2相 流動에서의 熱傳達(Ⅱ)

——Post-Dryout 領域——

李 永 煥
<韓國에너지硏究所>

1. 序 論

앞서* 언급된 바와 같이 熱傳達領域은 臨界熱流束點(CHF)을 기준으로 pre-CHF 領域과 post-CHF 領域의 두가지로 대별된다. Post-CHF 領域에 해당하는 熱傳達에는 遷移沸騰熱傳達과 膜沸騰熱傳達이 있으며 遷移沸騰은 CHF 點과 最小膜沸騰點 사이에서 일어나는 現象으로 核沸騰과 膜沸騰이 조합된 熱傳達 機構에 해당하고 膜沸騰은 加熱表面이 안정된 蒸氣膜에 의해 덮여 있는 상태의 熱傳達 機構에 속한다. 前稿에서는 pre-CHF 와 CHF 熱傳達 領域의 특성을 살펴보았고 本稿에서는 遷移沸騰과 最小膜沸騰溫度 및 膜沸騰에서의 熱傳達 相關式의 특성을 살펴 보고자 한다.

2. 遷移沸騰 熱傳達

2.1. 熱傳達 機構

遷移沸騰은 그림 1에서 보는 바와 같이 核沸騰 熱傳達 領域과 膜沸騰 熱傳達 領域 사이에서 일어나는 過渡現象으로 臨界 熱流束點과 最小膜沸騰點 사이에서 核沸騰과 膜沸騰이 동시에 일어나는 불안전한 熱傳達 領域이다.

2.2. 遷移沸騰 相關式

이 相關式들은 일반으로 遷移沸騰 熱流束이 臨

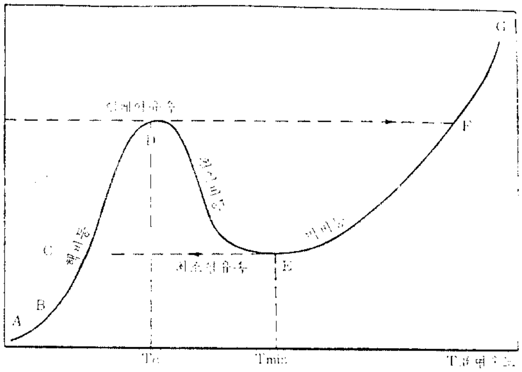

그림 1 비등곡선

界 熱流束과 最小 膜沸騰 熱流束 및 加熱面 溫度의 函數로 표시되며 크게 3가지 유형의 相關式으로 나누어 진다.

(1) 沸騰-對流 相關式

遷移沸騰 領域에서의 熱傳達을 核沸騰과 膜沸騰에 의한 熱傳達의 合으로 생각하는 방법으로 熱傳達 相關式은 일반적으로

$$h=h_b+h_c \tag{1}$$

의 형태로 표시되며 이때의 h_b는 沸騰成分의 熱傳達係數 h_c는 對流에 의한 熱傳達 係數이다.

h_b의 일반적 형태는 壁溫度와 飽和溫度의 차 ΔT_{sat}^n의 함수로 아래와 같이 표시된다.

$$h_b=A\cdot\exp(-B\cdot\Delta T_{sat}^n) \tag{2}$$

여기서 A, B, n는 常數이며 相關式의 특성에 따라 Q_{CHF}, ΔT_{CHF}, P의 함수로 표시되기도 한다. 상수 A, B가 갖는 물리적 의미는 遷移沸騰 熱

* 大韓機械學會誌 第23卷 第6號, pp. 419~426

流束의 최대값이 臨界 熱流束과 일치하도록 하며 一定溫度에서 流體가 가열면에 접촉하는 평균시간 또는 어느 순간에서의 평균 접촉 면적을 기준으로 熱傳達率을 나타내도록 실험에 의해 정하게 된다.

h_c는 蒸氣와 加熱面사이의 對流에 의한 熱傳達率이며 Tong[1]에 의해 제창된 Re 및 Pr-무차원수의 함수로 보는 相關式

$$h_c=f(X_e\cdot D_e\cdot \mu\cdot k)\ Re^a\ Pr^b \tag{3}$$

과 Hsu[2]에 의한 Bromley 相關式[3]의 형태를 갖는 식

$$h_c=f\left(\frac{H_{fg}\rho_g\cdot g\cdot \Delta\rho\cdot k^3}{\Delta T\cdot \mu_g\cdot L}\right) \tag{4}$$

이 사용되고 있다. 저압의 경우에는 복사열의 영향을 고려한 相關式이 Tong에 의해 개발 되었으며 이 相關式들은 표 1에 수록되어 있다.

(2) 現象學的 相關式

이 相關式은 遷移沸騰의 熱傳達現象을 液體-

표 1 비등-대류상관식

Tong	$h_{TB}=7000\exp(-0.008\,\Delta T_{sat})$ $+0.023\frac{K_f}{D_e}\exp\left(-\frac{190}{\Delta T_{sat}}\right)\left(\frac{C_p\mu}{K}\right)_f^{0.4}$ $\left[\frac{D_eG}{\mu_f}\left\{X_e\frac{\rho_f}{\rho_g}+(1-X)\frac{\rho_f}{\rho}\right\}\right]^{0.8}$ * 50～100 atm * lb-ft 단위
	$h_{TB}=9000\exp(-0.0054\,\Delta T_{sat})$ $+0.023\frac{K_f}{D_e}\left[\frac{D_eG}{\mu_f}\left\{X\frac{\rho_f}{\rho_g}+(1-X)\frac{\rho_f}{\rho_l}\right\}\right]^{0.8}\left(\frac{\mu C_p}{K}\right)_f^{0.4}$ $+1.73\times10^{-9}\left(\frac{1-0.6\,\alpha}{1.25-0.15\,\alpha}\right)$ $\left(\frac{T_w^4-T_{sat}^4}{T_w-T_{sat}}\right)$ * 1～5 atm * lb-ft 단위
Hsu	1. $h_{TB}=1456\,P^{0.558}\exp(-3.758\times10^3P^{0.1733}\Delta T_{sat})$ $+0.62\left[\frac{gK_g^3\rho_g(\rho_1-\rho_g)h_{fg}}{\Delta T_{sat}\mu_g}\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g(\rho_1-\rho_g)}{\sigma}}\right]^{1/4}$

加熱面 및 蒸氣-加熱面의 접촉 면적의 比의 變化에 따라 表現한 式이다. 즉 蒸氣와 液體가 加熱面에 접촉하는 면적비를 각각 a_{dry}, a_{wet}라 하면

$$a_{dry}+a_{wet}=1 \tag{5}$$

이 성립되며 總熱流束 Q_{total}은

$$Q_{total}=a_{wet}\cdot q_{CHF}+a_{dry}\cdot q_{min} \tag{6}$$

표 2 Tong-Young 상관식

Tong-Young	$q=q_{TB}+q_{FB}$ $q_{TB}=q_{CHF}\ a_{wet}$ $a_{wet}=e^{-f}(X, \Delta T_{sat}, q_{total}, G)$ $f=\frac{0.001X^{\frac{2}{3}}}{\left(\frac{q_{total}}{GH_{fg}}\right)\left(\frac{4}{D_e}\right)}\left(\frac{\Delta T_{sat}}{100}\right)^{(1+0.0016\Delta T_{sat})}$ $q_{FB}=0.04487\cdot$ $\frac{K_g^{0.4376}Pr_v^{0.2370}Re_f[0.6004+0.2456\ln(1+X_e)]}{D_e^{0.7842}(1+X)^{2.59028}}$ $\cdot\Delta T_{sat}$

로 表現된다. 이때에 a_{wet}는 그 값이 ΔT와 氣泡率의 증가에 따라 점근적으로 零에 수렴한다고 가정하여 지수함수로 보통 表現된다. 즉

$$a_{wet}=\exp[-f(\Delta T, \alpha)] \tag{7}$$

표 2에 주어진 바와 같이 Tong-Young[4]에 의해 제안된 相關式은 이러한 특성을 잘 나타내고 있다.

(3) 實驗相關式

이 相關式은 (1)(2)항의 相關式과는 달리 遷移沸騰의 물리적 특성보다는 주어진 조건의 實驗데이터와 가장 잘 맞도록 커어브 피팅(curve fitting)하여 얻어진 식이다. 표 3에는 지금까지 알려져 있는 實驗相關式을 수록하였다. 표 3에서 Ellion[5]의 相關式은 1～4기압 사이의 실험데이터를 바탕으로 表面過熱度 ΔT_s만의 함수로 表現되어 있으며 McDonough[6]의 相關式은 高壓인 56～140기압 사이의 실험데이타를 중심으로 壓力에 대해 指數函數로 표시되어 있어 저압인 경우 잘 맞지 않는다. Berenson[7]은 푸울沸騰實驗을 통해 遷移沸騰 熱流束은 對數座標에서 臨界 熱流束點과 最小 膜沸騰點을 잇는 직선으로 나타낼 수 있다고 주장하였다. 곧

표 3　천이비등 실험 상관식

Ellion	$q=4.562\times10^{11}\times\Delta T_{sat}^{-2.4}$
Mc Donough	$\dfrac{q_{\mathrm{CHF}}-q}{T_w-T_{\mathrm{CHF}}}=730e^{\frac{576}{P}}$
Berenson	$\dfrac{q}{q_{\mathrm{CHF}}}=\left[\dfrac{T_w-T_{\mathrm{sat}}}{T_{\mathrm{CHF}}-T_{\mathrm{sat}}}\right]^n$ Peterson andZaalouk: $n=-3.0\sim-4.1$ Groeneveld: $n=-1$
Kirchner	$q=q_{\mathrm{CHF}}\left(\dfrac{T_w}{T_{\mathrm{CHF}}}\right)^{XPNT}$ $X\,\mathrm{PNT}=\dfrac{\ln q_{\mathrm{CHF}}-\ln q_{\min}}{\ln T_{\mathrm{CHF}}-\ln T_{\min}}$
Bowring	$q=\delta q_{\mathrm{CHF}}+(1-\delta)q_{\min}$ $\delta=\left(\dfrac{T_w-T_{\min}}{T_{\mathrm{CHF}}-T_{\min}}\right)^2$

$$\frac{q}{q_{\mathrm{CHF}}}=\left[\frac{T_w-T_{\mathrm{sat}}}{T_{\mathrm{CHF}}-T_{\mathrm{sat}}}\right]^n \qquad (8)$$

여기서 n의 값은 Peterson과 Zaalouk[8]에 의해 제안된 $-3.0\sim-4.1$과 Groeneveld에 의한 -1이 널리 사용되고 있다.

臨界 熱流束과 最小 膜沸騰 熱流束 사이의 보간법을 이용하는 방법은 실험 데이터를 바탕으로 약간식 변형되어 原子力發電所의 事故解析코드(code)나 再冠水 解析코드에 사용되고 있다.

3. 最小 膜沸騰 溫度

3.1. 熱傳達 機構

膜沸騰이 일어나고 있는 加熱面의 溫度가 점차 내려가서 물방울이 마침내는 加熱面에 닿게 되는 再水着 現象이 일어나는 점, 또는 遷移沸騰이 일어나고 있는 加熱面의 溫度가 계속 증가하여 안정된 膜沸騰이 시작되는 점의 온도를 Leidenfrost 溫度 또는 最小 膜沸騰 溫度라고 하며 이 온도를 기점으로 양쪽의 熱傳達 領域에서의 熱傳達率이 큰 차이가 나므로 最小 膜沸騰 溫度의 정확한 豫測은 중요한 의미를 갖는다.

Leidenfrost 溫度는 그림 2의 온도-물방울 증발시간 곡선에서 보는 바와 같이 증발시간이 갑자기 감소하는 점의 온도로 정의되며 最小膜沸騰溫度는 그림 1에서와 같이 遷移沸騰에서 膜沸騰으로 이어지는 곡선중의 最小 熱流束點에 해당되는 溫度로 정의된다. 정의는 서로 다르지만 두 現象에 대한 기본원리가 같고 같은 實驗條件에서는 같은 값을 나타내므로 이들 두 온도는 넓은 의미에서 같은 의미로 사용된다[9].

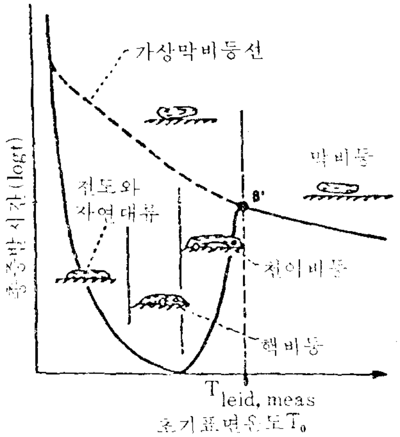

그림 2　물방울 증발 시간 곡선

3.2. 最小 膜沸騰 溫度 相關式

最小 膜沸騰 溫度를 예측하기 위한 모델은 주로 水力學的 理論과 熱力學的 理論에 그 근거를 두고 있으며 熱力學的 平衡狀態를 가정하고 있다.

(1) 水力學的 모델

最小 膜沸騰 熱流束을 구하기 위한 최초의 水力學的 모델을 Taylor의 不安定性 理論을 바탕으로 하여 포화온도 하에서의 액체에 대한 에너지 방정식을 이용하여 Zuber[10]에 의해 개발되었다. 곧 最小 熱流束는

$$q_{\min}=H_{fg}\cdot\rho_g\cdot\frac{4\pi}{3}\left(\frac{\lambda_c}{4}\right)^3\left(\frac{2}{\lambda^2_c}\right)\cdot f \qquad (9)$$

로 나타내며 여기서

$$臨界波長\ \lambda_c=2\pi\left[\frac{\sigma}{g(\rho_l-\rho_g)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$臨界周波數\ f=\left[\frac{2\pi\sigma}{\lambda_c^3(\rho_l+\rho_g)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

로 표시된다.

Berenson[11]은 액체-기체 경계면에서의 연속, 운동량의 방정식으로 부터 생성 기포의 膜의 두께 a를 아래와 같이 구하고 실험으로 상수

표 4 최소 막비등 온도 상관식(수력학적 모델)

	방 정 식	참 고
Berenson	$(\Delta T)_{\min}=0.127\frac{H_{fg}}{k_{vf}}\left[\frac{g(\rho_1-\rho_g)}{\rho_1+\rho_g}\right]^{2/3}\left[\frac{g_0\sigma}{g(\rho_1-\rho_g)}\right]^{1/2}\left[\frac{\mu_f}{g_0(\rho_1-\rho_g)}\right]^{1/3}$	※ ft-lb 단위
Henry	$(\Delta T)_{\min}=(\Delta T)_{\min},B+[(\Delta T)_{\min},B-T_1]$ $0.42\left[\sqrt{\frac{k_1\rho_1c_1}{k_w\rho_wc_w}}\cdot\frac{H_{fg}}{c_w(\Delta T)_{\min}B}\right]^{0.6}$ $(\Delta T)_{\min},B$: Berenson 상관식의 $(\Delta T)_{\min}$	※ft-lb 단위
Iloeje	$(\Delta T)_{\min}=0.29(\Delta T)_{\min,B}(1-0.295X)^{2.45}\{1+(G\times10^{-4})^{0.49}\}$	For 40000<G<100000 lbm/hr-ft²

표 5 최소 막비등 상관식(열역학적 모델)

Spiegler, et al	$\frac{T_{\min}}{T_{crit}}=\frac{27}{32}$
Simon et al	$\frac{T_{\min}}{T_{crit}}=0.13\frac{P}{P_{crit}}+0.86\pm0.06$
Kalinin, et al.	$\frac{T_{\min}-T_{sat}}{T_{crit}-T_L}=1.65\left[0.1+1.5\left\{\frac{(\rho CK)_L}{(\rho CK)_W}\right\}^{0.25}+0.6\left\{\frac{(\rho CK)_L}{(\rho CK)_W}\right\}\right]$
Leinhard	$\frac{T_{Leid}-T_{sat}}{T_{crit}}=\left(1-\frac{T_{sat}}{T_{crit}}\right)-\frac{27}{32}\left[1-\left(\frac{T_{sat}}{T_{crit}}\right)^{5.16}\right]$ $\frac{T_{Leid}-T_{sat}}{T_{crit}}=\left(1-\frac{T_s}{T_{crit}}\right)-0.905\left[1-\left(\frac{T_{sat}}{T_{crit}}\right)^{8}\right]$ (비금속성재질)
Baumeister & Simon	$T_{Leid}=\frac{\frac{27}{32}\ T_{crit}\left\{1-\exp\left[-0.52\left(\frac{10^4(\rho/A)^{4/3}}{\sigma_{LV}}\right)^{4/3}\right]\right\}-T_l}{\exp(0.00175\beta)\mathrm{erfc}(0.042\sqrt{\beta})}+T_l$

2.35를 결정하였으며

$$a=2.35\left[\frac{\mu_fk_{fg}\Delta T}{H_{fg}\rho_{fg}g(\rho_l-\rho_g)}\sqrt{\frac{g_c\sigma g}{(\rho_l-\rho_g)}}\right]^{1/4} \tag{10}$$

熱傳達 係數 h의 값은

$$h=\frac{k_{fg}}{a} \tag{11}$$

로서 정의하여 h를 구하였다.

표 4에는 위와같이 구한 $\dot{q}_{\min}$을 h로 나눈 값 곧 $\Delta T_{\min}$을 몇가지 표시하였다. Iloeje[12]는 Berenson의 $T_{\min}$이 流量과 퀄리티의 함수로 표시할 수 있다는 가정하에 식 (12)를 주장하였고

$$\Delta T_{\min}=\Delta T_{\min\ \mathrm{Berenson}}\cdot(1-AX)^n\cdot(1+BG^m) \tag{12}$$

상수 A, B,n,m을 실험을 통해 결정하였다. 이 밖에 Henry[13]의 상관식은 Berenson의 상관식을 토대로 加熱面과 액체의 접촉 및 접촉면에서의 液體微少境界層의 영향등을 고려하고 있다.

(2) 熱力學的 모델

Spiegler[14]는 안정된 膜沸騰이 일어나는 壁溫度는 액체가 過熱될 수 있는 최고온도로 가정하며 이때의 상태는 Van der Waals 방정식으로 계산될 수 있다는 가정하에 狀態量 $T_{\min}$을 구하였다. 곧 Van der Waals式

$$P'=\frac{8T'}{3\left(V'-\frac{1}{3}\right)}-\frac{3}{(V')^2} \tag{13}$$

$$P'=\frac{P}{P_{crit}},\quad V'=\frac{V}{V_{crit}},\quad T'=\frac{T}{T_{crit}}$$

에서

最大過熱溫度 T'_{Min} 에서는

$$\left(\frac{\partial P'}{\partial V'}\right)_{T'}=0$$

인 조건을 이용하여 얻은 식을 식 (13)에 대입하여 관계식을 얻고 P' 를 영으로 놓으면 식 (14)를 얻는다.

$$T'_{\mathrm{Min}}=\frac{T_{\mathrm{min}}}{T_{\mathrm{crit}}}=\frac{27}{32} \tag{14}$$

윗 식에서 T_{min} 을 구할 수 있다.

표 5는 熱力學的 理論을 근거로 도출된 상관식들이다. Simon의 식은 실험을 토대로 壓力의 영향을 고려 하였고 Leinhard의 식은 臨界 溫度와 飽和溫度의 函數로 표시하여 상수는 실험에 의해 구했고 Baumeister와 Simon[15]을 물방울이 가열면에 접촉할 때의 열전도와 액체-가열면의 表面張力을 고려한 상관식을 제안하였다. 이밖에 Kalinin의 식은 수직 水路에서 强制對流와 自然對流 實驗을 통해 얻어졌다.

4. 膜沸騰 熱傳達

4.1. 熱傳達 機構

加熱面의 溫度가 最小 膜沸騰 溫度(또는 Leidenfrost 溫度)이상인 경우 加熱面과 液體사이에 氣泡가 생성되고 氣泡주위의 蒸氣는 계속 氣泡內로 流入되어 氣泡는 成長하고 어느 정도의 크기에 이르면 氣泡가 깨어지는 現象이 일어난다. 이 現象이 거듭됨에 따라 蒸氣生成이 증대하여 마침내는 加熱面에 蒸氣膜이 形成되는데 이러한 熱傳達 機構를 膜沸騰 熱傳達이라고 한다. 그림 3에 加熱面流路內를 液體가 흐를 때의 沸騰樣式을 流量이 큰 경우와 작은 경우에 대해 개략적으로 표시하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 流量이 적을 경우는 스러그流(slug 流)가 形成이 되며 流量이 큰 경우에는 水柱가 형성되어 水柱와 加熱面 사이에 發生蒸氣로 둘러 싸이게 되는 蒸氣膜 環狀流가 형성된다. 이 領域에서는 生成蒸氣의 체적 팽창에 의해 蒸氣流動速度는 점차 커져서 나중에는 亂流 現象이 일어나

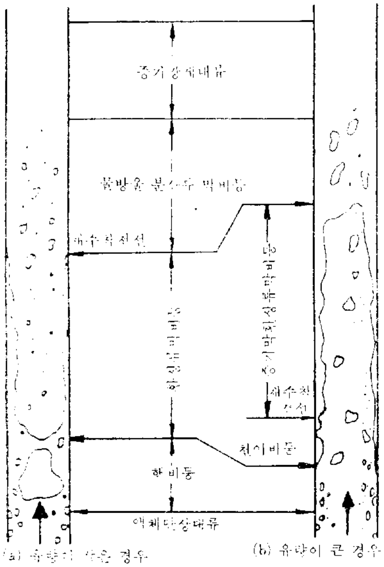

그림 3 비등 유도 양식

液體-蒸氣面에 波動이 일어나며 蒸氣速度가 어느값 이상이 되면 液體가 水柱에서 분리되는 液體同伴(liquid entrainment) 現象이 나타난다. 이때의 현상을 물방울 分散流 膜沸騰이라고 하며 계속 下流로 가면 물방울도 蒸發되어 없어지는 單相 蒸氣에 의한 强制對流 領域에 속하게 된다.

4.2. 膜沸騰 熱傳達 相關式

(1) 蒸氣膜 環狀流 相關式

이 領域에서 대표적인 實驗的 相關式은 Bromley 相關式[3]이다. Bromley는 膜凝縮에 대한 Nusselt 理論을 膜沸騰에 적용하여 水平管에 대한 다음과 같은 式을 구하였다.

$$h=h_{\mathrm{con}}+\frac{3}{4}h_{\mathrm{rad}} \tag{15}$$

여기서 h_{con} 은 對流를 고려한 항이고 h_{rad} 는 복사열을 고려한 항이며

$$h_{\mathrm{con}}=c\left[\frac{K_f{}^3\delta_f\cdot(\delta_l-\delta_f)gH_{fg}}{\mu_f\cdot D\cdot\Delta T_{\mathrm{sat}}}\right]^{1/4} \tag{16}$$

$$h_{\mathrm{rad}}=5.67\times10^{-8}(T_w{}^4-T_{\mathrm{sat}}{}^4)/\left(\frac{1}{\varepsilon_w}+\frac{1}{\varepsilon_l}-1\right)\Delta T_{\mathrm{sat}} \tag{17}$$

식 (16)과 (17)로 표시된다.

그는 實驗을 통해 c의 값을 0.62로 정하였으며 垂直管의 경우에도 特性길이 D를 가열길이로 대치 하므로써 식 (16)을 적용할 수 있다고 주장하였으나 加熱길이의 적용 범위에 대해서는 언급이 되어있지 않다.

Berenson[11]은 식 (16)에서 特性 길이 D를 Laplace계수로 대치 하였고 Sudo[16]는

표 6 증기막 환상류 막비등 실험 상관식

Bromley	$h=h_{\mathrm{CON}}+3/4\,h_{\mathrm{rad}}$ $h_{\mathrm{CON}}=0.62\left(\dfrac{k_f^3 g\rho_v(\rho_1-\rho_f)h'_{fg}}{D\mu_f\Delta T_{\mathrm{sat}}}\right)^{\frac{1}{4}}$ $h_{\mathrm{rad}}=\dfrac{5.67\times10^{-8}(T_w^4-T^4_{\mathrm{sat}})}{\left(\dfrac{1}{\varepsilon_w}+\dfrac{1}{\varepsilon_l}-1\right)\Delta T_{\mathrm{sat}}}$ $h_{fg}'=H_{fg}\left(1+\dfrac{0.4C_p\,\Delta T_{\mathrm{sat}}}{H_{fg}}\right)^2$
Berenson	$h_{FB}=0.425$ $\left\{\dfrac{K_f^3 g\rho_f(\rho_1-\rho_f)h_{fg}}{\mu_f\Delta T_{\mathrm{sat}}\sqrt{g\dfrac{\sigma}{(\rho_1-\rho_f)}}}\right\}^{\frac{1}{4}}$
Sudo. Y	a) 포화 $h_{\mathrm{csat}}=0.94\left[\dfrac{k_f^3\gamma_f(\gamma_l-\gamma_f h_{fg}'}{L\mu_f\,\Delta T_{\mathrm{sat}}}\right]^{\frac{1}{4}}$ b) 亞冷却 $h_{\mathrm{csub}}=h_{\mathrm{csat}}(1+0.025\,\Delta T_{\mathrm{sat}})$ $+\dfrac{3}{4}h_{\mathrm{rad}}$
Murao. Y	$h=0.94\left(\dfrac{k_g^3\,\rho_g\,\rho_l\,H_{fg}\,g}{L\mu_g\,\Delta T_{\mathrm{sat}}}\right)^{\frac{1}{4}}(1-\alpha)^{\frac{1}{4}}$ $+E\delta(1-\alpha)\dfrac{1}{2}(T_w^2-T^2_{\mathrm{sat}})/\Delta T_{\mathrm{sat}}$ E : 복사율 δ : Stephan-Boltsmann의 상수
Modified Ellion	$h=0.537\left(\dfrac{k_g^3\,\rho_g\,\rho_l\,H_{fg}\,g}{L\,\mu_g\,\Delta T_{\mathrm{sat}}}\right)^{\frac{1}{4}}$ $*(1/\times)^{2.09}\sqrt{V_{\mathrm{in}}}$

Bromley의 상관식에 亞冷却(Subcooled) 効果를 고려한 상관식을 개발하였다. Murao[17]는 Bromley의 식에 보이드率을 고려하였으며 Ellion은 注入流量을 고려 하였다. 이들의 相關式은 표 6에 수록되어 있다.

(2) 물방울 分散流의 膜沸騰 相關式

이 相關式들은 기본적으로 强制對流 相關式으로 넓리 알려져 있는 Dittus-Boelter 相關式에 근거를 두고 있으며 熱的 不衡狀態 즉 飽和狀態下의 氣體와 均質流動(미끄름율=1)을 가정하여 개발된 식들이다. 이들의 상관식은 표 7에 수록되어 있다.

표 7 물방울 분산류 막비등 실험 상관식

Polomik	$Nu_f=0.416\,Re_f^{0.598}Pr_f\dfrac{1}{3}\left(\dfrac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.288}$ $\left(\dfrac{1-x}{X}\right)^{0.616}$
Bishop	$Nu_f=0.0193Re_f^{0.8}Pr_f^{1.23}\left(\dfrac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.068}$ $\left[x+\dfrac{\rho_g}{\rho_l}(1-x)\right]^{0.68}$
Groeneveld	$Nu_g=a\left[Re_g\left(x+\dfrac{\rho_g}{\rho_l}(1-x)\right)\right]^b Pr_w^c$ $Y^d\ \phi^e$ ϕ in Btu/h·ft² $a=1.85\times10^{-4}$ $b=1.00$ $c=1.57$ $d=-1.12$ $e=0.131$
Herkenrath	$Nu=0.06Re_w\left(x+\dfrac{\rho_g}{\rho_l}(1-x)\right)\dfrac{\rho_w}{\rho_g}Pr_w\Big]^{0.8}$ $\left(\dfrac{G}{G_0}\right)^{0.4}\left(\dfrac{P}{P_c}\right)^{2.7}$ $G_0=10^3\,\mathrm{kg/m^2/s}$, P_c=임계압력
Tong	$Nu_w=0.005\left(\dfrac{De\,U_m\,\rho_w}{\mu_w}\right)^{0.8}Pr_g^{0.5}$
Slaughterbeck	$Nu_g=1.604\times10^{-4}\left[Re_g\left(x+\dfrac{\rho_g}{\rho_l}(1-x)\right)\right]^{0.838}$ $Pr_w^{1.81}\phi^{0.278}\left(\dfrac{K_g}{K_{\mathrm{crit}}}\right)^{-0.508}$ ϕ in Btu/h·ft²

위와같은 相關式 외에 최근에는 大型電算機의 등장으로 質量, 運動量, 에너지의 保存方程式을 이용하여 복잡한 膜沸騰 現象을 解析하는 방법이 제시되고 있다.

5. 맺음말

근래에 와서 原子力發電所 事故時의 安全性 評價와 관련하여 2相 流動 熱傳達에 관해 활발히

研究가 수행되어 왔으며 많은 相關式들이 개발되었으나 實驗遂行 範圍 때문에 이 式들의 適用範圍는 制限을 받고 있다. 한편 理論的 모델을 利用한 解析方法의 結果는 모델 설정과 사용된 가정에 따라 많은 차이를 나타내고 있으므로 이들의 使用에는 신중을 기해야 할 것이다.

참 고 문 헌

(1) L.S. Tong., "Heat Transfer Mechanism in Nuclear and Film Boiling", Nucl. Eng. and Design 21, 1-25, 1972.

(2) Y.Y. Hsu., "A Tentative Correlation for the Regime of Transition Boiling and Film Boiling During Reflood", WRSR Information Meeting U.S.N.R.C. 1975.

(3) L.A. Bromley., "Heat Transfer in Stable Film Boiling", Chem. Eng. Prog. 46(5) 221, 1950

(4) L.S. Tong and J.D. Young., "A Phenomenological Transition and Film Boiling Heat Transfer Correlation", Proc. 5th Int. Heat Transfer Cont, Tokyo 1974.

(5) M.E. Ellion., "A Study of the Mechanism of Boiling Heat Transfer", JPL-Memo 2-28 Pasadena Ca. 1954.

(6) J.B. McDonough., W. Milich and E.C. King, "An Experimental Study of Partial Film Boiling Region with Water at Elevated Pressure in a Round Vertical Tube", Chem. Eng. Prog. Sym. Series No. 32, Vol. 57, 197-208, 1961

(7) P.J. Berenson., "Experiments on Pool-Boiling Heat Transfer", Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 5, p. 985, 1962

(8) W.C. Peterson and M.G. Zaalouk., "Boiling-Curve Measurements from a Controlled Heat Transfer Process", Trans ASME J. of Heat Transfer, p. 408, 1971

(9) Y.Y. Hsu and R.W. Graham., "Transport Process in Boiling and Two-phase systems", Hemisphere Publishing Corp. 101, 1976

(10) N. Zuber., "On the Stability of Boiling Heat, Transfer", Trans of ASME 80, p. 711, 1958

(11) P.J. Berenson, "Film-Boiling Heat Transfer from a Horizontal Surface", J. Heat Transfer p. 351 Aug. 1961

(12) O.C. Iloeje., D.N. Plummer and P. Griffitht, "An Investigation of the Collapse and Surface Rewet in Film Boiling in Forced Vertical Flow", J. Heat Transfer p. 166, 1975

(13) R.E. Henry., "A Correlation for the Minimum Film Boiling Temperature", AICHE Symp. Ser. 70, 138, p. 81, 1974

(14) P. Spiegler et al., "Onset of Stable Film Boiling and the Foam Limit", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 6, p. 987, 1964

(15) K.J. Baumeister and F.F. Simon., "Leidenfrost Temperature-Its Correlation for Liquid Metals, Cryogens, Hydrocarbons and Water", J. Heat Transfer, p. 166, May, 1973

(16) Y. Sudo., "Film Boiling Heat Transfer During Reflood Phase in Posturated PWR Loss of Coolant Accident", J. Nul. Sci. Techn. 17, (7)p. 516, 1980

(17) Y. Murao and J. Sugimots., "Correlation of Heat Transfer Coefficient for Saturated Film Boiling during Reflood Phase Prior to Quenching", J. Nucl. Sci. Techn. 18(4) p. 275, 1981

◇