

광범위한 압력 조건하에서의 수직 환상 유로의 임계열유속

Critical Heat Flux in Vertical Annulus Geometry under a Wide Range of Pressures

천세영, 정홍준, 박종국, 양선규, 정문기

한국원자력연구소
305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

경수로의 안전성 및 성능 향상을 위해서는 저유량조건에서의 CHF 특성을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 이를 위해 한국원자력연구소에서는 RCS 열수력 Loop장치를 사용하여 광범위한 압력 조건에서 수직 환상유로의 CHF 실험을 수행하였다. 실험은 압력 0.57 ~ 15.01 MPa, 유량 0 및 200 ~ 650 kg/m²s, 입구 과냉도 85 ~ 413 kJ/kg의 조건에서 수행하였다. 본 실험자료들은 환상분 무류영역에 분포되었으며, 기존 CHF 자료의 부족한 영역에 해당한다. 유량을 증가시키면 CHF는 거의 대부분 선형적으로 증가하나, 0.57 및 1.01 MPa의 저압영역과 15.01 MPa의 고압에서는 입구 과냉도의 감소에 따라, 선형관계에서 벗어나는 경향을 나타냈다. 질량유속 650 kg/m²s의 경우 CHF는 압력의 증가에 따라 급격히 증가하여 약 2 ~ 3 MPa에서 최대가 된다. 질량유속 200 kg/m²s에서는 CHF의 최대가 되는 압력은 풀림 비등에서 CHF가 최대가 되는 압력과 일치하였다. 유량이 0 kg/m²s일 때는 CHF에 대한 압력 및 입구 과냉도의 영향은 작은 것으로 나타났다.

Abstract

It is important to understand correctly a CHF under low flow condition for improving reactor safety and performance in LWRs. The CHF experiments have been carried out in a wide range of pressures for an internally heated vertical annulus in the RCS loop facility of Korea Atomic Energy Research Institute. The experimental conditions covered ranges of pressure from 0.57 to 15.01 MPa, mass flux of 0 kg/m²s and from and 200 to 650 kg/m²s, and inlet subcooling from 85 to 353 kJ/kg. All of the CHF data in the present conditions lie in the annular mist flow region and CHF mechanism is dryout of liquid film. Though most of CHF data in this experimental range rise linearly with increasing mass flux, the departures from the linearity with decreasing inlet subcooling are observed in the data for pressures of 0.57, 1.01 and 15.01 MPa. For mass flux of 650 kg/m²s, the CHF increase rapidly with increasing pressure and have a maximum value in pressure of about 2 ~ 3 MPa. For mass flux of 200 kg/m²s, the pressure at the maximum CHF value corresponds to the pressure at the peak value of pool boiling CHF. In case of zero flow, the pressure and inlet subcooling have little effect on the CHF.

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. 이러한

노력의 결과 개발된 CHF 상관식들은 핵연료개발 및 노심 설계에 적용되고 있다. 그러나 이들 대부분의 연구는 원자로 정상 운전 조건을 대상으로 수행된 것들이고 좁은 범위에서 적용가능하며, LOCA와 같은 사고시나 운전 과도상태에서의 저유량 조건에서의 CHF 거동은 아직 명확하지가 않다. 또 앞으로 개발될 신형 경수 원자로에는 수동안전장치(Passive Safety Feature)가 도입될 것으로 예상된다. 이 경우 사고시 노심의 냉각능력은 자연순환이 중요한 역할을 담당하게 된다. 따라서 저유량 영역의 CHF에 대한 체계적인 연구와 Data Base의 정비가 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, 7) 한편 CHF를 예측하는 방법으로써 원형관 실험자료의 Data Base를 기초로 개발된 Look-up Table⁽⁸⁾를 환상유로에 응용하는 경우가 있는 데⁽⁹⁾ 저압 및 중압에서의 CHF 실험자료의 부족이 지적되고 있다.⁽¹⁰⁾ 지금까지 환상유로 CHF 실험에서 얻어진 실험자료는 광범위한 압력조건을 만족하지 못하고 있으며, 저유량 영역에서 압력의 영향을 조사한 실험적 연구는 아직 없다. 본 연구는 한국원자력연구소의 고온, 고압 CHF 실험장치인 RCS 열수력 Loop를 이용하여 환상유로에서 광범위한 압력조건에 대한 저유량 CHF 실험을 수행하여 압력이 CHF에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

그림 1은 RCS 열수력 Loop의 개략도이다. Loop는 순환펌프, 예열기, CHF Test Section, 기수분리기, 응축기, 가압기, 열교환기 등 주요 부품으로 이루어져 있다. Test Section에 들어가는 유량의 측정에는 3종류의 Orifice 유량계 중에서 실험유량의 범위에 적합한 것을 선택하여 사용한다. 유량은 순환펌프의 회전속도 조절, Bypass Line의 유량조절 그리고 유량제어 밸브의 조절을 조합하여 제어된다. 저유량영역에서 흔히 관찰되는 유량의 진동은 본 실험범위에서는 Test Section입구측의 밸브를 Throttling하므로서 피할 수 있었다. 예열기는 Test Section입구의 용수온도를 조절하기 위하여 설치되어있다. 본 연구에 사용된 Test Section은 Test Section Pipe 내부에 핵연료봉을 모의한 출력분포가 균일한 가열길이 1842 mm의 Heater 봉이 장전된 구조로 환상유로를 형성하고 있다. Heater 봉에는 표면 온도를 측정하고 CHF를 검출하기 위해 Sheath 직경이 0.5mm인 K-Type 비접지형 열전대 6개가 부착되어 있다. Test Section 구조 및 열전대의 위치를 그림 2에 보여준다. Test Section에서 수증기-물 2상유동 상태로 나온 순환용수는 기수분리기에서 수증기와 물로 완전히 분리되고 U-Tube Type 열교환기에서 설정된 온도까지 냉각된다. 실험장치의 가압은 내부에 40kW의 가열용 Heater가 설치된 가압기가 사용된다.

본 실험의 주요 측정변수는 Test Section입구 및 출구의 순환용수 온도와 압력, Test Section 유량 및 차압, Heater 봉의 표면 온도 및 Heater 봉에 투입되는 전력 등이며 측정된 신호는 모두 Workstation급 자료처리장치에서 자동으로 수집, 처리된다. 이들 압력, 유량, 온도 및 전력의 측정 불확실도(Uncertainty)는 Sensor 및 계측기기의 정도와 교정결과로부터 평가하였으며, 압력, 유량 및 온도에 대한 불확실도는 각각 자료처리장치의 지시치의 $\pm 0.3\%$, $\pm 1.5\%$ 및 0.6% 이하 였다. Heater 봉 전력 측정에 대한 불확실도는 ± 1.0 이하 였다.

CHF 실험은 다음과 같은 순서와 방법으로 수행된다. Test Section입구의 유량, 온도 및 압력을 설정된 조건에 맞춘 다음, Test Section Heater에 전원을 공급하고 서서히 가열전력을 증가 시킨다. CHF 근방에서 출력을 Step상태로 증가 시키고 수분동안 유지하여 정상상태를 확인 후 다음 Step으로 증가 시킨다. CHF가 발생하면 Burnout 검출기에 의해 전력공급을 80% 수준으로 낮추거나 Trip시키도록 되어있다. 이때 CHF의 발생 판단조건은 Heater 봉 표면 온도가 갑자기 지속적으로 상승하는 현상으로 판단하며, 본 실험에서는 표면 온도가 포화온도 보다 100 K이상 상승하면 CHF가 발생한 것으로 판단하였다.

3. 실험 범위

본 연구에서는 다음과 같은 조건에서 245개의 CHF 실험자료를 얻었다.

- 계통 압력 : 0.57 ~ 15.01 MPa
- 질량유속 : 0 및 200 ~ 650 kg/m²s
- 입구 과냉도 : 85 ~ 353 kJ/kg
- 출구 건도 : 0.106 ~ 0.536

압력은 Test Section 입구 Plenum 및 출구 Plenum에서 측정된다. CHF 조건에 가까와짐에 따라 입구 Plenum 압력은 원하는 값으로 유지할 수 있었으나 출구 Plenum 압력을 일정하게 유지하기가 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 Test Section 입구 Plenum의 압력을 계통 압력으로 사용한다. 입구 과냉도는 압력 조건에 다른 증발잠열과 입구 엔탈피의 차이이며 출구 건도는 CHF 조건에서 열역학적 평형을 가정하여 구하였다.

질량유속 0 kg/m²s에서의 실험은 상기 실험 절차와 같으나 Test Section Heater에 전력을 공급하기 전에 Test Section 입구의 유량 제어 Valve를 완전히 닫음으로써 이루어졌다.

4. 실험결과

본 실험에서 얻은 모든 CHF 자료와 환상유로에 대한 대표적 실험자료인 Janssen 및 Kervinen⁽¹⁾, Becker등⁽²⁾의 결과 및 최근의 Rogers등⁽⁵⁾, El-Genk등⁽⁶⁾에 의한 아주 저유량 CHF 실험자료를 질량유속의 함수로 그림 3에 보여준다. Janssen 및 Kervinen의 실험자료는 압력 4.1 ~ 10 MPa, 유량 175 ~ 8400 kg/m²s의 조건에서 수집된 것이며, Becker등의 자료는 압력 1.0 ~ 3.5 MPa, 질량유속 50 ~ 660 kg/m²s의 범위에서 얻은 것이다. Rogers등 및 El-Genk등은 아주 저유량에 대하여 실험을 수행하였으나 대기압 조건에서의 자료들이다. 그림 3에서 과거의 실험자료 들은 250 kg/m²s이하의 아주 저유량과 700 kg/m²s 이상의 유량에 집중하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 상기 문헌들의 실험자료는 넓은 범위의 압력조건을 만족하지 못하고 있는 것에 주목하여야한다.

CHF 현상은 2상유동의 양식과 밀접한 관계가 있다. 즉 CHF의 발생기구는 기포류 ~ 슬러류 영역에서는 핵비등 이탈(DNB), 환상류에서는 액체막의 건조(Dryout)로 크게 구분된다. CHF에 대한 예측 상관식이나 이론적 발생기구 모델을 개발할 때에는 정확한 2상유동 양식이 파악되어 있어야 한다. 따라서 본 실험조건에서의 유동양식을 파악하는 것이 중요하다. 저유량 조건에서의 CHF 발생기구는 다음과 같이 분류할 수 있다.^(4,5,6,7)

- 지극히 낮은 유량 조건에서 플러딩(Flooding)에 인한 CHF 발생
- 슬러류 또는 처언(Churn)류에서 환상류로 유동양식이 천이할 때 CHF가 발생
- 환상류에서 액체막의 건조
- 액체상의 완전한 증발 즉 출구건도가 약 100%가 될 때.

Mishima and Nishihara⁽¹¹⁾는 저유량조건에서의 CHF를 다음과 같은 무차원수로 분석하고 처언-환상류 천이한계를 제시하였다.

- 무차원 열유속

$$q^* = q / \left[h_{fg} \sqrt{\lambda \rho_g g \Delta Gr} \right]$$

- 무차원 질량유속

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

여기서 λ 는 Taylor Instability의 파장이다.

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

그림 4는 본 실험자료에 위의 무차원수를 적용하고 Mishima 및 Nisihara의 처인-환상류 천이한계를 표시하였다. 그림 5에는 본 CHF 자료를 출구 건도의 함수로 나타내고 환상류에서의 액적 이탈개시(Onset of Droplet Entrainment)한계⁽¹²⁾를 실선으로 표시하였다. 그림 4 및 5에서 보는 바와 같이 본 실험에서는 CHF 발생시의 유동 양식은 모두 환상분무류 영역에 분포하고 있다. 따라서 CHF 발생기구는 액체막의 건조로 판단된다.

그림 6은 유량을 고정한 경우 CHF가 입구 과냉도의 증가에 따라 선형적으로 증가함을 보여준다. 본 실험범위에서 CHF는 입구 과냉도의 증가에 따라 선형적으로 증가하였다. 일반적으로 입구 과냉도를 고정하여 유량을 증가 시키면 CHF는 증가한다. 본 실험에서는 일부 압력 범위를 제외하여 그림 7과 같이 CHF는 질량유속에 따라 선형적으로 증가하였다. 그림 8은 낮은 압력과 고압에서 CHF는 질량유속과의 선형관계에서 벗어나는 경향을 보여주고 있다. 압력 0.57 MPa에서 입구 과냉도에 관계 없이 선형관계에서 벗어나고 있으며 압력 1.01 및 15.01 MPa에서는 입구 과냉도가 클 때는 선형관계를 유지하다가 입구과냉도가 낮아지면 선형관계에서 벗어나는 경향이 있다.

CHF에 대한 압력의 영향을 조사하기 위하여 그림 9에 CHF를 압력의 함수로 보여준다. 질량유속이 650 kg/m²s의 경우, CHF는 압력의 증가에 따라 급격히 증가하여 2 ~ 3 MPa 근방에서 최대치가 된 후 15.01 MPa 까지 천천히 선형적으로 감소하고 있다. 유량이 200 kg/m²s일 때 CHF에 대한 압력의 영향은 크지 않으나, 8 MPa의 압력까지 CHF는 느리게 증가하여 그 후 천천히 감소하고 있다. 질량유속 0 kg/m²s에서는 압력의 영향은 거의 나타나지 않고 CHF는 압력이 변해도 거의 일정한 값을 보여주고 있다. 또한 입구 과냉도의 영향도 아주 작은 것으로 나타났다. 푸올 비등의 경우 CHF는 임계압력의 약 35 %의 압력(약 8 MPa)에서 CHF의 최대치가 있는 것으로 알려져 있다.⁽¹³⁾ 따라서 본 실험자료에서는 압력과 CHF의 관계에 있어서 질량유속이 낮아지면, CHF가 최대치가 되는 압력은 푸올 비등에서 CHF가 최대치를 나타내는 압력과 일치하는 것을 보여주고 있고 유량이 없을 경우는 이 CHF의 최대치의 존재를 판별하기가 어려워진다.

5. 결론

본 연구에서는 압력 0.57 ~ 15.01 MPa, 질량유속 0 및 200 ~ 650 kg/m²·s, 입구 과냉도 85 ~ 및 210 kJ/kg의 범위에서 CHF 측정 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 실험 조건에서는 CHF 발생기구가 환상분무류에서의 액체막의 건조로 판단된다.
- (2) 유량을 고정한 경우 입구 과냉도의 증가에 따라 CHF는 선형적으로 증가한다. 입구 과냉도를 고정하여 유량을 증가시키면 CHF는 거의 대부분 선형적으로 증가하나, 0.57 및 1.01 MPa의 저압영역과 15.01 MPa의 고압에서는 입구 과냉도의 감소에 따라 CHF는 이러한 선형관계에서 벗어나는 경향을 나타낸다.
- (3) CHF에 미치는 압력의 영향을 보기 위하여 CHF를 압력의 함수로 나타낼 때, 질량유속 650 kg/m²s의 경우 2~3 MPa 근방에서 CHF의 최대치가 나타난다. 200 kg/m²s의 질량유속에서는 압력에 대한 영향은 크지 않으나 푸올 비등에서 CHF가 최대가 되는 압력인 약 8 MPa에서 최대치가 나타난다.
- (4) 질량유속이 0 kg/m²s일 때 CHF에 미치는 압력 및 입구 과냉도의 영향은 아주 작은 것으로 나타났다. CHF와 압력의 관계에서의 CHF의 최대치를 판별하지 못한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 연구, 개발 지원으로 이루어졌습니다.

기호

G	질량유속 (kg/m ² s)	λ	Taylor instability의 파장 (m)
G*	무차원 질량유속 (-)	ρ_g	수증기의 밀도 (kg/m ³)
g	중력가속도 (m/s ²)	$\Delta\rho$	물 밀도와 수증기 밀도의 차이 (kg/m ³)
h_{fg}	증발잠열 (kJ/kg)	σ	표면장력 (N/m)
Δh_{in}	입구 과냉도 (kJ/kg)		
P	압력 (MPa)		
q	열유속 (kW/m ²)		
q*	무차원 열유속 (-)		
X _{ex}	출구 건도 (-)		

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) Kumamaru H., Koizumi Y. and Tasaka K., "Critical heat flux for annulus under high-pressure, low-flow and mixed inlet conditions," *J. Nucl. Sci. Tech.*, **27**[1], 68-80, (1990).
- (8) Groeneveld D. C. et al., "1986 AECL-OU critical heat flux look-up table," *Heat transfer Engineering*, **7**(1-2), 46-62, (1986).
- (9) Doerffer S. et al., "A comparison of critical heat flux in tube and annuli," *Nucl. Eng. Des.*, **149**, 167-175, (1994).
- (10) Teyssedou A. et al., "Critical heat flux data in a vertical tube at low and medium pressures," *Nucl. Eng. Des.*, **149**, 185-194, (1994).
- (11) Mishima K. and Nishihara H., "Critical heat flux at low velocity and pressure conditions," *Proceedings of Second International Topical Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations*, Tokyo, 1A-1, (1986).
- (12) Mishima K. and Ishii M. (1984), "Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tube," *Int. J. Heat Mass Transfer*, **27**, 723-737.
- (13) Morozov V. G., "New experimental data on critical heat loads at boiling of liquids on a submerged heating surface," *Int. J. Heat Mass Transfer*, **5**, 661-666, (1962).

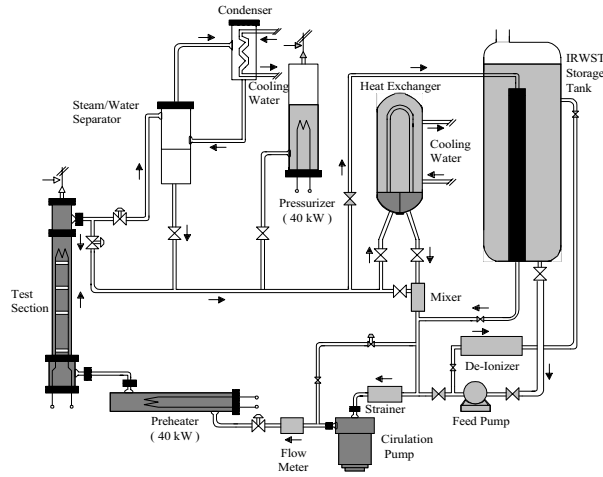


그림 1. RCS 열수력 Loop 장치 개략도

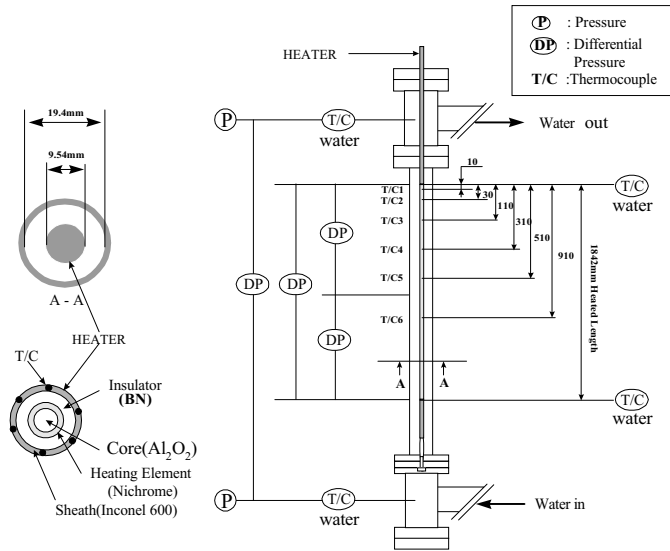


그림 2. 실험대 구조 및 열전대 위치

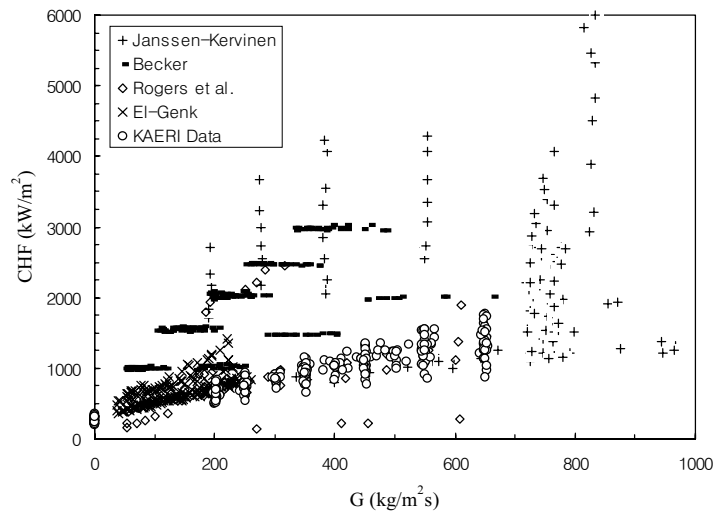


그림3. 기존 CHF 자료 및 KAERI CHF 자료

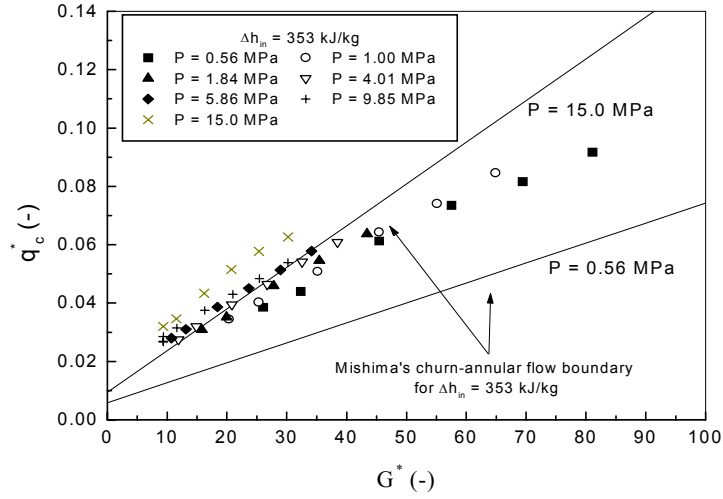


그림 4. 무차원 질량유속과 무차원 열유속과의 관계

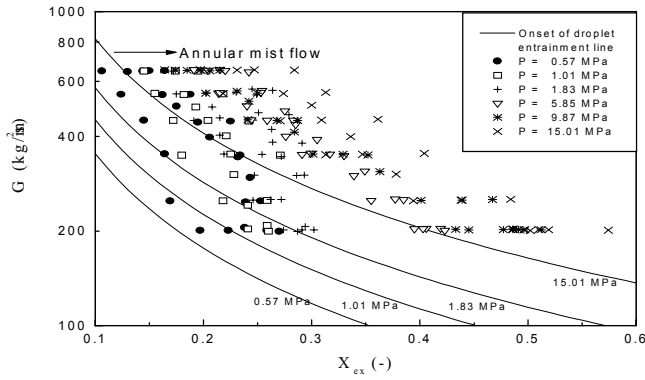


그림 5. CHF 조건에서의 출구건도와 질량 유속의 관계

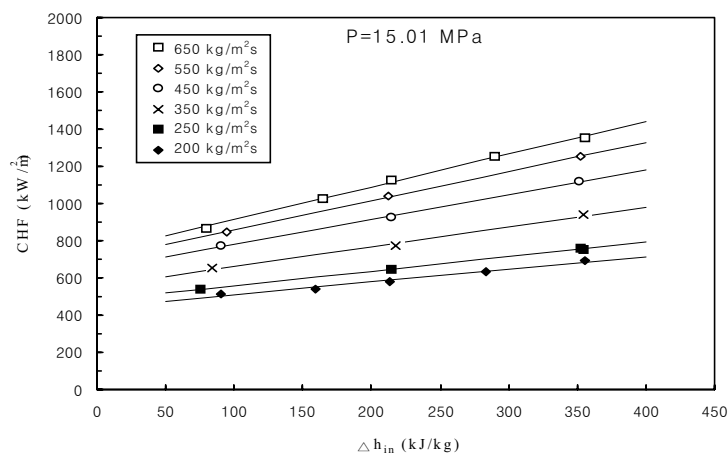


그림 6. 입구과냉도에 따른 CHF의 경향

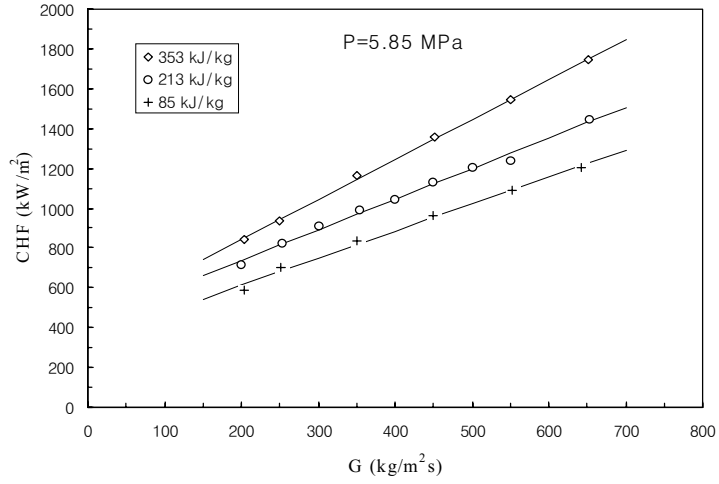


그림 7. 질량유속에 따른 CHF의 경향

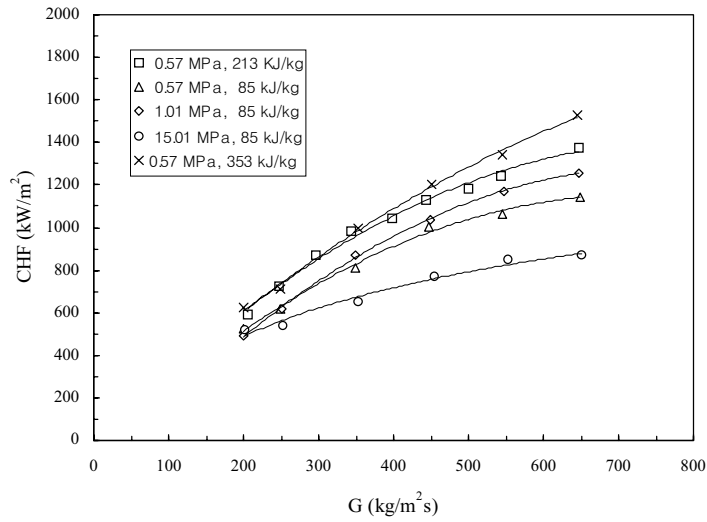


그림 8. 질량유속에 따른 CHF의 경향

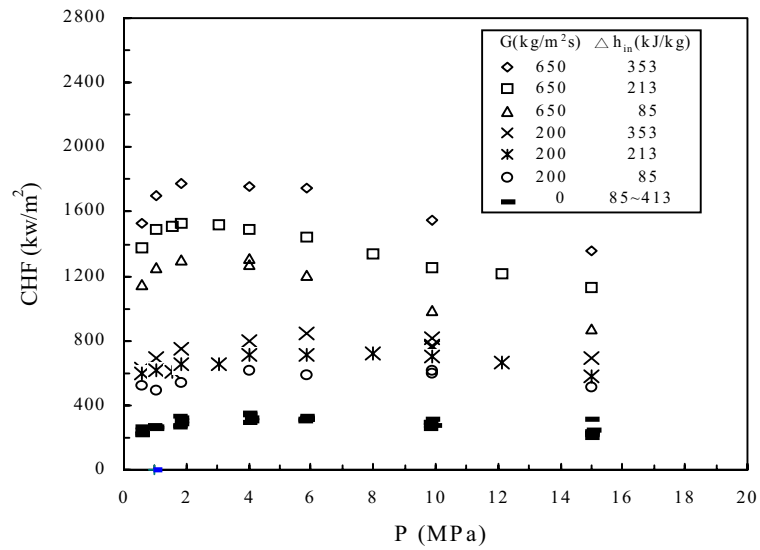


그림 9. CHF에 미치는 압력의 영향