

제상과정 해석을 위한 눈의 용해거동에 관한 수치적 연구

이 관 수[†], 박 준 상*, 김 서 영**

한양대학교 기계공학부, *한양대학교 대학원, **한국과학기술연구원

Numerical Study on the Behavior of Snow Melting for the Analysis of Defrosting Procedure

Kwan-Soo Lee[†], Jun-Sang Park*, Seo Young Kim**

School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-070, Korea

[†]Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-070, Korea

**Thermal/Flow Control Research Center, KIST, Seoul 136-791, Korea

(Received December 22, 1999; revision received April 17, 2000)

ABSTRACT: One dimensional numerical modeling was carried out for the melting behavior of dry snow and the unsaturated flow when heat was supplied from the bottom surface. Discrepancy between the previous experimental data and the present numerical results is substantially reduced by considering the density change of water permeation layer due to the infiltration of meltwater. In the parametric study for effective thermal conductivity, it was found that the effect of this parameter to the behavior of snow melting is minor. Sensitivity analysis showed that the melting time is most sensitive to changes in supplied heat flux, snow temperature, and bulk density, whereas snow bulk density and residual saturation have a significant effect on the height of water permeation layer in snow.

Key words: Snow melting(눈 용해), Porous media(다공성 물질), Defrosting(제상), Parameter study(인자연구), Sensitivity analysis(민감도 해석), Water permeation(수분 침투), Melting efficiency(용해효율)

기 호 설 명

c : 비열, [J/kg · °C]	K : 수력침투계수, [m/s]
D : 수력확산계수, [m ² /s]	k : 열전도계수, [W/m · °C]
d : 입자크기, [m]	k : 침투율, [m ²]
E : 눈층과 공기층을 포함한 초기 높이, [m]	P_c : 모세관압, [Pa]
g : 중력가속도, [m/s ²]	\dot{q}_s : 공급열량, [W/m ²]
H : 총 높이, [m]	S : 수분포화도
h_{ul} : 용해잠열, [J/kg]	T : 온도, [°C]
	t : 시간, [s]
	v : 유동속도, [m/s]
	\dot{W} : 용해수 배출율, [kg/m ² · s]
	z : 공간좌표(높이방향), [m]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-2290-0426; fax: +82-2-2295-9021

E-mail address: ksleehy@email.hanyang.ac.kr

그리스 문자

δ_i	: 얼음층의 두께, [m]
ϵ	: 다공비(porosity)
η	: 수분침투층의 두께, [m]
η_m	: 용해 효율
θ	: 각각의 상에 대한 부피비
μ	: 점성계수, [kg/s · m]
ρ	: 밀도, [kg/m ³]
σ	: 표면장력, [Pa]
τ	: 비틀림 계수(tortuosity)
τ_m	: 용해종료시간, [min]

하첨자

<i>eff</i>	: 유효(effective)
<i>g</i>	: 다공질내의 기체상
<i>i</i>	: 얼음
<i>ini</i>	: 초기 상태
<i>r</i>	: 잔류(residual)
<i>s</i>	: 눈층
<i>w</i>	: 물층
<i>wp</i>	: 수분 침투층

1. 서론

다공성 물질인 눈층의 용해문제는 극지방에서의 지구온난화에 의한 해수면 상승과 저온지역에서의 도로상의 융설문제등에 적용하기 위하여 다양하게 연구되어 왔다. 이에 반해서 냉동기의 열교환기에 착상된 서리층 용해에 대한 해석은 제상과정의 해석을 위하여 필수적인 과정임에도 서리구조의 복잡성 등으로 인하여 많은 연구가 이루어지지 않았다. 착상은 열교환기의 공기 유로를 차단시켜 유량을 감소시키며, 공기와 열교환기 사이의 열저항으로 작용하여 시스템의 효율을 저하시킨다. 이때 열교환기의 성능을 유지하기 위해서는 일정시간 경과 후 부착된 서리를 제거하는 제상작업이 요구된다. 이 작업은 일반적으로 열을 공급하는 방식에 의해 이루어지는데 이것은 전체 냉동시스템의 성능을 저하시키므로 주위 인자에 알맞은 제상시간과 공급열량을 결정해야 한다. 이를 위해서는 서리층의 용해현상에 대한 정확한 해석이 요구되지만 이에 따른 제상과

정을 모델링을 하는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 서리 대신 눈으로 대체하여 눈의 용해거동을 모델링한다.

Colbeck⁽¹⁻⁴⁾은 눈에서의 수분 이동에 대한 기구(mechanism)와 눈의 변성과정에 대한 이론을 정립하였고, 눈을 과냉상태에서의 각진 눈과 0°C 인 눈에서의 원형 눈으로 나누어 형태학적인 분류를 시도하는 등 기초적 연구를 진행하였다. Illangasekare and Walter⁽⁵⁾, Tuteja and Cunnane⁽⁶⁾, 그리고 Tao⁽⁷⁾는 다공성 물질인 눈의 유효열전도계수에 대한 식들을 제시하였다. 또한, Jordan⁽⁸⁾은 과냉된 눈에서 중력의 영향이 고려된 물의 유동과 수분침투에 의한 재응고를 고려한 1차원 모델링을 시도하였다. Illangasekare and Walter⁽⁵⁾는 과냉각된 눈에서의 용해수 침투와 이 현상이 열전달에 영향을 미치는 과정들을 눈의 밀도와 입자 크기의 불균일성, 모세관압 구배, 재응고 현상, 그리고 열전도의 영향을 포함한 2차원 모델로 제시하였다. Tao⁽⁷⁾는 불균일(heterogeneous)하게 분포되어 있는 눈에서의 핑거링(fingering) 현상을 눈과 수증기의 승화를 고려한 2차원 모델링을 실시하였다. 이러한 연구들의 대부분이 장기간에 걸쳐 발생하는 눈 용해현상 해석을 목적으로 한 반면, Aoki et al.⁽⁹⁾은 단기간에 용해가 종료되는 제상과정의 해석을 목적으로 실험과 해석을 병행하여 연구하였다.

본 연구에서는 건조한 눈(dry snow)의 밑면에서 일정한 열이 공급되는 경우의 용해 거동에 대한 1차원 모델링을 실시하였다. 특히, 에너지, 운동량 및 물질 수송과 용해수 침투에 의한 눈층 내 수분 이동 현상을 고려하였다. 또한 접수면에서의 열전도와 눈의 열용량의 영향, 과냉된 눈에서의 재응고, 그리고 용해수 침투에 의한 수분침투층의 밀도증가를 고려하여 모델링하였다. 제인자들의 변화에 대한 민감도 해석을 통하여 인자들에 대한 상대적인 중요도를 조사하였으며, 공급열유속과 눈층의 초기밀도가 용해효율에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 이론

2.1 물리적 모델

본 연구는 용해수 배출을 고려한 모델 1과 타당

성 검증을 위하여 용해수 배출을 고려하지 않은 모델 2로 구분하여 해석하였다. 모델 1과 2에 적용된 이론은 모델 1의 용해수 배출과 관련된 현상과 모델 2에서의 물층(water layer)의 형성과 관련된 현상 외에는 공통적으로 적용되었다. 시간에 따라 진행되는 눈의 용해 현상을 모델 1에서 설명하면 다음과 같다. 용해수의 배출이 고려된 이 용해과정은 Fig. 1과 같은 다섯 과정으로 진행된다. 과정 1(period 1)에서 과냉상태의 눈층과 공기층의 온도는 밀면에서 공급되는 열에 의하여 상승하며 눈의 용해는 발생하지 않는다. 눈층 밀면의 온도가 공급되는 열에 의하여 0°C에 도달하면 과정 2(period 2)가 시작되어 가열면에서 용해가 시작된다. 여기서 발생한 용해수는 모세관 현상과 중력의 영향으로 눈층 내부로 침투한다. 이 때 수분이 함유된 수분침투층(water permeation layer)과 수분이 함유되지 않은 눈층으로 구분되며 이 두 층의 경계면을 접수면(wetting front)이라 한다. 이 접수면은 시간에 따라 상승하며 전체 눈층의 높이는 용해에 의하여 감소한다. 또한 눈층이 일정한 밀도로 유지되는 것과는 달리 수분침투층의 밀도는 계속 증가하고 눈층이 과냉되어 있다면 접수면에서 재응고와 용해가 반복된다. 접수면의 높이와 전체 높이가 같아지면 과정 3(period 3)이 시작된다. 공기층의 온도가 영하로 유지되고 있다면 공기층과 수분침투층의 경계면에서 얼음층이 형성되고 이 층의 두께가 성장해 나간다. 수분침투층 밀면의 수분포화도가 최대 수분포화도에 달하면 용해수 배출이 발생하는 과정 4(period 4)가 되고, 용해수 배출은 계속되며 얼음층의 두께는 증가한다. 수분침투층

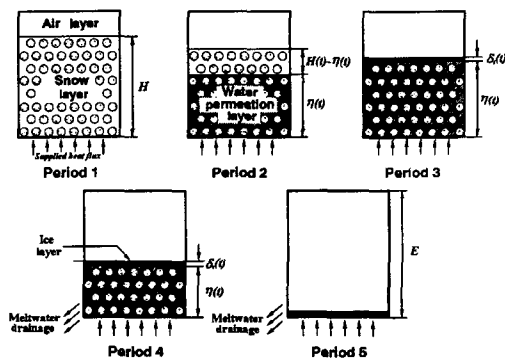


Fig. 1 Schematic on melting process of snow with meltwater drainage (model 1).

이 모두 용해하여 밀면에서 배출되면 과정 5(period 5)로 발전하여 얼음층의 용해가 시작되고 이 용해수가 모두 배출되면 용해과정은 종결된다.

모델 2(Fig. 2 참조)는 용해수 배출을 고려하지 않은 모델로서 과정 3까지는 모델 1의 경우와 동일한 과정이지만 이후의 과정부터는 가열면에서 물층이 형성되며 마지막 과정에서는 물층만 존재하게 된다. 본 해석모델의 용해과정은 Aoki et al.⁽⁹⁾이 제시하였던 눈 용해 과정과 유사하지만 그들이 간과하였던 눈의 열용량의 영향, 재응고 현상, 수분침투층의 밀도증가와 이에 의한 다공비의 변화 등의 현상을 고려하였다. 이를 위하여 본 연구에서 도입한 가정은 다음과 같다.

- ① 용해는 열이 가해지는 밀면에서만 발생하며, 1차원적으로만 발생한다.
- ② 공기층에서의 대류는 무시한다.
- ③ 눈층과 수분침투층에서 기체상의 압력은 균일하다.
- ④ 눈입자는 얼음입자로 간주한다.
- ⑤ 수분침투층에서의 온도는 0°C로 일정하고, 각 층에서의 다공비와 눈의 밀도는 균일하다.

2.2 지배방정식 및 경계조건

현 모델에 적용된 지배방정식과 경계조건을 과정별로 Table 1에 정리하였으며 각 과정에서의 특징적인 식들에 대하여 설명하면 다음과 같다. 과정 1에서 공급되는 열량에 의하여 상승하는 눈층의 온도분포를 구하기 위한 에너지 방정식에 나타나는 c_{eff} 와 k_{eff} 는 각각 눈의 비열과 유효열

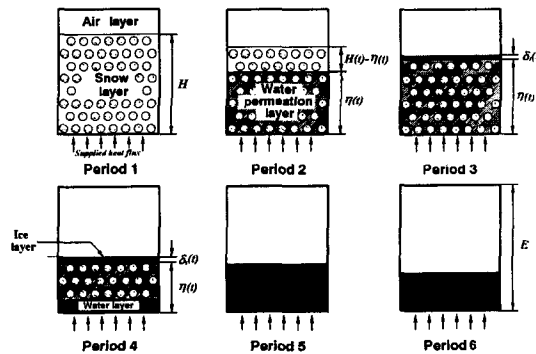


Fig. 2 Schematic on melting process of snow without meltwater drainage (model 2).

Table 1 Governing equations and boundary conditions for each period

Period	Governing equation	Boundary condition
1	(Snow) $\rho_s c_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial z} \right)$ (1)	$z = 0: -k_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big _{z=0} = \dot{q}$ (3)
		$z = H(t): T_s = T_a$ (4)
		$-k_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial z} = -k_a \frac{\partial T_a}{\partial z}$ (5)
	(Air) $\frac{\partial(\rho_a c_a T_a)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_a \frac{\partial T_a}{\partial z} \right)$ (2)	$z = E: \frac{\partial T_a}{\partial z} \Big _{z=E} = 0$ (6)
2	(Water permeation layer) $\frac{\partial(\rho_w \epsilon S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w v_w)}{\partial z} = 0$ (7)	$z = 0: v_w = \frac{1}{\rho_w} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta t}$ (12)
	$v_w = -D \frac{\partial S}{\partial z} - K$ (8)	$v_g = 0$ (13)
	$\frac{\partial(\rho_g \theta_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g v_g)}{\partial z} = 0$ (9)	$z = \eta(t): S = S_r$ (14)
	(Snow) $\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g v_g)}{\partial z} = 0$ (10)	$T_s = 0$ (15)
	$\rho_s c_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial t} + \rho_g c_g v_g \frac{\partial T_s}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial z} \right)$ (11)	$z = H(t):$ Eq.(4)~(5)
	(Air) Eq. (2)	$z = E:$ Eq.(6)
3	(Water permeation layer) Eq. (7) ~ (9)	$z = 0: v_w = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\{M(t - \Delta t) - \Delta M\}}{\Delta t}$ (17)
	(Air) Eq. (2)	$z = H(t) - \delta_i(t): v_w = 0$ (18)
		$T_i = 0$ (19)
	(Ice) $\frac{\partial(\rho_i c_i T_i)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right)$ (16)	$z = H(t): T_i = T_a$ (20)
		$-k_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = -k_a \frac{\partial T_a}{\partial z}$ (21)
	$z = E:$ Eq.(6)	
4	(Water permeation layer) Eq.(7)~(9)	$z = 0: S = S_{max}$ (22)
	(Ice) Eq.(16)	$z = H(t) - \delta_i(t):$ Eq.(18)~(19)
	(Air) Eq.(2)	$z = H(t):$ Eq.(20)~(21)
		$z = E:$ Eq.(6)
5	(Ice) Eq.(16)	$z = 0: \dot{W} = \rho_w \frac{q}{h_{il} \rho_i}$ (23)
		$T_i = 0$ (24)

전도계수(effective thermal conductivity)로서 다음과 같다⁽⁶⁾.

$$c_{eff} = [(1 - \epsilon) \rho_i c_i + \epsilon \rho_a c_a] / \rho_p \quad (25)$$

$$k_{eff} = 2.093 \times 10^{-1} + 7.95 \times 10^{-4} \rho_s + 2.511 \times 10^{-12} \rho_s^4 \quad (26)$$

과정 2에서는 밑면에서 생성된 용해수가 눈층으로 침투하여 수분침투층이 형성되고 이 층의 온

도는 0°C로 유지되고, 눈층에서는 0°C의 접수면과 영하로 유지되는 공기층 사이에 온도분포가 존재하며 공기층에서도 온도분포가 존재한다. 따라서, 이 단계의 지배방정식은 수분침투층에서의 연속방정식과 눈층 및 공기층의 에너지방정식 등으로 구성된다. 식(7)의 S는 수분침투층에서의 수분포화도로서 다음과 같이 정의한다.

$$S = \frac{\text{수분함유량}}{\text{최대 가능한 수분함유량}} = \frac{\theta_w}{\epsilon} \quad (27)$$

또한, u_w 는 모세관 압력과 중력의 영향을 고려한 눈층 내 수분 침투속도이며, 이 식의 D 와 K 는 각각 수력확산계수(hydraulic diffusivity)와 수력전도계수(hydraulic conductivity)로서 다음과 같다.

$$D = \frac{k}{\mu_w} \frac{\partial P_c}{\partial S} \quad (28)$$

$$K = \frac{k}{\mu_w} \rho_w g \quad (29)$$

그리고, k 는 침투율(permeability)로서 다음과 같다.

$$k = \frac{\epsilon^2 d^2}{2(1-\epsilon)^2 \tau^2 \phi^2} \quad (30)$$

여기서, d 는 눈 입자의 지름이며, τ 는 눈층 내 물의 흐름에 대한 경로를 보정하기 위한 비틀림 계수(tortuosity)이다. ϕ 는 입자의 모양에 대한 형상계수로서 Colbeck⁽⁴⁾을 참고하여 10으로 가정한다. 비틀림 계수와 모세관압력은 수분포화도의 함수로서 Ohtani and Maeda⁽¹⁰⁾가 제시한 다음 식을 사용한다.

$$\tau = \sqrt{[0.67 \exp 6(S-1)]^{-1}} \quad (31)$$

$$P_c = \frac{6(1-\epsilon)}{\epsilon d} \frac{1}{\sigma} [-1.6 \exp(-0.56S) + \exp\{30(S-1)\}] \quad (32)$$

접수면의 이동에 관한 식은 Aoki et al.⁽⁹⁾이 제안한 식을 사용한다.

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{1}{\epsilon \rho_w S_c} (m)_{z=\eta} + \frac{1}{\epsilon \rho_w S_c} \frac{k_{eff}}{h_{il}} \left(\frac{\partial T_s}{\partial z} \right)_{z=\eta} + u_x \quad (33)$$

여기서, m 은 다음과 같고 $\bar{\alpha}$ 는 비틀림 계수의 역수이다.

$$m = - \frac{\epsilon^2}{12(1-\epsilon)} \frac{\sigma d}{\mu} \rho_w \bar{\alpha} \left\{ \frac{\epsilon}{(1-\epsilon)} \frac{\rho_w d}{\sigma} - \frac{\partial P_c}{\partial z} \right\} \quad (34)$$

본 연구에서는 융해에 따른 평균밀도의 변화를 두가지로 구분하여 적용한다. 우선, 응고가 수분침투층과 다공질층 전체에서 발생한다는 가정하의 응고에 의한 평균 밀도변화율은 다음과 같다.

$$\frac{d\rho_s}{dt} = \frac{1}{H(t)h_{il}} \left\{ -k_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial z} \right|_{z=\eta(t)} - \rho_i c_i T_s^* \frac{d\eta}{dt} \right\} \quad (35)$$

또한, 융해수의 눈층 내부로의 침투에 의한 수분침투층의 밀도증가는 다음 식을 사용하여 계산한다.

$$\rho_{wp,t} = \frac{m_{ini} - \rho_{ini} A(H(t) - \eta_{wp,t})}{\eta_{wp,t} A} \quad (36)$$

평균밀도가 변화하면 이에 따라 다공비가 다음 식에 의하여 변화하며 이 다공비 변화에 의하여 수분침투층 내의 수분포화도는 변화한다.

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_i} \quad (37)$$

과정 2의 밀면($z=0$)에서의 경계조건은 수분침투속도를 사용하며 식(12)에 나타나는 총질량은 다음과 같다.

$$M(t) = \rho_w \epsilon \int_0^{H(t)} S(z,t) dz + H(t) \rho_s - \rho_w \epsilon \int_{H(t)-H(t+\Delta t)}^{H(t)} S(z,t) dz + H(t+\Delta t) \rho_s \quad (38)$$

밀면에서의 또 하나의 경계조건으로는 기체상의 속도가 0인 식(13)을 사용하고, 접수면에서는 수분포화도가 잔류수분포화도($S_r=0.1$)로 유지되고 온도는 0°C이므로 식(14)와 (15)를 쓸 수 있다.

과정 3에서 눈층은 모두 수분침투층으로 발달하게 되고, 이 층의 윗면에서 공기층으로의 열전

달로 인하여 발생한 얼음층의 성장속도는 다음과 같다.

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \frac{k_{eff} \left. \frac{\partial T_s}{\partial z} \right|_{z=H-\delta_i}}{h_{ii}(\rho_i - \rho_s)} \quad (39)$$

가열면의 경계조건을 나타내는 식(17)의 M 은 과정 2에서와는 달리 얼음층을 고려한 총질량으로서 다음과 같다.

$$M(t) = \rho_w \epsilon \int_0^{H(t)-\delta_i(t)} S(z, t) dz + H(t)\rho_s + \delta_i(t)\rho_i \quad (40)$$

과정 4가 되면 수분침투층 밑면의 용해가 계속 되어 이 면에서의 수분포화도가 최대 수분포화도 ($S_{max}=0.98$)에 도달하게 되고 용해수의 배출이 일어난다. 초기에는 수분침투도 존재하지만 수분침투층이 전부 포화되면 수분의 배출만 이루어진다. 이 때 용해수 배출률은 총질량의 시간에 따른 변화율로서 구할 수 있다.

과정 2~4동안 시간에 따라 변화하는 전체 높이는 다음 식에 의하여 계산한다.

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{\dot{q}}{h_{ii}\rho_s} \quad (41)$$

과정 5에서는 수분침투층이 모두 용해하여 배출된 후 얼음층의 용해가 진행된다. 이 때, 얼음층은 녹는 즉시 밑면에서부터 배출되므로 용해수 배출률은 식(23)과 같다.

2.3 수치해석

용해의 각 단계에서 각 층의 수분포화도 및 온도분포를 지배하는 비정상 1차원 방정식들을 이산화하기 위하여 유한차분법을 이용하였으며, 특히 해의 안정성을 고려한 Crank-Nicholson법을 사용하였다. 눈 용해현상에 있어서 시간에 따라 상승하는 접수면과 하강하는 전체 높이의 변화에 의한 이동 경계면 조건을 처리하기 위하여 Murray and Landis가 제시한 공간격자변화법⁽¹¹⁾을 이용하였다.

3. 결과

3.1 타당성 검증

현 모델의 타당성을 검증하기 위하여 모델 2의 용해거동에 대한 해석결과를 Aoki et al.⁽⁹⁾의 실험 및 해석결과와 함께 비교하였다. Fig. 3은 이 모델의 용해과정 중 실험결과와의 상대오차가 가장 컸던 수분침투층의 높이에 대한 것으로서 Aoki의 모델은 실험치와의 상대오차가 61~106%이었던 것에 비하여 현 모델은 3~37%로서 현 모델이 Aoki의 모델에 비해서 실험결과에 상당히 잘 일치하고 있다. 이 결과는 Table 2와 같은 초기조건에 대하여 해석한 것으로서 이 경우의 용해종료시간은 약 64분이다.

3.2 눈의 유효열전도계수의 영향

눈은 공극(pore)내의 공기와 얼음입자로 구성 되어 있는 다공성 물질로서 얼음과 같은 연속적인 물질에 대한 열전도계수뿐만 아니라 공기의

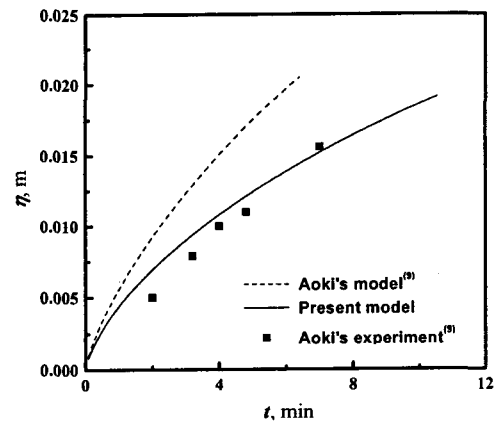


Fig. 3 Comparison of experimental and numerical results for the change of water permeation layer height with time (model 2).

Table 2 Initial conditions for analyzing model 2

Initial snow temperature, T_s	-5 °C
Initial snow density, ρ_s	550 kg/m ³
Initial total height, H_{ini}	0.025 m
Snow grain size, d	0.00015 m
Supplied heat flux, q_s	2,000 W/m ²

열전도계수 또한 고려해야 하므로 유효열전도계수를 사용한다.

Illangasekare and Walter⁽⁵⁾는 눈의 유효열전도계수를 식(42)와 (43)으로 제시하였다. Tao⁽⁷⁾는 눈에서의 유효열전도계수를 공기와 얼음의 열전도계수, 그리고 눈의 밀도의 함수인 식(44)로 제시하였으며, Tuteja and Cunnane⁽⁶⁾은 밀도만의 함수로서 식(45)와 같이 표현하였다. 이 식들을 Table 3에 정리하였다. 유효열전도계수가 눈의 용해거동에 미치는 영향과 어떠한 식이 본 연구의 모델에 가장 적합한지를 파악하기 위하여 모델 2에 이 식들을 각각 적용하였다. 이 때 시간에 따른 수분침투층의 높이 변화를 Aoki et al.의 실험결과와 함께 Fig. 4에서 비교하였다. 이 때, 적용된 눈의 초기 밀도는 550 kg/m^3 으로서

Table 3 Various equations for effective thermal conductivity of snow

Case	Equation
	$k_{eff} = 0.307 \times 10^{-3} \rho_s + 1.96 \times 10^{-6} \rho_s^2$
Illangasekare and Walter ⁽⁵⁾	for, $\rho_s \leq 450 \text{ kg/m}^3$ (42)
	$k_{eff} = 2.89 \times 10^{-3} \rho_s - 0.805$
	for, $\rho_s \geq 450 \text{ kg/m}^3$ (43)
Tao et al. ⁽⁷⁾	$k_{eff} = k_a + (7.75 \times 10^{-5} \rho_s + 1.105 \times 10^{-6} \rho_s^2)(k_i - k_a)$ (44)
Tuteja and Cunnane ⁽⁶⁾	$k_{eff} = 2.093 \times 10^{-1} + 7.95 \times 10^{-4} + 2.511 \times 10^{-12} \rho_s^4$ (45)

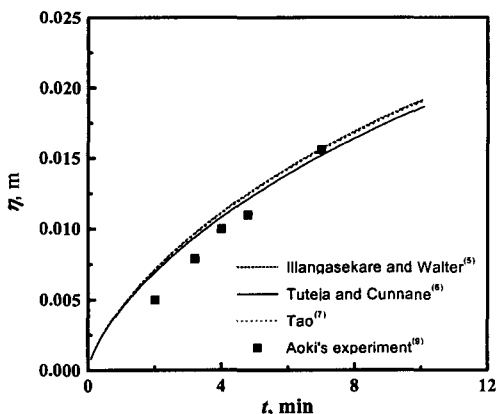


Fig. 4 Comparison of water permeation layer's height for various equations of effective thermal conductivity.

Table 3의 식들을 이용한 유효열전도계수의 값은 $0.784 \sim 0.876 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 의 범위에 분포한다. 그림을 살펴보면 Tuteja and Cunnane가 제안한 식이 실험치에 가장 근접하지만 각각의 식을 적용한 결과들 사이에 큰 차이가 없으므로 현 모델과 같은 눈 용해 현상에 있어서 유효열전도계수가 미치는 영향은 작다고 할 수 있다.

3.3 모델 1 해석결과

모델 1은 용해수 배출을 고려한 눈 용해 모델로서 시간에 따른 전체적인 용해거동을 Fig. 5에 나타내었다. 이 결과는 Table 4와 같은 초기조건에 대한 해석결과로서 용해종료시간은 약 45분이었다. 모델 1의 경우, 모델 2와 달리 물층이 형성되지 않으며 눈층의 전체높이와 수분침투층의 높이가 같아지는 순간부터 용해수의 배출이 시작되므로 전체적인 용해거동이 좀 더 단순한 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 제상운전시 용해수의 배출을 수반하는 서리층의 용해거동과 유사한 거동이다. 또한, Fig. 5를 살펴보면 Fig. 1의 과정

Table 4 Initial conditions for analyzing model 1

Initial snow/air temperature, T_s / T_a	-10°C
Initial snow density, ρ_s	300 kg/m^3
Initial total height, H_{mi}	0.04 m
Initial height of air layer, $E - H_{mi}$	0.01 m
Snow grain size, d	0.0004 m
Supplied heat flux, \dot{q}_s	$2,000 \text{ W/m}^2$

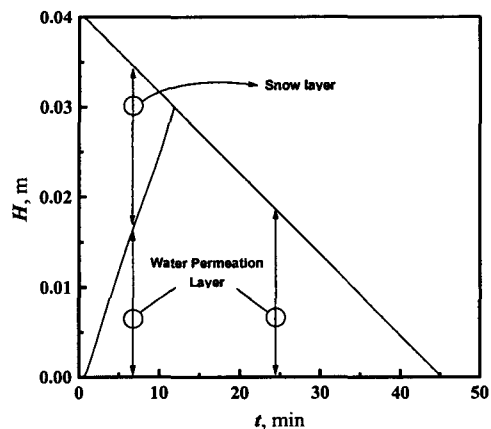


Fig. 5 Graphical representation on the melting behavior of snow for model 1.

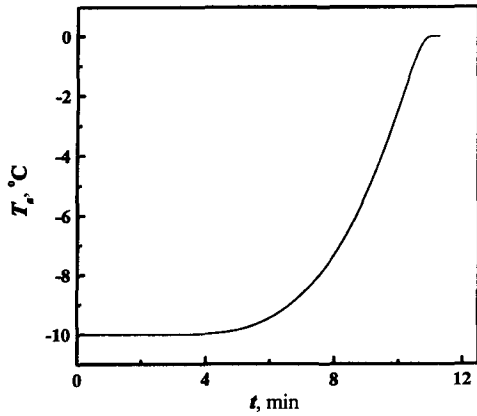


Fig. 6 Temporal variation of the air temperature during period 1 and 2.

3부터 발생한다고 언급하였던 얼음층의 형성과 증가, 융해거동에 관한 현상을 확인할 수 없다. 이것은 융해초기에는 공급열량이 눈의 융해와 현열에만 쓰여 공기층으로의 열전달은 없으므로 공기 온도의 변화가 거의 없다가 열량이 공급된 후 약 11분 경부터 공기 온도가 상승하기 시작하여 과정 2의 말기에는 거의 0°C에 도달하게 되기 때문이다. 즉, 과정 3이 시작되더라도 얼음층이 형성되지 않게 되고, 이러한 사실은 공기층의 온도변화를 나타낸 Fig. 6을 통해서도 확인할 수 있다.

3.4 민감도 해석

본 연구에 적용된 민감도 해석방식은 모델 1에 적용되었던 인자 값들을 기준(baseline)으로 하고 이 중 하나의 인자 값만을 변화시켜 출력인자의 변화를 조사하는 방식을 사용하였다. 이 때 사용된 입력 인자는 공급열유속, 눈의 초기밀도, 초기 온도, 입자지름, 잔류 수분포화도이고, 출력인자는 수분침투층의 높이와 융해종료시간이다. 우선 입력인자들의 값을 기준조건에 대하여 변화시킨 다섯 가지 경우의 출력인자값의 변화를 조사하였으며 이 결과를 Table 5와 Table 6에 표시하였다. 여기서 기준값에 대한 변화폭은 $\pm 30\%$ 정도이다. 잔류수분포화도와 눈 초기온도, 그리고 공급열유속에 대해서는 각 인자의 값을 감소시켰으며 눈의 초기밀도와 입자크기에 대해서는 증가시켜서 그 영향을 조사하였다. Table 6을 살펴보면 수분침투층의 높이는 잔류 수분포화도와 눈의 초

Table 5 Input data used in sensitivity analysis

Case	Input				
	Residual saturation	Initial snow density (kg/m ³)	Initial snow temp. (°C)	Snow grain size (mm)	Heat flux (W/m ²)
Baseline	0.1	300	-10	0.4	2000
1	0.07	300	-10	0.4	2000
2	0.1	400	-10	0.4	2000
3	0.1	300	-13	0.4	2000
4	0.1	300	-10	0.6	2000
5	0.1	300	-10	0.4	1400

Table 6 Output data used in sensitivity analysis

Case	Output	
	Height of water permeation layer (fully developed) (m)	Melting time (min)
Baseline	0.02860	45.30
1	0.03078	44.01
2	0.03037	57.51
3	0.02966	46.35
4	0.03028	44.91
5	0.02870	64.62

기밀도의 입력값의 변화에 가장 민감한 영향을 받았으며 융해종료시간은 공급 열유속과 눈의 초기밀도에 민감한 것으로 나타났다. 특히, 잔류 수분포화도와 눈의 초기밀도가 수분 침투층의 높이 변화에 가장 민감하게 영향을 미친다는 사실은 Illangasekare and Walter⁽⁵⁾의 결과와 일치한다. 또한, 융해종료시간의 경우는 본 연구의 목적인 제상현상의 모델링 결과를 최적제상으로 적용함에 있어서 중요한 인자이므로 이 인자에 미치는 영향이 큰 초기인자가 무엇인지를 파악하기 위하여 실시하였다. 따라서, 이 민감도 해석을 통하여 눈의 융해거동에 있어서 실험적으로 정확하게 측정되어야 할 인자들이 무엇인지 확인할 수 있다.

3.5 융해 효율

현 연구의 중요한 관심사는 눈층으로 공급되는 열량과 눈의 여러 인자들이 융해효율에 미치는 영향이다. 융해효율이란 공급된 열량 중 융해에 사용된 열량이 어느 정도인지를 정량적으로 평가하기 위한 것으로서 다음과 같다.

$$\eta_m = \frac{\text{융해에 쓰인 열량}}{\text{공급된 열량}} = \frac{h_{il}\rho_s H_{im}}{q_s \tau_m} \quad (46)$$

여기서, H_{ini} 는 눈층의 초기 높이이고, τ_m 은 용해 종료시간이다. Table 4의 초기조건에 대한 모델 1의 해석결과를 이용하여 계산한 용해효율은 약 0.73이다. 용해종료시간의 변화에 크게 영향을 미치는 인자인 눈의 초기밀도와 공급열유속을 변화시켜 가면서 용해효율에 대하여 조사하였다.

Fig. 7은 다양한 눈층의 초기밀도에 대한 용해효율을 나타낸 것이다. 눈층의 초기밀도가 커지면 용해효율이 지수적으로 증가하다가 약 0.78에 수렴한다. 이는 눈층의 초기밀도가 클수록 다공비와 침투율이 감소하고 수분 침투속도가 감소하여 용해종료시간은 증가하지만 이 용해종료시간의 증가율보다 밀도의 증가율이 더 크기 때문이다. Fig. 8

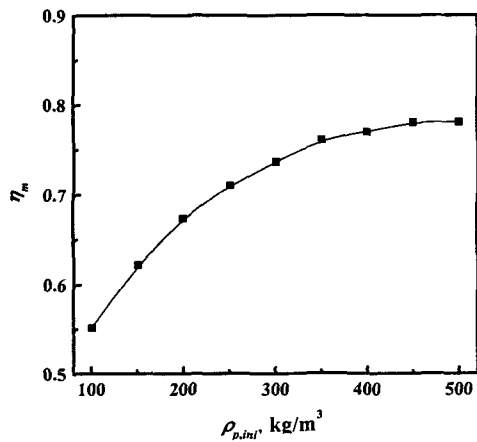


Fig. 7 Melting efficiency according to the change of initial snow density.

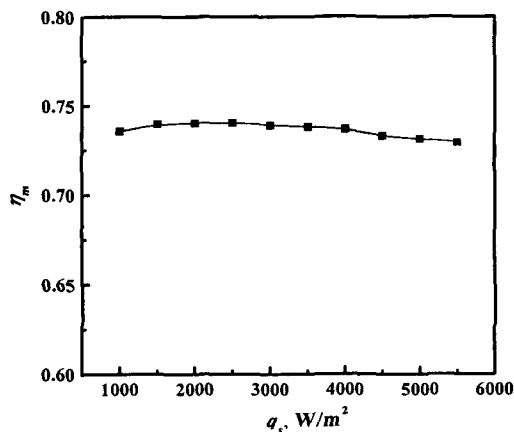


Fig. 8 Melting efficiency according to the change of supplied heat flux.

은 공급열량의 변화가 용해효율에 미치는 영향을 나타낸 것으로서 공급열유속의 변화에도 불구하고 용해효율은 약 0.74 정도에서 거의 일정하게 유지된다. 공급 열유속은 눈층의 용해종료시간에 민감한 영향을 미치는 인자로서 이 인자값의 증가에 따라 용해종료시간은 급격히 단축된다. 그러나 식 (47)에서 공급열유속과 용해종료시간의 곱으로 표현되는 공급된 총열량은 거의 일정하게 유지되기 때문에 용해효율은 공급열유속의 증가에도 불구하고 거의 일정하게 유지된다.

4. 결론

과냉된 눈의 용해 거동에 대하여 밀면에서의 용해수의 침투와 침투수 전면의 재응고를 고려한 1차원 모델링을 실시하였다. 특히, 용해수 침투에 따른 수분침투층에서의 밀도 증가와 다공비 및 각종 인자들의 변화를 고려하였다. 기존연구의 실험결과와 비교시 상대오차가 상당히 개선되었다. 또한, 유효열전도계수에 대한 인자연구와 민감도해석을 수행하였으며 용해효율에 대해 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 눈의 유효열전도계수가 눈층의 용해거동에 미치는 영향은 매우 작다.
- (2) 눈의 용해종료시간에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 공급 열유속과 눈 초기밀도이고, 수분 침투층의 높이 변화에 가장 큰 영향을 미치는 것은 잔류 수분포화도와 눈의 초기밀도이다.
- (3) 용해효율은 눈 초기밀도가 커지면 증가하다 일정한 값에 수렴하지만, 공급열유속의 변화에는 거의 영향을 받지 않는다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 한양대학교 최적 설계 신기술연구센터의 연구비 지원과 1999년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. Colbeck, S. C., 1971, One-dimensional water flow through snow, Res. Rep. 296, US Army Cold Region Research and

- Engineering Laboratory, Hanover, NH.
2. Colbeck, S. C., 1976, An analysis of water flow in dry snow, *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 523–527.
 3. Colbeck, S. C., 1974, The capillary effects on water percolation in homogeneous snow, *J. of Glaciology*, Vol. 13, No. 67, pp. 85–97.
 4. Colbeck, S. C., 1986, Classification of seasonal snow cover crystals, *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 9, pp. 59S–70S.
 5. Illangasekare, T. H. and Walter, R. J. Jr., 1990, Modeling of meltwater infiltration in subfreezing snow, *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 5, pp. 1001–1012.
 6. Tuteja, N. K. and Cunnane, C., 1997, Modelling coupled transport of mass and energy into the snowpack-model development, validation and sensitivity analysis, *J. Hydrology*, Vol. 195, pp. 232–255.
 7. Tao, Y. -X., 1996, Modeling of melting in heterogeneous snow cover on permeable frozen soils, *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 30, pp. 143–163.
 8. Jordan, P., 1983, Meltwater movement in a deep snowpack (1. Field observation), *Water Resources Research*, Vol. 19, pp. 971–978.
 9. Aoki, K., Hattori, M., and Chiba, S., 1986, A study of the melting process in ice-air composite materials, *Bulletin of JSME*, Vol. 29, pp. 2138–2144.
 10. Ohtani, S. and Maeda, S., 1964, Mechanism of water movement in moist granular material, *Chemical Engineering*, Vol. 28, pp. 361–366.
 11. Lewis, R. W. Morgan, K., and Zienkewicz, 1981, *Numerical Methods in Heat Transfer*, John Wiley & Sons Ltd. pp. 177–200.