

원형 및 환상 채널에 흐르는 수직 상향류의 액막 건조 모델

홍성덕*·천세영*

Phenomenological Liquid Film Dryout Model for Upward Flow in Tubes and Annuli

Sung-Deok Hong, Se-Young Chun

Key Words: Critical Heat Flux(임계열유속), Liquid Film Dryout(액막건조), Annular Flow(환상류), Churn-to-Annular Flow Transient(처언류-환상류 천이)

Abstract

We modeled the liquid film dryout(LFD) process for both tube and annulus which have uniformly heated vertical channels. We set phenomenological initial conditions in the model. The initial void fraction on the onset of the annular flow location is derived from the physical churn-to-annular flow criterion with the help of the drift-flux-model. The initial thermodynamic-equilibrium-quality is calculated by iteration with the flow quality to find the onset of the annular-flow location. Present model tends to predict very well at the lower exit quality but under-estimates at the higher exit quality. We found that the prediction error of the present model is gradually bigger as the inlet subcooling approaches near the saturation. We obtained excellent results for both tube and annulus channels as the mean of 0.97 and root-mean-square error of 11% for the number of 3883 experimental data on tubes, and of 0.96 and of 12% for 593 on annuli. The present model extended the applicable range to the relatively low exit quality region than previous LFD models.

기호설명

C	기체흐름에 포함된 액적의 밀집도 [kg m^{-3}]
C_{eq}	수력적평형 상태에서 액적의 밀집도 [kg m^{-3}]
C_{ff}	계면마찰계수
C_o	드리프트 유속모델에서의 분포인자
d	관의 직경 [m]
d_{he}	가열등가직경 [m]
D	액적의 점착률 [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
E	액적의 이탈률 [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
G	전체 질량유량 [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
G_g	기체 질량유량 [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
G_d	액적 질량유량 [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
G_l	액체 질량유량 [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
G_f	액막 질량유량(환상관) [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
G_{if}	액막 질량유량(원형관) [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
g	중력가속도 [m s^{-2}]
h_f	포화 액체의 엔탈피 [kJ kg^{-1}]
h_{fg}	기화의 잠열 [kJ kg^{-1}]
h_{in}	입구엔탈피 [kJ kg^{-1}]
j	겉보기속도 [m s^{-1}]
k	물질전달속도 [m s^{-1}]
L	가열길이 [m]

p	압력 [kPa]
q''	열유속 [kW m^{-2}]
R	반경 [m]
u	속도 [m s^{-1}]
V_{gj}	기체의 드리프트 속도 [m s^{-1}]
x	건도
x_e	열역학적 평형 건도
x_{ex}	출구건도
x_{he}	수력적평형 건도
Y_f	벽면으로부터의 수직방향 거리 [m]
z	축방향 거리 [m]

그리스문자

α	기공률
δ	액막 두께 [m]
δ_c	임계액막 두께 (식 5) [m]
μ	점도 [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$]
ρ	밀도 [kg m^{-3}]
σ	표면장력 [N m^{-1}]
τ	전단응력 [N m^{-2}]
ψ, ψ'	액적이탈인자 ($\psi' = 1 + \sqrt{2(\psi - 1)}$)

첨자

* 한국원자력연구소 열수력안전연구팀(042-868-8251)

an 환상류 시작점
 f 액체
 g 기체
 lf 액막
 i, o 내환봉, 외환봉
 w 벽
 + 무차원 표시

1. 서론

환상류(Annular Flow)는 증발기나 비등경수로에서 흔히 발생되는 유동양식이다. 위와 같은 시스템의 주요설계요소는 운전 중에 히터나 연료가 녹지 않도록 가열면의 열유속을 제한 값 이하에 두고 안전하게 운전하도록 운전조건을 설정하는 것이다. 현재 설계 방식은 운전영역을 포함하는 비교적 좁은 영역에서 임계열유속(Critical Heat Flux) 실험을 수행하고 얻은 경험상관식을 활용하여 운전제한조건을 설계하고 있다. 근래에는 경험상관식에서 탈피하여 시스템에 따라 다양하게 요구되는 운전영역에도 광범위하게 적용할 수 있는 현상학적인 접근방식도 개발이 상당히 진척되어 있다. 환상유동영역에서 일반적으로 받아들여지는 임계열유속기구(CHF Mechanism)는 가열표면에 있는 액막 이 건조(Liquid Film Dryout)되어 임계열유속이 발생하는 것이다^[1]. 액막건조기구는 유동상류쪽의 열수력적 상태인 입구미포화도, 유속, 압력, 열유속, 기공률, 환상류 시작점 및 가열길이 등에 의해 결정되는 액막에서의 액적의 점착, 액적의 이탈, 액막의 증발 등이 하류로 진행하면서 액막의 두께를 감소시키고 결국 액막유동이 소멸되어 가열면의 온도가 상승한다는 것이다. 초창기 현상학적인 액막건조모델(LFD Model) 연구자는 Vanderwater^[2], Isbin^[3], and Isbin et al.^[4] 등으로 액막에서 액적이탈, 점착, 증발의 누적균형(Integral Balance) 모델을 제시하였다. 이 후 Harwell 연구소에서 1960 년대와 1970 년대에 걸쳐 수행한 광범위한 환상유동 연구결과를 토대로 Whally^[5]가 보다 개선된 액막건조모델을 발표하였다. 근래의 연구는 선행연구의 기본골격은 유지한 상태에서 보조관계식을 보다 정교하게 수정하는 방향으로 연구가 진행 되었고^[6-10], 이와 함께 단순한 원형관에서 탈피하여 환상관과, 봉다발에도 적용할 수 있도록 기하학적인 적용환경이 확장되었다^[11-15].

선행된 액막건조모델들은 연구가 진행 될수록 잘 개선된 결과를 보여주었으나, 모두가 환상류 시작점을 현상학적으로 모델링하지 않고 경험상수를 사용하였다. Whally^[5]는 환상류 시작점의 건도를 1%로 두었고, Levy^[7]는 환상류 시작점의 기공률을 80%, Katto^[8]는 기공률을 60%로 가정하였다. 그러나 환상류 시작점은 열수력 조건에 따라 다양하게 나타난다. 건도는 기체의 겹보기속도, 기체의밀도, 유량의 함수이다^[16]. 즉,

$$x_{m} = \frac{j_g \rho_g}{G} \quad (1)$$

또한 기공률은 건도-기공률 관계식으로부터 건도의 함수로 결정된다.

본 논문에서는 유동양식지도에 있는 처언류-환상류 천이관계식으로부터 기체의 겹보기속도를 얻어내고

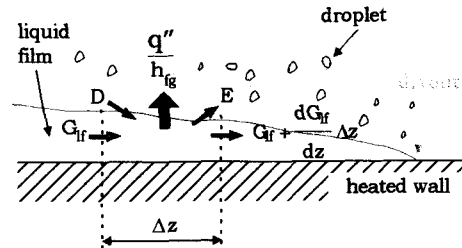


Fig. 1. Control volume of the dryout model

(1)식의 건도-겹보기속도관계식을 활용하여 환상류 시작점의 기공률을 현상학적으로 모델링 하였다. 덧붙여 원형관의 처언류-환상류 천이관계 식^[17-20]에 대한 민감도 조사를 수행하고, 환상채널에서 액적의 점착 및 이탈량은 내환봉 및 외환봉의 액적점착 면적비에 비례한다는 가정을 도입하여 환상관 모델링을 수행하였다. 각 모델은 광범위하게 수행된 임계열유속 실험자료와 비교하고 예측성능을 평가하였다.

2. 액막건조모델링

2.1 원형관 모델.

2.1.1 지배방정식

액막건조모델에서는 관벽을 따라 흐르는 액막, 관 중심부의 증기, 증기에 유입되어 함께 흐르는 액적을 포함한 3가지의 유체유동을 고려한다(Figure 1). 미소 제어체적 내의 액막, 증기 및 액적에 대한 질량방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dG_f}{dz} = \frac{4}{d} \left(D - E - \frac{q''}{h_{fg}} \right) \quad (2)$$

$$\frac{dG_g}{dz} = \frac{4q''}{dh_{fg}} \quad (3)$$

$$\frac{dG_d}{dz} = \frac{4}{d} (E - D) \quad (4)$$

액막유동은 액적의 이탈, 점착 그리고 액막의 증발에 의해 결정되고, 액막유량이 0이 될 때 CHF(혹은 Dryout) 발생조건이 된다.

2.1.2 주요가정

원형관 액막건조모델의 주요가정은 다음과 같다.

- 1) 미소제어체적내 액막의 두께는 일정하다.
- 2) 축방향 위치에서 압력도 단면에 걸쳐 일정하다.
- 3) 압력변화에 따른 상변화는 무시한다.
- 4) 액막두께가 임계 값에 이르른 액적이탈은 없다^[8].

$$\delta_c = 0.00536 \sigma \rho_g \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.4} \left(\frac{h_{fg}}{q''} \right)^2 \left(1 + \frac{\rho_g}{\rho_f} \right) \quad (5)$$

2.1.3 보조 관계식

액적들이 액막에 부딪쳐 액막유동을 증가시키는 액적의 점착률은 기체의 흐름에 포함된 액적의 밀집도 C와 물질전달속도 k에 비례한다. 즉,

$$D = kC \quad (6)$$

여기서, 기체의 흐름에 포함된 액적의 밀집도 C 는 유량과 건도의 함수이며,

$$C = \frac{(G(1-x) - G_f)}{\left\{ \frac{Gx}{\rho_g} + \frac{G(1-x) - G_f}{\rho_f} \right\}} \quad (7)$$

물질전달속도 k 는 유체의 표면장력의 함수로 표현된다 (Katto^[8]).

$$\left. \begin{aligned} k &= 0.405\sigma^{0.915} & \text{for } \sigma < 0.0383, \\ k &= 9.48 \times 10^4 \sigma^{4.70} & \text{for } \sigma > 0.0383. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

액적의 이탈은 액막의 유체속도보다 빠른 증기 때문에 발생한다. 액적의 이탈률은 수력적 평형상태에서 형성된 액적의 밀집도와 관련이 깊다.

$$E = kC_{eq} \quad (9)$$

여기서 C_{eq} 는 가열이 배제된 수력적평형상태에서 액적의 밀집도로 가열로 형성된 비평형상태에서의 밀집도 C 와 구분되며, 수력적평형상태에서의 건도 x_{he} 의 함수로 정의된다.

$$C_{eq} = \frac{(G(1-x_{he}) - G_f)}{\left\{ \frac{Gx_{he}}{\rho_g} + \frac{G(1-x_{he}) - G_f}{\rho_f} \right\}} \quad (10)$$

Levy^[7] 는 수력적평형상태에서의 건도 x_{he} 를 다음과 같이 제안하였다.

$$\left. \begin{aligned} x_{he} &= 1 - \frac{G_f/G}{1 - \sqrt{1/\psi}} & \text{for } Y_f^* \geq 30, \\ x_{he} &= 1 - \frac{G_f/G}{1 - \sqrt{1/\psi}} & \text{for } Y_f^* < 30, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ψ 는 액적이탈계수이다.

$$\psi = 1 + \left[\frac{2}{0.4x_{he}^2} \frac{\sigma\rho_f}{G^2d} \left\{ \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{1/\psi} - 1 \right\} \right]^{0.5}$$

무차원화된 액막두께 Y_f^* , 액막유량 G_{fi} , 그리고 벽면에 작용하는 전단응력 τ_w 는 서로 맞물려 있어 아래 식과 같이 삼각관계를 형성하고 있다^[7].

$$\frac{G_f/\rho_f}{\sqrt{\tau_w/\rho_f}} = \frac{2}{R^{1/2}} K(Y_f^*, R^*) \quad (12)$$

여기서,

$$R^* = \frac{R\rho_f\sqrt{\tau_w/\rho_f}}{\mu_f}, \quad Y_f^* = \frac{\delta_f\rho_f\sqrt{\tau_w/\rho_f}}{\mu_f}$$

벽면에서의 전단응력 식은

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_{fi} \rho_g \left(\frac{Gx_{he}}{\rho_g} \right)^2 \quad (13)$$

C_{fi} 는 계면마찰계수로 Hewitt-Whalley^[21]가 제안한 모델을 사용하였다.

2.1.4 초기조건

환상류 시작점에서의 기공률

증기의 결보기속도는 처언류-환상류 천이식으로부터 구할 수 있다. 처언류-환상류 천이에 관한 Taitel et. al.^[19] 식은 환상류 시작점에서 증기의 결보기속도를

다음과 같이 압력과 표면장력의 함수로 표현한다.

$$j_g = 3.1 \left[\frac{\sigma g (\rho_f - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{1/4} \quad (14)$$

윗 식에서 얻어진 증기의 결보기속도를 (1)식에 대입하여 건도 x_{an} 를 구하고, 아래의 기공률-건도 관계식으로부터 기공률을 얻는다.

$$\alpha_{an} = \frac{x_{an}}{C_o [x_{an} + \frac{\rho_g}{\rho_f} (1 - x_{an})] + \rho_g \frac{V_g}{G}} \quad (15)$$

V_g 와 C_o 는 기체의 드리프트속도와 분포인자로 Dix 모델^[22]를 사용하였다.

환상류 시작점의 액막두께

$$\delta_{an} = \frac{d(1 - \sqrt{\alpha_{an}})}{2} \quad (16)$$

환상류 시작점

에너지보존식으로부터 환상류 시작점을 유도하면,

$$z_{an} = \frac{dG}{4q} (h_{fg}x_e + h_f - h_m) \quad (17)$$

열역학적 평형건도 x_e 는 Levy 가 제안한 profile-fit-model^[23]에 식 (1)에서 얻은 건도 x_{an} 를 대입하고 반복 계산을 수행하여 구한다.

2.2 환상관 모델.

2.2.1 지배방정식

내환봉이 가열봉인 환상관은 내환봉과 외환봉의 액막유동을 구분하여 지배방정식을 세운다.

내환봉

$$\frac{dG_{fi}}{dz} = \frac{4}{d_{he}} \left(D_i - E_i - \frac{q''}{h_{fg}} \right) \quad (18)$$

외환봉

$$\frac{dG_{fo}}{dz} = \frac{4}{d_{he}} (D_o - E_o) \quad (19)$$

환상채널을 가열등가직경으로 Lumping 하고 증기유동과 액적유동에 대한 지배방정식을 세운다.

$$\frac{dG_g}{dz} = \frac{4q''}{d_{he}h_{fg}} \quad (20)$$

$$\frac{dG_d}{dz} = \frac{4}{d_{he}} (E - D) \quad (21)$$

위의 (20), (21)식은 내환봉 및 외환봉의 액막유량식 (18), (19)와 액적접촉면적비로 연계되어 질량균형을 이룬다.

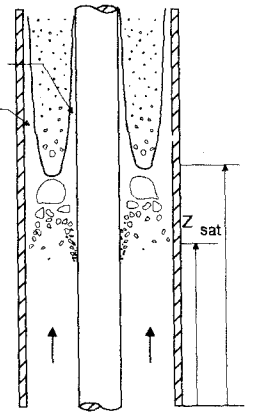


Fig. 2. Annulus channel

2.2.2 환상관 모델의 주요가정

환상관에 주요가정은 2.1.2 절에 논의된 원형관의 가정에 다음 항이 추가된다.

1) 내부액막과 외부액막의 표면에서 발생하는 액적의 점착 및 이탈량은 내환봉과 외환봉의 액적점착면적에 비례한다.

2) 환상류 시작점에서 다음과 같이 초기 액막두께와 관 직경의 비는 일정하다.

$$\frac{\delta_u}{d_i} = \frac{\delta_{oi}}{d_o} \quad (22)$$

여기서 δ_{ii}, δ_{oi} 는 내부관과 외부관의 초기액막두께이다.

2.2.3 보조 관계식

내환봉 및 외환봉의 액막에서 액적의 점착률,

$$D_n = kC \Lambda_n, \quad n = i, o \quad (23)$$

여기서 Λ_n 은 액적의 점착비이다.

$$\Lambda_n = \left(\frac{d_n}{d_o + d_i} \right), \quad n = i, o \quad (24)$$

액적의 이탈률,

$$E_n = kC_{eg} \Lambda_n, \quad n = i, o \quad (25)$$

기준이 되는 액적의 점착률과 이탈률은 환상채널의 가열등가직경을 사용하여 구한다. 즉 내/외환봉 액막에서 일어나는 전체 액적의 점착률과 이탈률은 환상채널을 원형채널로 Lumping 하고 계산한 것과 같은 결과를 얻게된다. 가열등가직경을 대입하여 식 (12)의 삼각관계에서 Lumping 으로 새롭게 정의된 액막두께 Y_f 는 2 차항을 무시한다고 가정하면 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$Y_f \approx d_{he} \left(\frac{\delta_i d_i + \delta_o d_o}{d_o^2 - d_i^2} \right) \quad (26)$$

2.2.4 초기조건

처연류-환상류 천이식

Venkateswararo^[24]가 수행한 봉다발의 유동양식지도 연구에 의하면 처연류-환상류 천이에 원형관모델인 Taitel et al^[18]의 식(14)를 봉다발에 적용하였다. 환상관에 대한 처연류-환상류 천이에 관한 모델이 없으므로 봉다발에도 적용하고 있는 식(14)를 환상관 모델에 사용하였다.

환상류 시작점의 액막두께

2 차항을 무시하면 ($\delta_{oi}^2 \approx 0$) 내부 및 외부 벽면에서의 초기액막두께는 다음과 같이 유도된다.

$$\left. \begin{aligned} \delta_{oi} &\approx \frac{(d_o^2 - d_i^2)(1 - \alpha_{am})}{4d_o \left(1 + \left(\frac{d_i}{d_o} \right)^2 \right)} \\ \delta_{ii} &= \frac{d_i}{d_o} \delta_{oi} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

또한 초기액막유량은 다음과 같이 계산된다.

$$\left. \begin{aligned} G_{fi}^i &= G_f \left(1 + \frac{\delta_{oi}(d_o - \delta_{oi})}{\delta_{ii}(d_i + \delta_{ii})} \right)^{-1} \\ G_{fo}^o &= G_f \left(1 + \frac{\delta_{ii}(d_i + \delta_{ii})}{\delta_{oi}(d_o - \delta_{oi})} \right)^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 원형관 모델

3.1.1 처연류-환상류 천이모델의 민감도

유동양식지도의 처연류-환상류 천이식 중에서 수식적으로 계산 가능한 Taitel et al.^[18], Wallis^[17], McQuillan-Whalley^[20] 및 Jones-Zuber^[18] 모델을 비교하였다. Table 1 에 제시된 바와 같이 Jones-Zuber 모델을 제외하고 선행된 액막건조모델보다 예측치가 개선 되었으며 모두 비슷한 수준으로 임계열유속을 예측하고 있다. Jones-Zuber 모델은 기체결빙기속도를 타 모델보다 10 배 가량 크게 예측하여 액막건조 모델의 수렴률이 급격히 떨어지는 요인으로 작용하였다.

3.1.2 건도 및 입구미포화도에 대한 예측 경향

건도가 높은 영역에서 제한한 원형관모델의 예측 경향은 실험치보다 약간 낮게 예측하나 낮은 건도 영역에서는 잘 맞는다(Figure 3). 기공률이 60%인 선행 모델의 경우 건도가 비교적 낮은 영역은 수렴하지 않고 계산영역에서 벗어나고 있는 반면에 제안모델은 정확히

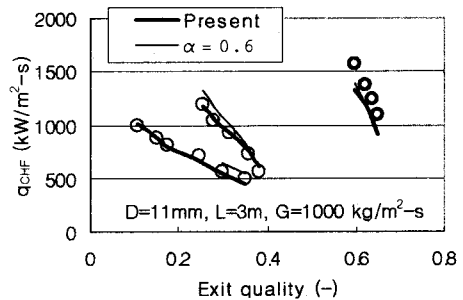


Fig. 3. Prediction trend along to the exit quality

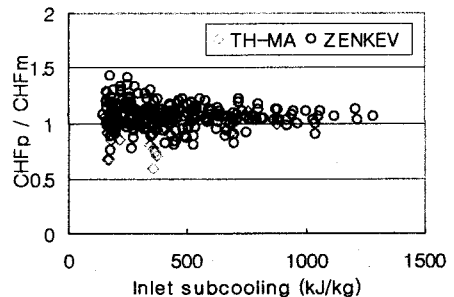


Fig. 4. Propagation of the prediction error on the inlet subcooling

예측해내고 있다.

Figure 4는 실험치 대 예측치 비를 입구미포화도에 대한 경향을 보여주고 있다. 가열구간입구에서 유체의 미포화도가 포화도에 가까워질수록 예측의 불확실도가 선형적으로 점차 증가하고 있다. 이 현상은 기포미포화 상태에서 발생한 후 하류로 가면서 형성된 기포류가 유연하게 슬러그류, 천류, 환상류로 전환되는 일반적인 과정을 거치지 못하고 유체가 입구를 통과하자마자 급격히 환상류가 형성되기 때문이다. 제시된 액막건조모델은 정상적으로 형성되는 환상류모델을 사용하므로 입구미포화도가 포화도에 가까워질수록 예측성능이 떨어지게 된다. 저 건도나 저 기공률 상태일지라도 유량이 커지면 기포융합이 증대되어 유동양식 천이가 일어난다^[32]. 또한 압력이 높은 곳에서는 액체와 기체의 밀도비 차이가 줄어들게 되어 건도와 기공률 비율도 줄어들게 된다. 그러므로 압력이 높은 조건에서 유량이 크면 환상류 시작점의 기공률이 상당히 작아질 수 있다. 제안된 액막건조모델의 환상류 시작점의 기공률은 0.20 부터 0.85까지 넓게 계산되었다

3.2 환상관 모델

Figure 5에 질량유량에 대하여 제안한 환상관 모델과 Katto 모델의 차이점을 비교하였다. 환상채널을 가열등가직경으로 두고 계산한 Katto 모델은 질량유량이 600 kg/m²-s 이하에서 예측오차가 커진다. 반면에 액적접촉 비 가정으로 지배방정식을 내부액막 및 외부액막으로 분리하여 설정한 제안모델의 경우 저 유량에서 오차가 상당히 줄어드는 것을 알 수 있다.

3.3 제안모델의 성능 평가

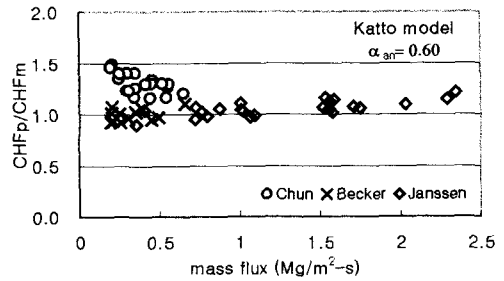
3968 개의 원형관 CHF 실험자료를 Zenkevich^[25] 와 Thomson-Macbeth^[26]의 자료가 포함된 KAIST의 CHF 데이터뱅크^[27]에서 수집하였다. 원형관에 대한 모델의 성능 평가 결과 3968 개 자료 중 3883 개가 수렴되었으며, 자료의 정규화된 평균은 0.97, RMS 오차는 0.113 이었다. 제안모델은 선행모델들 보다 수렴도가 높고 평균 및 오차가 전체적으로 개선된 결과를 보였다(Table 1).

Table 1. Comparison of the prediction capabilities of the liquid film dryout models on tubes

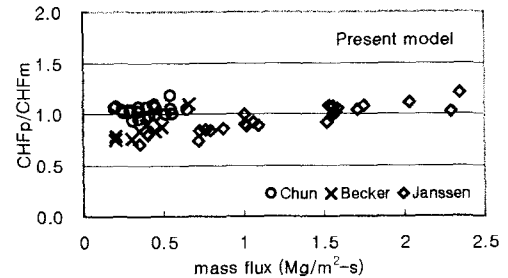
모델	개수	평균	RMS	환상류 시작점	REF.
Whally	3968	1.150	0.255	$x_{an} = 0.1$	[5]
Levy	1763	1.064	0.188	$\alpha_{an} = 0.8$	[7]
Katto	3205	1.038	0.135	$\alpha_{an} = 0.6$	[8]
Present	3883	0.970	0.1127	$j_e = 3.1 \left[\sigma g (\rho_f - \rho_g) / \rho_g^2 \right]^{1/4}$	Taitel et al.
	3887	0.970	0.1132	$j_e = 0.9 \left[g d (\rho_f - \rho_g) / \rho_g \right]^{1/2}$	Wallis
	3886	0.971	0.1129	$j_e = 1.0 \left[g d (\rho_f - \rho_g) / \rho_g \right]^{1/2}$	McQuillan-Whalley
	80	0.978	0.062	$j_f = \left[0.225 (\rho_f / \rho_g)^{0.5} - 0.35 \right] \times \left[g d (\rho_f - \rho_g) / \rho_g \right]^{1/2}$	Jones-Zuber

실험자료 범위(원형관)

출구건도, > 0.1 질량유량, 183 ~ 5261 kg/m²-s
 압력, 0.5 ~ 17.7 MPa 직경, 5.1 ~ 37.5 mm
 입구미포화도, 150 ~ 1534 kJ/kg



(a) Katto model(one liquid film)



(b) Present model

Fig. 5. Prediction trend on the mass flux of both Katto and present annulus LFD model

환상관모델의 경우, 수집한 Chun^[28,29], Janssen & Kervinen^[30] 및 Becker et al.^[31]의 CHF 실험자료의 595 개 중 593 개가 수렴하였다. 정규화 된 평균은 0.96, RMS 오차는 0.119 로 원형관 모델보다 성능이 약간 떨어지는 결과를 얻었다(Figure 6).

4. 결론

유동양식지도에 있는 처언류-환상류 천이관계식을 활용하여 현상학적인 액막건조모델을 제안하였다. 제안된 모델은 세계적으로 광범위하게 수행된 입계열유속 실험자료를 활용하여 예측성능을 평가하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 처언류-환상류 천이관계식을 활용하여 지배방정식의 초기조건을 실제 물리현상과 동일하게 모델링 하였을 때 액막건조모델의 입계열유속 예측의 정확도가 향상되었으며 적용환경도 저건도 영역까지 확장되었다.
- Taitel et al.의 처언류-환상류 천이관계식을 액막건조모델에 적용할 때 다른 관계식보다 원형관 및 환상관 채널 해석에 보다 정확한 결과를 주었다.
- 제안된 액막건조모델은 비교적 정확히 입계열유속을 예측하나 전체적으로 평균이 원형관은 3%, 환상관은 4% 저 평가된 결과를 주었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기연구개발사업의 일환으로 이루어졌다. 원형관 CHF 실험자료를 제공하여 주신 KAIST 원자력공학과 장순홍교수께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 권혁성, 전태현, 홍성덕, 황대현, 박철, 1995, "이론적 강제대류 CHF 해석 모델의 연구 현황 및 성능 평가," *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol. 27, No. 6.
- (2) Vanderwater, R. G., 1957, "An Analysis of Burnout in Two-Phase Liquid-Vapor Flow," PhD Dissertation, Univ. of Minnesota.
- (3) Isbin, H. S., 1959 "Two-Phase Heat Transfer, Two-Phase Burnout," AECU-4305, U. S. Atomic Energy Commission.
- (4) Isbin, H. S., Vanderwater, R. G., Fauske, H. and Singh H., 1961, "A Model for Correlating Two-Phase Steam Water Burnout Heat Transfer Fluxes," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 83, 149.
- (5) Whalley, P. B., Hutchinson P. and Hewitt, G. F., 1974, "The Calculation of Critical Heat Flux in Forced Convection Boiling," 5TH International Heat Transfer Conference, Paper B6.11, Tokyo.
- (6) El-Shanawany, M. El-Shirbini, A. A. and Murgatroyd, W., 1978, "A Model for Predicting the Dryout Position for Annular flow in a Uniformly Heated Vertical Tube," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 21, pp. 529-536.
- (7) Levy, S., Heazler, J. M. and Abdollahian, D., 1981, "Prediction of Critical Heat Flux in Vertical Pipe Flow," *Nucl. Eng. & Des.*, 65, pp. 131-140.
- (8) Katto, Y., 1984, "Prediction of Critical Heat Flux for Annular Flow in Tubes Taking into Account the Critical Liquid Film Thickness Concept," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 27, No. 6, pp. 883-891.
- (9) Hewitt, G. F. and Govan, A. H., 1989, "Phenomenological Modelling of Non-Equilibrium Flows with Phase Change," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 33, No 2, pp. 229-242.
- (10) Hoyer, N., 1998, "Calculation of Dryout and Post-Dryout Heat Transfer for Tube Geometry," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 24, No. 2, pp. 319-334.
- (11) Saito, T., Hughes, E. D. and Carbon, M. W., 1978, "Multi-Fluid Modeling of Annular Two-Phase Flow," *Nucl. Eng. & Des.*, 50, pp. 225-271.
- (12) Sugawara, S., 1990, "Analytical Prediction of CHF by FIDAS Code Based on Three-Fluid and Film-Dryout Model," *Nucl. Sci. & Tech.*, Vol. 27, No. 1, pp. 12-29.
- (13) Hong, S. D., Chun, S. Y., Yang, S. K., Chung, M. K., Park, C., 1999, "A Phenomenological Liquid Film Dryout Model in Vertical Annulus at High Vapor Quality," 4TH Int. Symposium of Multiphase Flow and Heat Transfer, pp. 138-147, X'ian China.
- (14) Whalley, P. B., 1977, "The Calculation of Dryout in a Rod Bundle," *Int. J. Multiphase Flow* Vol. 3, pp. 501-515.
- (15) Ninokata, H. et al., 1997, "Development of the NASCA Code for Prediction of Transient BT and Post BT Phenomena in BWR Rod Bundles," 4TH Int. Seminar on Subchannel Analysis, Tokyo.
- (16) Collier, J. G. and Thome, J. R., 1996, "Convective Boiling and Condensation," 3rd Ed. Clarendon Press, Oxford.
- (17) Wallis, G. B., 1969, "One-Dimensional Two-Phase

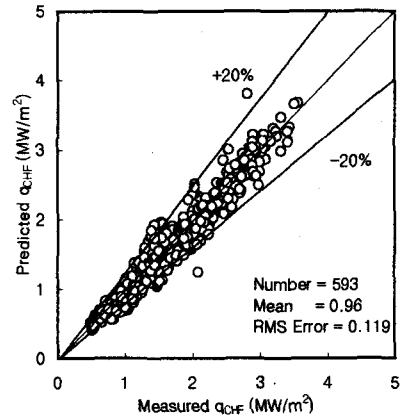


Fig. 6. Predicted vs. measured critical heat flux on annuli

- Flow," Chapter 11, Wiley, New York.
- (18) Jones, O. C. and Zuber, N., 1978, "Slug-Annular Transition with Particular Reference to Narrow Rectangular Ducts," *Int. Seminar, Momentum, Heat and Mass Transfer in Two-Phase Energy and Chemical System*, Dubrovnik, Yugoslavia, September.
- (19) Taitel, Y., Dukler, A. E. and Bornea, D., 1980, "Modeling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes," *AIChE. J.* Vol 26, No. 3, pp. 345-354.
- (20) McQuillan, K. W. and Whalley, P. B., 1985, "Flow Patterns in Vertical Two-Phase Flow," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 11, No. 2, pp. 161-175.
- (21) Hewitt, G. F. and Whalley, P. B., 1978, "The Correlation of Liquid Entrainment Fraction and Entrainment Rate in Annular Two-Phase Flow," *AERE-R9187*.
- (22) Dix, C. E., 1971, "Vapor Void Fractions for Forced Convection with Subcooled Boiling at Low Flow Rates," U. C. Berkeley.
- (23) Levy, S., 1966, "Forced Convection Subcooled Boiling—Prediction of Vapor Volumetric Fraction," *GEAP-5157*.
- (24) P. Venkateswararao, R. Semiat and A. E. Dukler, 1982, "Flow Pattern Transition for Gas-Liquid Flow in a Vertical Rod Bundle," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 8, No. 5, 509-524.
- (25) Zenkevich, B. A. et al., 1970, "Heat Transfer Burnout in Water flow Through Round Tubes and Annuli," *Proc. 4TH Int. Heat Transfer Conf.*, Paper No. B6.13, Paris.
- (26) Thomson, B. and Macbeth, R. V., 1964, "Boiling Water Heat Transfer Burnout in Uniformly Heated Round Tubes: A compilation of World Data with Accurate Correlations," *AEEW-R356*, UKAEA.
- (27) S. H. Chang, W. P. Baek et al., 1996, "The KAIST CHF Data Bank (Rev.3)," *KAIST-NUSCOL-9601*, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
- (28) S. Chun, H. J. Chung, S. D. Hong, S. K. Yang, M. K. Chung, 1998, "Effect of Pressure on Critical Heat Flux in Vertical Annulus Flow Channel under Low Flow Conditions," *Proc. 1TH Korea-Japan Symposium on Nucl. Thermal-Hydraulics and Safety*, Pusan, Korea, 342-347, October.
- (29) S. Chun, H. J. Chung, J. K. Park, S. K. Yang, M. K. Chung, 1998, "Critical Heat Flux in Vertical Annulus Geometry Under a Wide Range of Pressures," *Proc. of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Seoul, Korea, October.

- (30) E. Janssen and J. A. Kervinen, 1963, "Burnout Conditions for Single Rod in Annular Geometry, Water at 600 to 1400 psia," GEAP-3899, U. S. Atomic Energy Commission.
- (31) K. M. Becker, G. Hernborg, M. Bode and O. Eriksson, 1965, "Burnout Data for Flow of Boiling Water in Vertical Round Ducts, Annuli and Rod Clusters," AE-177, Aktiebolaget Atomenergi.
- (32) Williams, C. A., and Peterson Jr, A. C., 1975, "Flow Patterns in High Pressure Two-Phase Flow-- A Visual Study of Water in a Uniformly Heated 4-Rod Bundle," WAPD-TM-1199, Bettis Atomic Power Laboratory.