

제상 현상 연구를 위한 눈 용해 과정 해석

An analysis of snow melting process for a study of defrosting phenomena

이 관 수*, 고 영 우**
K. S. Lee, Y. W. Ko

Key words : Porous layer(다공질층), Water permeation layer(수분침투층), Snow melting(눈의 용해), Wetting front(접수면), Heat capacity(열용량)

Abstract

An improved one-dimensional modeling of snow melting was obtained by considering both the effect of heat capacity and the decreasing influence of porosity. Using the improved model, the effects of initial snow temperature, initial snow density and the heat flux on the snow melting were investigated. It is found that the drainage starting time is delayed and the drainage rate becomes smaller with lower initial snow temperature. Results also show that the drainage starts at the same time when an initial snow density is over a certain value. Melting efficiency increases linearly with an increasing initial snow temperature. With increasing the initial density of the snow and the amount of heat supplied, the melting efficiency increases, then converges to a constant value.

기 호 설 명

c : 비열, $J/kg \cdot ^\circ C$	P_c : 모세관압, Pa
D : 수력확산계수, m^2/s	q_s : 공급열량, W/m^2
E : 눈층과 공기층을 포함한 초기 높이, m	S : 포화도
g : 중력가속도, m/s^2	T : 온도, $^\circ C$
H : 총높이, m	t : 시간, sec
h_{ui} : 용해잠열, J/kg	v : 유동 속도, m/s
K : 수력침투계수, m/s	W : 용해수 배출율, $kg/m^2 \cdot s$
k : 침투율, m^2	z : 공간 좌표(높이 방향), m
k : 열전도계수, $W/m \cdot K$	

그리스문자

δ_i : 얼음층의 두께, m
 η : 수분침투층의 두께, m
 η_m : 용해 효율

* 정회원, 한양대학교 기계공학부
** 정회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

- θ : 각각의 상에 대한 부피비
- μ : 점성계수, $\text{kg/s} \cdot \text{m}$
- ρ : 밀도, kg/m^3
- σ : 표면장력, Pa
- τ_m : 용해 시간, min

하첨자

- a : 공기
- eff : 유효(effective)
- g : 다공질내의 기체상
- i : 얼음
- ini : 초기 상태
- p : 다공질
- w : 물

1. 서 론

냉동 분야에서 열교환기에 발생하는 서리는 냉동 성능을 저하시키므로 성능을 회복하기 위해서는 제상 작업이 이루어져 한다.⁽¹⁾ 이 작업은 외부에서 열을 공급하여 서리를 녹이는 방법이 대부분이지만, 이렇게 제상을 하면 시스템 내에 불필요한 온도 상승을 유발하여 다시 냉동이 이루어질 때 필요 이상의 에너지가 소비되는 문제점을 가지고 있다. 따라서 그 소비를 막기 위해서는 주위환경의 인자에 대하여 가장 알맞는 제상 시간과 공급 열량을 결정할 필요가 있다. 그러나 실제 상황에서 발생하는 서리는 내부 구조가 매우 복잡하여 연구 대상으로 하기에는 어려움이 있으므로 서리와 구조가 비슷하고 비교적 내부 구조가 균일한 눈층의 용해 과정을 이론적으로 연구할 필요성이 있다.

일반적으로 용해 문제는 상변화에 따른 열전도 문제로 다루어진다. 그러나 눈과 같은 다공질 물질에서의 용해 문제는 얼음과 같은 고체 물질의 상변화 문제와는 근본적으로 다르며, 모세관 현상과 중력, 다공질층의 구조변화 및 상변화에 의한 부피변화로 인해 해석에 어려움이 따르므로 열교환기에서의 제상 모델링에 관한 연구는 상당히 미비하다. 눈의 용해에 관하여 연구한 논문을 살펴보면 Colbeck^(2,3)은 눈층 뒷면에서의 용해시 접수면의 이동이 열용량의 영

향을 받고 있음을 입증하였고, 눈을 형태학적으로 두 분류로 나누었다. Marsh와 Woo^(4,5)는 Colbeck이 제안한 접수면의 이동에 관한 식을 사용하여 접수면과 핑거(finger)의 이동에 관하여 실험과 이론을 통하여 규명하였다. Jordan⁽⁶⁾과 Illangasekare 등⁽⁷⁾은 밀도와 입자 크기의 불규칙성, 침투 용해수의 재응고를 고려하기 위해 밀도의 변화 및 다공비의 공간적·시간적 분포, 유동의 차원성 등을 참작하여 모델링을 시도하였다. 이러한 논문들은 장기간에 걸쳐 눈의 용해를 연구한 논문이므로 단시간에 서리의 용해가 진행되는 열교환기의 제상 과정에 직접 적용하기에는 문제점이 있다. 열교환기에 적용하기 위해 눈의 용해 현상을 연구한 논문은 Aoki^(8,9)와 Ishihara 등⁽¹⁰⁾이 있다. Aoki^(8,9)는 열교환기의 제상연구에 보다 근접한 연구를 체계적으로 진행시켰으며, 접수면에서의 열전도를 고려하여 내부 응고 및 얼음층의 발생을 다루었다. 그러나 열용량의 영향과 다공비의 감소 효과를 고려하지 않았고, 눈 용해를 1차원적으로 그리고 균일하게 가정함으로써 실험과의 오차가 비교적 크게 발생하였다. Ishihara 등⁽¹⁰⁾은 수평 원판에서의 고온 가스 제상에서 서리가 완전히 용해되기 전에 관에서 이탈되는 것을 실험을 통하여 규명하고, 그 실험결과와 함께 수분 분포가 눈층내에 균일하게 이루어진다는 가정하에 열전도를 고려하여 모델링하였지만 얼음층과 용해수의 응고 현상이 고려되지 않아 엄밀한 눈의 용해 모델로 보기는 힘들다. 이러한 논문들 외에 Tsukidate⁽¹¹⁾는 태양에너지에 의한 도로에 쌓인 눈의 용해에 관하여 용해수 배출과 열전도를 고려하여 모델링하였고, Iwamoto⁽¹²⁾는 도로 내부에 설치한 열선의 성능 모델링시에 눈과 도로에서의 열전도만을 고려하였다.

이 연구에서는 수치적 모델을 사용하여 눈에서의 수분 침투를 1차원적으로 시간 변화에 따라 예측하고 있으며, 눈층과 공기층에서의 에너지, 운동량, 물질 수송과 관계되는 것을 고려하고 있다. 이와 함께 접수면에서의 열전도와 열용량의 영향, 그리고 다공비의 감소 효과를 참작하였다. 모델링의 검증을 위해 본 연구의 결과를 Aoki의 실험 및 해석 결과와 비교하였고, 더 나아가 눈의 초기 온도와 초기 밀도, 그리고 공급열량이 그 용해에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

2. 이 론

2.1 수학적 모델

이 연구는 Fig.1에 나타난 것과 같이 아랫부분에는 눈(snow)이 있고 윗부분에는 공기가 있는 용기 안에서의 용해 현상을 다루고 있다. 이 용기는 밀면에서만 열량이 공급되며, 윗면과 옆면은 단열되어 있다. 밀면에서 열이 공급됨에 따라 눈층은 밀면에서 녹게 되고, 녹은 물은 모세관 현상에 의해 눈층 내부로 침투된다. 수분 침투에 의해 수분이 함유된 지역이 형성되고, 그런 지역과 그렇지 못한 지역과의 경계면을 접수면(wetting front)이라 한다. 수분이 함유된 지역을 수분침투층(water permeation layer), 그렇지 않은 지역을 다공질층(porous layer)이라 한다. 접수면이 공기와의 경계면에 도달하면 눈층 전체는 수분침투층이 되고, 만약 공기의 온도가 영하로 유지되고 있다면 수분침투층의 상부에서 얼음층이 형성된다. 수분침투층에서의 포화도가 최대포화도에 도달하면 수분이 배출되며, 수분침투층의 두께가 0이 되면 얼음층의 용해가 진행된다. 이와 같이 눈의 용

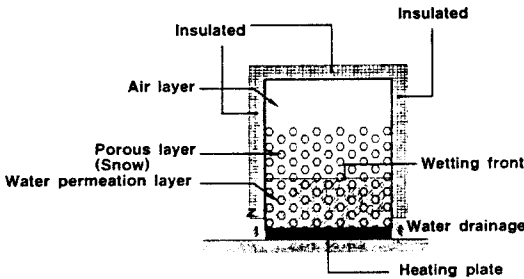


Fig.1 Schematic diagram of snow melting

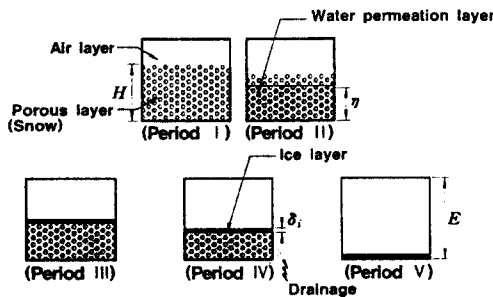


Fig.2 Period of snow melting

해 현상은 5단계로 분류되며, Fig.2에 간단히 도시하였다. 눈의 용해 과정의 각 단계를 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 사용한다.

- ① 용해는 1차원적으로 진행되고, 열이 가해지는 표면에서만 발생한다.
- ② 공기층에서의 대류는 무시한다.
- ③ 다공질층과 수분침투층에서 기체상의 압력은 균일하다.
- ④ 눈입자는 얼음입자로 간주한다.
- ⑤ 수분침투층에서의 온도는 0℃로 균일하고, 각 층에서의 다공비와 눈의 밀도는 균일하다.

2.2 지배방정식

(1) 단계 I

단계 I에서 다공질층과 공기층에서의 지배방정식은 아래와 같으며,

$$\text{(다공질층)} \quad \rho_p c_{eff} \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{eff} \frac{\partial T_p}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\text{(공기층)} \quad \frac{\partial (\rho_a c_a T_a)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_a \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) \quad (2)$$

그리고 경계조건과 초기조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$z=0 \text{에서} \quad -k_{eff} \frac{\partial T_p}{\partial z} \Big|_{z=0} = \dot{q} \quad (3)$$

$$z=H(t) \text{에서} \quad T_p = T_a, \\ -k_{eff} \frac{\partial T_p}{\partial z} = -k_a \frac{\partial T_a}{\partial z} \quad (4)$$

$$z=E \text{에서} \quad \frac{\partial T_a}{\partial z} \Big|_{z=E} = 0 \quad (5)$$

$$t=0 \text{에서} \quad T_p = f(z), \quad T_a = g(z) \quad (6)$$

식(1)에서 c_{eff} 와 k_{eff} 의 값은 다음 식을 사용하였다.⁽¹³⁾

$$c_{eff} = [(1-\epsilon)\rho_i c_i + \epsilon\rho_a c_a] / \rho_p \quad (7)$$

$$k_{eff} = k_a + (7.75 \times 10^{-5} \rho_p \\ + 1.105 \times 10^{-6} \rho_p^2)(k_i - k_a) \quad (8)$$

(2) 단계 II

단계 II에서 각각의 층에서의 지배방정식은 다음과 같고, 공기층에서의 에너지방정식은 식(2)와 같다.

$$(수분침투층) \quad \frac{\partial(\rho_w \epsilon S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w v_w)}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho_g \theta_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g v_g)}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

$$v_w = -D \frac{\partial S}{\partial z} - K \quad (11)$$

$$(다공질층) \quad \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g v_g)}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \rho_p c_{eff} \frac{\partial T_p}{\partial t} + \rho_g c_g v_g \frac{\partial T_p}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{eff} \frac{\partial T_p}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

다공질층과 공기와의 경계면과 공기층의 상부에서의 경계조건은 식(4)와 (5)이고, 밀면에서의 수분 침투속도는 총질량 $M(t)$ 를 이용하여 구한다.

$$M(t) = \rho_w \epsilon \int_0^{H(t)} S(z, t) dz + H(t) \rho_p \quad (14)$$

$$z=0 \text{에서 } v_w = \frac{1}{\rho_w} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta t} \quad (15)$$

$$z=\eta \text{에서 } S = S_r, \quad T_p = 0 \quad (16)$$

식(9)과 (10)에서 S 는 최대 가능한 수분함유량에 대한 수분함유량의 비로 정의되는 포화도이고, θ_g 는 기체상의 부피비이며, ϵ 은 다공비(porosity)이다. ϵ 은 눈의 밀도를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{1 - \rho_p / \rho_i}{1 - \rho_a / \rho_i} \approx 1 - \rho_p / \rho_i \quad (17)$$

여기서 ρ_p 와 ρ_i 는 각각 다공질과 얼음의 밀도이다. 식(11)에서 D 는 수력확산계수(hydraulic diffusivity)이며, K 는 수력침투계수(hydraulic conductivity)이다.

$$D = \frac{k}{\mu_w} \frac{\partial P_c}{\partial S}, \quad K = \frac{k}{\mu_w} \rho_w g \quad (18)$$

$$k = \frac{\epsilon^2 d^2}{2(1-\epsilon)^2 \tau^2 \phi^2} \quad (19)$$

이 때 d 는 얼음 입자의 지름이며, τ 는 비틀림계수(tortuosity)이다. ϕ 는 입자의 모양에 대한 형상계수로서 현 모델에서는 Colbeck⁽³⁾을 참고하여 10으로 가정하였다. Ohtani⁽¹⁴⁾는 비틀림계수와 모세관력을 다음과 같이 각각 제안하였다.

$$\tau = \sqrt{[0.67 \exp\{6(S-1)\}]^{-1}} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} P_c = \frac{6(1-\epsilon)}{\epsilon d} \frac{1}{\sigma} [-1.6 \exp(-0.56S) \\ + \exp\{30(S-1)\}] \end{aligned} \quad (21)$$

접수면의 이동 속도는 접수면에서의 에너지 방정식과 물질이동을 고려하여 다음과 같이 구하였다.

$$\begin{aligned} \frac{d\eta}{dt} = \left[v_w + \frac{k_{eff}}{h_{il} \rho_w} \left(\frac{\partial T_p}{\partial x} \right)_{z=\eta} \right] \\ \left/ \left[\epsilon S_r - \frac{T_p^* c_i \rho_p}{h_{il} \rho_w} \right] \right. \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 c_i 는 얼음의 비열이고 h_{il} 은 물이 얼음이 될 때의 잠열이며, S_r 은 접수면에서의 최소포화도(residual saturation)이다. T_p^* 는 $\eta(t + \Delta t)$ 에서의 온도를 0°C로 가정하기 전의 실제 온도이고, $(-T_p^*)c_i \rho_p$ 은 눈의 열용량에 의한 현열이다. 응고에 의한 평균밀도변화율과 다공비와 포화도의 변화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_p}{dt} = \frac{1}{H(t)h_{il}} \left[-k_{eff} \frac{\partial T_p}{\partial z} \Big|_{z=x(t)} \right. \\ \left. - \rho_i c_i T_p^* \frac{d\eta}{dt} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

$$\epsilon(t) = 1 - \frac{\rho_p(t)}{\rho_i}, \quad S(z, t) = \frac{\theta_w(z, t)}{\epsilon} \quad (24)$$

단계 II ~ IV에서의 총높이 변화율은 다음과 같다.

$$\frac{dH}{dt} = - \frac{\dot{q}}{h_{il} \rho_p} \quad (25)$$

(3) 단계Ⅲ

단계Ⅲ에서 수분침투층에서 액체상의 연속방정식과 기체상의 연속방정식, 그리고 유동속도는 식(9)~(11)이고, 공기층에서 에너지 방정식은 식(2)이다. 얼음층이 발생하여 성장하는 면의 성장속도와 에너지방정식, 그리고 얼음층을 고려한 총질량은 다음과 같다.

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \frac{k_{eff} \frac{\partial T_p}{\partial z} \Big|_{z=H-\delta_i}}{h_{ii}(\rho_i - \rho_p)} \quad (26)$$

$$\frac{\partial(\rho_i c_i T_i)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) \quad (27)$$

$$M(t) = \rho_w \epsilon \int_0^{H(t) - \delta_i(t)} S(z, t) dz + \rho_p H(t) + \rho_i \delta_i(t) \quad (28)$$

윗 식과 식(15)를 이용하여 $z=0$ 에서의 수분침투속도를 구할 수 있고, 수분침투층과 얼음층 사이의 경계면에서는 수분의 침투가 존재하지 않고, 온도가 0°C 이며, 얼음층과 공기층 사이의 경계면에서 온도와 열유속이 같다. $z=E$ 에서의 경계조건은 식(5)이다.

(4) 단계Ⅳ

단계Ⅳ에서 수분침투층에서 액체상에 대한 연속방정식과 기체상에 대한 연속방정식, 그리고 액체상의 유동 속도는 식(9)~(11)이다. 얼음층의 성장속도와 에너지 방정식, 그리고 얼음층을 포함한 시간에 따른 총질량은 각각 식(26)~(28)이며, 공기층에서의 에너지방정식은 식(2)이다. 수분이 배출하기 시작하면 수분의 배출율과 밀면의 수분포화도는 다음과 같고, 그 외의 경계조건은 단계Ⅲ와 동일하다.

$z=0$ 에서

$$\dot{W}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[M(t - \Delta t) - M(t)]}{\Delta t} \quad (29)$$

$$z=0 \text{에서 } S = S_{\max} \quad (30)$$

(5) 단계Ⅴ

단계Ⅴ에서 수분침투층이 다 녹으면 얼음층의 용해가 진행된다. 얼음층에서의 에너지방정식은 식(27)

과 동일하고, 얼음은 녹는 즉시 배출되므로 용해수 배출율은 다음과 같다.

$$z=0 \text{에서 } \dot{W} = \rho_w \frac{\dot{q}}{h_{ii} \rho_i} \quad (31)$$

공기층에서의 에너지방정식은 식(2)와 같다. 밀면에서는 용해가 진행되므로 0°C 를 유지한다. 얼음층과 공기층과의 경계면, 공기층의 상단부에서의 경계조건은 단계Ⅲ와 동일하다.

3. 수치 해석

용해의 각 단계에서 각각의 층의 비정상 1차원 포화도 분포 및 온도 분포를 지배하는 비선형 미분방정식들을 이산화하기 위해 Crank-Nicholson법을 사용하였다. 시간에 따라 상승하는 접수면의 변화와 시간에 따라 하강하는 전체 높이 변화에 의한 이동경계면 조건을 처리하기 위해 Murray와 Landis⁽¹⁵⁾가 제시하였던 공간 격자 변화법을 선택하였다.

전체 좌표계는 용해에 따라 하강하게 된다. 눈층의 전체 높이가 $H \rightarrow H'$ 으로 되면 전좌표에 있던 수분 포화도는 새로운 값으로 바뀌게 되며, 이 값을 구하기 위해 선형보간법을 사용하였다. 식(22)를 이용하여 접수면의 상승속도를 구할 때 T_p^* 는 $\eta(t + \Delta t)$ 에서의 온도이지만 T_p^* 를 알아야만 $\eta(t + \Delta t)$ 를 계산할 수 있으므로 T_p^* 는 $\eta(t)$ 를 0°C 로 가정하기 전의 온도로 보았다.

4. 결과 및 고찰

4.1 현 모델의 타당성

현 모델의 타당성을 검증하기 위해 현 모델의 해석결과를 Aoki⁽⁹⁾의 실험결과 및 해석결과와 비교하였다.

Fig.3은 Aoki의 모델과 현 모델을 비교하기 위해 시간에 따른 수분침투층의 높이 변화를 나타낸 것이다. Aoki의 모델에서 열용량만을 추가적으로 고려한 모델은 Aoki의 모델에 비해 초기에 약간의 개선을 가져왔고, Aoki의 모델에서 다공비의 변화만을 추가적으로 고려한 모델은 초기보다 후기에 개선되었다. 그러므로 Aoki의 모델을 전반적으로 개선시키기 위해

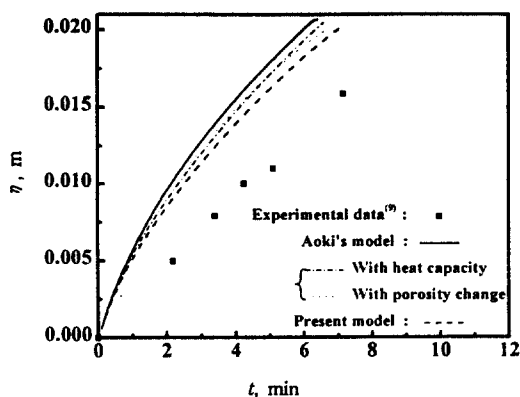


Fig.3 Comparison of the water permeation layer height between Aoki's model and present model with time during period II

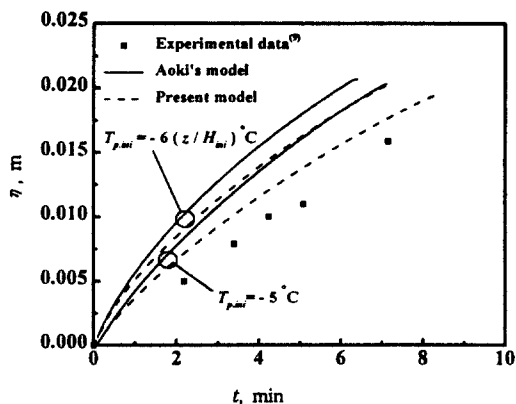


Fig.4 Comparison of the water permeation layer height between Aoki's model and present model with time for different initial snow temperatures during period II

Table 1 Baseline conditions for the analysis of melting model

Initial snow/air temperature, °C	Initial snow density, kg/m ³	Initial total height, m	Initial height of air layer, m	Supply heat flux, W/m ²
-10	300	0.04	0.01	2,000

서는 용해모델링시에 열용량과 다공비의 변화를 함께 고려하여야 한다. Aoki의 모델은 실험치와의 오차가 61~106%이지만 열용량과 다공비의 변화를 함께 고려한 현 모델은 실험치와의 오차가 45~85%로 개선되었다.

Aoki는 눈을 -5°C의 냉동실에서 보관한 후 그 눈을 실험에 사용하였으므로 다공질층의 초기 온도를 선형적이라고 가정한 것은 실험조건과 일치하지 않는다. 따라서 눈의 초기 온도가 -5°C로 균일하다고 가정한 경우에 대하여 두 모델의 결과를 살펴볼 필요가 있다. Fig.4에는 눈의 초기 온도가 선형적 분포일 때와 균일할 때에 대해 시간에 따른 수분침투층의 높이 변화를 나타내었다. 눈의 초기 온도가 균일하다고 가정하였을 경우에 Aoki의 모델은 실험치와의 오차가 31~72%이고, 현 모델은 실험치와의 오차가 12~43%로 개선되었다. 그러므로 이 후의 결과에서는 눈의 초기 온도가 균일하다고 가정하여 해석을 수행하였다.

이 후의 결과에서 사용한 기준 조건은 Table 1과 같으며, 눈의 입자지름은 Colbeck⁽³⁾을 참고하여 해석의 편의를 위해 0.4mm라고 하였다.

4.2 눈의 초기 온도의 영향

Fig.5는 눈의 초기 온도에 대한 시간에 따른 수분침투층의 높이와 전체 높이의 변화를 나타낸 것이다. 눈의 초기 온도가 낮을수록 눈의 현열에 더 많은 열량이 필요하게 되어 단계II의 시작 시점이 지연되었고 또한 그 단계의 기간이 늘어났으며 이로 인해 용해 시간이 길어지고 있다. 초기 온도에 관계없이 단계III의 초기에 공기온도가 0°C이므로 얼음층은 형성되지 않는다.

Fig.6은 단계IV에서 눈의 초기 온도에 대한 시간에 따른 용해수 배출율을 보여주고 있다. 용해수 배출은 수분침투층 밀면이 포화상태일 때 발생하지만 단계IV의 초기에는 수분침투층 내부는 포화상태가 아니므로 수분침투와 동시에 이루어진다. 용해수 배출율은 수분침투층 내부가 점점 포화상태가 되어감에 따라 증가하게 되고, 수분침투층 내부가 완전히 포화상태에 도달한 이후에는 거의 일정한 값을 유지하게 된다. 그림을 보면 눈의 초기 온도가 낮을수록 배출 시작점이 지연되고 수분침투층 내부가 완전히 포화상태에 도달한 후에 용해수 배출율은 적어지고 있다. 이것은 눈의 초기 온도가 낮을수록 눈층으로

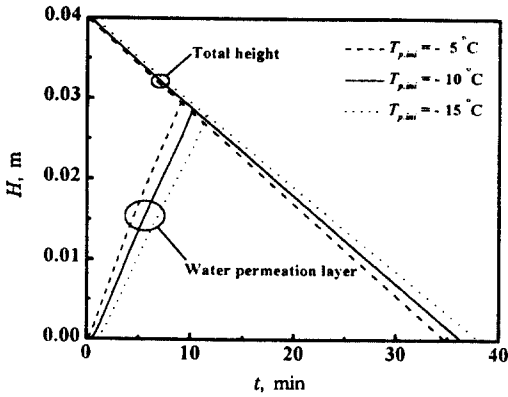


Fig.5 Changes of the water permeation height and the total height with time for different initial snow temperatures

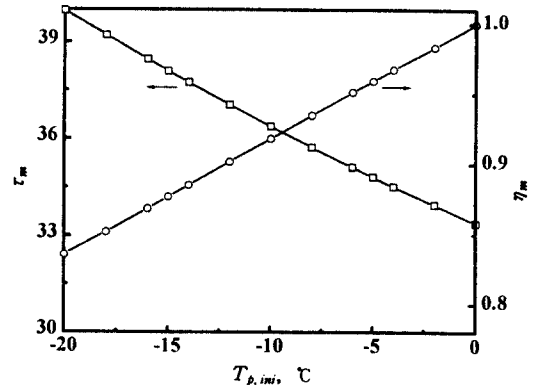


Fig.7 Melting time and melting efficiency with different initial snow temperatures

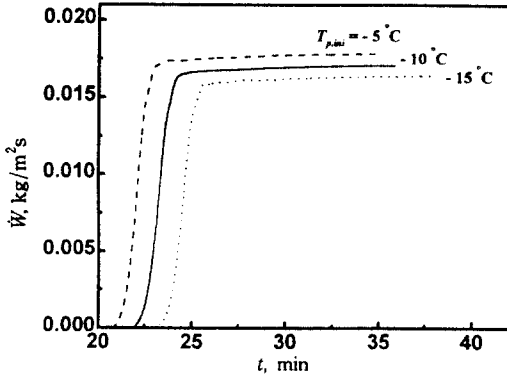


Fig.6 Water drainage rate with time for different initial snow temperatures during period IV

$$\eta_m = \frac{\text{용해에 쓰인 열량}}{\text{공급된 열량}} = \frac{h_{if} \rho_p H_0}{q_s \tau_m} \quad (32)$$

이 때 H_0 는 눈층의 초기 높이이고, τ_m 은 용해 시간이다.

4.3 눈의 초기 밀도의 영향

Fig.8은 눈의 초기 밀도에 대한 시간에 따른 수분침투층의 높이와 전체 높이의 변화를 도시한 것이다. 눈의 초기 밀도가 증가할수록 열전도계수의 증가로 인한 열전도성의 향상으로 다공질층 내의 온도 상승이 먼저 이루어져 단계Ⅱ의 시작점이 약간 더 빨라지고, 다공비의 감소로 수분침투속도가 늦어져 수분침투층의 높이 기울기가 보다 더 완만해짐을 알 수 있다. 그림에서는 나타나지 않지만 눈의 초기 밀도가 100kg/m^3 일 때 얼음층이 0.002mm 가량 존재하고 있다. 이 경우에 얼음층이 발생한 이유를 살펴보기 위해 Fig.9에 단계Ⅰ과 단계Ⅱ에서의 눈의 초기 밀도에 대한 시간에 따른 공기 온도의 변화를 조사하였다. 눈의 초기 밀도가 작을수록 수분의 침투속도가 커져서 100kg/m^3 일 때는 공기 온도가 0°C 에 도달하기 전에 단계Ⅲ가 시작되어 얼음층이 발생하고 있다. 그렇지만 눈의 초기 밀도가 300kg/m^3 보다 큰 경우에는 단계Ⅲ가 시작될 때의 온도가 0°C 이므로 얼음층이 발생하지 않고 있다.

Fig.10에는 눈의 초기 밀도에 대한 시간에 따른 용해수 배출율을 보여주고 있다. 그림에서 눈의 초기

침투된 용해수 중에서 응고되는 양이 더 많아져 수분 포화시점이 늦어지고 용해속도가 감소하기 때문이다.

Fig.7에서는 눈의 초기 온도에 따른 용해 시간과 용해 효율을 조사하였다. 눈의 초기 온도가 낮을수록 용해 시간은 직선적으로 증가하고, 용해 효율은 직선적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 초기 온도가 낮을수록 용해에 필요한 잠열량은 변하지 않지만 현열량이 증가하기 때문이다.

여기서 용해효율은 공급된 열량 중 용해에 얼마나 쓰였는가를 정량적으로 평가하는 효율이며, 공급된 열량에 대한 용해에 쓰인 열량의 비로서 다음과 같이 정의하였다.

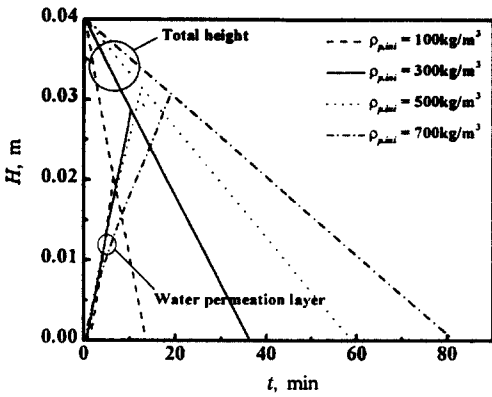


Fig.8 Changes of the water permeation height and the total height with time for different initial snow densities

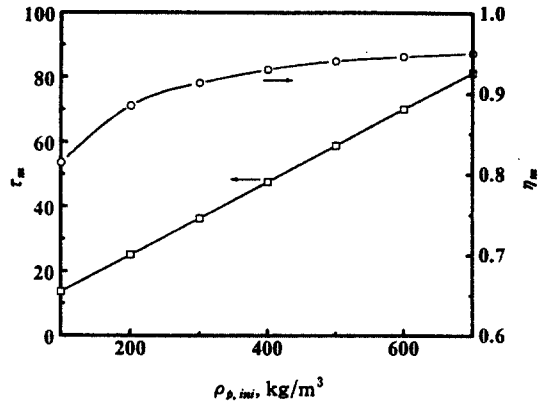


Fig.11 Melting time and melting efficiency with different initial snow densities

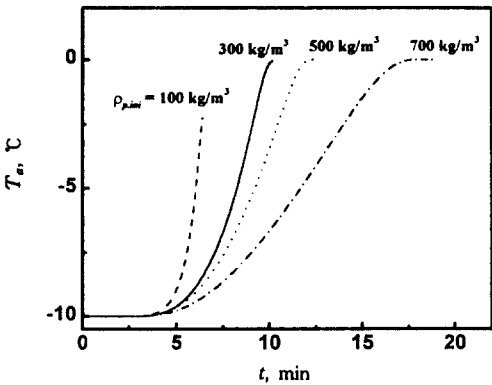


Fig.9 Temporary variations of air temperature for different initial snow densities during period I and period II

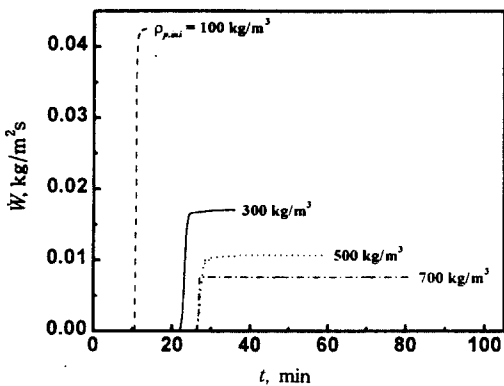


Fig.10 Water drainage rate with time for different initial snow densities

밀도가 클수록 배출율이 더 작고, 단계IV가 되는 시점이 더 늦어지고 있다. 이는 눈의 초기 밀도가 클수록 용해속도가 더 느려 수분침투층이 포화상태에 도달하는 시간이 오래 걸리기 때문이다. 그러나 눈의 초기 밀도가 700kg/m³일 때는 500kg/m³일 때보다 다공비의 감소폭이 용해속도의 감소폭보다 더 크기 때문에 후자와 비슷한 시기에 포화상태에 도달하게 되어 용해수 배출이 후자와 거의 동시에 일어나고 있다.

Fig.11에는 눈의 초기 밀도에 따른 용해 시간과 용해 효율을 나타내었다. 눈의 초기 밀도가 클수록 용해 시간은 직선적으로 감소하고, 용해에 필요한 잠열량이 많아져 용해 효율은 증가하다가 500kg/m³ 이상일 경우에는 0.94의 값에 수렴하고 있다.

4.4 공급열량의 영향

Fig.12는 공급열량에 대한 시간에 따른 수분침투층의 높이와 전체 높이의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 단계III에 이르는 시간은 공급열량이 증가할수록 짧아지지만 그 단계의 시작점에서 수분침투층 높이는 공급열량에 영향을 받지 않고 있다. 이는 공급열량이 증가할수록 접수면의 상승 속도가 증가하지만 총높이의 감소율이 같은 정도로 커져 수분침투층과 총높이가 거의 비슷한 위치에서 단계III가 시작되기 때문이다. 얼음층은 공급열량이 4,000W/m²일 때보다 큰 열량에서 발생하고 있다. 이는 열량이 큰 경우에는 접수면의 상승 속도가 매우 커서 공기가 온도가 0°C로 도달하기 전에 단계III로 발전하기 때문이다.

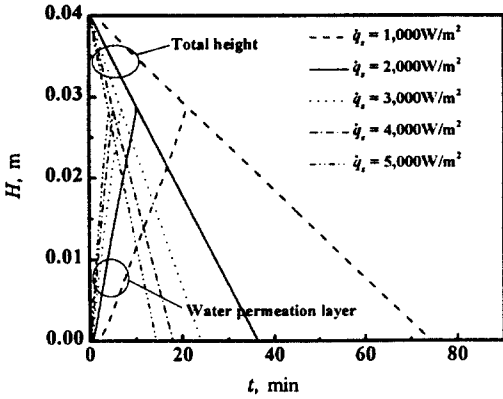


Fig.12 Changes of the water permeation height and the total height with time for different heat fluxes

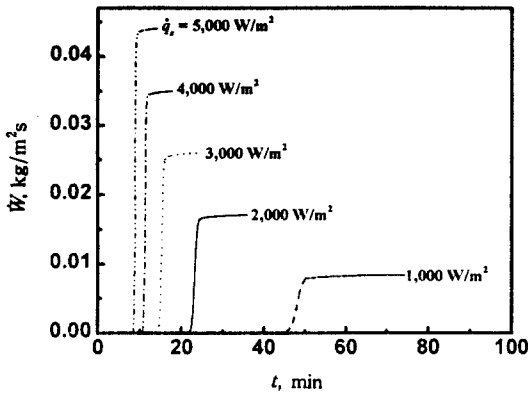


Fig.13 Water drainage rate with time for different heat fluxes

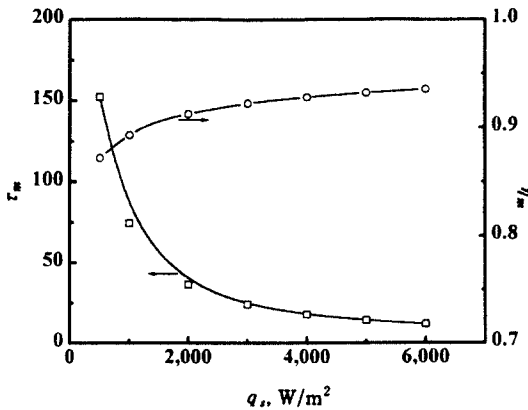


Fig.14 Melting efficiency and melting time with different heat fluxes

Fig.13에서는 공급열량에 대한 시간에 따른 용해수 배출율을 조사하였다. 공급열량이 증가할수록 용해수 배출율이 더 많고 배출 시작점이 더 빨라지고 있다. 이는 공급열량이 증가할수록 밀면에서의 용해속도가 커져 포화되는 시기가 더 빨라지며 용해수 배출율도 더 많아지기 때문이다. 특히 공급열량이 어느 이상일 때부터는 거의 비슷한 시기에 배출이 시작되고 있다.

Fig. 14에는 공급열량에 따른 용해 시간과 용해 효율을 나타내었다. 공급열량이 증가할수록 용해 시간은 지속적으로 감소하고 용해 효율은 증가하다가 일정한 값에 수렴하고 있다.

5. 결 론

1차원 눈의 용해 모델링 시에 Aoki가 간과한 열용량의 영향과 다공비의 감소효과를 고려한 결과 Aoki의 모델은 실험치와의 오차가 61~106%이지만 현 모델은 실험치와의 오차가 45~85%로 개선되었다. 또한 초기 온도를 Aoki와 동일한 실험조건인 -5°C 로 균일하게 가정함으로써 실험치와의 오차를 Aoki의 모델은 31~72%로, 현 모델은 12~43%로 개선시킬 수 있었다. 개선된 모델을 사용하여 윗면과 옆면은 단열되고, 밀면에서는 열량이 공급되는 용해 조건에서 눈의 초기 온도와 눈의 초기 밀도 그리고 공급열량을 다양하게 변화시켜 그 인자들이 용해에 미치는 영향을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 눈의 초기 온도가 낮을수록 용해수 배출 시작시점이 늦어지고 용해수 배출율이 적어지며, 용해 효율은 선형적으로 감소한다.

(2) 눈의 초기 밀도가 클수록 용해수 배출 시작시점이 늦어지고 용해수 배출율이 적어지고 있지만, 그 밀도가 어느 이상이 되면 동일한 시점에서 용해수가 배출된다. 용해 효율은 눈의 초기 밀도가 클수록 증가하다가 일정한 값에 수렴한다.

(3) 공급열량이 증가할수록 단계Ⅲ에 이르는 시간은 짧아지지만 그 단계의 시작점에서 수분침투층 높이는 그 열량에 영향을 받지 않는다. 용해 효율은 공급열량이 클수록 증가하다가 일정한 값에 수렴한다.

참 고 문 헌

1. 김규우, 지성, 이관수, 1997, "핀-관 계상 거동에 관한 실험적 연구", 추계학술대회논문집 B, pp. 287~292.
2. Colbeck, S., C., 1976, "An analysis of water flow in dry snow", Water Resource Research, Vol. 12, pp. 523~527.
3. Colbeck, S., C., 1986, "Classification of seasonal snow cover crystals", Water Resource Research, Vol. 22, pp. 59S~70S.
4. Marsh, P., and Woo, M., K., 1984, "Wetting front advance and freezing of meltwater within a snow cover(1. observations in the Canadian arctic)", Water Resource Research, Vol. 20, pp. 1853~1864.
5. Marsh, P., and Woo, M., K., 1984, "Wetting front advance and freezing of meltwater within a snow cover (2. a simulation model)", Water Resource Research, Vol. 20, pp. 1865~1874.
6. Jordan, P., 1983, "Meltwater movement in a deep snowpack (1. field observation)", Water Resource Research, Vol. 19, pp. 971~978.
7. Illangasekare, T. H., and Walter, R. J. Jr., 1990, "Modeling of meltwater infiltration in subfreezing snow", Water Resource Research, Vol. 26, No. 5, pp. 1001~1012.
8. Aoki, K., Hattori, M., Chiba, S., Hayashi, Y., 1981, "A study of the melting process in ice-air composite materials", ASME Paper 81-WA/HT.
9. Aoki, K., Hattori, M., Chiba, S., 1986, "A study of the melting process in ice-air composite materials (in the case where a temperature gradient exists in porous materials)", Bulletin of JSME, Vol. 29, pp. 2138~2144.
10. Ishihara, I., and Hioue, Y., 1992, "Basic study on defrosting of frost on horizontal cylinder", 空氣調和·衛生工學會論文集, No. 63, pp. 83~88.
11. Tsukidate, T. et al, 1996, "Study on combination system of snow melting and solar water heating part 1-suitable roadbed structure for solar collecting", 空氣調和·衛生工學會論文集, No. 63, pp. 75~83.
12. Iwamoto, K., Sayama, S., and Kyo, S. I., 1996, "Simulation of temperature change under the road heating panel", 空氣調和·衛生工學會論文集, No. 63, pp. 49~57.
13. 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.
14. Ohtani, S., and Maeda, S., 1964, "Mechanism of water movement in moist granular material", Chemical Engineering, Vol. 28, pp. 361~366.
15. Lewis, R. W., Morgan, K., and Zienkiewicz, 1981, Numerical Methods in Heat Transfer, John Wiley & Sons Ltd., pp. 177~200.