`99춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

균일 가열봉을 가진 환상유로에서의 고건도 임계열유속과 비등길이의 관계

Relationship between High Quality CHF and Boiling Length in Annulus Geometry with Uniformly Heated Rod

천세영, 문상기, 박종국, 양선규, 정문기

한국원자력연구소
305-353 **대전광역시 유성구 덕진동** 150

요 약

균일 가열봉을 가진 환상유로에서 압력 0.57   15.01 MPa, **질량유속** 200   650 kg/㎡s, **입구 미포화도** 85   353 kJ/kg, **출구 건도** 0.106~0.536**의 조건에서의** CHF **실험자료를 사용하여** CHF**와 비등길이의 관계를 조사하였다**. CHF **조건에서의 가열구간의 유동양식을 조사한 결과** CHF **실험자료는 모두 환상류에서의 액체막의 건조이며** CHF **조건에서 환상류 시작위치는 압력의 증가에 따라 가열구간의 하류쪽에 이동하였다**. **압력이 비등길이에 미치는 영향은** CHF**와 압력의 관계와 유사한 경향을 나타내었다**. **즉 비등길이는 질량유속** 650 kg/㎡s**에서 압력의 증가에 따라** 2~3 MPa**에서 최대치를 나타내며 질량유속** 200 kg/㎡s**의 경우** 7~8 MP**에서 최대치가 되었다**. CHF**와 질량유속을 무차원**, CHF $q*_{CHF}$ **와 비등길이를 고려한 무차원 질량유속**, $G*(L_h/L_B)$**의 관계로 표시하면 무차원** CHF**는 압력 및 입구 미포화도에 관계 없이 흩어짐이 없는 선형관계를 나타내었다**. **무차원** CHF**와 무차원 변수** $G*(L_h/L_B)$**의 관계를 이용하여 구한** CHF**는 압력에 대한 의존이 전혀 없이 실험치를 잘 예측한다**.

Abstract

The relationship between the boiling length and the CHF in annulus geometry with uniformly heated rod has been studied. In this study the CHF data under pressure of 0.57~15.01 MPa, flow rate of 200~650 kg/㎡s, inlet subcooling of 85~353 kJ/kg and exit quality of 0.106~0.536 have been applied. As a result of examining the flow pattern over the heated section, all of the CHF data were the dryout type CHF in annular flow and the locations of the churn to annular flow transition moved down stream of the heated section with increasing the pressure. The effect of pressure on the boiling length under the CHF conditions showed the trends similar to the effect of pressure on the CHF. The relationship between the non-dimensional CHF, $q*_{CHF}$ and mass flux taking into account of the boiling length, $G*(L_h/L_B)$ indicated the linear relationship without scatter and regardless of pressure and inlet subcooling. The CHF calculated by using the relationship between the non-dimensionless CHF, $q*_{CHF}$ and mass flux, $G*(L_h/L_B)$ predicted very well the experimental CHF data with the pressure dependence.

1. 서 론

비등 열전달계통에서 열유속이 어떤 값에 도달하면 가열표면에 액체가 계속적으로 접할 수 없게 되는 상황이 일어날 수 있다. 이 때 가열표면과 액체간의 열전달의 급격한 악화에 따라 가열표면온도가 급격히 상승하게 된다. 이 열유속을 임계열유속(Critical Heat Flux : CHF)이라고 한다. CHF는 핵연료봉의 건전성을 유지하는 데 한계를 나타내는 열수력 특성 인자이며, CHF 예측의 신뢰성은 원자로의 안전성에 직접 영향을 미치기 때문에 이에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다. 그러나 LOCA시나 SLB(Steam Line Break)사고와 같은 Non-LOCA시의 저유량 조건에 대한 CHF 연구는 원자로 정상 운전조건에서의 CHF 연구에 비해 아직 미비한 상황이다. 또 앞으로 개발될 신형 원자로에는 수동안전장치(Passive Safety Feature)가 도입될 것으로 예상된다. 이 경우 사고시 노심의 냉각능력은 자연순환에 크게 의존한다. 따라서 저유량 영역의 CHF에 대한 체계적인 연구와 Data Base의 확충이 필요하다.

원형관, 환상유로, 봉다발 유로 등에 대한 CHF 실험이 활발하게 수행되고 있으며 특히 환상유로는 "단일봉다발"로 볼 수 있기 때문에 보다 중요하게 여겨진다. 환상유로에서의 CHF 실험은 오래 전부터 수행되어 왔으며[1, 2, 3,] 최근에는 저유량 조건에서의 CHF에 주안점을 둔 실험적 연구도 보고되었다.[4, 5, 6] 저자들은 이들 기존의 실험적 연구가 특정 압력 범위에서 수행되었음을 지적하여, 광범위한 압력조건에서의 CHF 실험을 수행하고 기존 CHF 상관식들이 압력의 영향을 적절하게 반영하지 못하고 있음을 보여주었다.[7] 본 연구는 저자들의 CHF 실험자료를 사용하여 압력이 비등길이에 미치는 영향을 파악하고 CHF와 비등길이의 과계를 조사하였다.

2. CHF 실험자료

실험자료는 한국원자력연구소의 고온, 고압 CHF 실험장치인 RCS 열수력 Loop에서 생산되었으며 실험장치 및 실험방법은 참고 문헌[7, 8]에 자세히 기술되어있다. 실험에 사용된 Test Section은 Test Section 관 내부에 핵연료봉을 모의한 출력분포가 균일한 가열길이 1842 mm의 가열봉이 장전된 구조로 환상유로를 형성하고 있다. 가열봉에는 표면 온도를 측정하고 CHF를 검출하기 위해 Sheath 직경이 0.5mm인 K-Type 비접지형 열전대 6개가 부착되어 있다. Test Section 구조 및 열전대의 위치를 그림 1에 보여준다.

본 연구에서는 다음과 같은 조건에서 242개의 CHF 실험자료가 사용되었다.

- 계통 압력 : 0.57 15.01 MPa
- 질량유속 : 200 650 kg/m^2s
- 입구 과냉도 : 85 353 kJ/kg
- 출구 건도 : 0.106 0.536
- 가열봉 출력 분포 : 균일

CHF 현상은 2상유동의 양식과 밀접한 관계가 있다. 즉 CHF의 발생기구는 기포류 슬럭류 영역에서는 핵비등 이탈(DNB), 환상류에서는 액체막의 건조(Dryout)로 크게 구분된다. 위 실험조건에서는 CHF는 모두 가열구간 출구에서 발생하였으며, 그 발생기구는 모두 환상류에서의 액막의 건조, 즉 고건도 CHF 였다.[8]

그림 2는 CHF 실험자료를 질량유속의 함수로 나타낸 것이다. 그림 3은 CHF를 압력의

함수로 보여주고 있다. 일반적으로 CHF는 압력 및 입구 미포화도가 일정일 때 질량유속의 증가에 따라 선형적으로 증가한다. 이들 그림은 유량이 증가함에 따라 압력 및 입구 미포화도의 영향이 커져 CHF가 넓은 범위에 분포, 흩어지는 것을 보여주고 있다. 또한 Chun등[7]은 0.57 및 1.01 MPa의 저압 영역과 15.01 MPa의 고압에서 입구 미포화도의 감소에 따라 CHF는 유량과의 선형관계에서 벗어나는 것을 지적하였다.

3. CHF와 비등길이의 관계

위에서 지적한 바와 같이 CHF 발생시 가열구간 출구의 유동양식은 환상류이다. 가열구간에서 환상류 및 환상분무류의 시작 위치를 조사하기 위해서 다음과 같은 Mishima 및 Ishii[9]의 유동양식 천이한계 관계식을 적용하였다.

- 처언류에서 환상유동으로 천이

$$j_g = \sqrt{\left(\frac{\Delta r g D_{hy}}{r_g}\right)}(a - 0.11)$$

여기서 $a = \dfrac{j_g}{C_o j + 0.35\sqrt{\Delta r g D_{hy} / r_f}}$,

$C_o = 1.2 - 0.2\sqrt{\dfrac{r_g}{r_f}}$ 및 $j = j_f + j_g$

- 액척 발생개시(Onset of Entrainment) 한계

$$j_g \geq \left(\frac{s g \Delta r}{r_g^2}\right)^{1/4} N_{mf}^{-0.2}$$

여기서 $N_{mf} = \dfrac{m_f}{\left\{r_f s \sqrt{s / g\Delta r}\right\}^{0.5}}$

유동양식의 천이위치는 겉보기 속도 j_g 또는 j_f에서 열역학적 평형을 가정하여 건도 ($x_e = r_g j_g / G$)를 구하고 열평형 관계식에서 결정할 수 있다. 그림 4. (a) 및 (b)는 CHF 조건에서의 압력에 따른 유동양식 천이위치의 변화를 보여주고 있다. 질량유속 650 kg/m^{2}s 의 경유 처언-환상류 천이위치는 압력이 증가함에 따라 가열구간 하류 쪽으로 이동하고 있다. 질량유속 200 kg/m^{2}s에서는 처언-환상류 천이는 압력의 증가에 따라 서서히 하류 쪽으로 이동하나 환상분무 천이(액척 발생개시)는 2~3 MPa 까지 급격히 하류 쪽으로 이동하고 이후 15 MPa 까지 상류 쪽으로 이동하고 있다. 한편 입구 미포화도의 영향을 보면 미포화도가 감소함에 따라 천이위치는 하류 쪽으로 이동하며, 질량유속이 200 kg/m^{2}s 일 때 환상분무류의 천이위치에 관에서는 입구 미포화도의 영향이 아주 작은 것을 나타내었다.

환상류에서의 CHF는 비등길이의 영향을 받는다.[10] 비등길이는 열평형 관계식에서 구할 수 있다. 환상유로에서 가열구간 입구로부터의 위치 Z에서의 건도 x_z는 다음과 같다.

$$x_z = \left(\frac{4d}{G\left(D_{in}^2 - d^2\right)}\int_0^z q''(z)dz - \Delta H_{in}\right) / H_{fg}$$

균일가열의 경우 일반적으로 CHF는 가열구간 출구에서 발생하므로, $x_z = 0$ 일 때의 입구로부터의 거리를 $L_{x=0}$ 로 하면 비등길이 L_B 는 $L_h - L_{x=0}$ 이다. 여기서 L_h 는 가열구간 길이다. 그림 5에 CHF 조건에서의 압력과 무차원 비등길이 L_B / L_h 의 관계를 보여준다. 압력이 비등길이에 미치는 영향은 그림 3에 보여준 CHF와 압력의 관계와 유사한 경향을 나타내었다. 즉 질량유속 650 kg/m²s에서는 압력의 증가에 따라 2~3 MPa에서 최대가 되어 15 MPa까지 서서히 감소하나, 질량유속 200 kg/m²s의 경우 압력의 증가에 따라 완만하게 증가하여 7~8 MP에서 최대가 되고 이후 서서히 감소한다.

Mishima and Nishihara[11]는 저유량조건에서의 CHF를 다음과 같은 무차원 변수로 분석하였다.

- 무차원 CHF

$$q^*_{CHF} = q''_{CHF} / \left(H_{fg} \sqrt{\lambda \rho_g g \Delta \rho} \right)$$

- 무차원 질량유속

$$G^* = G / \sqrt{\lambda \rho_g g \Delta \rho}$$

여기서 λ 는 Taylor Instability의 파장이다.

$$\lambda = \sqrt{\sigma / (g \Delta \rho)}$$

그림 6 및 7은 실험자료에 위의 무차원 변수를 적용하여 CHF와 질량유량 및 압력의 관계를 나타낸 것이다. 질량유속과 CHF의 관계를 나타내는 그림 2에 비해 CHF의 흩어짐을 줄일 수 있으나 그림 7과 같이 여전히 압력의 영향은 남아있다. 여기서 비등길이를 고려한 무차원 변수, $G^*(L_h / L_B)$를 생각한다. 무차원 CHF와 $G^*(L_h / L_B)$의 관계를 그림 8. (a) 및 (b)에 나타낸다. 그림 8. (a)에서 무차원 CHF는 $G^*(L_h / L_B)$=105를 경계로 2개의 영역으로 나눌 수 있으며, 각 영역에서 무차원 CHF와 $G^*(L_h / L_B)$의 관계는 상관계수 R=0.933 및 표준편차 S. D=0.0029이하의 선형관계에 있다. $G^*(L_h / L_B) > 105$의 영역은 압력 1.01 MPa이하 및 15.01 MPa의 질량유속 450 kg/m²s이상의 영역에 해당하며, 이는 Chun 등[7]이 지적한 CHF와 질량유속의 관계가 저압 및 고압에서 입구 미포화도의 감소에 따라 CHF와 질량유속의 선형관계에서 벗어나는 것과 일치한다. 그림 8. (b)는 1.54~12.13 MPa의 압력범위에 대한 무차원 CHF와 $G^*(L_h / L_B)$의 관계를 보여주고 있다. 압력범위 0.57~15.01 MPa에 비해 상당히 향상된 선형관계(R=0.983 및 S. D=0.0020)를 나타내고 있다. 따라서 이와 같은 무차원 CHF와 무차원 질량유속에 무차원 비등길이를 고려한 무차원 변수 $G^*(L_h / L_B)$와의 관계는 CHF에 대한 압력 및 입구 미포화도의 영향에 관계 없이 흩어짐이 없는 선형관계로 표시되는 것을 알 수 있다.

저자 등은 본 실험자료를 사용하여 기존 CHF 상관식들의 압력에 대한 의존도를 조사한 바 있으며 Bowring 상관식이 가장 뛰어난 예측능력을 보여주었다.[7] 그림 9는 Bowring 상관식의 압력의존도를 보여준 것이다. 무차원 CHF와 $G^*(L_h / L_B)$의 선형관계로부터 본 실험조건에 대한 CHF를 예측할 수 있다. 그림 10. (a) 및 (b)는 CHF 예측치와 CHF 실험자료를 비교한 결과를 보여준 것이다. 여기서 예측오차, 평균오차 및 RMS 오차는 다음과 같이 정의된다.

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

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

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

Bowring 상관식은 중압(3~8 MPa)에서 CHF를 높게 예측하고 15.01 MPa에서 낮게 예측하고 있으나, 무차원 CHF와 $G^*(L_h/L_B)$의 관계를 이용하여 구한 CHF는 압력에 대한 의존이 전혀 없으며, 0.57~15.01 MPa의 범위에서 평균오차 및 RMS 오차는 각각 0.005 및 0.072, 또 압력범위 1.54~12.13 MPa에서는 평균오차 0.002 및 RMS 오차 0.061로 CHF 실험치를 잘 예측하고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 균일 가열봉을 가진 환상유로에서 압력 0.57 15.01 MPa, 질량유속 200 650 kg/m²s, 입구 미포화도 85 353 kJ/kg, 출구 건도 0.106~0.536의 조건에서의 CHF 실험자료를 사용하여 CHF와 비등길이의 관계를 조사하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 CHF 실험자료는 모두 환상류에서의 액체막의 건조이며 CHF 조건에서 환상류 시작위치는 압력의 증가에 따라 가열구간의 하류쪽에 이동한다.

(2) 질량유량 200 kg/m²s의 경우 입구 미포화도에 따른 환상분무류 천이위치의 변화는 거의 나타나지 않았다.

(3) 무차원 CHF, q^*_{CHF}와 비등길이를 고려한 무차원 변수, $G^*(L_h/L_B)$의 관계는 압력 및 입구 미포화도에 관계 없이 흩어짐이 없는 선형관계로 잘 표시된다.

(4) 무차원 CHF와 무차원 변수 $G^*(L_h/L_B)$의 관계를 이용하여 구한 CHF는 압력에 대한 의존이 전혀 없이 CHF 실험치를 잘 예측한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 연구, 개발 지원으로 이루어졌습니다.

기호

C_o	분포 변수	q''_{CHF}	임계열유속 (kW/m²)
D_{in}	Test Section 관 내경 (m)	$q''_{CHF,\exp}$	임계열유속 실험치 (kW/m²)
D_{hy}	수력학적 등가직경 (m)	$q''_{CHF,pred}$	임계열유속 예측치 (kW/m²)
d	가열봉 직경 (m)	$q''(z)$	z의 위치에서의 열유속 (kW/m²)
G	질량유속 (kg/m²s)	q^*_{CHF}	무차원 임계열유속 (-)
G^*	무차원 질량유속 (-)	R	상관계수

g	중력가속도 (m/s^2)	S. D	표준편차
H_{fg}	증발잠열 (kJ/kg)	x_z	위치 z에서위 건도 (-)
ΔH_{in}	입구 미포화도 (kJ/kg)		
j	2 상유동의 겉보기 속도 (m/s)	a	기공율
j_f	물의 겉보기 속도 (m/s)	l	Taylar Instability의 파장 (m)
j_g	수증기의 겉보기 속도 (m/s)	m_f	물의 점도 (Ns/m^2)
L_B	비등길이 (m)	r_f	물의 밀도 (kg/m^3)
L_h	가열구간 (m)	r_g	수증기의 밀도 (kg/m^3)
N	실험자료 개수	Δr	물과 수증기의 밀도차이 (kg/m^3)
N_{mf}	점도계수	s	표면장력 (N/m)

참고문헌

(1) Janssen E. and Kervinen J. A., "Burnout conditions for single rod in annular geometry, water at 600 to 1400 psia," General Electric Company, Atomic Energy Commission, USA, GEAP-3899, (1963).

(2) Becker K. M. et al., "Burnout data for flow of boiling water in vertical round ducts, annuli and rod clusters," Aktiebolaget Atomenergi, Stockholm, Sweden, AE-177, (1965).

(3) Barnett P. G., "A correlation of burnout data for uniformly heated annuli and its use for predicting burnout in uniformly heated rod bundles," AEEW-R463, (1966).

(4) Mishima K. And Ishii M., "Experimental study on natural convection boiling burnout in annulus," *Proceeding of the 7th International Heat Transfer Conference*, Munchen, **4**, 309-314, (1982).

(5) Rogers J. T., Salcudean M. and Tahir A. E., "Flow boiling critical heat fluxes for water in a vertical annulus at low pressure and velocities," *Proceeding of the 7th International Heat Transfer Conference*, Munchen, **4**, 339-344, (1982).

(6) El-Genk M. S., Haynes S. J. and Kim S. H., "Experimental studies of critical heat flux for low flow of water in vertical annuli at near atmospheric pressure," *Int. J. Heat Mass Transfer*, **31**, 2291-2304, (1988).

(7) S. Y. Chun et al., “Effect of pressure on critical heat flux in vertical annulus flow channel under low flow conditions,” NTHAS98, 342-347, (1998)

(8) 천세영 등, “광범위한 압력조건하에서의 수직 환상 유로의 임계열유속,” 한국원자력학회 ’98추계학술대회, 제3분과 (A), (1998)

(9) Mishima K. and Ishii M., “Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, **27**, 723-737, (1984)

(10) Collier J. G and Thome J. R, “Convective boiling and condensation, third edition,” Clarendon Press. Oxford, 408-414, (1994)

(11) Mishima K. and Nishihara H., “Effect of channel geometry on critical heat flux for low pressure water,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, **30**, 1169-1182, (1987)

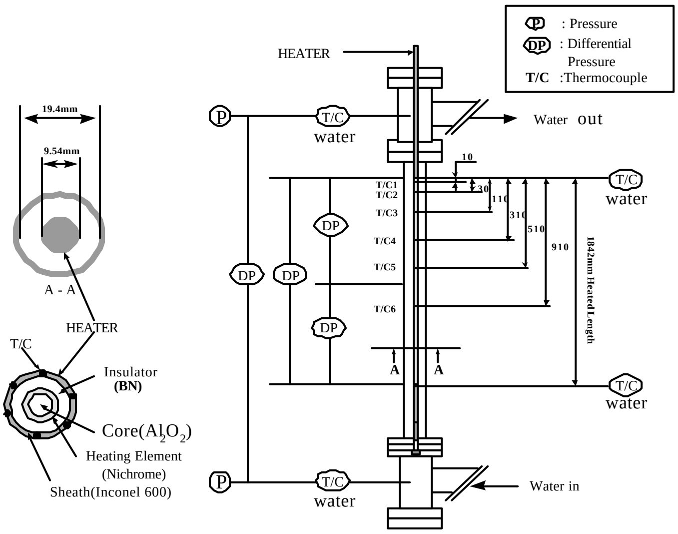

그림 1. 실험대 구조 및 열전대 위치

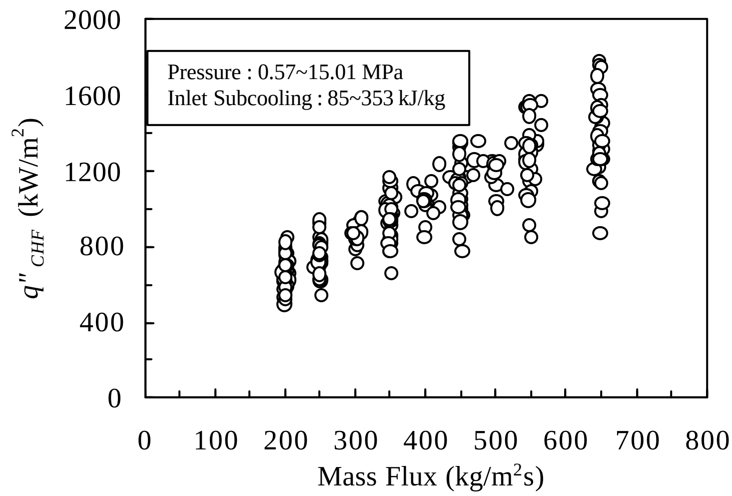

그림 2. CHF와 질량유속의 관계[8]

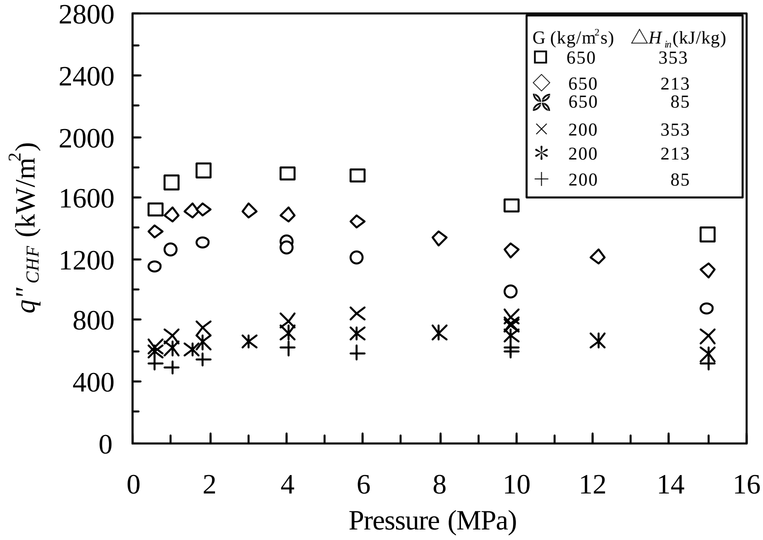

그림 3. CHF에 대한 압력의 영향[8]

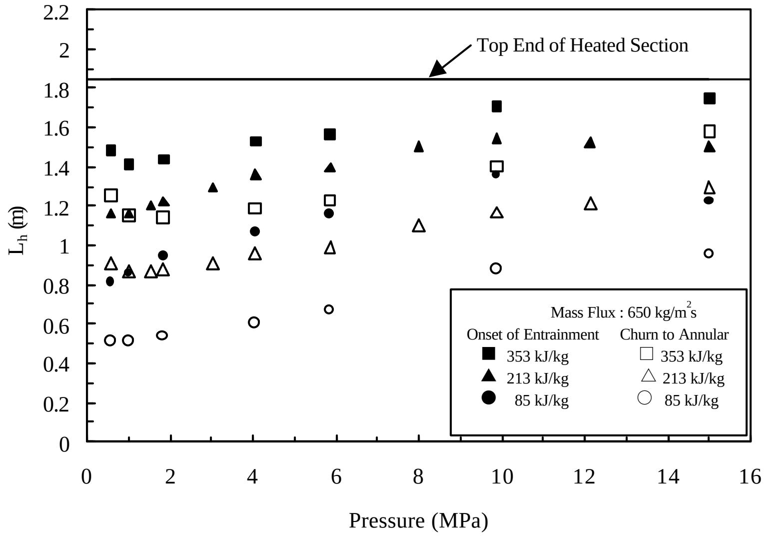

그림 4. (a) 유동양식 천이 위치

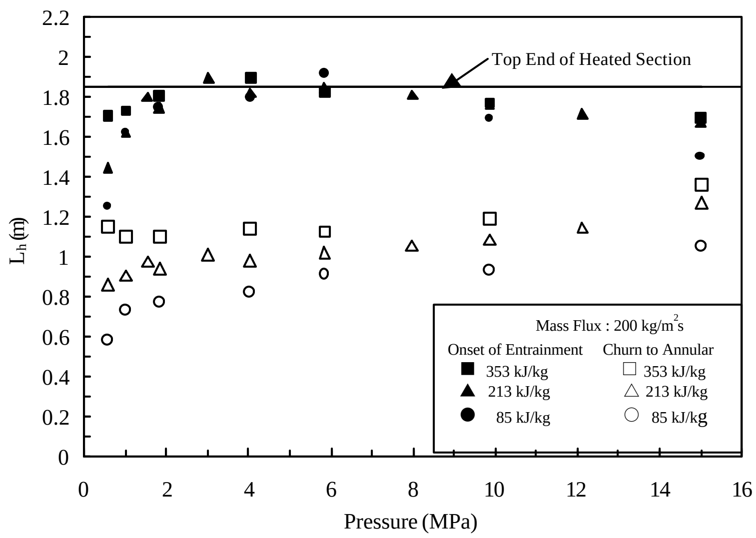

그림 4. (b) 유동양식 천이 위치

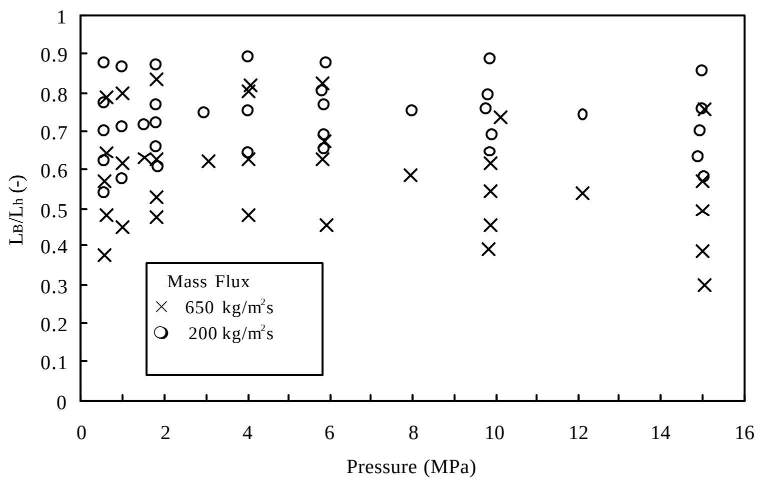

그림 5. 비등길이와 압력의 관계

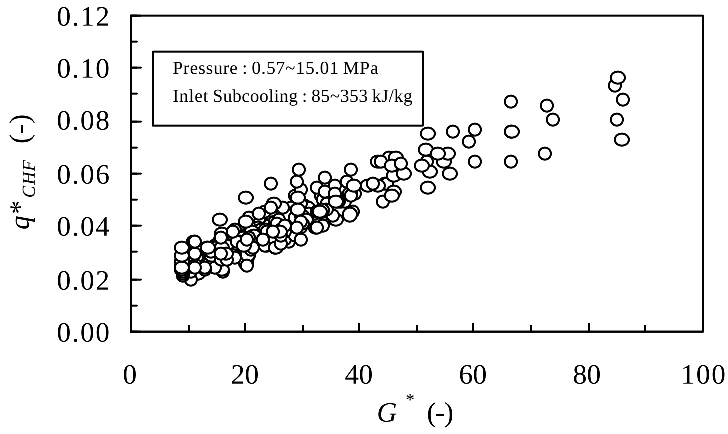

그림 6. **무차원** CHF**와 무차원 질량유속의 관계**

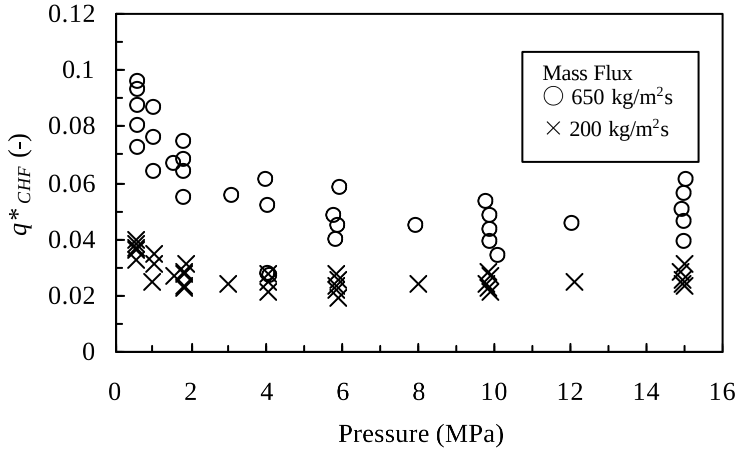

그림 7. **무차원** CHF**와 압력과의 관계**

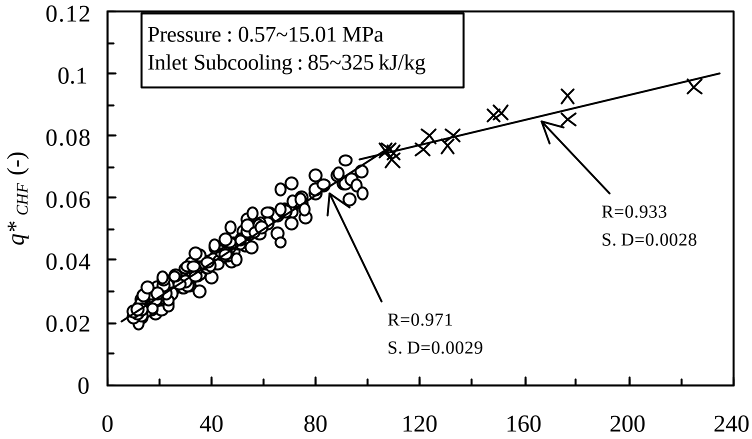

그림 8. (a) **무차원** CHF**와 무차원 변수** $G*(L_h/L_B)$ **의 관계**

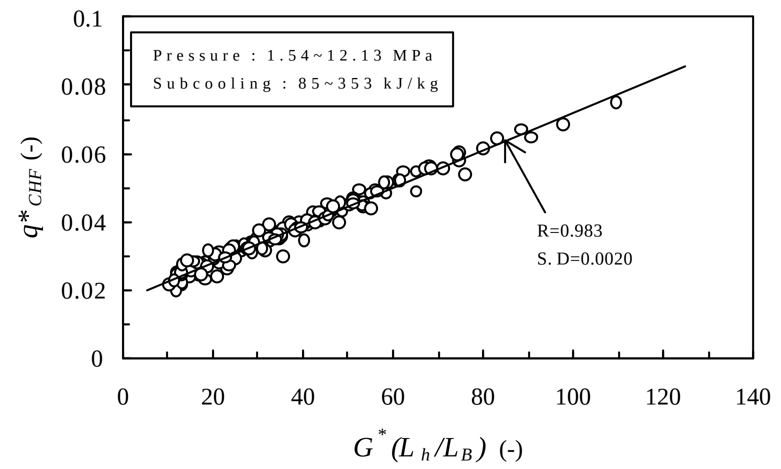

그림 8. (b) 무차원 CHF와 무차원 변수 $G^*(L_h/L_B)$의 관계

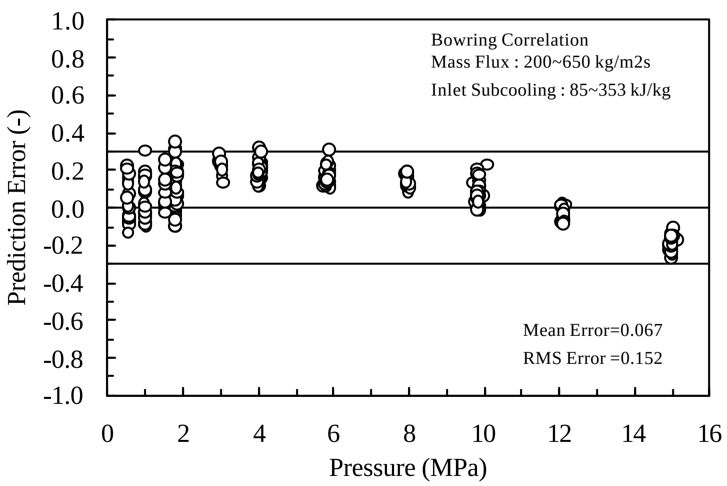

그림 9. Bowring 상관식의 CHF 예측능력에 대한 압력 의존도(7)

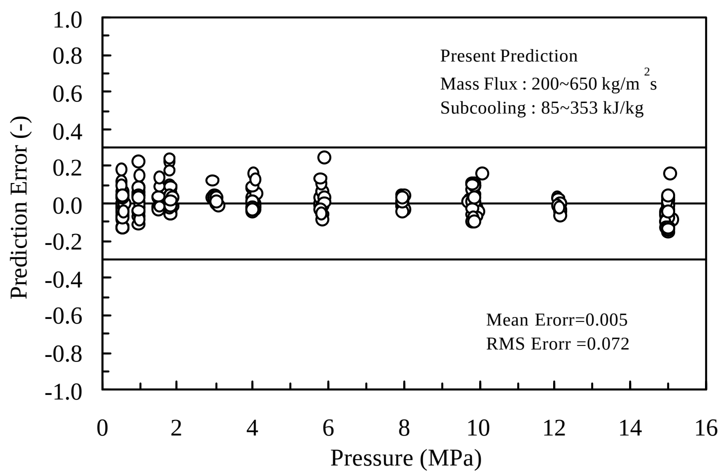

그림 10. (a) q^*_{CHF} 와 $G^*(L_h/L_B)$의 관계에서 예측한 CHF와 실험치와의 비교

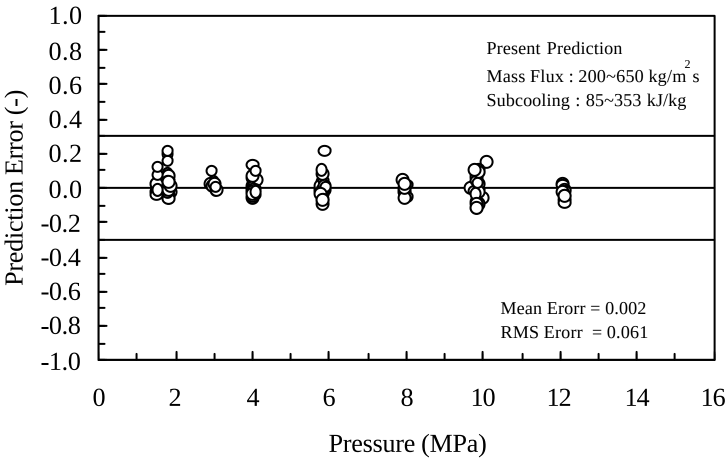

그림 10. (b) q^*_{CHF} **와** $G^*(L_h/L_B)$ **의 관계에서 예측한** CHF**와 실험치와의 비교**