

(論 文)

모세관 모델에 의한 다공층내의 증발 열전달 해석

김흥제* · 이진호**

(1991년 9월 13일 접수)

Analysis of Evaporative Heat Transfer in a Porous Layer by Capillary Model

Hong-Je Kim, and Jinho Lee

Key Words: Evaporative Heat Transfer(증발열전달), Porous Layer(다공층), Capillary Model(모세관모델), Evaporation Intensity(증발강도), Length of Evaporation Zone(증발영역의 길이)

Abstract

The analysis of the evaporative heat transfer in the inclined porous layer ($0^\circ < \theta < 90^\circ$) is made by using capillary model. The length of the evaporation zone is obtained numerically by integrating the differential equation using a Runge-Kutta algorithm. As a result, the length of the evaporation zone is inverse proportional to the dimensionless number, $E (= Re \cdot \phi / \cos \theta)$ representing the evaporation intensity, and the relationship of these parameters shows linear in the log graph.

기 호 설 명

<p>a : 단위체적당 입자의 표면적 (m^{-1})</p> <p>d_p : 다공물질 입자의 직경 (m)</p> <p>d_n : 모세관 직경 (m)</p> <p>E : 식(32)에서 정의된 무차원수, 증발강도</p> <p>g : 중력가속도 (m/sec^2)</p> <p>H : 식(28)에서 정의된 무차원 변수</p> <p>h : 엔탈피 (kJ/kg)</p> <p>h : 대류열전달계수 (W/m^2K)</p> <p>h_{fg} : 증발잠열 (kJ/kg)</p> <p>J : Leverett의 J함수</p> <p>K : 절대침투율 (absolute permeability) (m^2)</p> <p>k : 상대침투율 (relative permeability)</p> <p>\dot{m} : 질량속도 (kg/m^2sec)</p>	<p>Nu : Nusselt수, hd_p/λ</p> <p>P : 압력 (N/m^2)</p> <p>Pr : Prandtl수, $\mu c_p/\lambda$</p> <p>Re : Reynolds수, $\dot{m} d_p/\mu$</p> <p>r : 기포반경 (m)</p> <p>r_c : 모세관반경 (m)</p> <p>r_e : 곡률반경 (m)</p> <p>S : 액체포화도</p> <p>\bar{S} : 유효포화도</p> <p>S_{ir} : 잔여포화도 (residual saturation)</p> <p>S_F : 형상계수 (shape factor)</p> <p>T : 다공벽의 온도 ($^\circ C$)</p> <p>t : 냉각수의 온도 ($^\circ C$)</p> <p>u : 식(1) 및 식(2)에서 정의된 속도, Darcy 속도 (m/sec)</p> <p>v : 입자틈새 유속 (m/sec)</p>
---	--

*정회원, 한국에너지기술연구소

**정회원, 연세대학교 기계공학과

- x : 좌표 (m)
 β : 증기와 액체 동점성계수의 비, ν_l/ν_v
 Γ : 단위체적당 증기발생율 ($\text{kg}/\text{m}^3\text{sec}$)
 γ : 증기-액체면이 고체입자의 표면과 이루는 접촉각 (contact angle) ($^\circ$)
 δ : 미세액체막 두께 (m)
 ζ : 식(28)에서 정의된 무차원 변수
 η : 식(31)에서 정의된 무차원 2상증발영역의 길이
 θ : 계가 중력방향과 이루는 경사각 ($^\circ$)
 λ : 열전도율 (W/mK)
 μ : 점성계수 ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{sec}$)
 ν : 동점성계수 (m^2/sec)
 ξ : 채널길이이계수 (channeling length factor)
 ρ : 밀도 (kg/m^3)
 σ : 표면장력 (N/m)
 ϕ : 공극율
 φ : 식(31)에서 정의된 무차원 형상매개변수
하첨자
 b : 비등 (boiling)
 eff : 유효 (effective)
 l : 액체
 m : 혼합물 (mixture)
 p : 입자
 s : 고체
 sat : 포화
 v : 증기

1. 서 론

상변화를 수반하는 다공물질 (porous media) 내의 열전달 문제는 다공물질이 비체에 비해 비표면적이 매우 크며 유체와 고체상간의 작은 온도차로도 많은 양의 열을 전달할 수 있을 뿐만 아니라 액상의 유체가 증발되어 과열증기가 되는 과정에서 높은 열 흡수용량을 갖기 때문에 지열에너지의 저장, 가스터어빈의 날개 및 로켓트 노즐의 냉각, 폐열의 회수 및 원자로의 냉각 등 넓은 과학기술 분야에 걸쳐 많은 연구와 관심의 대상이 되고 있다. 특히 다공물질은 구조적 특성상 기포형성 (bubble formation)이 쉬운 위치들을 많이 가지고 있으며, 모세관압력의 영향으로 인하여 낮은 액체과열도 (liquid superheat)에서도 액체가 쉽게 증발된다.

액체로 포화된 다공층내에서 증발이 일어날 경우

일반적으로 거의 등온상태의 증기와 액체가 공존하는 2상증발영역 (two-phase evaporation zone)이 나타나는데, 이러한 현상은 증발분출냉각 시스템의 경우에 다공층의 형상에 따른 액상의 불완전한 증발에 기인한 것으로 알려지고 있다⁽¹⁾. 특히 이러한 경우 증발영역의 발생은 냉각수의 완전한 증발보장 및 다공층벽 두께의 결정 등 냉각장치의 설계 및 응용에 있어서 중요한 변수로 작용하기 때문에, 이에 대한 정보 및 지식이 대단히 필요하다.

지금까지 다공물질내의 증발 열전달문제에 있어서 2상영역에 대한 이론적 연구는 주로 지열이용⁽²⁾, 열파이프 효과⁽³⁾ 및 원자로의 사고시 냉각^(4,5) 등과 관련한 것으로 증기와 액상의 흐름이 상호 반대 (counter-current)인 경우에 대하여 이루어졌다. 그러나 증발분출냉각의 경우에는 증기와 액상이 같은 흐름방향을 가지고, 그 진행과정에서 유체의 증발이 일어남에 따라 수반되는 해석상의 난점으로 인하여 해석적 연구가 별로 이루어지지 않았다.

Yang⁽⁶⁾은 다공층내의 유체와 다공물질간의 온도차를 고려하여 다공물질층을 액체영역과 비등영역으로 나누었으며, 이로부터 각 상에 대한 온도분포 및 상변화위치에 대한 수치해를 구하였다. 또한 최근 김 등⁽⁷⁾은 다공층을 2상증발영역을 포함한 3개의 영역으로 나누고 각 영역에 대한 온도해를 구하였으며, 각각의 경계면에서 온도접합 조건을 사용함으로써 증발영역의 길이를 산출해 내었다. 그러나 이들의 연구에서는 다공층의 구조 및 유동특성이 명확히 고려되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 모세관 모델을 이용하여 다공물질의 구조 및 유동특성을 고려한 경사진 다공층내의 증발열전달에 대한 해석적 연구를 수행함으로써 증발영역의 존재 및 발생 가능성, 그리고 다공층의 구조 및 형상, 경사각 및 냉각수량 등이 증발영역의 길이에 미치는 영향을 정성적으로 조사하고자 하였다.

2. 이론해석

2.1 다공물질내의 2상흐름에 대한 기본 방정식

증기와 액체가 혼합된 다공물질내의 2상흐름 (two-phase flow)에 대한 1차원 운동 방정식은 일반적으로 Darcy 방정식의 확장된 형태인 다음식이 널리 사용된다⁽²⁾.

$$u_v = -\frac{Kk_v}{\mu_v} \left(\frac{dP_v}{dx} + \rho_v g \cos \theta \right) \quad (1)$$

$$u_1 = -\frac{Kk_1}{\mu_1} \left(\frac{dP_1}{dk} + \rho_1 g \cos \theta \right) \quad (2)$$

여기서 u_v 와 u_1 은 각각 증기와 액상의 가상속도 (superficial velocity)로서 입자틈새의 유체속도 v_v 및 v_1 과의 관계는 다음식과 같다.

$$u_v = \phi(1-S)v_v, u_1 = \phi S v_1 \quad (3)$$

여기서 S 는 액체포화도(liquid saturation)로서 액상에 의해 점유된 빈(void) 체적의 비율 나타내며, ϕ 는 공극율(porosity)이다. 또한 식(1)과 식(2)에서 θ 는 계가 중력방향과 이루는 경사각이며, K 는 절대침투율(absolute permeability), k_v 와 k_1 은 각각 증기상과 액체상의 상대 침투율(relative permeability)이다. 절대침투율 K 는 일반적으로 Kozeny-Carman 식에 의해 표시된다. 즉

$$K = \frac{\phi^3 d_p^2}{180(1-\phi)^2} \quad (4)$$

다공물질내에서 증기상과 액체상 간의 압력차이는 모세관압력(capillary pressure)으로 다음식과 같이 표시된다.

$$P_c = P_v - P_1 = \frac{2\sigma}{r_e} \quad (5)$$

여기서 σ 는 표면장력이며, r_e 는 상경계면의 평균 곡률반경이다.

정상상태에서 증기와 액체상에 대한 질량보존식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dx}(\rho_v u_v) = \Gamma \quad (6)$$

$$\frac{d}{dx}(\rho_1 u_1) = -\Gamma \quad (7)$$

여기서 Γ 는 단위체적당 증기발생률(rate of vapor generation)이다.

증기와 액체가 혼합된 2상영역내에서 증기와 액체의 온도가 같은 것으로 가정하면 정상상태에 대한 에너지방정식은 고체상과 2상 혼합물(two-phase mixture)에 대하여 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(\lambda_s)_{eff} \frac{d^2 T_s}{dx^2} = ha(T_s - t_m) \quad (8)$$

$$\frac{d}{dx}[(\lambda_r)_{eff} \frac{dt_m}{dx}] = \frac{d}{dx}(\rho_v u_v h_v + \rho_1 u_1 h_1) - ha(T_s - t_m) \quad (9)$$

여기서 T_s 와 t_m 은 각각 고체입자 및 2상혼합물의 온도이며, $(\lambda_s)_{eff}$ 및 $(\lambda_r)_{eff}$ 는 각각 고체상과 2상혼합물의 유효열전도율(effective thermal conductivity)이다. 또한 h 는 내부 열전달계수(internal heat transfer coefficient)이며 a 는 단위체적당 고체입자의 표면적이다.

2.2 모세관 모델

상변화가 일어나는 다공물질내에서 증기와 액체상의 온도는 포화온도에서 거의 일정하므로 이론해석의 단순화를 위하여 흐름방향의 온도구배 및 열전도항을 무시하면, 식(9)는 식(6)과 식(7)을 이용하여 다음식과 같이 표시된다.

$$h_{fs} \frac{dm_v}{dx} = h_{fs} \Gamma = ha(T_s - t_m) \quad (10)$$

여기서 m_v 는 증기의 질량속도이며, h_{fs} 는 증발잠열이다. 해석의 편의상 다공물질의 입자형태가 구(sphere)인 경우를 가정하면 단위체적당 입자의 표면적 a 는 다음과 같이 표시된다.

$$a = \frac{6(1-\phi)}{d_p} \quad (11)$$

여기서 d_p 는 다공물질의 평균 입자직경이다.

증발영역내의 액체포화도는 흐름방향의 길이를 따라 변화하며, 이는 액체의 증발률, 열전달계수 및 다공벽과 혼합물 간의 온도차 등에 큰 영향을 받는다. 따라서 증발이 일어나는 2상증발영역내의 열전달특성을 조사하기 위해서는 이들 값을 포화도의 함수로 표시할 필요가 있다.

Maiorov⁽⁸⁾는 증발영역내의 체적열전달계수 (ha)_b에 대한 관계식을 다음과 같이 유도하였다. 즉

$$[ha]_b = 18 \frac{(1-\phi)^2}{\phi} \frac{\lambda_1}{d_p^2} \frac{1}{(1-(1-S)^{1/2})} \quad (12)$$

여기서 S 는 액체포화도이다. 그러나 이 식은 포화도의 함수이나 전도의 영향이 지배적이며 냉각수량의 변화에 따른 대류의 영향이 고려되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 대류열전달의 영향을 고려한 다음식을 사용하였다⁽⁹⁾.

$$[ha]_b = 6(-\phi) \frac{\lambda_1}{d_p^2} \frac{[Nu]_{1,s}}{(1-(1-S)^{1/2})} \quad (13)$$

여기서 $[Nu]_{1,s}$ 는 액체 단일상에 대한 Nusselt수이다.

고체입자와 2상혼합물 간의 온도차($T_s - t_m$)는 다

공물질의 모세관특성을 고려한 관계식으로부터 얻어질 수 있다. 즉 Konev와 Mitrovic⁽¹⁰⁾은 모세관 구조내의 액체의 비등과 관련하여 액체과열도(liquid superheat) ΔT 에 대한 관계식을 Clausius-Clapeyron 방정식과 Thomson 방정식을 이용하여 다음식과 같이 유도하였다.

$$\Delta T = \frac{2\sigma t_{sat}}{h_{fg}\rho_v r_c} \left(\frac{r_c}{r} - 1 \right) \quad (14)$$

여기서 r_c 와 r 은 각각 모세관반경과 기포반경(bubble radius)이며, t_{sat} 는 평면경계면(planar interface)에서의 포화온도이다. 식(14)는 $r \rightarrow r_c$ 에 대하여 $\Delta T \rightarrow 0$ 임을 나타내며, 일정한 기포반경에 대하여 모세관반경이 작을수록 ΔT 가 감소함을 보여준다. 따라서 모세관 구조내에서는 작은 액체과열도에서도 증발이 쉽게 일어남을 알 수 있다. 만일 액체가 고체입자의 벽에 미세막(micro-film)을 형성하여 벽으로부터 증발이 일어나는 것으로 고려한다면 액체과열도 ΔT 는 근사적으로 $(T_s - t_m)$ 의 값으로 사용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 식(14)를 포화도의 함수로 나타내기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

(1) 다공물질의 흐름통로는 Fig. 1과 같이 직경 d_n 인 모세관으로 이루어지며, 액체는 관벽에서 얇은 막을 형성한다.

(2) 기포반경은 기포가 존재할 수 있는 최대값인 $\delta/2$ 이다. 여기서 δ 는 액체막의 두께이다.

이상과 같은 가정으로부터 액체가 차지하는 체적

비, 즉 액체포화도는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = 1 - (1 - 2\delta/d_n)^2 \quad (15)$$

여기서 모세관직경 d_n 은 고체입자의 직경이 d_p 인 구의 경우에

$$d_n = \frac{4 \times (\text{다공물질내의 빈체적})}{\text{다공물질 입자의 표면적}}$$

로부터 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$d_n = \frac{2}{3} \frac{\phi}{(1-\phi)} d_p \quad (16)$$

식(15)와 식(16)을 이용하여 식(14)를 다시 쓰면 다음식과 같다.

$$\Delta T = \frac{3(1-\phi)\sigma t_{sat}}{\phi d_p \rho_v h_{fg}} \left[\frac{1+(1-S)^{1/2}}{1-(1-S)^{1/2}} \right] \approx T_s - t_m \quad (17)$$

한편 증기의 질량속도 \dot{m}_v 는 식(6)과 식(7)을 적분하면

$$\dot{m}_v = \dot{m} - \dot{m}_l \quad (18)$$

이 되며, 여기서 \dot{m} 는 주입냉각수의 질량속도이다. 한편 모세관압력 구배에 대한 관계식은 식(1), (2) 및 식(5)로부터 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{dP_c}{dx} = \frac{\nu_l}{Kk_l} \dot{m}_l - \frac{\nu_v}{Kk_v} \dot{m}_v + (\rho_l - \rho_v) g \cos \theta \quad (19)$$

여기서 2상증발영역내의 증기와 액체간의 상경계면(phase interface)은 증발에 따른 기포의 생성으로 인하여 불안정하며, 또한 이론해석의 단순화를 위하여 증기와 액상이 열적평형(thermal equilibrium)을 이룬다고 가정하면⁽⁴⁾ $P_v = P_l$ 가 된다. 따라서 식(19)에서 흐름방향의 길이에 대한 모세관압력구배 dP_c/dx 는 무시될 수 있으며, 식(18)과 식(19)로부터 증기의 질량속도 \dot{m}_v 는 다음식과 같이 표시된다.

$$\dot{m}_v = \frac{\frac{\nu_l}{Kk_l} \dot{m} + (\rho_l - \rho_v) g \cos \theta}{\left(\frac{\nu_l}{Kk_l} + \frac{\nu_v}{Kk_v} \right)} \quad (20)$$

상대침투율 k_v 및 k_l 은 2번째 상의 출현으로 인한 유체 각 상의 유동감소를 고려한 0-1 사이의 값을 갖는 무차원수로 일반적으로 포화도만의 함수로 표시된다. 증기상과 액체상의 상대침투율에 대한 단순화된 수학적 표현은 다음식이 널리 사용된다⁽¹¹⁾.

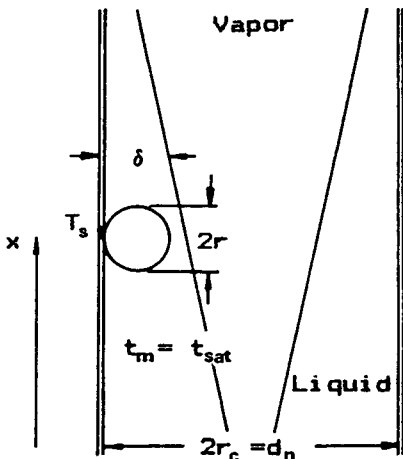


Fig. 1 Flow model and coordinate system in capillary structure

$$k_v = (1 - \bar{S})^3 \quad (21)$$

$$k_l = \bar{S}^3 \quad (22)$$

여기서 \bar{S} 는 축척된(scaled) 유효포화도(effective saturation)로서 다음식과 같이 정의된다.

$$\bar{S} = \frac{S - S_{ir}}{1 - S_{ir}} \quad (23)$$

여기서 S_{ir} 은 잔여포화도(residual saturation)로서 모세관력에 의해 액체가 입자 사이에 끼어 흐름이 불연속으로 되는 연속상태에 대한 최소 액체포화도

이다. 문헌⁽¹²⁾에 의하면 잔여포화도는 다음식과 같이 주어진다.

$$S_{ir} = \frac{1}{22} \left[\frac{(1 - \phi)^2 \sigma \cos \gamma}{d_p^2 \phi^3 \rho_l g} \right]^{0.264} \quad (24)$$

여기서 γ 는 접촉각(contact angle)으로 증기-액체 경계면이 고체입자의 표면과 이루는 각이다.

따라서 이상의 결과로부터 식(10)은 포화도만의 함수로 표시될 수 있다. 즉 식(21)과 식(22)를 식(20)에 대입하고 이를 미분하면 다음식과 같다.

$$\frac{d\dot{m}_v}{d\bar{S}} = \frac{3\bar{S}^2(1 - \bar{S})^2 \left[\frac{K(\rho_l - \rho_v)g \cos \theta}{\nu_v} [\beta(1 - \bar{S})^4 - \bar{S}^4] - \dot{m}\beta \right]}{[\bar{S}^3 + (1 - \bar{S})^3 \beta]^2} \quad (25)$$

여기서 $\beta = \nu_l / \nu_v$ 이다. 따라서 $d\dot{m}_v/dx$ 는

$$\frac{d\dot{m}_v}{dx} = \frac{d\dot{m}_v}{d\bar{S}} \cdot \frac{d\bar{S}}{dx} \quad (26)$$

로 표시되므로 식(10)은 식(13), (17) 및 식(25)를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dx}{d\bar{S}} = \frac{\bar{S}^2(1 - \bar{S})^2 [\cos \theta (\beta(1 - \bar{S})^4 - \bar{S}^4) - \zeta \beta] [1 - ((1 - S_{ir})(1 - \bar{S}))^{1/2}]^2 \cdot H}{[\bar{S}^3 + (1 - \bar{S})^3 \beta]^2 [1 + ((1 - S_{ir})(1 - \bar{S}))^{1/2}] (\text{Nu})_{1,s}} \quad (27)$$

여기서

$$H = \frac{d_p^3 \phi \rho_v h_{fg}^2 K (\rho_l - \rho_v) g}{12 (1 - \phi)^2 \lambda_l \nu_v \sigma t_{sat}} \quad (28)$$

$$\zeta = \frac{\dot{m} \nu_v}{K (\rho_l - \rho_v) g}$$

이다.

식(27)을 무차원화하기 위하여 $[\text{Nu}]_{1,s}$ 에 대하여 다음과 같은 관계식을 도입한다.

$$[\text{Nu}]_{1,s} = \frac{S_r P_r \cdot Re}{6(1 - \phi) \xi} \quad (29)$$

$$\frac{d\eta}{d\bar{S}} = \frac{\bar{S}^2(1 - \bar{S})^2 \left[\frac{\cos \theta}{Re \cdot \phi} [\beta(1 - \bar{S})^4 - \bar{S}^4] - \beta \right] [1 - ((1 - S_{ir})(1 - \bar{S}))^{1/2}]^2}{[\bar{S}^3 + (1 - \bar{S})^3 \beta]^2 [1 + ((1 - S_{ir})(1 - \bar{S}))^{1/2}]} \quad (30)$$

여기서

$$\eta = \frac{2(1 - \phi) \lambda_l \sigma t_{sat} P_r x}{\rho_v h_{fg}^2 \phi \mu_l d_p^2}$$

$$\phi = \frac{\nu_v \mu_l}{K (\rho_l - \rho_v) g d_p} \quad (31)$$

이다.

식(30)에서 우변항 분모에 나타난 무차원항 $\cos \theta / Re \cdot \phi$ 는 증발영역의 길이와 관련한 중요 매개변수들로서 다음과 같은 하나의 무차원수로 표시될 수 있다. 즉

식(29)는 Kunii와 Suzuki⁽¹³⁾에 의해 채널링(channeling)모델의 개념을 이용하여 얻어진 식으로 여기서 S_r 는 형상계수(shape factor)이며, ξ 는 채널 길이계수(channeling length factor)로서 입자직경에 대한 평균채널 길이의 비이다. 따라서 $S_r=1$ 및 $\xi=1$ 인 이상적 경우에 대하여 식(29)를 식(27)에 대입하고 이를 무차원화하면 다음식과 같이 표시된다.

$$\frac{\cos \theta}{Re \phi} = \frac{1}{E} \quad (32)$$

3. 계산결과 및 고찰

2상증발영역의 길이는 Runge-Kutta 연산방식을 이용하여 식(30)에 대한 적분을 수행함으로써 얻어지며, 식의 계산은 증발이 일어나는 증발영역내의 물리적인 의미를 만족하는 포화도의 구간, 즉

$$\frac{dm_v(\bar{S})}{d\bar{S}} \leq 0$$

인 범위에서 수행되었다. 이때 식(30)의 계산에서 잔여포화도는 Leverett⁽¹⁴⁾의 $J-S$ 선도에서 나타난 잔여포화도의 값인 0.17을 사용하였다.

3.1 증발강도, E

식(32)에서 정의된 E 는 증발이 일어나는 2상증발영역내의 증발강도(evaporation intensity)를 나타내는 무차원수로서 E 의 값이 클수록 증발이 빨리 일어나며, E 가 작을수록 상대적으로 증발이 완만하게 일어난다.

Fig. 2는 증발강도 E 에 대한 무차원 증발영역의 길이 η 를 나타낸 것이다. 그림에서 E 와 η 와의 관계는 대수(log-log) 그래프에서 거의 선형적으로 나타나며, 이를 간단히 쓰면 다음식과 같다.

$$\eta = C'E^{-1} \tag{33}$$

여기서 $C'=0.00868$ 이다.

한편 식(32)에서 나타난 Re 수, 무차원 형상 매개변수(shape parameter) φ 및 경사각 θ 가 증발영역의 길이 η 에 미치는 영향을 살펴보면 아래와 같다.

3.2 냉각수량의 영향

Fig. 3은 경사각이 0° , 즉 수직계의 경우에 Re 수

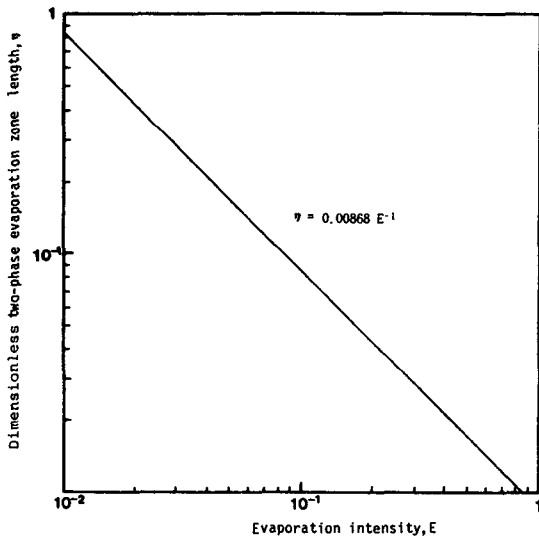


Fig. 2 Dimensionless two-phase evaporation zone length η vs. evaporation intensity E

에 따른 증발영역의 길이 η 를 형상매개변수 φ 의 변화에 대하여 대수 그래프에 나타낸 것이다. 그림에서 증발영역의 길이 η 는 일반적으로 Re 수가 증가함에 따라 감소하며, 형상매개변수 φ 가 작을수록 현저하게 증가하는 경향을 보인다. 그러나 증발영역의 길이는 Re 수가 1에 접근해 갈수록 형상매개변수 φ 에 큰 영향을 받지 않고 일정한 값을 나타낸다. 이러한 이유는 Re 수가 큰 경우에 냉각수량의 증가에 따른 대류 열전달의 영향이 상대적으로 증가함으로 인하여 증발이 빨리 일어나기 때문으로 판단된다.

Fig. 4는 일정한 형상매개변수하에서 Re 수의 증가에 따른 증발영역의 길이를 경사각 θ 의 변화에

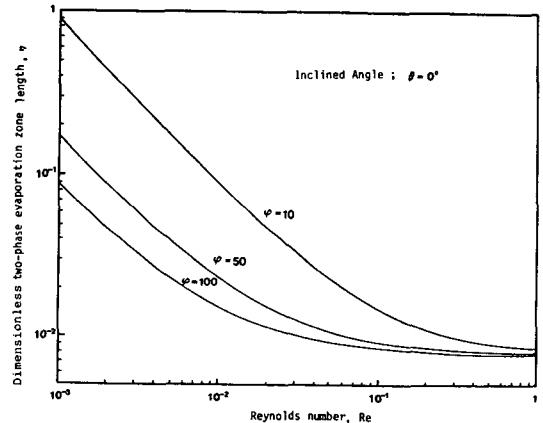


Fig. 3 Dimensionless two-phase evaporation zone length η vs. Reynolds number Re at $\theta=0$

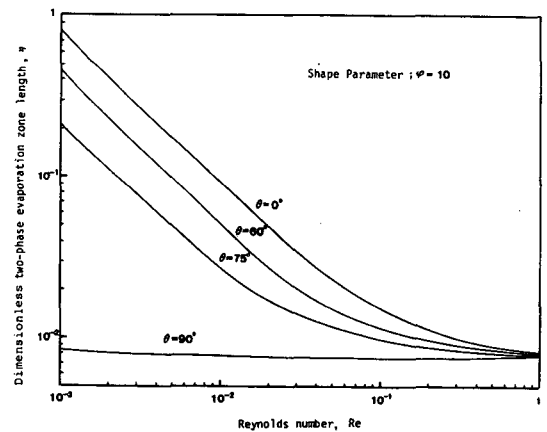


Fig. 4 Dimensionless two-phase evaporation zone length η vs. Reynolds number Re at $\varphi=10$

대하여 나타낸 것이다. 그림에서 증발영역의 길이는 Re 수가 증가함에 따라 감소하며, 이러한 경향은 경사각이 클수록(즉 수평계에 가까울수록) 현저하게 나타난다.

3.3 경사각의 영향

Fig. 5 및 Fig. 6은 각각 경사각 θ 에 따른 증발영역의 길이 η 를 형상매개변수 ϕ 와 Re 수의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 이들 그림에서 증발영역의 길이는 경사각이 클수록 감소하며, 이러한 경향은 각각 Re 수와 형상매개변수 ϕ 가 작을수록 현저하게 나타난다. 특히 증발영역의 길이는 경사각이 $60^\circ < \theta < 90^\circ$ 인 범위, 즉 수평계에 가까울수록 급격히 감소하는 경향을 보이나, 경사각이 90° 인 수평계에 도달하면 Re 수와 형상매개변수에 관계없이 일정한 값을 나타낸다. 이러한 이유는 경사각이 0° 인 수직계의 경우는 증발로 인해 생겨난 증기가 밀도차에 의해 상부로 빨리 빠져나가기 때문에 상당한 두께의 액막을 형성하나, 경사각이 증가하면 부력의 영향이 감소되어 증기의 흐름이 원활하게 이루어지지 않아 액막의 두께가 상당히 줄어들기 때문에 증발이 빨리 일어나는 것으로 판단된다.

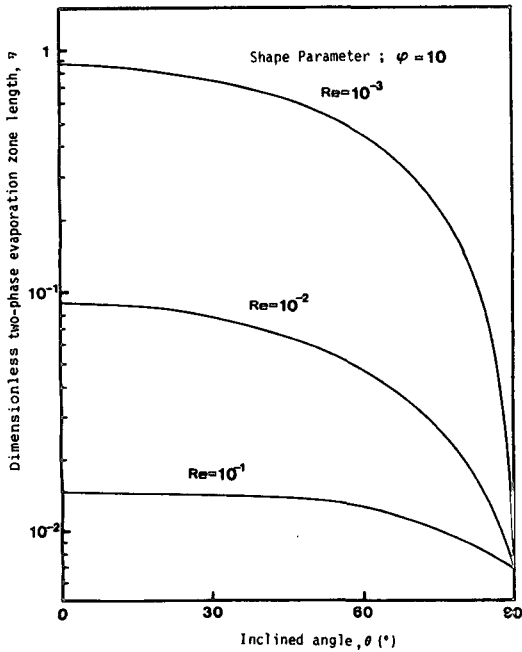


Fig. 5 Dimensionless two-phase evaporation zone length η vs. inclined angle θ . at $\phi = 10$

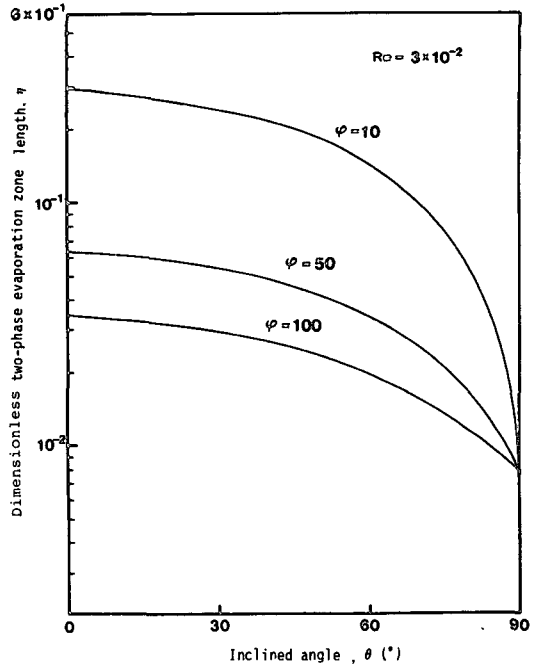


Fig. 6 Dimensionless two-phase evaporation zone length η vs. inclined angle θ at $Re = 3 \times 10^{-2}$

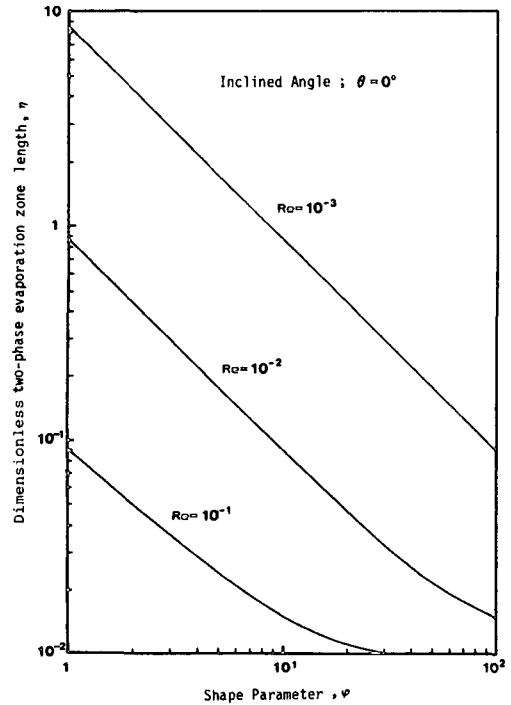


Fig. 7 Dimensionless two-phase evaporation zone length η vs. shape parameter ϕ at $\theta = 0^\circ$

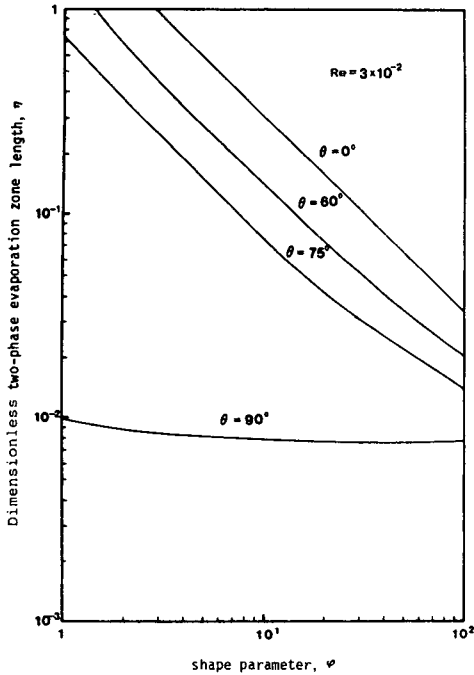


Fig. 8 Dimensionless two-phase evaporation zone length η vs. shape parameter ϕ at $Re=3 \times 10^{-2}$

3.4 다공물질 구조의 영향

형상매개변수 ϕ 는 식(31)에서 정의된 바와 같이 다공물질 입자의 직경 및 공극율 등 다공물질의 구조에 의존한다. Fig. 7 및 Fig. 8은 각각 형상매개변수 ϕ 의 변화에 따른 증발영역의 길이를 Re 수와 경사각 θ 의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 이들 그림에서 증발영역의 길이는 형상매개변수 ϕ 가 클수록 감소하며, 이는 일정한 형상매개변수 값에 대하여 각각 Re 수 및 경사각이 작을수록 크게 나타난다. 일반적으로 증발영역의 길이는 다공물질의 구조 및 형태에 대하여 큰 영향을 받는다. 즉 형상매개변수 ϕ 는 침투율에 반비례하는데, 여기서 침투율은 다공층의 입자 및 공극율이 작을수록 크게 나타난다. 따라서 다공층의 입자크기 및 공극율이 큰 경우에는 단위체적당 열전달면적이 상대적으로 감소하기 때문에 열전달이 완만하게 일어나며, 그 결과 증발영역의 길이는 증가한다.

3.5 기타의 영향

식(31)에서 나타난 바와 같이 증발영역의 길이는 냉각수의 종류와 관련하여 증발잠열(h_{fg}) 및 표면장력(σ) 등 유체의 물성치와도 관련한다. 즉 증발

영역의 실제길이 x 는 증발잠열의 2제곱에 비례하므로, 결과적으로 증발잠열이 큰 냉각수를 사용할 경우에 증발영역의 길이는 상대적으로 크게 나타날 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 다공층내의 증발 열전달 특성을 모세관 모델을 이용하여 해석적으로 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 즉 다공층내의 증발영역의 길이는 식(32)에서 정의된 무차원수 E 에 반비례하며, 이들의 관계식은 대수(log) 그래프에서 선형적으로 나타난다. 여기서 무차원수 E 는 증발강도를 나타내는 것으로 Re 수와 식(31)에서 정의된 형상매개변수 ϕ 에 비례하고 경사각의 $\cos \theta$ 값에 반비례한다. 형상매개변수 ϕ 는 침투율에 반비례하며, 이는 다공층의 입자 및 공극율이 작을수록 크게 나타난다. 따라서 증발은 냉각수량이 많을수록, 또는 공극율 및 다공층의 입자 크기가 작은 수직계의 경우에 빨리 일어나며, 그 결과 증발영역의 길이는 감소한다.

참고문헌

- (1) Koh, J.C.Y. and Del-Casal, E.P., 1968, "Two-Phase Flows in Porous Matrices for Transpiration Cooling," Dev. Mech., Vol.4, pp. 1527~1541.
- (2) Donaldson, I.G., 1968, "The Flow of Steam-Water Mixture through Permeable Beds; A Simple Simulation of a Natural Undisturbed Hydro-Thermal Region," N.Z.J. Sci., Vol.11, pp. 3~23.
- (3) Udell, K.S., 1985, "Heat Transfer in Porous Media Considering Phase Change and Capillarity-the Heat Pipe Effect," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.28, pp. 485~495.
- (4) Chawla, T.C., Pederen, D.R. and Minkowycz, W.J., 1985, "Governing Equation for Heat and Mass Transfer in Heat Generating Porous Beds-I. Coolant Boiling and Transient Void Propagation," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.28, pp.2129~2136.
- (5) Reed, A. W., 1986, "A Mechanistic Explanation of Channels in Debris Beds," J. Heat Transfer, Trans. ASME, Series C, Vol.108, pp. 125

- ~131.
- (6) Yang, J.W., 1969, "Analysis of Heat Transfer in Evaporative-Transpiration Cooled System," J. Spacecraft, Vol.6, pp. 759~762.
- (7) 김홍제, 이진호, 1992, "다공층의 증발냉각 열전달에 관한 해석적 연구", 대한기계학회논문집 제16권 제1호 pp. 104~111.
- (8) Mayorov, V. A., 1983, "Augmentation of Evaporative Heat Transfer in a Channel Filled with a Porous Highly Conductive Metal," Heat Transfer-Soviet Research, Vol.15, pp. 99~107.
- (9) 김홍제, 1988, 다공물질내의 2상유동 및 열전달 현상에 관한 연구, 공학박사 학위논문, 연세대학교, 기계공학과.
- (10) Konev, S.Y. and Mitrovic, J., 1984, "An Explanation for the Augmentation of Heat Transfer during Boiling in Capillary Structure," int. J Heat Mass Transfer, Vol.29, pp. 91~94.
- (11) Wyllie, M.R.J., 1962, "Relative Permeability," Chapter 25, Petroleum Production Handbook, Vol.2, edited by Frick, McGraw-Hill, New-York.
- (12) Lipinski, R. J., 1984, "A Coolability Model for Post-Accident Nuclear Reactor Debris," Nucl. Tech., Vol.65, pp. 53~66.
- (13) Kunii, D. and Suzuki, M., 1967, "Particle-to-Fluid Heat and Mass Transfer in Packed Beds of Fine Particles," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 10, pp. 845~852.
- (14) Leverett, M.C., 1941, "Capillary Behavior in Porous Solids," AIME Trans., Vol.142, pp.152~169.