 경우, 전체 포장층은 강설이 존재하는 아스팔트 포장구조에서 강설로 생성되는 건조적설층(dry snow layer), 강설 공극에 수분이 포화되어 존재하는 포화적설층(water + dry snow layer), 수분이 침투되어 있는 표층상부(water + pavement surface), 수분이 존재하지 않는 표층하부층(pavement surface)과 공극이 상대적으로 작아 강설에 의한 수분의 전달이 없는 기층 또는 하부층(sublayer)으로 다음 Fig. 1 또는 Fig. 2와 같이 구분될 수 있다.

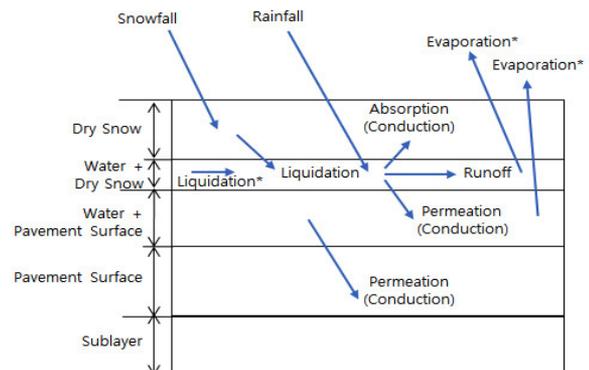


Fig. 1 Mass Balance in Porous Pavement System (*conditional)

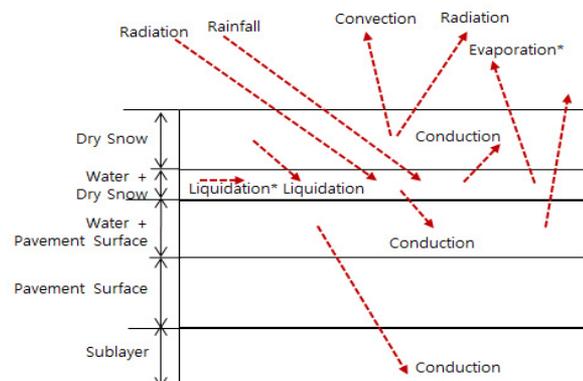


Fig. 2 Heat Balance in Porous Pavement System (*conditional)

Fig. 1과 Fig. 2는 각각 아스팔트 포장에서의 물질평형과 열평형에 고려된 인자를 나타내고 있다. Fig. 1과 Fig. 2에서의 포화적설층에서의 강설이 수분으로 변화하는 액화(liquidation)는 건조적설층이 존재하지 않는 경우에만 조건부로 발생하며, 포화적설층과 건조적설층의 수분이 수증기로 변화하는 기화(evaporation)는 각각 건조적설층이 없는 경우와 적설층이 없는 경우에만 조건부로 발생하는 것으로 가정하여 별도의 표시(*)로 구분하였다. 이외에도 Fig. 1과 Fig. 2의 조건에서 합리적인 물질평형 방정식과 열평형 방정식을 유도하기 위하여 설정된 가정은 다음에 서술되어 있는 바와 같다. 기본적인 가정은 Liu et al.(2007)이 공항의 시멘트 콘크리트 포장에서의 이론적 용설모형을 개발하기 위하여 제시된 것과 유사하지만 본 연구에서 공극을 고려한 포장층 내에서의 열전도 및 수분전달의 영향을 포함하기 위하여 수정되거나 추가된 가정은 별도의 표시(*)로 표시되었다.

- 건조적설층은 포장층 상부의 강설이 대기 또는 포장표층의 온도에 따라서 수분으로 변화하기 이전의 상태를 나타내며, 건조적설층에서는 강설이 직접 기체로 변화하는 승화(sublimation)가 발생하지 않는다. 건조적설층만 존재하는 경우에는 대기 또는 포장표층의 온도에 따라 건조적설층 하부에서 용설로 인한 수분이 발생하며, 이 때 발생되어 건조적설층으로 흡수되는 수분은 건조적설층을 반드시 포화시키면서 포화적설층을 생성한다. 건조적설층에서는 온도가 증가되면서 강설의 수분으로의 상변화가 발생되므로 건조적설층의 온도는 0°C를 초과하지 않는다.
- 포화적설층에 존재하는 수분은 그 상부에 건조적설층이 없는 경우에만 포화적설층 상부에서 기화되며, 건조적설층이 있는 경우에는 기화되지 않는다. 대기 또는 포장상부에서 유입된 열류로 인하여 포화적설층에서 발생된 수분은 모두 건조적설층으로의 흡수(absorption), 포장상부로의 침투(permeation), 도로 경계면으로 배출(runoff)된다.* 단, 항상 강설과 수분이 동시에 존재하는 포화적설층의 온도는 항상 0°C이다.
- 포장표층으로 침투된 수분은 하향 전도(conduction)되며, 포장층 상부의 적설층이나 수분이 완전히 제거되기 전까지는 대기중으로 기화되지 않는다.*
- 포장하부층은 열류만을 전도시키므로 포장표층으

로부터의 수분의 전도는 없는 것으로 가정한다.*

- 태양 복사열(short wave radiation)은 매개없이 강설이 존재하는 포장구조에 전달되며, 포화적설층이 없는 경우에는 건조적설층 하부, 포화적설층과 건조적설층이 모두 없는 경우에는 수분층 상부 또는 표층상부, 포화적설층이 있는 경우에는 포화적설층에만 영향을 미친다.*
- 복사열(long wave radiation)은 적설층에서 매개없이 대기중으로 방출되며, 이에 따른 온도의 감소는 건조적설층 상부에서 발생한다.
- 대기에 의한 강제대류(convection)는 최상위 적설층 상부에만 영향을 미친다.
- 강설은 건조적설층에 질량 증가 요인으로 작용하지만, 건조적설층의 온도를 변화시키지는 않는다.
- 강우는 건조적설층의 질량과 온도에 영향을 미치지 않고 포화적설층으로 투과된다. 다만 강우는 포화적설층의 질량과 온도를 변화시킨다.
- 합리적인 수치해석모형의 개발을 위하여 건조적설층과 포화적설층은 각각 1개의 절점으로 표현된다. 따라서 열전도와 물질전도를 나타내는 수치모형에서 각층은 상부 또는 하부의 구분이 없다.*

건조적설층, 포화적설층의 두께 또는 깊이를 나타내는 변수가 Fig. 3과 같이 가정될 때, 모든 강설층 내의 시간에 따른 전체 강설의 질량은 단위면적에 대하여 얼음의 밀도, 강설의 간극률(porosity)과 강설고 또는 적설고로 다음 Eq. (3)과 같이 나타내어질 수 있다.

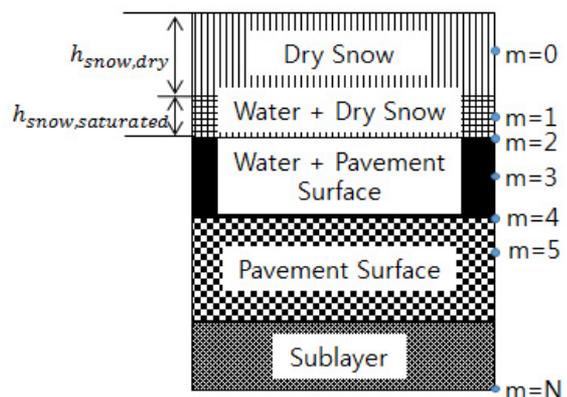


Fig. 3 Definitions of Heights

Fig. 3의 우측 점은 수치해석에 필요한 절점(node)를 나타내고 있다. 건조적설층과 포화적설층은 각 1개의

절점을 갖으며, 포장층은 다수의 절점을 갖는다.

$$m_{snow} = \rho_{ice}(1 - \phi_{snow})h_{snow} \quad (3)$$

where, ρ_{ice} = density of ice $\left(= \frac{\rho_{snow}}{(1 - \phi_{snow})}\right)$,

ρ_{snow} = density of snow,

ϕ_{snow} = porosity of snow, and

h_{snow} = snow height.

이는 Eq. (4)와 같이 적설고의 변화량으로 표현될 수 있다. 따라서 적설고의 변화량은 공극이 존재하지 않은 얼음에 대한 중량비를 통하여 결정된 강설의 공극특성을 반영할 수 있다.

$$\Delta h_{snow} = \frac{\Delta m_{snow}}{\rho_{ice}(1 - \phi_{snow})} \quad (4)$$

where, Δh_{snow} = change of snow height
for the time step, and

Δm_{snow} = change of snow mass
for the time step.

건조적설층이나 포장층이 수분에 의하여 완전히 포화되지 않은 경우, 건조적설층이나 적설층에서 발생된 수분은 포장층 경계에서 노면을 따라 배출되거나 적설층으로 흡수되거나, 포장층으로 침투한다고 가정할 수 있다. 건조적설층 또는 포화적설층 상부에서 용설로 발생된 수분이 상부 건조적설층으로 흡수될 때, 단위면적에 대하여 적설층으로 흡수된 수분의 질량은 수분의 밀도와 강설의 간극률 및 포화적설층의 높이로 다음 Eq. (5)와 같이 표현되며, 포화적설층의 높이의 변화량은 Eq. (4)와 유사한 방법으로 다음 Eq. (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$m_{water} = \rho_{water}\phi_{snow}h_{snow, saturated} \quad (5)$$

where, m_{water} = mass of water in water+snow layer,

ρ_{water} = density of water, and

$h_{snow, saturated}$ = height of saturated snow.

$$\Delta h_{snow, saturated} = \frac{\Delta m_{water}}{\rho_{water}\phi_{snow}} \quad (6)$$

where, $\Delta h_{snow, saturated}$ = change of saturated
snow height, and

Δm_{water} = change of water mass
in water+snow layer.

적설층의 높이가 충분히 낮은 경우에는 수분이 상부로 전달될 수 있는 최대 포화적설층의 높이는 실시간으로 결정되는 적설층의 높이와 동일하겠지만, 적설층의 높이가 충분히 높은 경우에는 최대 포화적설층의 높이가 실험적으로 결정될 필요가 있다. 그러나 수분의 적설층 내 흡수가 모세관 현상에 의하여 발생하는 점을 활용하면 다음 Eq. (7)과 같이 표면장력, 접촉각, 밀도, 중력 가속도 및 반경으로 표현할 수 있으며, 필요에 따라 측정을 통하여 보정값을 활용할 수 있다. 따라서 최대 포화적설층의 높이는 적설층의 높이나 모세관 현상으로 전달될 수 있는 수분의 높이 중에서 최소값으로 Eq. (8)과 같이 결정된다.

$$h_{snow, capillary} = B \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho_{water} g r} \quad (7)$$

where, $h_{snow, capillary}$ = liquid intake,

B = correction factor,

γ = liquid-air surface tension ($= 0.0728 N/m$),

θ = contact angle ($= 0^\circ$)

g = gravity acceleration ($= 9.81 m/s^2$), and

r = radius of column.

$$h_{snow, saturated} = \min[h_{snow, capillary}, h_{snow}] \quad (8)$$

Eq. (4)와 Eq. (6)에서 얻어진 적설층의 높이 및 포화적설층의 높이를 이용하면 건조적설층의 높이를 결정할 수 있으며, 이에 따라 건조적설층에서의 질량은 다음 Eq. (9)와 같이 표현될 수 있다. 포화적설층 및 건조적설층의 높이는 유한차분법을 이용한 수치해석에서 절점의 위치를 결정하는데 활용되며, 건조적설층의 질량은 물질평형 방정식을 풀기 위하여 활용된다. 따라서 강설의 간극률은 강설의 특성에 따라서 결정되어야 한다.

$$m_{snow, dry} = \rho_{ice}(1 - \phi_{snow})h_{snow, dry} \quad (9)$$

where, $h_{snow, dry} = h_{snow} - h_{snow, saturated}$

앞서 언급된 바와 같이, Fig. 1에서 최상부의 적설층에 존재하는 강설의 승화가 무시되면, 수분이 공극에 존재하는 포화적설층과 수분이 존재하지 않는 건조적설층 모두에 존재하는 강설의 질량의 변화는 강설량과 용설량에 의하여 Eq. (10)과 같이 표현될 수 있다. 단, 건조강설층의 수분으로의 액화를 나타내는 항은 건조적설층의 온도가 0℃ 이상이 되는 경우에 조건부로 활성화되며, 그렇지 않은 경우에는 잠정적으로 계산된 잠열을 저장하는 부분을 수치해석 프로그램에 포함한다.

Snow Mass Balance Equation for Dry Snow Layer

$$\dot{m}_{snowfall} - \dot{m}_{liquidation} = \frac{\Delta m_{snow}}{\Delta t} \quad (10)$$

where, $\dot{m}_{snowfall}$ = rate of snowfall,

$\dot{m}_{liquidation}$ = rate of snow melt,

Δm_{snow} = change of snow content, and

Δt = time step.

실제 강설은 외부의 태양 복사열로 인하여 적설층 상부에서 수분으로 용해되거나 도로포장층에서 발생된 열로 인하여 적설층과 포장층의 경계에서 수분으로 용해될 수 있으나, 단순화를 위하여 외부 에너지로 인한 건조적설층이 존재하는 경우 강설의 용해는 건조적설층 하부 또는 포화적설층 상부에서만 발생하고 포화적설층이 존재할 경우에는 포화적설층 하부에서만 발생하는 것으로 가정할 수 있다. 이러한 가정이 성립된다면 외부 에너지나 포장 내부 에너지에 의한 용설에 의하여 발생된 수분은 포화적설층 상부에서 건조적설층으로 흡수되거나 포화적설층 하부에서 포장층으로 침투하거나 포장층 경계면을 따라 배출된다. 이때 배수성 포장 또는 보수성 포장과 같이 공극이 큰 포장의 포화적설층에서의 수분의 변화량에 대한 물질평형 방정식은 강설의 액화, 강수, 건조적설층으로 흡수되는 수분, 포장표층으로 침투하는 수분 및 기화를 고려하여 다음 Eq. (11)과 같이 표현될 수 있다. 단, 건조적설층이 없는 경우에만 발생하는 수분의 기화에 의한 물질이동은 조건부로만 발생한다.

Water Mass Balance Equation for Water+Dry Snow Layer

$$\begin{aligned} & \dot{m}_{liquidation} + \dot{m}_{rainfall} - \dot{m}_{water, absorbed} \\ & - \dot{m}_{permeation} - \dot{m}_{runoff} - \dot{m}_{evaporation} \\ & = \frac{\Delta m_{water}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (11)$$

where, $\dot{m}_{rainfall}$ = rate of water absorption to snow,

$\dot{m}_{water, absorbed}$ = rate of water absorbed to dry snow,

$\dot{m}_{permeation}$ = rate of water permeation to pavement,

\dot{m}_{runoff} = rate of water runoff, and

$\dot{m}_{evaporation}$ = rate of evaporation.

적설층이 있는 조건에서 표층상부의 수분이 존재하는 층에서의 침투하는 수분을 고려한 물질평형 방정식과 이에 따른 유한차분식은 각각 Eq. (12)와 Eq. (13)으로 표현된다. 적설층 없이 표층상부에 수분이 존재하는 조건은 모형에서 고려하지 않는다. 이때 Eq. (13)의 우변에서는 절점의 크기를 고려하여 공간중분(spatial step)은 절반만 고려한다. 포장의 공극이 큰 경우에는 유량과 투수계수(permeability coefficient)를 이용한 표현으로 유도하는 것이 바람직할 수 있으나, 아래 Eq. (13)의 두 번째 항의 확산계수를 조정하는 것으로도 동일한 해석이 가능할 것을 예측할 수 있다.

Water Mass Balance Equation for Pavement Surface (Interface)

$$\dot{m}_{permeation} = \frac{\Delta m_{water}}{\Delta t} \quad (12)$$

FDE for Pavement Surface (Interface)

$$\begin{aligned} & \rho_{w,s} D_{w,s} \left(\frac{M_1^i - M_2^i}{\Delta x_{w,s}} \right) + \rho_{w,p} D_{Pave} \left(\frac{M_3^i - M_2^i}{\Delta x_{pave}} \right) \\ & = \rho_{w,s} \frac{\Delta x_{w,s}}{2} \left(\frac{M_2^{i+1} - M_2^i}{\Delta t} \right) \\ & + \rho_{w,p} \frac{\Delta x_{pave}}{2} \left(\frac{M_2^{i+1} - M_2^i}{\Delta t} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

where, $D_{w,s}$ = diffusion coefficient of water

in water+snow layer

D_{pave} = diffusion coefficient of water
in pavement surface

M_m^i = water content at node m with time i
(= $\rho_w/\rho_{w,s}$) or (= $\rho_w/\rho_{w,p}$),

$\rho_{w,s}$ = density of water in saturated snow layer,

$\rho_{w,p}$ = density of water in water+pavement surface,

$\Delta x_{w,s}$ = spatial step in water+snow layer,
and

Δx_{pave} = spatial step in pavement surface.

표층 상부의 경계를 제외하고 여러 개의 절점을 갖는 표층 내부에서의 물질 평형방정식은 다음 Eq. (14)와 같으며, 이에 따른 유한차분식은 Eq. (15)와 같다. 설정된 가정에 따라 수분은 하부층으로 전달되지 않는 것으로 가정한다.

Water Mass Balance Equation for Pavement Surface (Interior)

$$\dot{m}_{permeation, pave} = \frac{\Delta m_{water}}{\Delta t} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \rho_{w,p} D_{pave} \left(\frac{M_{m-1}^i - M_m^i}{\Delta x_{pave}} \right) + \rho_{w,p} D_{pave} \left(\frac{M_{m+1}^i - M_m^i}{\Delta x_{pave}} \right) \\ & = \rho_{w,p} \Delta x_{pave} \left(\frac{M_m^{i+1} - M_m^i}{\Delta t} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

2.3. 열평형 방정식

에너지의 변화가 복사, 전도, 대류에 의한 열전달로 한정되는 경우, 에너지 평형방정식 Eq. (1)은 Eq. (16)의 열평형 방정식(heat balance equation)으로 표현될 수 있다. Eq. (16)의 세 번째 항은 자체적으로 에너지를 발생하는 경우에 사용되는 항으로 발열도로포장 내에서의 전기 등의 외부에너지의 유입으로 인한 발열을 설명하는데 적용될 수 있다.

General Heat Balance Equation

$$\dot{Q}_x - \dot{Q}_{x+\Delta x} + \dot{E} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (16)$$

where, \dot{Q}_x = rate of net heat transfer in,

$\dot{Q}_{x+\Delta x}$ = rate of net heat transfer out,

ΔQ = change of heat

건조적설층에 유입된 열에너지는 건조적설층의 온도를 증가시키고, 강설의 온도가 0℃ 이상이 되는 시점에서는 강설을 액화(liquidation)시키는 데에도 사용된다. 강설에 대한 물질평형 방정식과는 달리 건조적설층과 포화적설층의 온도가 구분되어야 하므로, 건조적설층에서의 열평형 방정식은 단위면적당 열 또는 열류($q = \dot{Q}/A$)를 이용하여 다음 Eq. (17)과 같이 나타내어진다. 건조적설층에서는 절점이 한 개만 존재하므로 포화적설층의 영향을 고려하기 위하여 Eq. (17)의 우변의 예와 같이 평균값을 적용한다.

Heat Balance Equation for Dry Snow Layer

$$\begin{aligned} & \dot{q}_{cond, water + snow} + \dot{q}_{rad, shortwave} - \dot{q}_{rad, longwave} \\ & - \dot{q}_{conv} - \dot{q}_{snowfall} - \dot{q}_{liquidation} \\ & = \left(\frac{\rho_{snow, dry} + \rho_{snow, saturated}}{2} \right) \times \left(\frac{\Delta x_{snow, dry} + \Delta x_{snow, saturated}}{2} \right) \times \\ & \left(\frac{C_{p, snow, dry} + C_{p, snow, saturated}}{2} \right) \times \frac{(T_{snow, dry} - T_{snow, saturated})}{\Delta t} \end{aligned} \quad (17)$$

where, $\dot{q}_{cond, water + snow}$ = rate of conductive heat transfer from water+snow layer,

$\dot{q}_{rad, shortwave}$ = rate of short wave radiative heat transfer,

$\dot{q}_{rad, longwave}$ = rate of long wave radiative heat transfer,

\dot{q}_{conv} = rate of convective heat transfer,

$\dot{q}_{snowfall}$ = rate of snow fall,

$\dot{q}_{liquidation}$ = rate of heat for liquidation,

$C_{p, snow, dry}$ = specific heat capacity of dry snow,

$C_{p, snow, saturated}$ = specific heat capacity of saturated snow,

$T_{snow, dry}$ = temperature of dry snow, and

$T_{snow, saturated}$ = temperature of saturated snow.

Eq. (17)에서 나타난 열류에 대한 정의는 Eq. (18)~Eq. (24)에 나타난 바와 같다.

$$\dot{q}_{cond, water + snow} = \left(\frac{k_{snow, dry} + k_{snow, saturated}}{2} \right) \times \frac{(T_{snow, dry} - T_{snow, saturated})}{(\Delta x_{snow, dry} + \Delta x_{saturated})/2} \quad (18)$$

where, $k_{snow, dry}$ = conductive coefficient of dry snow, and

$k_{snow, saturated}$ = conductive coefficient of saturated snow.

$$\dot{q}_{rad, short wave} = \epsilon \sigma (T_{snow, dry}^4 - T_{sky}^4) \quad (19)$$

where, ϵ = emissivity,

σ = Stefan-Boltzmann constant, and

T_{sky} = temperature of sky.

$$\dot{q}_{rad, long wave} = \epsilon \sigma (T_{snow, dry}^4 - T_{MRT}^4) \quad (20)$$

where, T_{MRT} = mean radiant temperature.

$$\dot{q}_{conv} = h_c (T_{snow, dry} - T_{air}) \quad (21)$$

where, h_c = convective coefficient of dry snow, and

T_{air} = temperature of air.

대류에 의한 열전달을 나타내는 Eq. (21)의 대류전달 계수는 Blasius의 대류계수모형을 사용할 때 다음 Eq. (22)로 구체화 될 수 있다.

$$h_c = 5.6 + 0.332 R_e^{0.5} P_r^{0.33} k_{air} / L \quad (22)$$

where, $k_{air} = 0.027$,

$P_r = 0.7$,

$R_e = vL/\mu$,

μ = kinematic viscosity of air (= $16.01 E^{-6}$),

and

L = length for infinite flat plate (= 0.15).

$$\dot{q}_{snowfall} = \dot{m}_{snow, dry} C_{p, snow, dry} (T_{air} - T_{snow, dry}) \quad (23)$$

$$\dot{q}_{liquidation} = \dot{m}_{liquidation} h_{if} \quad (24)$$

where, h_{if} = heat of fusion of water.

포화적설층에서는 강설과 수분이 동시에 존재하므로, 강설이 모두 액화될 때까지 온도가 0°C에서 변화하지 않고 공급된 열에너지는 모두 강설을 액화시키는데 사용되며, 건조적설층이 없는 경우에는 수분을 기화시키는 데에도 사용된다. 포화적설층에서는 응력(condensation)이 없다고 가정하면, 전도, 강수 및 액화와 기화를 조건부로 고려한 포화적설층의 열평형 방정식은 다음 Eq. (25)~Eq. (28)에 나타난 바와 같다.

Heat Balance Equation for Water + Dry Snow Layer

$$\dot{q}_{cond, pave} + \dot{q}_{rainfall} - \dot{q}_{cond, water + snow} \quad (25)$$

$$- \dot{q}_{liquidation} - \dot{q}_{evaporation} = 0$$

where, $\dot{q}_{cond, pave}$ = conductive heat flux

from pavement surface,

$\dot{q}_{rainfall}$ = rate of conductive heat transfer due to rainfall, and

$\dot{q}_{evaporation}$ = heat flux due to evaporation.

$$\dot{q}_{cond, pave} = k_{pave} \frac{(T_{pave} - T_{snow, saturated})}{\Delta x_{water + snow}} \quad (26)$$

where, k_{pave} = conductive heat transfer coefficient of pavement.

$$\dot{q}_{rainfall} = \dot{m}_{rainfall} C_{p, water} (T_{air} - T_{water + snow}) \quad (27)$$

where, $C_{p, water}$ = specific heat capacity of water.

$$\dot{q}_{evaporation} = \dot{m}_{evaporation} h_{fg} \quad (28)$$

where, h_{fg} = enthalpy of evaporation of water.

적설층과 도로포장층 경계면에서의 열평형 방정식과 이에 따른 유한차분식은 각각 다음 Eq. (29) 및 Eq. (30)과 같이 나타내어진다. Eq. (29)와 Eq. (30)은 포장표층과 하부층과의 경계조건에서 동일하게 적용될 수 있는데, 발열소재가 표층하부와 하부층의 경계면에 균등하게 분포하거나 매트형식으로 존재하는 경우에는 Eq. (30)에 하부층에서의 발열을 포함하는 항($= e\Delta x_{sublayer}/2$)이 좌변에 추가되어야 한다.

Heat Balance Equation for Pavement (Interface)

$$\begin{aligned} \dot{q}_{cond,pave} - \dot{q}_{cond,snow,saturated} + \dot{E} \\ = mC_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \end{aligned} \quad (29)$$

Finite Difference Equation for Pavement Surface (Interface)

$$\begin{aligned} k_{pave} \left(\frac{T_3^i - T_2^i}{\Delta x_{pave}} \right) - k_{snow,saturated} \left(\frac{T_2^i - T_1^i}{\Delta x_{snow,saturated}} \right) \\ + e\Delta x_{pave}/2 = \rho_{pave} C_{p,pave} \frac{\Delta x_{pave}}{2} \left(\frac{T_2^{i+1} - T_2^i}{\Delta t} \right) \\ + \rho_{snow,saturated} C_{p,saturated} \frac{\Delta x_{saturated}}{2} \times \left(\frac{T_2^{i+1} - T_2^i}{\Delta t} \right) \end{aligned} \quad (30)$$

where, ρ_{pave} = density of pavement surface,

$C_{p,pave}$ = specific heat capacity of pavement surface.

도로포장층 내부에 발열소재가 균등하게 분포되어 있는 경우, 도로포장층 내에서의 열평형 방정식은 Eq. (31)과 같이 좌변의 두 번째 항을 포함하여 표현될 수 있으며, 이에 따른 유한차분식은 Eq. (32)와 같이 표현될 수 있다. Eq. (30)과 Eq. (32)에 나타난 재료의 단위 면적당 에너지는 규정에 맞는 실내실험을 수행하거나, 열역학 이론을 적용하여 결정할 수 있다.

Heat Balance Equation for Pavement (Interior)

$$\dot{q}_{cond,pave} + \dot{E} = mC_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (31)$$

Finite Difference Equation for Pavement (Interior)

$$\begin{aligned} k_{pave} \left(\frac{T_{m+1}^i - T_m^i}{\Delta x_{pave}} \right) - k_{pave} \left(\frac{T_m^i - T_{m-1}^i}{\Delta x} \right) + \dot{e}_m \Delta x_{pave} \\ = \rho_{pave} \Delta x_{pave} C_{p,pave} \left(\frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta x_{pave}} \right) \end{aligned} \quad (32)$$

3. 결론

본 연구에서는 물질전도 및 열전도 이론에 기반한 동결-융설 모형을 이론적으로 유도하였다. 유도된 이론적 융설모형은 Liu et al.(2007)이 제안한 가열 파이프를 이용한 이론적 모형에 기반을 두었으나, 기존 연구에서 포함하지 않은 포장표면에서의 수분의 확산 또는 투수를 고려하여 공극이 중요한 역할을 하는 아스팔트 포장에 보다 합리적으로 적용할 수 있다는 특성이 있으며, 구체적인 특성은 다음과 같다.

- 대기과 도로포장 사이의 대류, 복사, 전도에 의한 동결층의 용빙 및 승화를 고려할 수 있다. 이는 기존의 열에 대한 변화만을 고려하는 것이 아니라 물질 또는 수분의 상변화를 고려하여 보다 합리적이다.
- 또한 도로포장 상부의 융설층에 낙하하는 강우 및 강설의 영향을 고려하여 도로포장에서 발생할 수 있는 대부분의 기상조건을 고려할 수 있다.
- 본 논문에서 유도된 모형은 일반적으로 도로포장 내의 공극을 고려하지 않는 열전도 모형과는 달리 공극에 포함하는 수분의 양을 고려할 수 있으며, 공극 포화에 따른 배수의 영향을 고려한다.
- 또한 도로포장 층에 존재하는 수분의 강설층으로의 물질전달 및 일부 하부층으로의 전달을 고려할 수 있다.

이상에서 유도된 해석모형은 유한차분법으로 나타내어져 엑셀 스프레드 시트나 기타의 컴퓨터 언어를 사용하여 구현될 수 있다. 또한 유도된 해석모형은 기존의 포장 깊이별 온도와 기상자료를 활용한 보정을 통하여 겨울철 동결을 포함한 온도 예측에 적용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업 재원으로 수행되었습니다.

REFERENCE

Chapman WP. 1952. Design of Snow Melting Systems, Heating and

- Ventilating. Vol. 95.
- Chapman WP, Katunich S. 1956. Heat Requirement of Snow Melting Systems. ASHAE Transactions. Vol. 62, pp. 359-372.
- Dejmal K, Repal V. 2009. Prediction of Ice Formation on Road Surface. AARMS. Vol. 8, No. 2, pp. 213-219.
- Fujimoto A, Saida A, Fukuhara T. 2012. A New Approach to Modeling-vehicle-induced Heating and Its Thermal Effect on Road Surface Temperature. Journal of Applied Meteorology and Climatology. Vol. 51, pp. 1980-1993.
- Fujimoto A, Watanabe H, Fukuhara T. 2006. Effect of Tire Frictional Heat on Snow Covered Road Surface. Standing International Road Weather Conference. Vol 13. pp. 117-122.
- Heo JY, Park BJ, Kim TH. 2013. A Feasibility Study on Developing Snow Melting Systems using CNT-Cement Composite. International Journal of Highway Engineering. Vol. 5, No. 2, pp. 29-37.
- Jacobs W, Raatz WE. 1996. Forecasting Road-Surface Temperatures for Different Site Characteristics. Meteorological Applications. Vol. 3, Issue. 3. pp. 243-256.
- Kim JS, Ha SJ, Son KJ. 2010. A Basic Study of snow Melting System for the Anti-Freezing Road using the Pulsating Heat Pipe. Journal of Korea Society of Power System Engineering. Vol. 3, pp.19-24.
- Kim KW, Lee GH, Hong SK, Jin JI, Doh YS. 2003. Evaluation of Self-deicing Function of Snow-melting Asphalt. International Journal of Highway Engineering. Vol. 5, No. 2, pp. 1-14.
- Lee JH, Lee HJ. 2003. A Basic Study for the Development of Road Snow Melting System using Heating Paint. Journal of Korea Society of Civil Engineers. Vol. 23, No. 6, pp. 827-834.
- Liu X, Rees SJ, Spitler JD. 2007. Modeling Snow Melting on Heated Pavement Surface. Applied Thermal Engineering. Vol. 27. pp. 1115-1124.
- Lund JW. 1999. Reconstruction of a Pavement Geothermal Deicing System. GEO-Heat Center Quarterly Bulletin. Vol. 20, No. 1, pp. 14-17
- Morita K, Tago M. 2000. Operational Characteristics of the Gaia Snow-melting System in Ninohe, Iwate, Japan. Geo-heat Center, Quart. Bull. Vol. 21, No. 4, pp. 5-11.
- Park MS, Joo SJ, Son YT. 2014. Development of Road Surface Temperature Prediction Model using the Unified Model output. Atmosphere. Korean Meteorological Society. Vol. 24. No. 4. pp. 471-479.
- Ragnarsson R. 1997. Snow Melting-Safer Cities. Cold Climate HVAC International Conference. pp. 9.
- Sass BH. 1992. A Numerical Model for Prediction of Road Temperature and Ice. Journal of Applied Meteorology. Vol 31. pp.1499-1506.
- Sass BH. 1997. A Numerical Forecasting System for the Prediction of Slippery Road. Journal of Applied Meteorology. Vol 36. pp. 201-817.
- Seo YC, Seo BS, Song JK, Cho NH. 2013. A Study on Field Applicability Underground Electric Heating Mesh. Vol. 15, No. 2, pp.19-27.
- Seo YG, Seo UJ, Eum, JY, Kim BC. 2009. Pilot Test of Geothermal Snow Melting System for Concrete Pavement.
- Yang CH, Yun DG, Sung JG. 2012. Validation of a Road Surface Temperature Prediction Model using Real-Time Weather Forecasts. Vol. 16. No. 7. pp.1289-1294.
- Yun DG, Jeong JH. 2006. Performance and Adequacy of Deicing Materials. International Journal of Highway Engineering. Vol.1, pp. 55-64.
- Zwarycz K. 2002. Snow Melting and Heating Systems Based on Geothermal Heat Pumps at Goleniow Airport, Poland. Geothermal Training Programme. No. 21, pp. 431-464