2相 流動에서의 熱傳達(Ⅰ)

——Pre-Dryout 領域——

李 永 煥
<韓國에너지硏究所>

1. 序 論

科學, 工業技術의 發展으로 增加하는 電力需要에의 원활한 供給을 위해 에너지源이 부족한 우리나라에서는 原子力 發電에 의한 電力確保方案이 脚光을 받게 되었다. 우리나라에서 주로 건설되고 있는 原子爐는 加壓輕水爐가 主軸을 이루고 있으며 그의 系統은 크게 1次系統과 2次系統으로 대별된다. 1次系統에서의 熱傳達機構(正常, 過渡 및 事故時의)를 이해하기 위해서 그림 1을 살펴 보기로 한다. 그림 1은 가열표면의 過熱度와 그 표면에서의 熱流束과의 관계를 定性的으로 표시한 沸騰曲線을 표시한다. 그림 1에서 線分 AB는 單相(液相)에 의한 熱傳達을 표시하며 BC는 2相에 의한 이른바 核沸騰(nucleate boiling) 領域에서의 熱傳達을 표시한다. 原子爐의 正常 또는 過渡 狀態時에 1次系統의 熱傳達 現象은 BC 領域에 속하게된다. 이 領域에서는 表面過熱度가 커짐에 따라 기포의 발생이 점점 많아지면서 熱流束이 급격히 증가해서 결과적으로 좋은 熱傳達 效果를 나타내게 된다.

기포의 발생이 점점 많아져서 液體가 加熱表面에 닿지못하게 되는 순간점이 점 C로 표시되며 이 現象을 드라이 아웃(dryout), 沸騰危機(boiling crisis), 번아웃(burnout), 核沸騰離脫(DNB) 등으로 표시 하는데 이때의 加熱表面 溫度를 臨界溫度, 熱流束을 臨界熱流束(CHF)이라고 한다. 原子爐의 正常稼動時에는 臨界熱流束 q''_{CHF}와 原子爐內의 局部熱流束 q''_{local}의 比가 安全性 確保上 1.3 이상이 되도록 規制되어 있다.

線分 ABC 領域을 pre-CHF 領域이라고도 하며 線分 CDE 領域을 post-CHF 領域이라고 하는데 post-CHF 領域은 原子爐 1次系統의 冷却材喪失事故時 安全注入에 따라 일어나는 現象이다. 이 領域은 線分 CD로 표시되는 遷移沸騰(transition boiling)과 線分 DE로 표시되는 膜沸騰(film boiling)으로 구분된다. 點 D는 最少膜沸騰溫度이며 Leidenfrost 溫度 또는 再水着溫度라고도 한다. 그림 1에 표시되어 있는바와 같이 遷移沸騰領域은 核沸騰과 膜沸騰 사이에 있어 이 두개의 複合된 熱傳達 機構에 속하며 膜沸騰은 加熱表面이 완전히 蒸氣膜에 의해 덮여 있는 狀態에서의 熱傳達 領域에 속한다. 위와 같이 原子爐의 正常, 過渡, 事故時의 運轉에 대

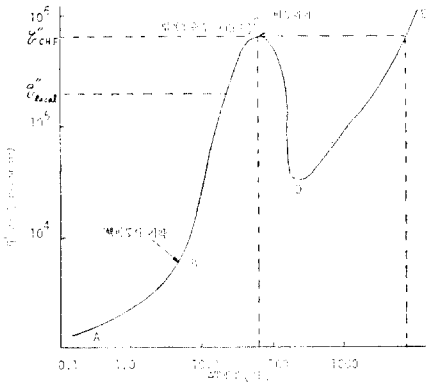

그림 1 膜(film) 溫度差에 대한 熱流束의 變化(沸騰系統)

비하여 각 沸騰領域에서의 熱傳達現象을 定量的으로 파악하고 豫測하는것이 중요하므로 이에 관련하여 많은 硏究가 이루어져 수많은 相關式이 발표되었는데 이중에서(pre-dryout 領域에서의) 대표적인 몇개의 相關式에 대하여 그의 특성을 살펴 보기로 한다.

2. Pre-Dryout 領域

2.1. 單相領域

그림 1에서 線分 AB에 해당하는 領域이므로 이때의 熱傳達은 전형적인 熱傳達 相關式인 Dittus-Boelter 의 식

$$Nu=0.023\,Re^{0.8}Pr^{0.4} \tag{1}$$

이 적용된다.

2.2. 核沸騰領域(Pool Boiling)

그림 1에서 線分 BC의 領域을 말하며 많은 硏究者들이 이 領域에서의 相關式을 도출하는데 있어서 전형적인

$$Nu=a\,Re^{m}Pr^{n} \tag{2}$$

의 Nusselt 이론식을 적용하려고 노력하였다. 단지 이 相關式이 종래의 單相 熱傳達의 경우의 相關式과 다른점은 式 (2)에 포함되어 있는 特性變數나 無次元數를 沸騰現象에 관계되는 다른 영향변수로 대치한 것이 그 특색이라고 하겠다. 어떤 變數를 어떻게 대치 하였는지 살펴보기로 한다.

(1) 特性길이(d)

Nu 또는 Re 무차원수에 나타나는 特性길이 d를 生成氣泡의 離脫直徑으로 대치한 것으로 Rohsenow 相關式[1]에서 볼 수 있다. 氣泡의 離脫直徑(D_b)은 氣泡의 부력에 의한 힘과 氣泡의 表面張力과의 힘의 균형에 의해 구해질 수 있으며

$$D_b=\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l-\rho_v)}} \tag{3}$$

의 式으로 표시된다. 여기서 σ는 表面張力, g는 重力의 가속도, ρ_l 및 ρ_v는 각 液體와 蒸氣의 밀도를 표시한다.

특성길이를 표시하는데 또 다른 방법이 있다. 일반으로 氣泡生成이 등압하에서 이루어진다고 가정하여 열전도 방정식을 취하고 液相과 氣相 사이에서 상호간섭되는 물질수지로 얻은 식과 연립해서 풀면[2] 氣泡半徑 $R(t)$는

$$R(t)=2c\sqrt{\alpha_l t} \tag{4}$$

로 표시되는데 여기서 α_l은 液體의 열 확산율, t는시간, c는 Jakob 무차원수의 함수이며 Jakob 무차원수는 다음과 같이 표시된다.

$$J_a=\frac{\rho_l c_l}{\rho_v H_{fg}}(T_{sup}-T_{sat}) \tag{5}$$

여기서 C_l은 液體의 比熱 H_{fg}는 증발잠열, T_{sup}는 過熱溫度, T_{sat}는 飽和溫度이다.

Forster 와 Zuber[3]는 식 (4)의 상수 c를 J_a 무차원수의 $\frac{\sqrt{\pi}}{2}$배로 정하므로 氣泡半徑 R을

$$R=\sqrt{\pi}J_a\sqrt{\alpha_l t} \tag{6}$$

로 표시하고 이것의 2배를 Re 무차원수의 특성길이로 정하였다.

(2) 속도(u)

Rohsenow 는 氣泡의 속도를 열유속 q''와 증발잠열 H_{fg}에 의한 蒸氣의 열함량의 比로 정하여

$$u=\frac{q''}{H_{fg}\rho_v} \tag{7}$$

로 표시한 반면 Forster 와 Zuber 는 식 (6)에서 반경 R의 시간적 변화율인 $\frac{dR}{dT}$를 u로 정하였다. 곧

$$u=\frac{dR}{dt}=\frac{\sqrt{\pi}}{2}J_a\sqrt{\frac{\alpha_l}{t}} \tag{8}$$

(3) Nu 무차원수

Nu-무차원수는 일반적으로 아래와 같이 정의되며 δ는 특성길이, k_l은 液體의 熱傳導度이다.

$$Nu=\frac{q''\delta}{\Delta T k_l}=\frac{h\delta}{k_l} \tag{9}$$

Rohsenow 는 δ 대신에 식 (3)을 이용 하였으나 Forster 와 Zuber[4]는 δ에 식 (6)을 적용 하지 않고 시간에 무관한 특성반경

$$R=\left(\frac{c_l\delta_l\Delta T\sqrt{\pi\alpha_l}}{H_{fg}\rho_v}\right)\left(\frac{2\sigma}{p_v-p_\infty}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\rho_l}{p_v-p_\infty}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{10}$$

을 사용하였다.

이와같이 각 特性길이나 무차원수를 정의한

다음에 실험적으로 Rohsenow 는

$$\frac{RePr}{Nu}=a\cdot Re^{m}Pr^{n} \qquad (11)$$

의 相關式을 개발하였고 상수 a, m, n 로는 각 0.013, 0.33, 1.7 을 제안하였다.

한편 Forster 와 Zuber 도 상기 特性길이들을 도입하여 相關式

$$Nu=a\cdot Re^{m}Pr^{n} \qquad (12)$$

을 개발 하였으며 상수 a, m, n 로는 각 0.0015, 0.62, $\frac{1}{3}$을 제안하였다.

그림 2 는 Rohsenow 의 물에 대한 沸騰實驗結果와 相關式을 비교한 것이며 그림 3 은 여러물체에 대한 Forster-Zuber 의 實驗結果와 相關式의 비교도를 나타내고 있으며 두 相關式들은 實驗結果에 대해 비교적 잘 相關시켜주고 있다. 그러나 West Water[5]는 "Forster-Zuber 의 相關

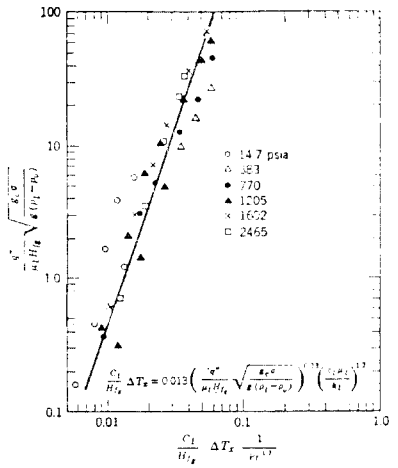

그림 2 Rohsenow 相關式과 實驗値와의 비교

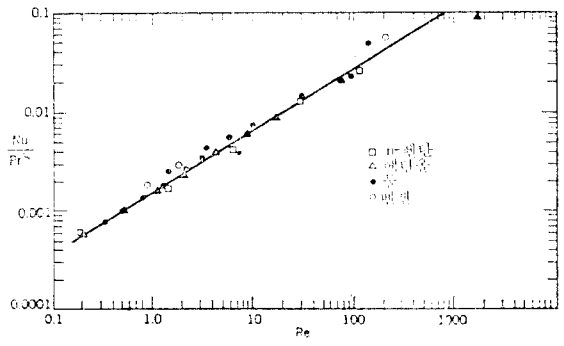

그림 3 Forster-Zuber 相關式과 實驗値와의 비교

표 1 Rohsenow 와 Forster-Zuber 의 상관식

1. 氣胞生成과 微視的 對流에 근거한 상관식들

Rohsenow18)	$Nu_b=\frac{1}{C_{sf}}\,Re_b^{1-n}Pr^{-m}$ $n=0.33,\ m=0.7$ $Nu_b=\frac{h}{k_f}\left[\frac{\sigma}{g(\rho_f-\rho_g)}\right]^{\frac{1}{2}}$ $Re_b=\frac{\phi}{h_{fg}\rho_f}\cdot\left[\frac{\sigma}{g(\rho_f-\rho_g)}\right]^{\frac{1}{2}}\cdot\frac{\rho_f}{\rho_g}$ $h=\phi/\Delta T_{sat}$
Forster 20) -Zuber	$Nu_b=0.0015\,Re_b^{5/8}\,Pr^{1/3}$ $Nu_b=\frac{h}{k_f}\cdot\frac{\Delta T_{sat}\,Cp_f\,\rho_f}{h_{fg}\,\rho_g}$ $\left(\frac{\pi k_f}{\rho_f Cp_f}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\rho_f r^{*3}}{2\sigma}\right)^{\frac{1}{4}}$ $Re_b=\frac{\rho_f}{\mu_f}\left(\frac{\Delta T_{sat}\,k_f}{\rho_g h_{fg}}\right)^2\frac{\pi k_f}{\rho_f Cp_f}$ $h=\phi/\Delta T_{sat}$ $r^*=\frac{R\,T_{sat}^2}{h_{fg}\,M}\cdot\frac{2\sigma}{P\Delta T_{sat}}$ R : 일반 기체 상수 M : 분자무게

式은 한눈에 Re 와 Pr 의 지수가 單相强制對流熱傳達에 사용되는 식들과 비슷한 값을 갖고 있는것이 타당성 있게 보이며 Rohsenow 의 相關式에서는 Pr-무차원수의 지수가 음의 값을 갖고 있어 非論理的으로 보인다. 한편으로 Forster-Zuber 의 相關式은 過熱表面에서의 液體沸騰(all heterogeneous cases)에 있어서나 體積沸騰(bulk boiling-homogeneous case)에 대해서 熱傳達係數를 같게 예측하나 두가지 경우에 같은 식을 적용하는데 대한 타당성은 큰 의문점으로 남아 있으며 Rohsenow 의 相關式은 非均質(heterogeneous)의 경우에 대해서만 식이 유도 되었고 또한 적용될 수 있다"고 지적하고 있다. 表 1 에 Rohsenow 와 Forster-Zuber 의 相關式이 요약해서 표시되어 있다.

이밖에 식 (2)의 접근방법에 따른 相關式으론 Levy[6], Stephan[8], Kutateladze[7] 相關式등이 있으며 表 2 에 표시되어 있다.

이와는 대조적으로 表面過熱度 ΔT 는 熱流束 q'' 와 系의 壓力의 함수로 보는 經驗的 有次元의 相關式 곧

표 2 푸울비등(pool boiling) 상관식

Levy	$\phi=\frac{k_f Cp_f \rho_f^2}{\delta\, T_{sat}(\rho_f-\rho_g)}\cdot\frac{1}{B_L}\cdot \Delta T_{sat}^3$ $(x\leq 0)$, $\phi=\frac{k_f Cp_f \rho_f^2}{\sigma\, T_{sat}(\rho_f-\rho_g)}\cdot\frac{1-x}{B_L}\cdot \Delta T_{sat}^3$ $(x>0)$ B_L : 실험적 상관계수$(\rho_g h_{fg})$
Kutateladze-Borishanskii	$\frac{h}{\phi^{0.7}}=0.44\,k_f\left(\frac{\rho_f-\rho_g}{\delta}\right)^{\frac{1}{2}}\mathrm{Pr}^{0.35}\times\left(\frac{P}{3,600\,h_{fg}\rho_g\mu_f g}\cdot\frac{\rho_f}{\rho_f-\rho_g}\right)^n$ $n=\begin{cases}0.7 & \text{새로운 표면}\\ 0.6 & \text{오래된 표면}\end{cases}$ P : 기압
Kutateladze	$\mathrm{Nu}_b=1.5\times10^{-3}K_*$ $K_*=Cp_f\phi P/(gk_f h_{fg}\rho_g)$ $\mathrm{Nu}_b=h\delta_*/k_f$ δ_* : Laplace 상수
Stephan	$\mathrm{Nu}_b=0.071\,K_1^{0.7}K_2^{0.3}K_3^{0.133}$ $K_1=\phi d/k_f\,T_{sat}$ $K_2=(d\cdot T_{sat}\,k_f\,\rho_f)/\mu_f\sigma$ $K_3=R_p\rho_g h_{fg}/(fd)^2\cdot d\cdot\rho_f$ f : 氣胞진동수, $fd^2=3.06\ \mathrm{m^2/sec}$ R_p : 평균조도 DIN(Deut. Ind. Norm) 4762

표 3 발달된 핵비등에서의 상관식

McAdams	$\phi=0.074\ \Delta T_{sat}^{3.86}$ ϕ : Btu/hr·ft²·°F ΔT_{sat} : °F
Jens-Lottes*	$\Delta T_{sat}=25\,\phi^{0.25}\exp(-p/62)$
Thom et al.*	$\Delta T_{sat}=22.65\,\phi^{0.5}\exp(-p/87)$
Weatherhead	$\Delta T_{sat}=0.18\times10^6\,\sigma(\phi/10^6)^{0.25}$ σ : $(500-0.707\,T)\times10^{-6}$ $\mathrm{Lb}_f/\mathrm{in}$ ϕ : Btu/hr·ft²·°F ΔT_{sat} : °F
Borishanskii **	$h=A^*\phi^{0.7}F(p)$ $A^*=0.1011\,P_{cr}^{0.69}$ $F(p)=1.8\,P_R^{0.17}+4\,P_R^{1.2}+10\,P_R^{10}$ 여기서 $P_R=P/P_{cr}$ 이고 P_{cr}은 유체의 임계압력

* P(bar), ΔT_{sat}(°C), ϕ (W/m²·°C)
** 모든 변수는 SI 단위

$$\Delta T_{sat}=f(p)\cdot q''^n \qquad (13)$$

의 형태를 갖는 相關式이 있다. 이 相關式들은 완전히 발달된 核沸騰에서는 加熱表面의 溫度는 液體의 流速이나 서브쿨링(subcooling)度의 變化에 관계없이 系의 壓力과 熱流束에 一定하다는 實驗的인 結果에 근거를 두고 있다. 이 부류에 속하는 相關式은 McAdams[9], Jens-Lottes[10], Thom et al.[11], Weatherhead[12], Borishanskii[13] 相關式 등이며 표 3에 그 式들을 표시하였다.

지금까지는 流體의 流動을 고려하지 않은 경우에 대해서 기술하였으나 流體의 流動이 고려되는 경우에 대해서 살펴보기로 한다.

2.3. 强制對流蒸發(Forced Convection Vaporization)

(1) 機 構

流路內를 흐르는 流體가 계속 가열되어 飽和溫度에 도달하면 沸騰現象이 加熱表面에 국한되지 않고 流體內에서 體積沸騰(bulk boiling)이 일어난다. 體積沸騰이 일어남에 따라 流路의 下流에서는 蒸氣發生이 增大되어 流路內部에 蒸氣코어(core)가 형성하게 되므로 流動形態는 內部는 蒸氣, 加熱壁에 둘러싸인 外部는 液體膜으로 덮여있는 環狀流로 바뀌게 된다. 이때의 일반적 특성은 加熱表面에서 방출되는 熱이 液體膜을 통해 蒸氣코어 쪽으로 전달되고 蒸氣코어와 液體膜의 경계면에서는 蒸發에 의해 熱이 傳達된다. 따라서 流路下流로 갈수록 蒸氣의 量이 증가할뿐 아니라 相變化時의 體積팽창에 의해 蒸氣코어의 流速은 液體膜의 流速에 비해 매우 크며 또한 加熱表面에 둘러싸여 있는 液體膜이 점점 얇아지게 된다. 液體膜이 얇아지면 液體膜內에서의 核沸騰現象이 일부 또는 완전히 소멸된다. 그림 4에 核沸騰 現象의 소멸과정이 도시되어 있다[14]. 퀄리티(quality)가 낮을때에는 液體膜이 두껍기 때문에 주어진 熱流束에 대하여 加熱表面溫度가 沸騰開始溫度(T_{ONB})보다 높아 液體膜內에서 核沸騰現象이 존재 하지만 퀄리티가 커짐에 따라 液體膜이 얇아져 加熱表面溫度

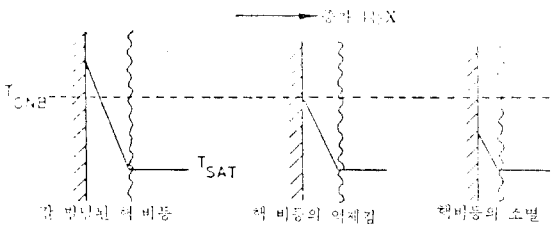

그림 4 環相流에서의 핵비등의 억제기구

가 T_{OVB}보다 낮아져서 결과적으로 核沸騰 現象이 일부 또는 전부 소멸되어 熱傳達의 性格은 强制對流로 변하게 된다. 이러한 熱傳達機構의 變化는 그림 5로 잘 설명될 수 있다.

그림 5는 Lockhart-Martinelli Parameter[15]에 대한 2相流動과 單相流動의 熱傳達係數의 比 $\left(\frac{h_{TP}}{h_L}\right)$의 변화를 도시한 것이다. 그림 5의 우측부분, 곧 X_{tt}가 작은 경우(퀄리티가 큰 경우)에서의 熱傳達은 크게 流動의 영향을 받게 되는 것을 볼 수 있는데 이것은 沸騰이 아닌 强制對流의 熱傳達의 性格을 갖는 것이어서 이 領域에서는 核沸騰 現象이 억제되고 있음을 시사해 주고 있다. 큰 X_{tt}의 값 곧 퀄리티가 작은 領域에서는 $\frac{h_{TP}}{h_L}$의 比는 일정한 값을 갖게되며 이것은 流動에 의한 영향은 없음을 의미하여 완전히 발달된 核沸騰의 熱傳達 機構를 갖고 있음을 말해 주고 있다.

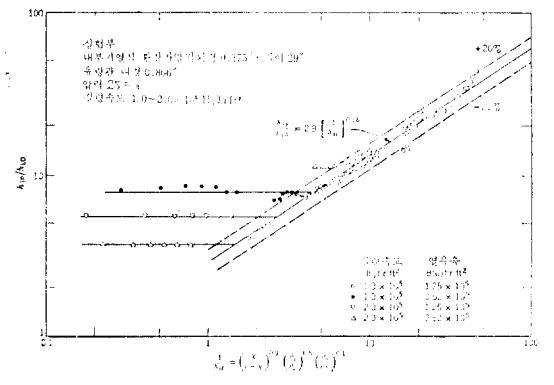

그림 5 Martinelli 인자에 의한 열전달 계수비의 변화

(2) 相關式

强制對流蒸發熱傳達에 관한 많은 硏究가 수행되어 이에 따라 많은 相關式이 제시되어 있다. 그림 5에 의해서 표시될 수 있는 相關式

$$\frac{h_{TP}}{h_L}=F\cdot\left(\frac{1}{X_{tt}}\right)^n \qquad (14)$$

이 보편적으로 이용되고 있으며 硏究者들의 實驗結果에 따라서 상수 F와 n의 값이 조금씩 다르게 표현되어 있다.

여기서 X_{tt}는 Lockhart-Martinelli Parameter로서 식 (15)로 표시되며

$$\frac{1}{X_{tt}}=\left(\frac{x}{1-x}\right)^{0.9}\left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right)^{0.5}\left(\frac{\mu_v}{\mu_L}\right)^{0.1} \qquad (15)$$

h_L로는 Dittus-Boelter나 Sieder-Tate에 의한 單相强制對流의 熱傳達係數를 사용한다.

표 4에 F와 n의 값에 대한 각 연구자의 결과를 표시 하였다.

표 4 방정식(14)에서의 F와 n의 여러 값들

연 구 자	F	n
Wright[16]	2.72	0.58
Dengler and Addoms[17]	3.5	0.5
Schrock and Grossman[18]	2.5	0.75
Collier and Pulling[19]	2.17	0.7

核沸騰과 强制對流蒸發을 함께 고려하는 相關式이 또한 연구자들에 의해 개발 되었는데 Schrock and Grossman[18]은 높은 熱流束이 있는 경우에

$$\frac{h_{TP}}{h_L}=A\left[\frac{q''}{GH_{fg}}+F\left(\frac{1}{X_{tt}}\right)^n\right] \qquad (16)$$

을 제안하였다.

Chen[20]은 沸騰 熱傳達을 微視的(microscopic)으로 强制對流熱傳達을 巨視的(macroscopic)으로 생각하고 이들이 相互간에 영향을 미친다는 가정하에 무차원함수 F 및 S를 도입하였다. F는 Reynolds 무차원수가 2相流動에 미치는 영향을 고려해 주는 인자이며 F는 核沸騰을 억제해 주는 인자로서 核沸騰의 소멸 효과를 고려해 주는 것이다. 그림 6에는 F, 그림 7에는 S의 변화가 도시 되어 있다. Chen은 h_{mic}에 Forster-Zuber 식을 h_{mac}에 Dittus-Boelter 의식을 이용

하였다. 곧

$$h = h_{mic} + h_{mac}$$
$$= S \cdot (\text{Zuber-Forster Correleation}) + F \cdot (\text{Dittus-Boelter Correlation}) \quad (17)$$

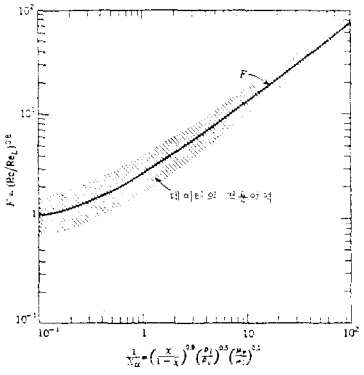

그림 6 레이놀즈수의 인자 F

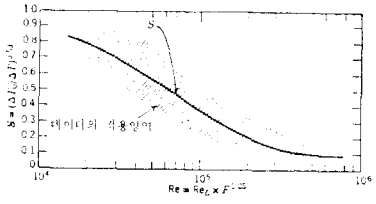

그림 7 억제인자 S

이 밖에 Schrock-Grossman[18], Bennett[21], Dengler-Addoms[22], Guerrieri-Talty[23], 등의 相關式이 제안되어 있어 표 5에 기재하였다. 그러나 이들 相關式 중에서 Chen의 相關式이 제일 잘 豫測하고 있는 것으로 알려져 있다.

표 5 강제대류 증발 상관식

Schrock-Grossman	$\frac{h_{TP}}{K_f} = 7390\left[B_0 + 1.5\times10^{-4} X_{tt}^{-\frac{2}{3}}\right] \cdot 0.023\,\mathrm{Re}_l^{0.8}\mathrm{Pr}^{1/3}$
Bennet et al.	$\frac{h_{TP}}{h_L}\cdot\phi^{-0.11} = 0.64\,X_{tt}^{-0.74}$
Dengler-Addoms	$\frac{h_{TP}}{h_L} = F\cdot 3.5\,X_{tt}^{-0.5}$ $F = 0.673\left[(\Delta T_{sat} - \Delta T_{ONB})\left(\frac{dP}{dT_{sat}}\cdot\frac{D}{\sigma}\right)T_w\right]^{0.1}$ $F<1,\ F=1$
Guerrieri-Talty	$\frac{h_{TP}}{h_L} = 0.187(\gamma^*/\delta_{sub})^{-59}\cdot 3.4\,X_{tt}^{-0.45}$ h_L ; $\mathrm{Nu}_L = 0.023\left[\frac{GD(1-x)}{\mu}\right]^{0.8}\cdot \mathrm{Pr}^{0.4}$로 부터 계산됨 γ^* ; 열수력학적 안정기포가 되는 최소반경 δ_{sub} ; 層流亞層의 두께

3. 臨界熱流束(CHF)

3.1. 沸騰危機의 機構

沸騰過程에서 가열표면과 액체와의 접촉이 蒸氣의 發生으로 차단될 경우에는 熱傳達係數가 급격히 떨어지는 현상이 일어나는데 이것을 沸騰危機(boiling crisis)라하며 핵비등이탈(DNB) 또는 번아웃(burnout) 이라고도 불리워진다. 熱傳達係數의 급격한 강하는 一定한 熱出力의 경우에는 加熱表面의 급격한 溫度上昇을 가져올 수 있으며 이에따라 加熱表面이 녹게되며 沸騰危機가 발생하기 직전의 熱流束을 臨界熱流束(CHF)이라 한다.

沸騰危機는 푸울비등의 경우는 熱流束이 높을 때에 발생되며 유동비등(flow boiling)의 경우는 서브쿨링이 클때나 높은 퀄리티가 있을때에 발생하는 두가지 경우가 있다.

서브쿨링이 존재한다는 것은 낮은 퀄리티를 의미하며 높은 熱流束과 큰 流量의 경우에 沸騰危機가 발생하는데 이때에 생성되는 氣泡에 의해 加熱表面근방의 流體는 열역학적으로 비 평형 상태가 된다. 이 경우의 沸騰危機는 높은 熱流束에 의해 表面溫度의 급격하고도 過多한 溫度上昇을 가져온다.

높은 퀄리티가 존재하는 流體에서는 전자의 경우보다 낮은 熱流束의 경우에 沸騰危機가 발생한다. 이때에는 전체의 流量은 비교적 적으나 높은 퀄리티의 상태이므로 蒸氣의 流速은 상당히 크다. 따라서 일반적으로 環狀流가 되며 過多한 沸騰이 발생하면 液膜이 파괴되어 沸騰危機가 일어나게 된다. 이 때의 加熱表面溫度는 서브쿨링시의 沸騰危機때 보다 천천히 상승한다.

沸騰危機에 대한 정확한 機構는 아직 잘 알려

져 있지 않으나 퀄리티, 壓力, 증기 및 액체의 속도, 液膜의 두께등의 영향을 받는것으로 알려져 있다.

3.2. 臨界熱流束의 相關式

微視的 方法에 의한 CHF의 豫測은 영향인자의 過多등에 의한 관계로 만족할 만한 結果에 도달하고 있지 않아 설계 목적으로 경험적 相關式을 구하는 연구가 수행되었다. 이 연구는 대체로 原子力發電所 供給會社에서 수행되었으나 주로 실험에 의해 相關式을 얻게 되므로 開發된 領域에서만 정확히 豫測이 가능하며 외삽(Extrapolation)에 의해 適用범위를 넓히는 것은 위험하다.

현재 비교적 많이 사용되는 相關式으로는 W-3[24], B & W-2[25], Barnett[26]등이 RELAP 5, TRAC, RETRAN, COBRA 등의 계산코오드에 수록되어 있으나 실험조건내에서 약 20~30%의 오차가 있음이 밝혀지고 있다.

표 6과 7 및 8에 이들의 相關式을 표시 하였다.

지금까지의 고찰을 통하여 아래와 같은 결론을 얻게 된다.

① Pre-CHF 영역에서의 熱傳達 및 沸騰危機에 여러 相關式이 제안되었으나 熱水力現象의 복잡성 때문에 完全한 理論解는 구해져 있지 않다.

② 各 相關式은 그 豫測에 있어서 정량적으로 많은 차이가 있다.

③ 相關式의 적용범위가 한정되어 있기 때문에 使用 相關式의 선택을 條件에 따라 신중히 하여야 한다.

표 6 W-3 상관식

Tong W-3	$\frac{\phi_{CHF\ EU}}{10^6}=\{(2.003-0.0004302P)+(0.1722-0.0000984P)\exp[(18.177-0.004129P)x]\}\times[(0.1480-1.596x+0.1729x\|x\|)(G/10^6)+1.037](1.157-0.869x)\times[0.2664+0.8357\exp(-(3.151D_e)][0.8258+0.000794(H_{sat}-H_{in})]$ $F_e=\phi_{CHF\ EU}/\phi_{CHF\ NU}$: 非等熱流束효과 $F_s=\phi_{CHF}$ 스페이서/ϕ_{CHF} 스페이서가 없는 경우 $=1.0+0.03\left(\frac{G}{10^6}\right)\left(\frac{TDC}{0.019}\right)^{0.35}$; 스페이서 그리드 효과 여기서 $TDC=\epsilon/(Va)$ ϵ : 亂流擴散 係數 a : 핀의사이

표 7 B & W-상관식

B & W-2	$\phi_{CHF}=\frac{1.155-16.03D_h}{4.03\times10^3(2.25\times10^{-3}G)^A}[3.7\times10^7(4.36\times10^{-4}G)^B-48.22H_{fg}\cdot G]$ $A=0.712+3\times10^{-2}(P-13.790)$ $B=0.834\ 9.9\times10^{-3}(P-13.790)$

표 8 Barnett 상관식

Barnett	$\frac{\phi_{CHF}}{10^6}=\frac{A+B\Delta H}{C+L}$ $A=67.45D_{he}^{0.68}(G\times10^{-6})^{0.132}\left\{1.0-0.744\exp\left\{-6.512D_{he}\left(\frac{G}{10^6}\right)\right\}\right\}$ $B=0.2587D_{he}^{1.261}\left(\frac{G}{10^6}\right)^{0.617}$ $C=185.0D_{hy}^{1.415}\left(\frac{G}{10^6}\right)^{0.212}$ 여기서 $D_{he}=(D_0^2-D_i^2)/D_i$는 inch로 표시된 가열 等價直徑이고, $D_{hy}=D_0-D_i$는 inch로 표시된 水力等價直徑임

참 고 문 헌

(1) W.M. Rohsenow, "A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling of Liquids", Trans. ASME, Vol. 74. 969~976(1952).

(2) L.S. Tong, "Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow" p. 15. Robert E. Kriege Co., 1975.

(3) Forster, H.K. and N. Zuber, "Growth of a Vapor Bubble in a Superheated Fluid," J.

Appl. Phys. 25, 474-488(1954).
(4) H.K. Forster and N. Zuber, "Dynamics of Vapor Bubbles and Boiling Heat Transfer", AIChE J., Vol. 1, 532(1955).
(5) J.W. Westwater, "Boiling of Liquids", in Advances Chem. Eng. 1, 2-76(1956).
(6) S. Levy, "Generalized Correlation of Boiling Heat Transfer", Trans. ASME, J. Heat Transfer, Vol. 81, 37-42(1959).
(7) S.S. Kutateladze, "Boiling and Bubbling Heat Transfer under Free Convection of Liquid", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 22, 281-299(1979).
(8) K. Stephan, "Beitrag zur Thermodynamik des Wärmeübergangs beim Sieden", Abhandl. Deut., Kältetech. Verein, No. 18, (1964).
(9) W.H. McAdams, "Heat Transmission", 3rd. ed. McGraw Hill Co. New York(1954).
(10) W.H. Jens and P.A. Lottus. "Analysis of Heat Transfer, Burn-out, Pressure and Density Data for High Pressure Water", USAEC Report ANL-4627(1951).
(11) J.R.S. Thom, W.M. Walker, T.A. Fallon and G.F.S. Reising, "Boiling in Subcooled Water During Flow up Heated Tubes or Annuli", Proc. Inst. Mech. Eng. Vol. 180r No. 3C, 226-246(1966).
(12) R.J. Weatherhead, "Nuclate Boiling Characteristics and the Critical Heat Flux Occurrence in Subcooled Axial-FlowWater Systems." ANL-6675(1963).
(13) V.M. Borishanski, "Correlation of the Effect of Pressure on the Critical Heat Flux and Heat Transfer Rates Using the Theory of Thermodynamic Similarity." Pergamon Press,(1969).
(14) G.F. Hewitt. et. al. "Burnout and Nucleation in Climing Film Flow", Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 8, 793(1965).
(15) R.W. Lockhart and and R.C. Martinelli, "Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes", Chem. Eng. Progr. Vol. 45. No. 1, 39-48 (1949).
(16) R.M. Wright, "Downflow Forced Convection Boiling of Water in Uniformly Heated Tubes," USAEC UCRL-9744(1961)
(17) C.E. Dengler and J.N. Addoms, Chem. Eng. Progr., Symp. Ser. 52, No. 18(1956).
(18) V.E. Schrock and L.M. Grossman "Forced Convection Boiling Studies Forced Convection Vaporization Project", USAEC, TID-14632 (1959).
(19) J.G. Collier and D.J. Pulling, "Heat Transfer to Two-phase. Gas-Liquid System," U.K. Report AERER-3809(1962).
(20) J.C. Chen, "A Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated liquids in Convective Flow," ASME 63-HT-34(1963).
(21) Bennett, J.A.R. et al "Heat Transfer to Two-Phase Gas-Liquid Systems." AERE-R 3159(1959).
(22) C.E. Dengler and J.N. Addoms. "Heat Transfer Mechanism for Vaporization of Water in a Vertical Tube", Chem. Eng. Prog. Symp. No. 18, Vol. 52, 95-103(1956).
(23) S.A. Guerrieri and R.D. Talty, "A Study of Heat Transfer to Organic Liquids in Single Tube, Natural-Circulation, Vertical Tube Boilers," Chem. Eng. Progr. Symp. Ser. No. 18, Vol. 52, 62-77(1956).
(24) L.S. Tong, "Prediction of Departure from Nucleate Boiling for an Axially Non-Uniform Heat Flux Distribution", J. Nucl. Energy Vol. 21, 241-248(1967).
(25) Bobcock and Wilcox "Correlation of Critical Heat Flux in a Bundle Cooled by DWR." ASME meeting Los Angeles, California, 63-71(1969).
(26) P.G. Barnett, "A Comparison of the Accuracy of Some Correlations for Burnout in Annuli and Rod Bundles," AEEW-R-558 (1968)