'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

비균일 가열 수직 환상유로에서 유량 공급이 없는 조건에서의 임계열유속
Critical Heat Flux under Zero Flow Conditions in Non-uniformly Heated Vertical Annulus

천세영, 안성민, 문상기, 양선규, 정문기

한국 원자력 연구소
305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

원자로 사고시 노심의 건전성 확보를 위해서는 정체 유량시의 CHF 현상이 정확하게 파악되어야 한다. 따라서 본 연구는 원전에서 노심의 연료봉을 모의한 비균일 출력분포(Cosine Distribution)를 가지는 가열봉을 가지고 0.55 ~14.97 MPa 범위의 압력과 92 ~353 kJ/kg의 입구 미포화도 그리고 영유속(Zero Flow)조건에서 압력 및 입구 미포화도가 CHF에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. CHF는 항상 가열구간 상단부에서 발생하였고, 기존의 플러딩 기구에 의해 발생하는 것으로 나타났다. Nejat 상관식이 Mishima 상관식보다 실험의 데이터와 비교하여 더 좋은 예측값을 보여주었다.

Abstract

The understanding on the fundamental nature of CHF in vertical annulus under zero flow condition is important for reactor safety. The CHF experiments under zero flow condition in non-uniformly heated rod have been performed in range form 0.55 to 14.97 MPa and inlet subcooling from 94 to 353 kJ/kg. The CHF was influenced by the inlet subcooling. All of the CHF occurred at the top of heater rod, and occured by flooding mechanism. The CHF predicted by Nejat correlation showed better agreements with our experimental CHF data than that of Mishima.

1. 서론

임계열유속(Critical Heat Flux : CHF) 연구는 열전달 장치 및 원전 설계에 있어서 무엇보다 중요한 일이다. Wickless, Heat Pipe, Thermosyphons, Steam Generator, 원자로에서의 냉각재상실사고(LOCA)등과 같이 외부로부터 냉각재의 공급이 없는 영유속 CHF의 정확한 해석이 필수적이다. 특히 원전에서의 노심은 여러 가지 유동상황(유동의 정체:Low Stagnation, 역류:Flow Reversal, 저유량)을 겪게 되므로 원자로 노심의 안전성을 확보하기 위하여 가장 중요한 인자인 CHF의 거동이 명확하게 파악되어야 한다. 수직 가열 유로에서 가열구간 입구에서 유량이 없으면 CHF 발생 현상은 Pool boiling과 Flooding으로 두 가지

의 경우를 고려해볼 수 있는데, 유로의 크기가 커지면 Pool boiling과 유사한 Mechanism이 되나 원전의 안전성 측면에서 살펴보면 길이가 길고 좁은 유로에서의 CHF가 중요하게 된다. 그림 1은 Flooding 현상을 나타낸 그림으로 Flooding 현상은 액체가 벽면을 타고 하향 유동을 하는 유로에서 수증기가 상향으로 흐르면 액체는 전단력을 받아 흐름이 느려지게 된다. 수증기의 속도가 증가하면 액체와 수증기의 유동이 혼돈상태가 되고 기체 압력강하가 크게 증가하게된다. 그리고 결국은 액체가 수증기와 함께 상향으로 흐르게 된다. 이런 Flooding 현상이 CHF를 유발하는 것으로 생각되고 있다. Mishima[1], Nejat[2], Chang 및 Yao [3]는 실험대 하부를 막은 수직 원형관 유로에서의 CHF 실험결과가 Wallis의 Flooding 관계식을 이용하여 유도한 CHF 상관식과 잘 일치하는 것을 보여 주었다. 그러나 이런 연구결과들은 본 연구와 비교하여 비교적 낮은 압력(0.2 MPa이하)과 짧은 유로(1.0m 이하)와 균일한 출력분포를 가지는 가열봉을 사용하여 수행한 실험결과들이었다. 본 연구에서는 유로의 길이가 긴 환상유로에서 Cosine 출력분포를 가지는 가열봉으로 실험대 입구에서 유량의 공급이 없는 조건에서 압력과 입구 미포화도가 CHF에 미치는 영향을 조사하였으며 Wallis의 Flooding 관계식을 이용하여 유도한 CHF 상관식과 실험결과를 비교 하였다.

2 실험장치 및 실험 방법

2.1 실험장치

본 실험은 한국원자력연구소의 RCS 열수력 Test Loop에서 수행하였으며 Loop에 대한 자세한 내용은 참고 문헌[4]에 기술되어 있으며 실험장치는 그림 2와 같다. 그리고 Test Section의 구조와 열전대의 위치 그리고 가열봉의 단면도는 그림 3에 나타나 있다. 본 연구에서 사용한 Test Section은 환상유로부, 상부 및 하부 Plenum으로 구성되어 있으며 상부 Plenum은 물/수증기 분리 탱크에 연결되어있다. 환상유로부는 원형관 내부에 핵연료봉을 모의한 Cosine 출력분포를 가지는 길이 1843mm, 직경 9.53mm인 가열봉이 내장되어 있고, 가열봉 표면온도를 측정하고 CHF를 검출하기 위하여 Sheath 외경이 0.5mm인 K-Type 비접지형 열전대 6개가 부착되어있다. 그림 4는 Cosine 출력분포를 가지는 가열봉의 그림이다. Power Ratio(PR)는 전체 평균출력에 대한 각 구간에서의 출력의 비이다. 본 실험에서는 가열봉을 열 개의 구간으로 나누었기 때문에 전체 평균출력의 1/10에 대한 각 구간에서의 비로 나타내며, 각 구간마다 0.448 ~1.4의 값을 가진다. 본 실험의 주요 측정변수인 압력, 온도 및 전력 측정의 불확실도(Uncertainty)는 Sencor 및 계측기의 정도와 교정결과로부터 평가를 하였으며 온도, 압력, 가열봉의 전력 측정에 대한 불확실도는 각각 ±0.67℃, ±0.019MPa, ±1.82 % 이다.

2.2 실험방법 및 조건

CHF 실험은 다음과 같은 순서와 방법으로 수행된다. Loop의 유량, 실험대 입구온도 및 압력을 설정된 조건에서 맞춘 다음 순환펌프를 정지시키고 하부 Plenum의 상류측에 위치한 격리 밸브를 완전히 닫는다 실험대의 가열봉에 전원을 공급하고 가열전력을 Step으로 증가시키고 전력을 증가할 때마다 수 십분 동안 유지하여 정상상태를 확인 후 다음 Step으로 증가시킨다. 공급전력이 증가에 따라 상부 Plenum의 유체온도와 물/수증기 분리 탱크에 연결 배관의 유체온도는 포화온도에 도달한다. 만약 이들 온도가 포화온도에 도달하기 전에 전력을 갑작스럽게 증가시키거나 정상상태의 확인 없이 전력을 증가시키면 가열구간 전면에서 가열 봉 표면온도의 급격한 상승으로 Dryout이 발생하는 경우가 있다. 이는 가열구간에서 발생한 수증기가 상부 Plenum의 미포화 액체에 의해 응축되고 한편 가열구간 내에서는 수증기가 생산됨으로 결국 수증기가 빠져나가지 못해 가열구간 전체가 Dryout에 이르기 때문이다. 정상상태를 유지하면서 계속 전력을 증가시키면 CHF가 발생한다. 이 때 CHF 검출기에 의해 전력공급을 80%수준으로 낮추거나 Trip 시킨다. CHF 발생 판단조건은 가열봉 표면온도가 갑자기 지속적으로 상승하여 표면 온도가 포화온도보다 100 K 이상 상승하면

CHF가 발생한 것으로 간주하였다. 가열구간 입구 물 온도는 하부 Plenum의 열손실로 인해서 가열봉의 전력을 공급하여도 포화온도에 도달하지 못하고 계속 미포화도를 유지하였다. 또한 모든 CHF Data는 가열봉의 상부(T/C-1 또는 T/C-2)에서 나타나는 것으로 관찰되었다.(그림 4) 본 연구의 실험조건은 압력이 0.55 ~ 14.97 MPa이며, 입구 미포화도는 92 ~ 353 kJ/kg이다.

3. 실험결과

본 실험결과를 분석하기 위하여 그림 5 에서 보는 바와 같이 물과 수증기의 대향류를 가정하고 입구 미포화도를 갖는 CHF 실험결과를 분석하기 위하여 비등길이를 아는 것이 중요하다. 비등길이(L_{BLA})는 입구에서부터 CHF가 발생한 위치(L_{CHF})까지의 거리에서 유체의 온도가 포화 온도가 되는 지점(L_B)까지의 거리를 뺀 값으로 CHF 발생위치는 가열봉에 부착된 열전대의 위치로 알 수 있다. 영유속 조건에서 기포의 생성지점 즉 유체의 온도가 포화온도가 되는 지점($x=0$)을 알기 위해서 가열구간하부($Z_{\Delta P}=1402.5mm$)에서 측정한 압력강하와 입구 미포화도를 가지고 비등길이를 구하였다. 가속과 마찰에 의한 압력강하는 중력에 의한 압력강하에 비해 무시할 수 있다고 가정하면 압력강하는 (1)과 같은식으로 표시 할 수 있다.

$$\Delta P=\alpha(\rho_g-\rho_f)g(Z_{\Delta P}-Z_{sat})+\rho_f g(Z_{\Delta P}-Z_{sat})+\rho_f gZ_{sat} \quad (1)$$

위 식을 기공율(α)에 대해서 정리를 하면 다음과 같이 된다.

$$\alpha=\frac{\rho_f gZ_{\Delta P}+(\rho_f-\rho_f)gZ_{sat}-\Delta P}{\Delta\rho g(Z_{\Delta P}-Z_{sat})} \quad (2)$$

일정한 Loop 압력 하에서는 입구 미포화도와 가열구간 하부의 압력강하 측정치와의 관계가 그림 6 과 같이 선형적으로 변하는 것이 관찰되었다. 이 결과로부터 입구에서 미포화도가 Zero일때의 압력강하를 외삽으로 구한 값과 $Z_{sat}=0$를 식(2)에 대입하면 하부에서의 평균기공율(α_o)를 구할 수 있다. 그리고 $Z_{sat}\sim Z_{\Delta P}$ 에서의 기공율이 선형적으로 변한다고 가정하면 $Z_{sat}\sim Z_{\Delta P}$ 에서의 평균기공율은 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$\alpha=\alpha_o\left(1-\frac{Z_{sat}}{Z}\right) \quad (3)$$

(3)식과 실험에서 측정한 압력강하 측정치를 (2)식에 대입하면 Z_{sat}를 얻을 수 있다.

그림 7은 압력에 따라서 비등시작점(L_B)의 관계를 나타고 있다. 같은 조건의 미포화도에서 압력이 높아지면 비등시작길이는 짧아지지만 미포화도가 작아지면 압력의 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다. 입구에서부터 CHF가 발생한 위치까지의 길이(L_{CHF})에서 Z_{sat}을 뺀 값이 비등길이(L_{BLA})가 된다. 또한 가열봉이 Cosine 출력을 하기 때문에 비등가열 구간에서의 평균 열유속은 (4)식과 같이된다

$$q''_{BLA}=\frac{Q_{BLA}}{A_{BLA}} \qquad A_{BLA}=\pi d_o L_{BLA}$$

(4) 여기서 Q_{BLA}는 다음과 같이 정의된다.

$$Q_{BLA}=Q_{C,ave}-Q_{B,ave} \quad (5)$$

$$Q_{C,ave} = \frac{1}{L_{CHF}} \int_0^{L_{CHF}} Q(z)dz$$

$$Q_{B,ave} = \frac{1}{L_B} \int_0^{L_B} Q(z)dz$$

그림 8은 압력에 따른 비등 가열구간의 평균 열유속을 나타낸 그림이다. 압력이 4~6 MPa에서 최대CHF값을 갖고, 압력 뿐만아니라 입구의 미포화도에 따라서 CHF에 영향을 미치는 것을 알 수 있다

Nejat[2]는 Wallis의 Flooding 관계식[5]과 질량보존 방정식으로부터 영 유속에 대한 CHF 상관식을 유도하였다. 본 연구에서는 입구 미포화도의 영향을 고려하기 위하여 위의 방법으로 구한 비등길이와 비등구간에서의 평균열유속 그리고 수력직경을 사용하여 Flooding에 대한 CHF를 평가하였다. 수직 원형관에서 물과 공기의 Flooding 관계식은 식 (6)과 같다.

$$j_g^{*1/2} + m j_f^{*1/2} = C \tag{6}$$

여기서 j_g^* , j_f^*은 다음과 같이 정의 된다.

$$j_g^* = j_g \rho_g^{1/2} (g D_{hy} (\rho_f - \rho_g))^{-1/2} \tag{7}$$

$$j_f^* = j_f \rho_f^{1/2} (g D_{hy} (\rho_f - \rho_g))^{-1/2} \tag{8}$$

그림 4와같은 대향류에서의 질량보존식은 (9)식과 같다.

$$j_g = \frac{Q_{BLA}}{\rho_g A_f h_{fg}} \qquad j_f = \frac{Q_{BLA}}{\rho_f A_f h_{fg}} \tag{9}$$

위에서 (7)식과 (8)식을 (6)식에 대입하면 무차원화된 CHF를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$q_N^* = C^2 \frac{A_f}{A_{BLA}} \left[\frac{\Delta\rho}{\rho_g} \right]^{1/2} \left[1 + m \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right) \right]^{-2} \tag{10}$$

여기서 수증기와 물의 밀도 비에 기반을 둔 Nejat[2] 무차원화된 CHF q_N^*는 다음과 같이 정의된다.

$$q_N^* = \frac{q_{BLA}}{h_{fg} \rho_g (g D_{hy})^{1/2}} \tag{11}$$

또한 Mishima에 의해 제안된 영유속에 관한 Flooding 상관식은 다음과 같다.

$$q_M^* = \frac{A_f}{A_{BLA}} \frac{C^2 \sqrt{D_{hy}^*}}{\left[1 + (\rho_g / \rho_f)^{1/4} \right]^2} \tag{12}$$

여기서 $q_M^* = \frac{q_{BLA}}{h_{fg} \sqrt{\lambda \rho_g g \Delta\rho}}$ $\lambda = \sqrt{\frac{\sigma}{g \Delta\rho}}$ $D_{hy}^* = D_{hy} / \lambda$ 이다.

식(6)에서 m값과 C값은 상수로 Wallis는 m은 난류의 경우는 1이며 C은 날카로운 모서리를 가지는 입구의 경우는 0.725이고 입구를 부드럽게 하여 모서리 영향을 최소화 시키면 0.88~1의 범위의 값을 제안했다. 본 연구에서는 Nejat[2] 상관식 일 때는 1.625, Mishima[1] 상관식 일 때는 1.828의 값을 갖는다. 이는 본 연구가 환상유로에서 수행한 결과이기 때문에 원형관에서 Wallis가 제안한 값과는 차이가 난다. 천세영 등[6]은 본 연구과 같은 조건에서 균일 출력의 가열봉에서 수행한 실험에서 C값이 Nejat[2] 상관식 일 때는 1.493을 Mishima[1] 상관식 일때는 1.452 이었다. 본 연구에서 C값들은 이보다 큰 값을 가지는데 이는 비등가열 구간의 평균열유속이 균일 출력 가열봉보다 비균일 출력 가열봉 일 때가 크기 때문인 것으로 판단된다. 즉 C값은 Geometry와 가열봉의 출력분포에 영향을 받는 것으로 생각된다. 그림 9와 그림 10은 Mishima 상관식과 Nejat 상관식을 이용하여 본 실험결과를 무차원화 시킨 그림이다. Mishima 상관식보다 Nejat상관식이 선형적으로 잘맞는 것을 알

수 있다. 그림 11은 Nejat 상관식으로 CHF를 예측한 예측오차와 함께 평균오차 및 RMS 오차를 나타낸 그림이다. 예측오차는 10MPa이하에서는 ±10%의 오차를 보이고 10MPa 이상에서는 ±20%의 오차를 보이고 있다. 예측오차, 평균오차, RMS오차는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{예측오차}(\varepsilon) = \frac{q''_{CHF,pred} - q''_{CHF,exp}}{q''_{CHF,exp}}$$

$$\text{평균오차(Mean error)} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{q''_{CHF,pred} - q''_{CHF,exp}}{q''_{CHF,exp}}\right)$$

$$\text{RMS오차(RMS error)} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{q''_{CHF,pred} - q''_{CHF,exp}}{q''_{CHF,exp}}\right)^2}$$

4. 결론

본 실험결과를 가지고 Flooding 관계식에 기반을 두고 유도된 상관식으로 부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 비등길이는 동일한 조건에서의 미포화도에서 압력이 커지면 짧아지지만 미포화도가 작아질수록 압력의 영향이 없어진다.

(2) 비균일 출력의 유로가 긴 수직환상유의 가열봉에서의 CHF는 Nejat상관식으로 비교적 잘 예측할 수 있었다.

(3) 그림 10과 식(9)의 C값은 균일 가열봉의 경우 1.493 였지만 본 연구에서 수행된 비균일 가열봉에서는 1.625 의 값을 갖는다. 이는 비등구간의 평균열유속이 균일 가열봉보다 비균일 가열봉일 때 더 큰 값을 가지기 때문인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기 연구, 개발 과제의 지원으로 이루어졌습니다.

기호설명

ΔP	실험대 하부에서의 압력강하(MPa)	q^*_N	Nejat 무차원 임계열유속
P	압력(MPa)	q^*_M	Mishima 무차원 임계열유속
g	중력가속도(m/s^2)	D_{hy}	수력직경(m)
j	겉보기속도(m/s)	D^*_{hy}	무차원 수력직경
j*	무차원 겉보기 속도	ΔT_{in}	입구 미포화도(℃)
q'_{BLA}	비등가열 구간에서의 임계 열유속	h_{fg}	잠열(kJ/kg)
α	기공율	Z_{sat} (L_B)	유체가 포화온도가 되는 수직거리(m)
ρ_f	포화액체의 밀도(kg/m^3)	$Z_{\Delta P}$	가열구간 하부 차압계길이(m)
ρ_g	포화수증기의 밀도(kg/m^3)	L_{BLA}	비등 가열길이(m)
ρ_1	가열구간입구에서액체의 밀도(kg/m^3)	L_{CHF}	CFH 발생위치(m)
$\Delta\rho$	포화온도에서 물과 수증기 밀도차	C	상수
A_{BLA}	비등가열 면적(m^2)	m	상수
A_f	유동면적(m^2)	α_a	입구 미포화도가 영일 경우 기공율
Q_{BLA}	비등가열구간의 평균 Power(kW)	λ	Taylor instability length scale
$Q_{C,ave}$	CHF지점까지의 평균 Power(kW)	ε	예측오차
$Q_{B,ave}$	Boiling시작점까지 평균 Power	σ	표면장력(N/m)
$q''_{CHF,pred}$	임계열유속 예측치(kW/m^2)	N	데이터 수
$q''_{CHF,exp}$	임계열유속 실험치(kW/m^2)		

참고문헌

[1] K.Mishima and H.Nishihara, "Effect of Channel Geometry on Critical Heat Flux for Low Pressure Water," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol 30, No. 6, 1169-1182, (1987)

[2] Z. Nejat, "Effect of Density Ratio on Critical Heat Flux in Closed End Vertical Tubes," Int, J, Multiphase Flow Vol. 7, 321-327 (1981)

[3] Y. Chang and C. Yao, "Critical Heat Flux of Narrow Vertical Annulus with Closed Bottoms," J. Heat Transfer, Transaction of the ASME, Vol. 105, 192-195, (1983)

[4] S. Y. Chun et. al. "Critical Heat Flux for Low Flow in Vertical Annulus under Various Pressure Condition," Proceeding of Korea Nuclear Society Spring Meettng, Vol. 1, 386-391 (1997).

[5] Waills,G. B., 1969, "One-Dimensional Two-Phase Flow," McGraw-Hill.

[6] 천세영 등, "수직 환상유로에서 유량공급이 없는 조건하에서의 임계열유속", 한국 원자력 학회, 98추계학술발표회논문집, 제 3분과 (A), (1998)

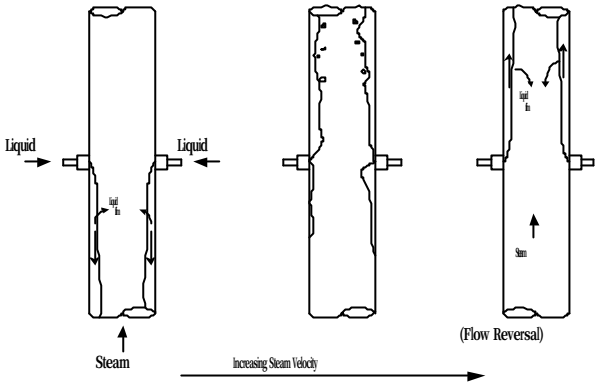

그림 1. Flooding and Flow reversal

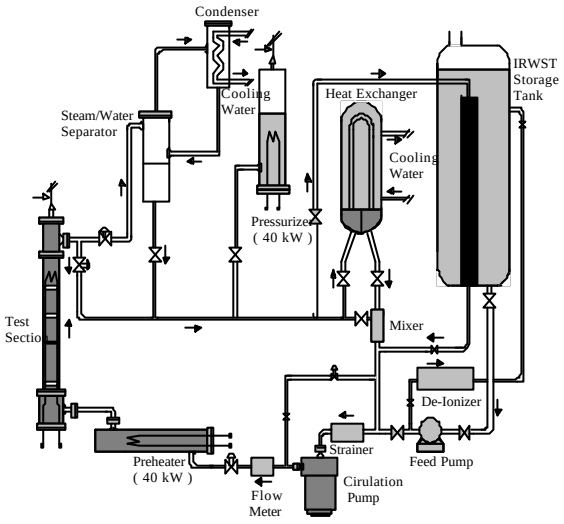

그림 2. 실험장치의 계통도

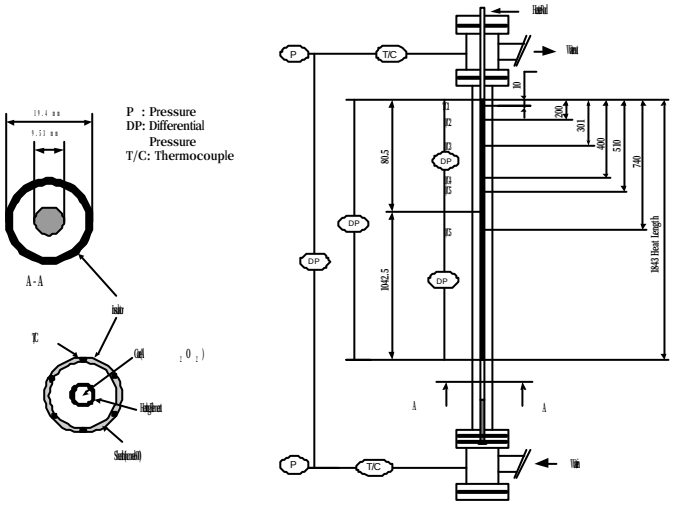

그림 3. 시험대 구조 및 열전대 위치

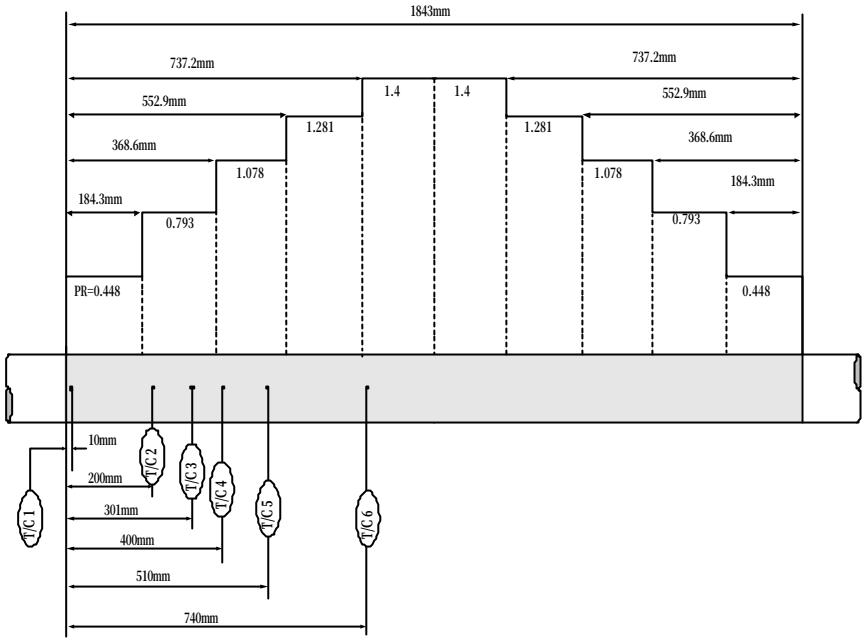

그림 4. 가열봉의 출력분포 및 열전대 위치

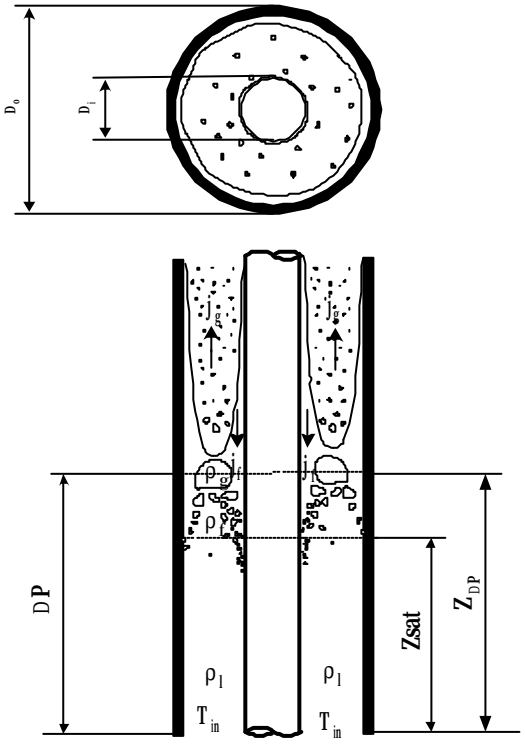

그림 5 대향류를 가정한 환상유로부의 Flooding현상

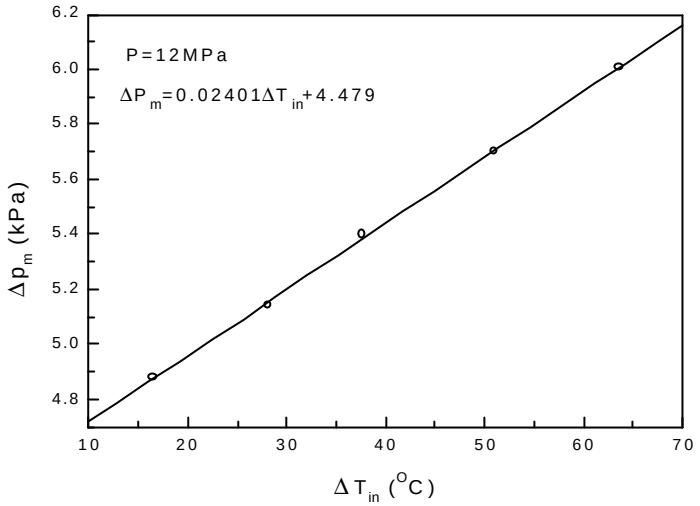

그림 6. 입구 미포화도와 하부의 압력강화와의 관계

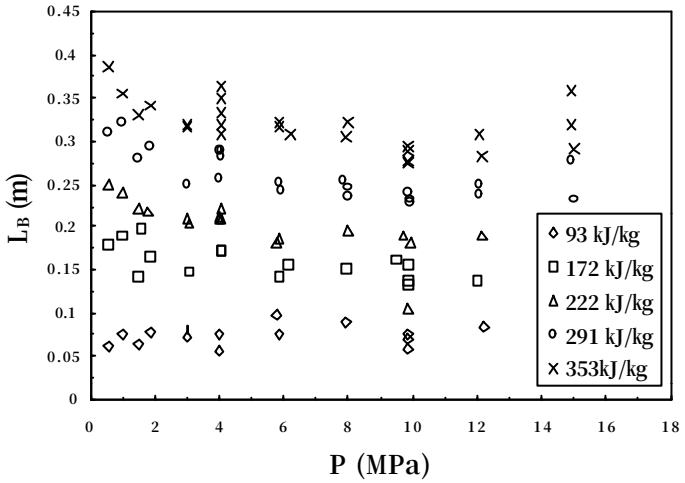

그림 7. 압력에 따른 비등 시작점과의 관계

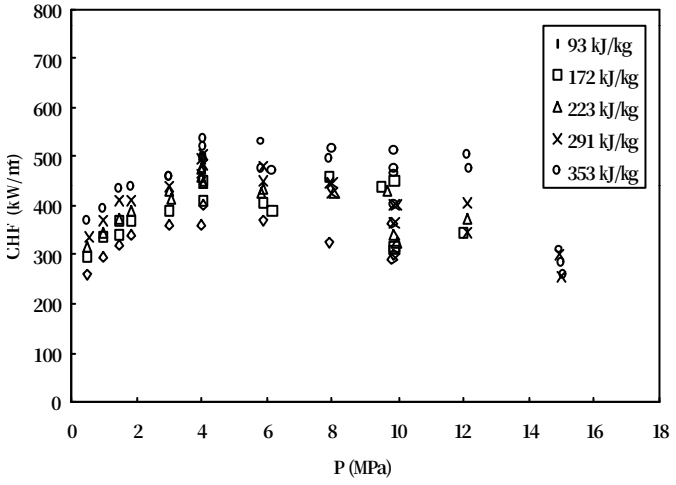

그림 8. 압력에 따른 CHF

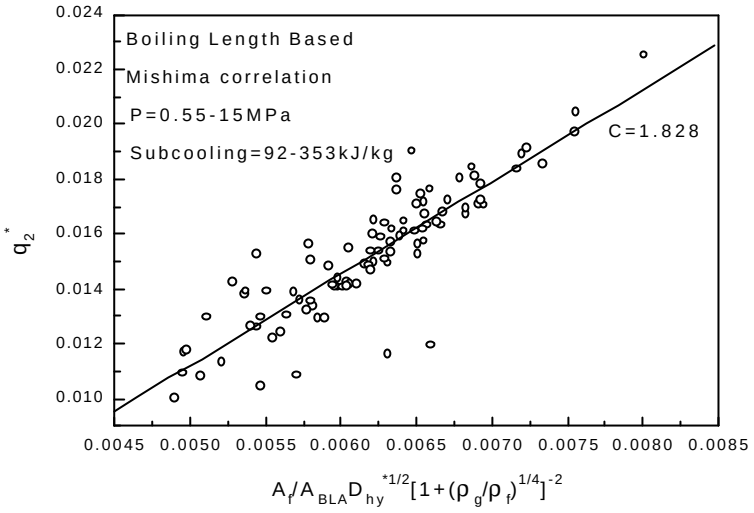

그림 9. Mishima 무차원 변수의 CHF

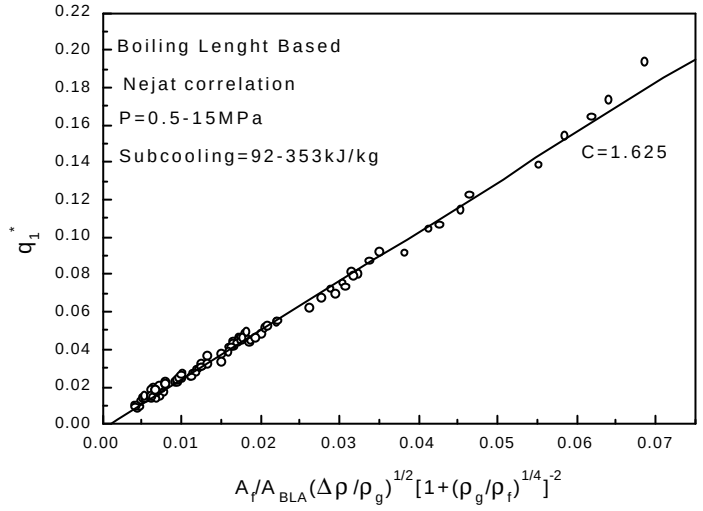

그림 10. Nejat 무차원변수의 CHF

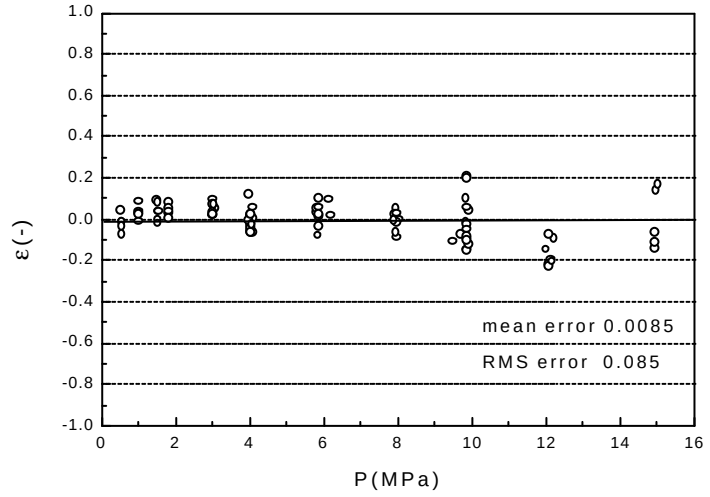

그림 11. Nejat 무차원 변수에 의해 예측된 CHF