

〈論 文〉

다공층의 증발냉각 열전달에 관한 해석적 연구

김홍제* · 이진호**

(1991년 8월 20일 접수)

Analytical Study of Heat Transfer in Evaporative Cooling of a Porous Layer

Hong-Je Kim and Jinho Lee

Key Words : Evaporative Transpiration Cooling (증발분출냉각), Heat Transfer Characteristics (열전달 특성), External Heat Input (외부열입력), Two-Phase Evaporation Zone (2상증발영역)

Abstract

In this study, the heat transfer characteristics of the evaporative transpiration cooled system is analytically investigated considering the occurrence of the two-phase evaporation zone. Under the condition of the external heat input, analytical solutions of the three regions (i.e., vapor, liquid and two-phase evaporation zone) are respectively obtained using the matching conditions for the steady-state problem where properties are constant. As results, the length of the evaporation zone increases with increasing heat input and with decreasing mass flow rate. It also increases with increasing particle size, system porosity, thermal conductivity of material, inlet temperature and latent heat of coolant. The position of the lower interface of the evaporation zone have a lot of efforts on the evaporation zone length, the position of the upper interface penetrates deeper into the porous layer with lower thermal conductivity of porous material, higher system porosity and larger particle size.

기 호 설 명

A	: 식 (10)에서 정의된 무차원 변수, $h_a \delta / \dot{m} c_p$	h	: 엔탈피 (kJ/kg)
a	: 단위체적당 입자의 비표면적 (m^{-1})	h	: 대류열전달계수 ($W/m^2 \cdot K$)
B	: 식 (10)에서 정의된 무차원 변수 $\dot{m} c_p \delta_i / (\lambda)_{eff}$	h_{fg}	: 증발잠열 (kJ/kg)
C^*	: 식 (10)에서 정의된 무차원수, $c_{p,v} / c_{p,l}$	k, K	: 차원 및 무차원 증발영역의 상단 경계면 위치
c_p	: 비열 ($kJ/kg \cdot K$)	ℓ, L	: 차원 및 무차원 증발영역의 하단 경계면 위치
D	: 식 (13) 및 식 (16)에서 정의된 무차원 변수	\dot{m}	: 냉각수량 ($kg/m^2 \cdot sec$)
F	: 식 (10)에서 정의된 무차원 변수, $\dot{q} \dot{m} c_{p,l} (t_{sat} - t_{in})$	\dot{q}	: 열유속 (W/m^2)
H	: 식 (10)에서 정의된 무차원 변수, $h_{fg} / c_{p,l}$	S_w	: 식 (23)에서 정의된 무차원수, $a_{in} / \dot{m} c_{p,l}$
		T	: 다공벽 온도 ($^{\circ}C$)
		t	: 냉각제 온도 ($^{\circ}C$)

*정회원, 한국에너지기술연구소

**정회원, 연세대학교 기계공학과

- x, X : 차원 및 무차원 좌표
- a_{in} : 다공벽 입구에서의 열전달계수 ($W/m^2 \cdot K$)
- γ : 식 (19)에서 정의된 무차원 변수, $(A_b \cdot B_b)^{1/2}$
- δ : 다공층의 두께 (m)
- ϵ : 식 (19)에서 정의된 무차원 변수, $\exp[-2\gamma(K-L)]$
- κ : 식 (19)에서 정의된 무차원 변수, B_v/B_i
- θ : 무차원 온도, $(T_w - t_{in}) / (t_{sat} - t_{in})$
- λ : 열전도율 ($W/m \cdot K$)
- π : 식 (13)에서 정의된 무차원 변수
- φ : 식 (13)에서 정의된 무차원 변수
- ϕ : 식 (13) 및 식 (16)에서 정의된 무차원 변수
- Ω : 식 (16)에서 정의된 무차원 변수

하첨자

- av : 평균
- b : 비등 (boiling)
- c : 냉각제
- eff : 유효 (effective)
- in : 입구
- l : 액체
- sat : 포화 (saturation)
- T : 2상증발 (two-phase evaporation)
- v : 증기
- w : 벽 (wall)

1. 서 론

분출냉각이란 기계장치의 수명연장을 위하여 다공물질의 기공사이로 액체 또는 기체상태의 냉각제 (coolant)를 연속적으로 공급하여 고온에 노출된 장치의 표면온도를 적정온도 이하로 냉각시킴으로써 표면을 열적보호 (thermal protection) 하는 방법을 말하며, 가스터어빈의 날개, 로켓트 노즐 및 우주선의 원추형 두부 등의 냉각에 널리 응용이 되고 있다⁽¹⁾. 특히 액체상태의 냉각제를 주입, 증발시킴으로써 상변화에 따른 잠열교환의 효과를 이용한 증발분출냉각법 (evaporative transpiration cooling method)은 단상의 냉각제를 사용하는 경우보다 훨씬 효과적이며 냉각응용에 요구되는 냉각제의 양을 상대적으로 줄일 수는 장점이 있다

분출냉각은 Duwez와 Wheeler⁽²⁾에 의해 최초로 '땀냉각 (sweet cooling)'으로 소개되었으며 초기연

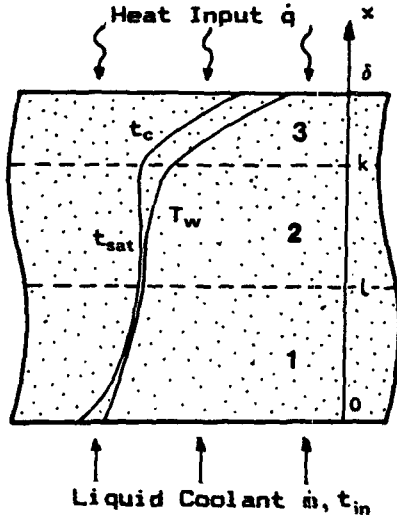
구의 대부분^(3,4)은 냉각수가 단일상인 경우에 대하여 이루어졌다. 그 후 액체의 증발에 따른 잠열효과를 이용한 증발분출에 관한 연구는 1960년대 후반 부터 활발하게 이루어졌으며, Koh와 Del-Casal⁽⁵⁾은 다공물질내의 냉각수의 유동을 액체 영역과 증기영역으로 나누어 각 영역에서의 온도분포와 압력분포를 해석하였으며 무차원 온도분포가 반대수 (semi-log) 그래프에서 선형적으로 나타남을 발견하였다. 이와 유사한 연구들이 Rubin과 Schweitzer⁽⁶⁾, Luikov 등⁽⁷⁾에 의하여 이루어졌다. 그러나 이상의 연구들은 유체와 다공물질간의 열적 평형을 가정하였으며 냉각수의 상변화 영역을 하나의 면으로 간주하여 2개의 상, 즉 냉각수가 증발하는 과정에서 나타나는 액체와 증기가 공존하는 유한한 두께의 2상증발영역 (two-phase evaporation zone)의 존재 가능성에 대해서는 고려하지 않았다. 최근 이등⁽⁸⁾은 외부열입력 조건에 대하여 실험적 연구를 수행한 결과 2상증발영역은 다공층 두께의 약 40% 정도까지 나타나며, 그 길이의 증가는 시스템의 냉각효율을 감소시키는 결과를 가져옴을 발견하였다. 이러한 2상증발영역의 발생은 다공층 내부의 온도분포, 특히 표면온도의 예측을 어렵게 하는 요인이 되며 증발잠열의 이용문제와 관련하여 냉각제의 완전한 증발보장 및 다공층벽 두께의 결정 등 냉각장치 설계 및 응용에 있어서 중요한 변수로 작용한

Yang⁽⁹⁾은 다공층내의 유체와 다공물질간의 온도차를 고려함으로써 다공물질층을 액체영역과 비등영역 (boiling region)으로 나누었으며, 이로부터 각 상에 대한 온도분포 및 상변화 위치에 대한 수치해를 구하였다. 그러나 그는 증발이 일어나는 2상영역의 존재가능성은 제시하였으나, 다공물질을 떠나는 냉각수의 상태를 포화 증기로 제한하여 실제 경우 나타나는 과열증기영역에 대해서는 고려하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 외부 열입력 (external heat input)의 조건하에서 증발분출냉각 시스템에서 나타나는 3개의 영역, 즉 증기, 증발 및 액체영역을 고려한 이론해석을 행함으로써 증발분출냉각 시스템의 열전달 특성을 정성적으로 조사하고자 하였다.

2. 이론해석

대류 또는 복사열전달에 의한 외부열입력의 조건



(1) Liquid zone (2) Evaporation zone
(3) Vapor zone

Fig. 1 Physical model of evaporative-transpiration cooling system

하에서 증발분출냉각계에 대한 기본적인 물리적 모델은 Fig. 1과 같다. 즉 열의 흐름과 반대 방향으로 다공물질층 내부로 강제 수송된 액체상태의 냉각제는 다공층의 내부에서 증발되어 과열증기상태로 시스템을 빠져나가며, 이 과정에서 서로 다른 3개의 영역이 나타난다. 따라서 본 해석에서는 액체상태의 냉각제가 증발되어 과열증기로 천이되는 과정에서 증기와 액체가 공존하는 2상영역(two-phase zone)의 존재를 고려하였다.

2.1 기본방정식

이론해석을 위하여 본 모델에 대한 에너지방정식은 다음과 같은 가정하에서 단순화 시킨다. 즉

- (1) 열과 유체의 흐름은 1차원 정상상태이다.
 - (2) 다공층의 표면으로부터 전달된 열은 다공물질의 입자를 통하여 전도되며 냉각제를 통한 열전도는 무시된다.
 - (3) 증발영역내의 냉각수의 온도는 포화온도로서 일정하다.
 - (4) 증발영역의 유효열전도율 및 내부열전달계수는 포화도(saturation)에 관계없이 일정하다.
 - (5) 각 영역에 대한 냉각수의 물성치(밀도, 비열, 열전도율, 점성계수)는 일정하다.
- 이상과 같은 가정하에서 각 영역에 대한 에너지 방정식은 다음과 같다.

액체영역 :

$$(\lambda_l)_{eff} \frac{d^2 T_{w,l}}{dx^2} = h_l a (T_{w,l} - t_{c,l}) = \dot{m} c_{p,l} \frac{dt_{c,l}}{dx} \quad (1)$$

증발영역 :

$$(\lambda_b)_{eff} \frac{d^2 T_{w,b,2}}{dx^2} = h_b a (T_{w,b} - t_{sat}) \quad (2)$$

증기영역 :

$$(\lambda_v)_{eff} \frac{d^2 T_{w,v}}{dx^2} = h_v a (T_{w,v} - t_{c,v}) = \dot{m} c_{p,v} \frac{dt_{c,v}}{dx} \quad (3)$$

여기서 T_w 및 t_c 는 각각 고체입자 및 냉각제의 온도이며, \dot{m} 은 냉각수의 질량유속, 하첨자 l, b, v 는 각각 액체, 증발, 증기영역을 나타낸다. 경계조건은 다음과 같다.

$x=0$ 에서

$$\dot{m} c_{p,l} (t_{c,l} - t_{in}) = \alpha_{in} (T_{w,l} - t_{in}) = (\lambda_l)_{eff} \frac{dT_{w,l}}{dx} \quad (4a)$$

$x=l$ 에서

$$t_{c,l} = t_{c,b} = t_{sat}, \quad \dot{m} (h'_{sat} - c_{p,l} t_{in}) = (\lambda_l)_{eff} \frac{dT_{w,l}}{dx} \quad (4b)$$

$x=k$ 에서

$$t_{c,b} = t_{c,v} = t_{sat}, \quad \dot{m} (h''_{sat} - c_{p,l} t_{in}) = (\lambda_v)_{eff} \frac{dT_{w,v}}{dx} \quad (4c)$$

$x=\delta$ 에서

$$(\lambda_v)_{eff} \frac{dT_{w,v}}{dx} = \dot{m} (h''[t_{c,v}(\delta)] - c_{p,l} t_{in}) (= \dot{q}) \quad (4d)$$

여기서 α_{in} 은 다공벽입구의 열전달계수이며, h' 와 h'' 는 각각 액체와 증기상의 엔탈피이다. 여기서 무차원화를 위하여 다음과 같은 무차원변수를 도입한다.

$$\theta_w = \frac{T_w - t_{in}}{t_{sat} - t_{in}}, \quad \theta_c = \frac{t_c - t_{in}}{t_{sat} - t_{in}} \quad (5)$$

$$X = x/\delta, \quad L = l/\delta, \quad K = k/\delta$$

식(1), (2) 및 식(3)과 경계조건 식(4a)-(4d)는 상기 무차원변수를 이용하여 정리하면 각각 다음과 같다.

액체영역 :

$$\frac{d^2 \theta_{w,l}}{dX^2} = A_l B_l (\theta_{w,l} - \theta_{c,l}) = B_l \frac{d\theta_{c,l}}{dX} \quad (6)$$

증발영역 :

$$\frac{d^2 \theta_{w,b}}{dX^2} = A_b B_b (\theta_{w,b} - 1)$$

증기영역 :

$$(7)$$

$$\frac{d^2\theta_{w,v}}{dX^2} = A_v B_v (\theta_{w,v} - \theta_{c,v}) = B_v \frac{d\theta_{c,v}}{dX} \quad (8)$$

경계조건
X=0에서

$$S_w \theta_{w,t} = \theta_{c,t} = \frac{1}{B_t} \frac{d\theta_{w,t}}{dX} \quad (9a)$$

X=L에서

$$\theta_{c,t} = \theta_{c,b} = 1, \quad B_t = \frac{d\theta_{w,t}}{dX} \quad (9b)$$

X=K에서

$$\theta_{c,b} = \theta_{c,v} = 1, \quad \frac{B_v(1+H)}{C^\circ} = \frac{d\theta_{w,v}}{dX} \quad (9c)$$

X=1에서

$$\frac{d\theta_{w,v}}{dX} = FB_v/C^\circ \quad (9d)$$

여기서 무차원 매개변수 및 무차원수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_t &= h_{ia}\delta/\dot{m}c_{p,t}, \quad A_b = h_b a\delta/\dot{m}c_{p,t}, \\ A_v &= h_v a\delta/\dot{m}c_{p,v}, \\ B_t &= \dot{m}c_{p,t}\delta/(\lambda_t)_{eff}, \quad B_b = \dot{m}c_{p,t}\delta/(\lambda_b)_{eff}, \\ B_v &= \dot{m}c_{p,v}\delta/(\lambda_v)_{eff} \quad (10) \\ S_w &= \alpha_{in}/\dot{m}c_{p,t}, \quad H = h_{fg}/c_{p,t}(t_{sat} - t_{in}) \\ C^\circ &= c_{p,v}/c_{p,t} \end{aligned}$$

2.2 일반해

경계조건을 이용하여 식(6), (7) 및 식(8)을 풀면 액체영역과 증기영역에 대한 일반해는 각각 다음과 같다.

(1) 액체영역 :

$$\theta_{c,t} = C_1 \exp\phi_1 X + C_2 \exp\phi_2 X \quad (11)$$

$$\theta_{w,t} = C_1 D_1 \exp\phi_1 X + C_2 D_2 \exp\phi_2 X \quad (12)$$

$$C_1 = -\frac{\pi/\exp\phi_1 L}{\phi - \pi}, \quad C_2 = \frac{1/\exp\phi_1 L}{\phi - \pi}$$

여기서

$$\phi = \exp\phi_2 L / \exp\phi_1 L, \quad \pi = (S_w \phi_1 + A_t) / (S_w \phi_2 + A_t)$$

$$D_1 = 1 + \phi_1/A_t, \quad D_2 = 1 + \phi_2/A_t \quad (13)$$

$$\phi_{1,2} = \frac{A_t}{2} [-1 \pm (1 - 4B_t/A_t)^{1/2}]$$

(2) 증기영역 :

$$\theta_{c,v} = C_3 + C_4 \exp\phi_3(X-K) + C_5 \exp\phi_4(X-K) \quad (14)$$

$$\theta_{w,v} = C_3 + C_4 D_3 \exp\phi_3(X-K) + C_5 D_4 \exp\phi_4(X-K) \quad (15)$$

$$C_3 = 1 + \frac{1+H}{C^\circ}$$

$$C_4 = \frac{[F/\exp\{\phi_3(1-K)\} - (1+H)\Omega]}{C^\circ(1-\Omega)}$$

$$C_5 = -\frac{[F/\exp\{\phi_3(1-K)\} - (1+H)]}{C^\circ(1-\Omega)}$$

여기서

$$\Omega = \exp\{\phi_4(1-K)\} / \exp\{\phi_3(1-K)\},$$

$$D_3 = 1 + \phi_3/A_v \quad (16)$$

$$D_4 = 1 + \phi_4/A_v, \quad \phi_{3,4} = \frac{A_v}{2} [-1 \pm (1 - 4B_v/A_v)^{1/2}]$$

증기-증발영역의 경계면(K)과 증발-액체영역의 경계면(L)에서는 각 영역의 온도구배가 같아야 하므로

X=K에서

$$\frac{d\theta_{w,v}}{dX} = \frac{d\theta_{w,b}}{dX} \quad (17a)$$

X=L에서

$$\frac{d\theta_{w,b}}{dX} = \frac{d\theta_{w,t}}{dX} \quad (17b)$$

를 만족해야 한다. 따라서 식(17a)와 식(17b)를 만족하는 증발영역에 대한 온도해를 구하면 다음과 같다.

(3) 증발영역

$$\theta_{w,b} = C_6 \exp\{r(X-L)\} + C_7 \exp\{-\gamma(X-L)\} + 1 \quad (18)$$

$$C_6 = \frac{B_t[\kappa(1+H)\epsilon^{1/2} - \epsilon]}{\gamma(1-\epsilon)}$$

$$C_7 = \frac{B_t[\kappa(1+H)\epsilon^{1/2} - 1]}{\gamma(1-\epsilon)}$$

여기서 $\gamma = (A_b B_b)^{1/2}$

$$\epsilon = \exp(-2\gamma(K-L)) \quad (19)$$

$$\kappa = B_v/B_t$$

2.3 온도접합(Temperature Matching)

다공물질층 내부의 온도분포는 증기-증발영역의 상경계면 K와 증발-액체영역의 경계면 L에서 각각 연속조건을 만족하여야 한다. 즉

$$X=K에서 \quad \theta_{w,v} = \theta_{w,b} \quad (20a)$$

$$X=L에서 \quad \theta_{w,b} = \theta_{w,t} \quad (20b)$$

따라서 식(12), (15) 및 식(18)로부터 식(20a)와 식(20b)의 접합조건을 만족하는 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{\phi_2\pi - \phi_1\varphi}{A_i(\varphi - \pi)} = \frac{B_i[2\kappa(1+H)\epsilon^{1/2} - (1-\epsilon)]}{\gamma(1-\epsilon)} + 1 \quad (21)$$

$$\frac{B_i[\kappa(1+H)(1+\epsilon) - 2\epsilon^{1/2}]}{\gamma(1-\epsilon)} = \frac{[F(\phi_3 - \phi_4) / \exp(\phi_3(1-K))] + (1+H)(\phi_4\Omega - \phi_3)}{C^*A_v(1-\Omega)} - \frac{1+H}{C^*} \quad (22)$$

3. 계산결과 및 고찰

식(21)과 식(22)에 대한 계산결과는 Newton-Raphson 방법을 이용하여 여러가지 매개변수에 대하여 두 식을 동시에 만족하는 K 및 L 의 값을 구함으로써 얻어진다. 여기서 표시된 K 와 L 은 각각 2상증발영역의 무차원화된 상단 경계면 및 하단 경계면의 위치로서 L 은 냉각수의 증발이 시작되는 점의 위치이며, K 는 냉각수의 증발이 완전히 끝나는 점의 위치이다. 따라서 $(K-L)$ 은 무차원화된 증발영역의 길이를 나타낸다. 식에서 나타난 무차원 매개변수는 $A_v, A_b, A_i, B_v, B_b, B_i, S_w, F, H$ 등 7개이며, 이중에서 A_i 과 B_i 는 각각 A_v 및 B_v 와 상호 관계된다. 한편 A_b 및 B_b 는 본 해석의 가정으로부터 고려된 증발영역내의 평균대류 열전달계수와 평균 유효열전도율을 대표하는 무차원수로서 각각 $A_b = N_1 \cdot A_i$ 및 $B_b = N_2 \cdot B_i$ 로 가정하였다. 따라서 A_b 는 증발영역내에서 축적된 (scaled) 유효포화도 (effective saturation) S 의 적분구간, 즉 $S=1$ 에서 $S=0$ 에 대해 2상증발영역의 평균 Nusselt수가 $(Nu)_b / (Nu)_i = 4.49^{(10)}$ 의 값을 갖기 때문에 대략 Yang⁽⁹⁾이 사용한 값과 같은 $N_1 = 10$ 을 선택하였으며, B_b 는 2상영역의 유효열전도율이 다공물질 입자간의 접촉점에서 잔여액체 (residual liquid)로 인한 열저항의 감소로 인하여 비교적 크게 나타나기 때문에 임의적으로 대략 $N_2 = 2$ 의 값을 선택하였다. 한편 S_w 는 무차원화된 다공벽 입구의 열전달계수로서

$$S_w = \frac{a_{in}}{mc_{p,i}} = \frac{t_c - t_{in}}{T_w - t_{in}} \leq 1 \quad (23)$$

로 정의되는 Stanton수이며, 이는 물리적으로 1이하의 값을 갖는다. 지금까지 조사된 바로는 이에 대한 일반적인 관계식은 아직까지 알려지지 않고 있으며, 문헌⁽¹¹⁾의 관계식으로부터 대략 Reynolds 수가 1이하의 영역에서는 $S_w=1$ 의 값을 나타내므로 본 계산에서는 이 값을 인용하여 사용하였다.

즉 이와 같은 경우 액체영역에서의 액상의 속도는 매우 느리기 때문에 다공벽 입구에서의 다공물질 입자와 냉각수 상호간에는 열적평형 (thermal equilibrium)이 이루어짐을 의미한다.

3.1 냉각수량의 영향

B_v 는 식(10)에서 나타난 바와 같이 증기영역의 수정된 Peclet수에 해당하는 무차원수로서 주어진 다공물질에 대하여 냉각수량의 변화를 대표한다. Fig. 2는 일정한 열입력 (F)의 조건하에서 냉각수량의 변화 (B_v)에 따른 2상영역의 길이를 나타낸 것이다. 여기서 L_T 는 무차원 2상증발영역의 길이로서 $(K-L)$ 을 나타낸다. 그림에서 증발영역의 길이는 냉각수량이 감소함에 따라 점차 증가하며, 상변화가 시작되는 증발영역의 하단 경계면의 위치, 즉 L 의 변화에 크게 영향을 받는다. 한편 상변화가 끝나는 증발영역의 상단 경계면의 위치 K 는 냉각수량이 비교적 작은 범위내에서는 냉각수량이 감소함에 따라 조금씩 다공층 내부로 침투해 들어감을 알 수 있으나, 냉각수량이 큰 범위에서는 냉각수량의 변화에 대해 큰 변화를 보이지 않는 것으로 나타난다. 이와 같은 경향은 Rubin과 Schweitzer⁽⁶⁾의 결과에서 나타난 경향과 일치하는 것으로 Peclet수가 큰 경우에는 상변화위치 K 가 계의 내부로 거의 침투해 들어가지 않는 것을 알 수 있다. 또한 비교적 작은 냉각수량의 범위에서

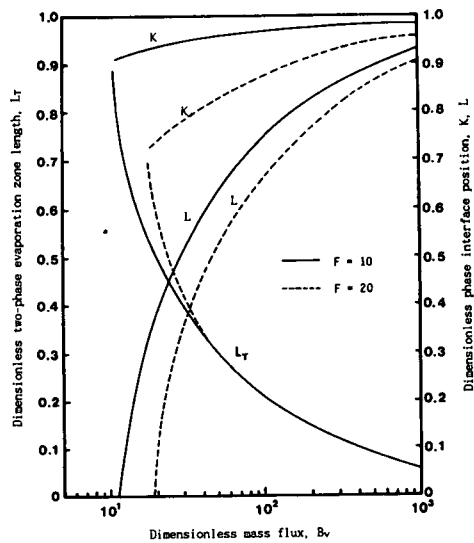


Fig. 2 Dimensionless two-phase evaporation zone length L_T vs. dimensionless mass flux B_v at $A_v=1.0, B_v/B_i=1.36, H=7.68$

증발영역의 길이는 동일한 냉각수량하에서 열유속이 증가함에 따라 점차 크게 나타나는데, 이러한 경향은 Yang⁽⁹⁾의 수치계산 결과와 일치한다. 그러나 증발영역의 길이는 냉각수량이 증가하면 동일한 냉각수량하에서 열유속의 변화에 대해 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타난다.

3.2 열유속의 영향

Fig. 3~Fig.5는 열유속(F)의 변화에 따른 증발영역의 길이를 B_v , B_v/B_i 및 A_v 의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 B_v 는 주어진 다공물질 층하에서 증기영역의 냉각수량을, B_v/B_i 는 주어진 냉각제에 대하여 증기영역과 액체영역의 유효열전도율의 비율, 또한 A_v 는 증기영역의 수정된 Stanton수에 해당하는 무차원수로 체적열전달계수를 각각 대표한다.

Fig. 3은 열유속의 변화에 따른 증발영역의 길이와 상변화위치를 냉각수량의 변화에 대해 나타낸 것으로 일반적으로 증발영역의 길이는 열유속(F)이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으며 냉각수량(B_v)이 작은 경우에는 열유속의 작은 범위에서 현저하게 증가한다. 그러나 냉각수량이 증가함에 따라 증발영역의 길이는 점차 열유속의 넓은 범위에 걸쳐서 나타나며, 열유속이 작은 범위에서는 완만하게 증가하나 열유속이 큰 범위에서는

역시 현저하게 증가하는 경향을 보인다. 이러한 현상은 냉각수량에 대한 영향에서도 관찰된 바와 같이 증발영역의 상변화 위치와 관련한다. 즉 증발영역의 상단 경계면의 상변화위치 K 는 냉각수량의 증감에 따라 큰 영향을 받지 않으나 하단 경계면의 상변화위치 L 은 상대적으로 이에 따라 큰 영향을 받기 때문이다. 한편 본 계산결과 나타난 흥미있는 현상으로서 2상증발영역의 길이에 대한 이론해는 열유속과 냉각수량의 범위에 따라 반대수 그래프에서 일정한 영역을 형성함을 알 수 있다. 즉 냉각수량이 작은 경우($B_v=60$)에 증발영역의 길이에 대한 해가 존재하는 영역은 작은 열유속의 범위에서 제한되며 냉각수량이 증가함에 따라 그 영역의 범위는 점차 확장된다. 이러한 경향은 본 이론해에서 얻어진 모든 결과로부터 나타나는 현상으로서 주어진 냉각조건하에서 본 모델에 대한 이론해가 존재하는 영역의 바깥부분에서는 3개의 영역, 즉 증기, 증발, 액체영역이 존재하지 않고 이 중에서 두개의 영역 혹은 하나의 영역만 존재함을 의미한다. 이와 같은 현상은 그림에서 나타난 바와 같이 증발영역의 상변화위치, 즉 K 및 L 의 값이 각각 주어진 조건하에서 1과 0으로 접근함을 보이고 있기 때문이다.

Fig. 4는 열유속의 변화에 따른 증발영역의 길이 B_v/B_i 가 3.2인 경우에 대하여 나타낸 것으로

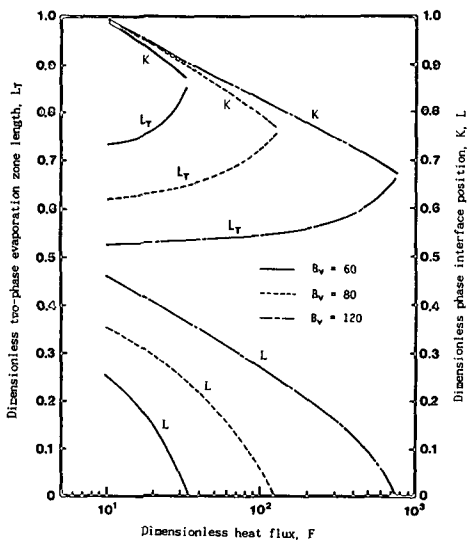


Fig. 3 Dimensionless two-phase evaporation zone length L_T vs. dimensionless heat flux F at $A_v=1.0$, $B_v/B_i=6.0$, $H=7.68$

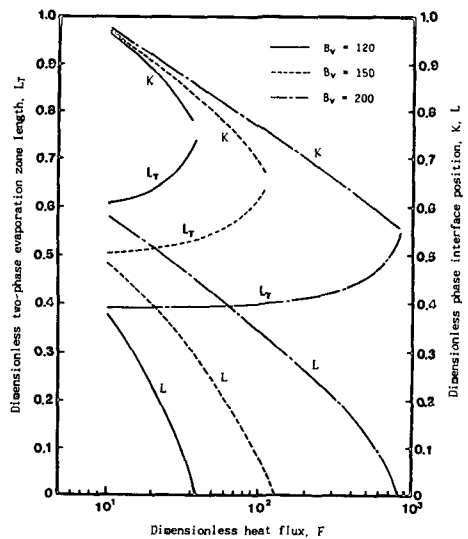


Fig. 4 Dimensionless two-phase evaporation zone length L_T vs. dimensionless heat flux F at $A_v=1.0$, $B_v/B_i=3.2$, $H=7.68$

상변화위치 K 는 Fig. 3과 비교하여 볼 때 B_v/B_i 의 값이 작은 경우가 다공층의 내부로 더 깊이 침투해 들어감을 알 수 있다. 따라서 다공물질의 재질 변화는 증발영역의 상단경계면, 즉 K 의 변화에 큰 영향을 주는 것으로 나타난다.

Fig. 5는 열유속의 변화에 따른 증발영역의 길이를 A_v , 즉 체적열전달계수의 변화에 대하여 나타낸 것으로 다공물질의 열전달계수와 관련한다. 즉 다공물질 입자의 크기 및 공극율이 작을수록 열전달면적은 증가하며 이때 A_v 는 증가한다. 따라서 A_v 의 값이 큰 경우에는 대류에 의한 열전달 효과가 보다 크게 나타나므로 냉각수의 증발이 빨리 일어나며, 이에 따라 증발영역의 길이는 상대적으로 감소한다. 이때 증발영역의 상단 경계면의 위치 K 는 A_v 가 큰 경우에는 열유속의 변화에 대하여 그 변화량이 완만하나 A_v 가 작은 경우에는 열전달이 원활히 일어나지 않기 때문에 상변화위치 K 가 다공층 내부로 깊숙히 침투해 들어감을 알 수 있다. 또한 A_v 의 값에 대한 증발영역의 길이는 A_v 의 작은 값의 범위에서 열유속의 변화에 매우 민감하게 나타나는데, 이는 증발영역의 하단 경계면의 위치 L 이 A_v 의 변화에 큰 영향을 받기 때문이다.

3.3 다공물질의 종류에 따른 영향

Fig. 6은 B_v/B_i , 즉 증기영역과 액체영역의 유효

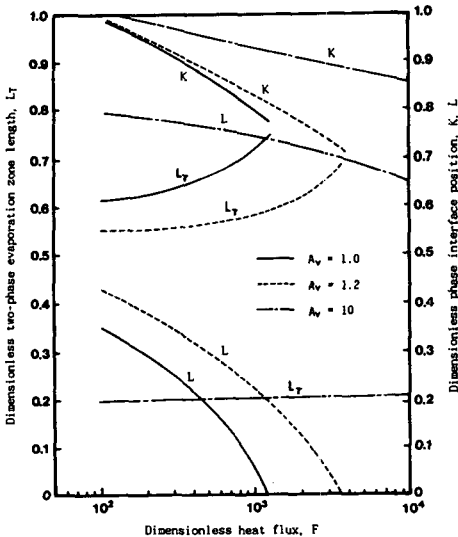


Fig. 5 Dimensionless two-phase evaporation zone length L_T vs. dimensionless heat flux F at $B_v/B_i=6.0$, $B_v=150$, $H=7.68$

열전도율의 비에 따른 증발영역의 길이 변화를 나타낸 것으로 일정한 냉각조건에 대하여 B_v/B_i 값이 클수록 증발영역의 길이는 증가하며 B_v/B_i 의 값이 작은 범위에서는 체적열전달계수, 즉 A_v 의 변화에 대해 그 변화량은 작은 것으로 나타났다. 일반적으로 B_v/B_i 의 값은 다공물질의 열전도율이 좋을수록 크게 나타나는데⁽¹²⁾, 이러한 결과로부터 증발영역의 길이는 다공물질의 열전도율이 클수록 증가함을 알 수 있다. 그리고 이는 Yang⁽⁹⁾의 결과와 동일한 경향을 나타낸다.

3.4 냉각제의 종류에 따른 영향

Fig. 7은 증발잠열(H)의 영향에 대한 증발영역의 길이변화를 나타낸 것으로 냉각제의 종류 변화

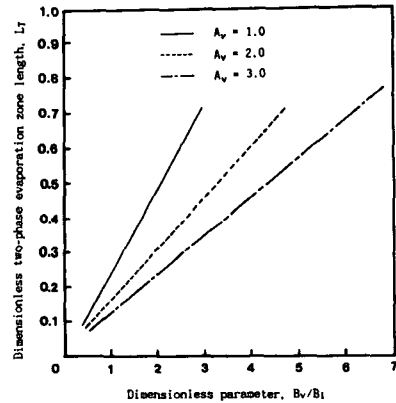


Fig. 6 Dimensionless two-phase evaporation zone length L_T vs. dimensionless parameter B_v/B_i at $B_v=50$, $F=30$, $H=7.68$

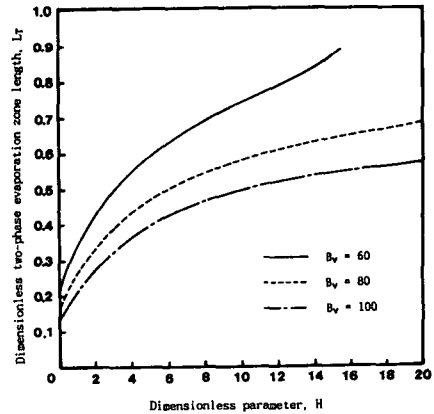


Fig. 7 Dimensionless two-phase evaporation zone length L_T vs. dimensionless parameter H at $A_v=1.0$, $B_v/B_i=3.2$, $F=30$

에 대해 고려할 수 있다. 그림에서 H , 즉 냉각제의 증발잠열이 큰 경우에 증발영역의 길이는 증가하며, 냉각수량이 증가함에 따라 증발잠열에 대한 영향은 점차 감소하는 것으로 나타난다. 한편 무차원 매개변수 H 는 동일한 냉각제에 대하여 냉각수의 주입온도에 대한 영향으로 고려될 수 있는데, 이때 주입온도의 증가는 증발영역의 길이를 증가시키는 결과를 가져온다.

4. 결 론

본 연구는 외부열입력 조건하의 다공층에 대하여 2상증발영역을 고려한 증발분출 냉각 시스템의 열전달 특성을 해석적 연구를 행하여 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 외부열입력 조건하에서 다공층 내부의 증기, 액체 및 2상증발영역 내부의 냉각유체 및 고체상에 대한 온도해가 각각 얻어졌다.
- (2) 증발영역의 길이는 냉각수량이 작을수록 또는 열유속이 클수록 증가하며, 다공물질 입자의 크기 및 공극률이 작을수록 감소한다.
- (3) 증발영역의 길이는 다공물질의 열전도율이 클수록 증가하며, 냉각수의 주입온도가 높을수록 또는 증발잠열이 큰 냉각제를 사용하는 경우 증가한다.
- (4) 증발영역의 길이 변화는 대체로 증발이 시작되는 2상영역의 하단 경계면의 위치변화에 큰 영향을 받으며, 증발영역의 상단 경계면의 위치는 다공물질의 열전도율이 낮을수록 또는 다공물질의 입자 크기 및 공극률이 클수록 다공층 내부로 깊숙히 침투한다.

참 고 문 헌

(1) Schuster, J.R. and Lee, T.G., 1972, "Application of

an Improved Transpiration Cooling Concept to Space Shuttle Type Vehicles", *J. Spacecraft*, Vol.9, No.11, pp.804~811.

(2) Duwez, P. and Wheeler, H. L., 1948, "Experimental Study of Cooling by Injection of a Fluid through a Porous Material", *J. Aero. Sc.*, Vol.15, No.9, pp.509~521.

(3) Weinbaum, S. and Wheeler, H.L., 1948, "Heat Transfer in Sweat-Cooled Porous Metals", *J. Applied Physics*, Vol.20, pp.113~122.

(4) Green, L. and Downey, C., 1952, "Gas Cooling of a Porous Heat Source", *J. Applied Mechanics*, Vol.74, pp.173~178.

(5) 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.

(6) Rubin, A. and Schweitzer, S., 1972, "Heat Transfer in Porous Media with Phases Change", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.5, pp.43~60.

(7) Luikov, A.V., Vasiliev, L. L. and Mayorov, V. A., 1975, "Static Characteristics of Equilibrium Two-Phase Transpiration Cooling System", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.18, pp.863~873.

(8) 이진호, 남궁규완, 김홍제, 주성백, 1988, "증발분출냉각의 열전달 특성에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 논문집, 제12권, 제5호, pp.1130~1137.

(9) Yang, J.W., 1969, "Analysis of Heat Transfer in Evaporative-Transpiration Cooled System", *J. Spacecraft*, Vol.6, pp.759~762.

(10) 김홍제, 1988, "다공물질내의 2상유동 및 열전달 현상에 관한 연구," 공학박사 학위논문, 연세대학교, 기계공학과.

(11) Mairov, V.A., 1984, "Boundary Conditions for a Forced Transpiration Cooling System", *Inzh. Fiz., Zh.*, Vol.46, No.4, pp.587~594.

(12) Krupiczka, R., 1967, "Analysis of Thermal Conductivity in Granular Materials", *Int. Chem. Eng.*, Vol.7, pp.122~144.