

저유속 및 광범위한 압력조건하에서 비균일 가열 수직 환상유로에서의 임계열유속

**Critical Heat Flux in Non-Uniformly Heated Vertical Annulus Under Low Flow  
and a Wide Range of Pressure Conditions**

천세영, 문상기, 정홍준, 양선규, 정문기

한국원자력연구소  
303-353 대전광역시 유성구 덕진동 150

**요 약**

비균일하게 가열되는 수직 환상관에서 저유속 및 광범위한 압력 조건하에서 물을 사용한 상향 유동에 대한 임계열유속 실험을 수행하였다. 본 연구의 목적은 광범위한 압력조건하에서 저유속일 경우 발생하는 임계열유속의 변수경향(Parametric Trends)을 체계적으로 연구하고, 나아가서 수직 방향 출력 분포가 임계열유속에 미치는 영향을 규명하기 위한 것이다. 실험은 압력 0.57 ~ 15 MPa, 유량 200 ~ 650 kg/m<sup>2</sup>s, 입구과냉도 85 ~ 353 kJ/kg의 조건에서 수행되었다. 대부분의 임계열유속은 환상류에서 발생하며, 임계열유속 메커니즘은 액막건조(Liquid Film Dryout)에 의한 것으로 나타났다. 각종 변수들이 임계출력(Critical Power)에 미치는 영향은 균일 가열관에서의 변수경향과 유사한 것으로 나타났다. 출력분포의 영향은 낮은 압력일 경우에 크게 나타났으며, 압력이 증가함에 따라 그 영향이 작아졌다.

**Abstract**

An experimental study on the critical heat flux (CHF) has been performed for water flow in non-uniformly heated vertical annulus under low flow and a wide range of pressure conditions. The objectives of this study are to investigate systematically the parametric trends of the CHF under low flow and a wide range of pressure conditions, and to identify the effect of the axial heat flux distribution on the CHF. The experiment has been performed in the following conditions: pressure of 0.57 ~ 15 MPa, mass flux of 200 ~ 650 kg/m<sup>2</sup>s, inlet subcooling of 85 ~ 353 kJ/kg. Most of the CHF's are occurred in the annular flow pattern, thus the possible CHF mechanism is thought to be the liquid film dryout in annular flow regime. The parametric trends of the critical power at CHF condition are generally consistent with previous understandings for uniform heat flux distributions. The effect of the heat flux distribution is large at low pressure conditions, but the effect becomes small as the system pressure increases.

**1. 서론**

원자로나 보일러와 같은 비등 열전달계통에서 발생하는 임계열유속(Critical Heat Flux : CHF) 조건은 가열표면에 액체가 계속적으로 접할 수 없어, 가열표면과 액체간의 열전달이 급격히 감소하여 열유속이 조절되는 계통의 경우 가열표면의 온도가 급격히 상승하는 현상을 말한다. 이러한 임계열유속은 원자로의 경우 핵연료봉의 건전성을 나타내는 열수력 특성 인자이며, 임계열유속 예측의 신뢰성은 원자로의 안전성에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 임계열유속에 대한 이해와 신

뢰성 있는 임계열유속 예측 모델의 개발은 매우 중요하다. 지난 40년간의 임계열유속에 대한 광범위한 실험 및 이론 연구의 결과로 개발된 많은 임계열유속 상관식들이 핵연료개발 및 노심 설계에 적용되고 있다. 그러나 이들 대부분의 연구는 원자로 정상 운전 조건을 대상으로 수행된 것들이고, 좁은 범위에서 적용이 가능하며, LOCA와 같은 사고시나 운전 과도상태에서 발생하는 저유량 조건에서의 임계열유속 거동은 아직 명확하지 않다. 이러한 저유량 조건에서의 임계열유속은 경수로의 사고해석, 실험용 원자로의 정상상태 및 과도상태, 그리고 신형경수로의 피동 안전계통(Passive Safety System)에서의 자연순환 등과 관련하여 지속적으로 관심이 증대되고 있다. 하지만 지금까지 수행된 대부분의 저유량 조건에서의 임계열유속에 대한 실험 연구는 대기압 상태에서 이루어졌다. 따라서 광범위한 압력조건하에서 저유량 영역의 임계열유속에 대한 체계적인 연구와 실험 데이터의 확보가 필요하다.

환상유로에서의 임계열유속 실험은 오래 전부터 수행되어 왔으며[1-3], 최근에는 저유량 조건에서의 임계열유속에 주안점을 둔 실험 연구도 보고 되고 있다[4-7]. 한편 임계열유속을 예측하는 방법으로써 원형관 실험자료를 기초로 개발된 Look-Up Table을 환상유로에 응용하는 경우가 있는 데[8], 저유속, 저압 및 중압에서의 임계열유속 실험자료가 부족하여 예측의 신뢰성이 떨어지고 있다. 지금까지 환상유로 임계열유속 실험에서 얻어진 실험자료는 광범위한 압력조건을 만족하지 못하고 있으며, 저유량 영역에서 압력의 영향을 조사한 실험적 연구는 거의 없는 실정이다. 본 연구는 한국원자력연구소의 고온, 고압 임계열유속 실험장치인 RCS 열수력 Loop를 이용하여 환상유로에서 광범위한 압력조건에 대한 저유량 임계열유속 실험을 수행하여 압력이 임계열유속에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 출력분포가 임계열유속에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

그림 1은 RCS 열수력 Loop의 개략도로서 순환펌프, 예열기, Test Section, 기수분리기(Steam/Water Separator), 응축기, 가압기, 열교환기 등으로 이루어져 있다. 유량의 측정은 실험범위에 따라 3종류의 오리피스 유량계중 적절한 것을 사용한다. 유량은 순환펌프의 회전속도 조절, Bypass Line의 유량조절, 그리고 유량제어 밸브의 조절을 조합하여 제어된다. 저유량영역에서 흔히 관찰되는 유량의 진동은 Test Section 입구측의 밸브를 Throttling하여 제거하였다. 예열기는 Test Section 입구의 용수온도를 조절하기 위하여 설치되어 있다. Test Section에서 수증기-물의 2상유동 상태로 나온 순환용수는 기수분리기에서 수증기와 물로 완전히 분리되고, U-Tube Type 열교환기에서 설정된 온도까지 냉각된다. 실험장치의 가압 및 계통압력은 내부에 40 kW의 가열봉이 설치된 가압기를 사용하여 조절된다.

본 연구에 사용된 Test Section은 핵연료봉을 모의하도록 수직방향 출력분포를 갖는 길이 1843 mm의 가열봉이 환상유로 내부에 장전되어 있는 구조이다. 그림 2는 Test Section 구조 및 열전대의 위치를 보여준다. 그림 3에 나타난 것처럼 출력분포는 10개의 Step으로 균일하게 나뉘어져 있으며, 대칭적인 Cosine 분포를 모사한다. Test Section은 내부에 설치된 저항선에 교류를 통과시켜 간접적으로 가열된다. 가열봉에는 표면 온도를 측정하고 임계열유속을 검출하기 위해 Sheath 직경이 0.5 mm인 K-Type 비접지형 열전대가 6개 부착되어 있다.

본 연구에서는 다음과 같은 조건에서 약 290개의 임계열유속 실험자료를 얻었다.

- Test Section 형상 : 내부직경 = 9.53 mm, 외부직경 = 19.4 mm, 가열길이 = 1843 mm
- 출력분포 : 비균일
- 계통 압력 : 0.54 ~ 15.12 MPa
- 질량유속 : 0 및 200 ~ 650 kg/m<sup>2</sup>s
- 입구 과냉도 : 85 ~ 353 kJ/kg
- 출구 건도 : 0.07 ~ 0.57

압력은 Test Section 입구 Plenum 및 출구 Plenum에서 측정된다. 임계열유속 조건에 가까와짐에

따라 입구 Plenum 압력은 원하는 값으로 유지할 수 있었으나, 출구 Plenum 압력을 일정하게 유지하기가 어려웠다. 따라서 본 논문에서는 Test Section 입구 Plenum의 압력을 계통 압력으로 사용한다.

본 실험의 주요 측정변수는 Test Section 입구 및 출구의 순환유속 온도와 압력, Test Section 유량 및 차압, 가열봉의 표면 온도 및 가열봉에 투입되는 전력 등이며, 측정된 신호는 모두 자료 처리 및 획득장치에서 자동으로 수집, 처리 및 저장된다. 이들 압력, 유량, 온도 및 전력의 측정 불확실도(Uncertainty)는 압력, 유량 및 온도에 대하여 각각 자료처리장치 지시치의  $\pm 0.3\%$ ,  $\pm 1.5\%$  및  $0.6\%$  이하였다. 또한 가열봉의 전력 측정에 대한 불확실도는  $\pm 1.0\%$  이하였다.

임계열유속 실험은 다음과 같은 순서와 방법으로 수행된다. Test Section 입구의 유량, 온도 및 압력을 설정된 조건에 맞춘 다음, Test Section 가열봉에 전원을 공급하고 서서히 가열전력을 증가시킨다. 임계열유속 근방에서 출력을 조금씩 Step상태로 증가시키고, 수분동안 유지하여 정상 상태를 확인한 후, 다음 Step으로 조금씩 증가시킨다. 임계열유속이 발생하면 Burnout 검출기에 의해 전력공급을 80% 수준으로 낮추거나 전원을 자동적으로 정지시킨다. 임계열유속 발생 판단 조건은 가열봉의 표면 온도가 지속적으로 급격히 상승하는 경향으로 판단하며, 본 실험에서는 표면 온도가 포화온도보다 약 110 K이상 상승하면 CHF가 발생한 것으로 판단하였다.

### 3. 실험 결과 및 논의

#### 3.1 임계열유속에 대한 변수 경향

균일 출력분포를 갖는 시험관에서는 임계열유속이 출구에서 발생하지만, 비균일 출력분포를 갖는 시험관에서는 열유속 분포에 따라 출구 상류(Upstream of Exit)에서 발생한다. 따라서 비균일 출력분포를 갖는 시험관에서의 임계열유속 분석은 임계열유속이 발생한 지점에서의 열수력학적 조건(엔탈피, 건도 등)을 이용해야 한다. 이러한 열수력학적 조건은 임계열유속 발생 지점까지의 총출력  $Q_c$  혹은 평균 열유속  $q_c$ 에 의존하므로, 본 실험결과와 분석은 임계열유속이 발생지점까지의 총출력 혹은 평균 열유속을 사용하거나, 임계열유속 지점에서의 열역학적 건도  $X_c$ 를 사용하여 이루어졌다. 이러한 분석은 임계열유속 메커니즘이 상류의 열수력학적 조건에 의존하는 액막건조(Liquid Film Dryout)일 경우에 적절한 분석 방법이다. 본 실험조건에서는 대부분의 임계열유속이 출구쪽에서 약간 떨어진 열전대 2와 3에서 발생하였다.

Mishima와 Ishii[9]의 유동양식 선도를 이용하여 임계열유속이 발생하는 위치에서의 유동양식을 분석하였다. 그림 4 ~ 6은 입구 과냉도에 따라 다음과 같이 무차원화된 질량유속 및 임계열유속값에 대해 그린 것이다.

$$q_c^* = \frac{Q_c}{h_{fc} A_{fc} \sqrt{\lambda \rho_g \Delta \rho}} \quad (1)$$

$$G^* = \frac{G}{\sqrt{\lambda \rho_g \Delta \rho}} \quad (2)$$

$$\lambda = \sqrt{\sigma / (g \Delta \rho)} \quad (3)$$

여기서  $\lambda$ 는 Taylor-Wave Length Scale이며, 하첨자 c는 임계열유속 지점을 나타내며,  $Q_c$ 는 임계열유속 지점까지의 총출력을 나타낸다. 그림에는 Mishima와 Ishii의 유동양식 선도[9]에 따른 무차원화된 처연-환상류 유동 천이곡선이 나타나 있다. 그림에 나타난 것처럼 모든 임계열유속은 환상류에서 발생하므로 임계열유속 메커니즘은 액막건조에 의한 것으로 판단된다. 특히 입구과냉도가 감소함에 따라 처연유동(Churn Flow)양식에서 멀어져 환상영역에서 임계열유속이 발생하고 있다.

그림 7은 질량유속에 따른 임계열유속 발생지점까지의 평균 임계열유속  $q_c$ 를 보여준다. 그림에 나타난 것처럼 질량유속에 따라 임계열유속은 증가한다. 그림 8은 임계열유속 발생지점의 건도에 대한 질량 유속의 영향을 보여준다. 질량유속이 증가함에 따라 임계건도는 감소하며, 이러한 감소

경향은 압력이 높고, 질량유속이 작을 경우 더욱 크게 발생한다. 그림 9 ~ 11은 다양한 계통 압력에서 임계열유속에 대한 입구 과냉도의 영향을 보여준다. 저압에서는 입구과냉도의 영향이 크게 나타나지 않지만, 압력이 증가함에 따라 입구과냉도와 임계열유속은 뚜렷한 선형관계를 보여준다. 그림 12와 13은 임계출력  $Q_c$ 에 대한 계통 압력의 영향을 보여준다. 그림에 나타난 것처럼 높은 질량유속 조건에서는 압력이 증가함에 따라 임계출력이 급격히 증가하여 약 2 ~ 4 MPa에서 국부적인 최고치를 보이며, 약 12 MPa에서 또 다른 최고치를 보여준다. 그러나 낮은 질량유속에서는 저압에서의 임계출력 거동이 뚜렷하지 않고, 높은 압력에서 나타나는 최고치도 뚜렷하지 않다. 압력에 따른 임계열유속의 영향에서는 두 번째의 최고치가 발생하지 않는 것으로 나타났으나, 이는 임계열유속 발생위치에 의한 것으로 생각된다.

### 3.2 출력분포의 영향

출력분포의 영향을 살펴보기 위해 균일 가열관에서 수행한 임계열유속 실험 데이터[10]와 비교하였다. 그림 14 ~ 16은 균일 가열관과 비균일 가열관에서의 임계출력비를 압력에 따라 그린 것이다. 그림에 나타난 것처럼 거의 대부분의 압력 범위에서 비균일 가열관의 임계출력이 균일 가열관의 임계출력보다 작다는 것을 알 수 있다. 특히 낮은 압력에서는 출력분포의 영향이 크게 나타나며, 압력이 증가함에 따라 임계출력의 비는 1에 가까워져 높은 압력에서는 출력분포가 임계출력에 미치는 영향이 상대적으로 작음을 알 수 있다. 국부적인 관점에서 살펴보기 위해 임계건도를 압력에 따라 그려보면 그림 17 ~ 19와 같다. 그림에 나타난 바와 같이 비균일 가열관에서는 균일 가열관에서의 국부적인 건도보다 낮은 건도에서 임계열유속이 발생함을 알 수 있다.

## 4. 결론

저유량 및 광범위한 압력조건에서 비균일하게 가열되는 수직 환상관에서 주요 변수들이 임계열유속에 미치는 영향을 관찰하고, 출력분포에 대한 영향을 평가하기 위한 임계열유속 실험을 수행하였다. 실험에서 얻어진 임계열유속 데이터를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 유동양식 분석에 따르면 임계열유속은 환상류에서 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 간접적으로 액막건조에 의해 임계열유속이 발생했음을 나타낸다. 특히 입구과냉도가 감소함에 따라 임계열유속 조건에서의 국부조건은 처연류에서 멀어지고 있다.
2. 따라서 임계열유속 데이터의 분석은 국부적인 열유속 값보다는 전체적인 임계출력이나 임계열유속 발생지점까지의 평균 열유속, 혹은 국부건도를 통하여 이루어지는 것이 바람직하였다.
3. 임계출력 혹은 국부건도에 대한 변수들의 경향은 기존의 실험연구에서 나타나는 균일 가열관에서의 변수경향과 거의 일치하였다. 그러나 임계출력에 대한 압력의 영향은 낮은 압력에서 복잡하게 나타났다.
4. 출력분포의 영향은 낮은 압력에서 크게 나타나며, 압력이 증가함에 따라 출력분포의 영향은 작아지는 것으로 나타났다. 또한 비균일 가열관에서는 균일 가열관보다 낮은 국부 건도 혹은 낮은 임계출력에서 임계열유속이 발생하였다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 과제 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. E. Janssen and J. A. Kervinen, "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. K. M. Becker, G. Hernborg, M. Bode and O. Eriksson, "Burnout data for flow of boiling water in vertical round ducts, annuli and rod clusters," Aktiebolaget Atomenergi, Stockholm, Sweden, AE-177 (1965).
3. P. G. Barnett, "A correlation of burnout data for uniformly heated annuli and its use for predicting burnout in uniformly heated rod bundles," AEEW-R463 (1966).
4. K. Mishima and M. Ishii, "Experimental study on natural convection boiling burnout in annulus," *Proc of the 7th International Heat Transfer Conference*, Munchen, **4**, 309-314 (1982).
5. J. T. Rogers, M. Salcudean and A. E. Tahir, "Flow boiling critical heat fluxes for water in a vertical annulus at low pressure and velocities," *Proc of the 7th International Heat Transfer Conference*, Munchen, **4**, 339-344 (1982).
6. M. S. El-Genk, S. J. Haynes and S. H. Kim, "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. J. W. Park, W. P. Baek and S. H. Chang, "Critical heat flux and flow pattern for water flow in annular geometry," *Nucl. Eng. Design*, **172**, 137-155 (1997).
8. S. Doerffer, D. C. Groeneveld et al., "A comparison of critical heat flux in tubes and annuli," *Nucl. Eng. Design*, **149**, 167-175 (1994).
9. K. Mishima and M. Ishii, "Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes," *Int. J. Heat Mass Transfer*, **27**[5], 723-737 (1984).
10. 천세영 등, "광범위한 압력조건하에서의 수직 환상 유로의 임계열유속," 한국원자력학회 '98 추계학술대회 제3분과 (A) (1998).

### 기호설명

$A_{hc}$	Heated area from inlet to CHF location
$G$	Mass flux
$G^*$	Dimensionless mass flux
$g$	Acceleration due to gravity
$h_{fg}$	Latent heat of vaporization
$P$	Pressure
$Q_c$	Total power from inlet to CHF location
$q_c$	Average heat flux (CHF) from inlet to CHF location
$q_c^*$	Dimensionless CHF
$X_c$	Thermodynamic quality at CHF location
$\lambda$	Taylor-wave length scale
$\Delta h_i$	Inlet subcooling
$\Delta \rho$	Density difference between saturated water and steam
$\rho_g$	Steam density
$\sigma$	Surface tension

### 하첨자

NU	Non-uniform
UN	Uniform

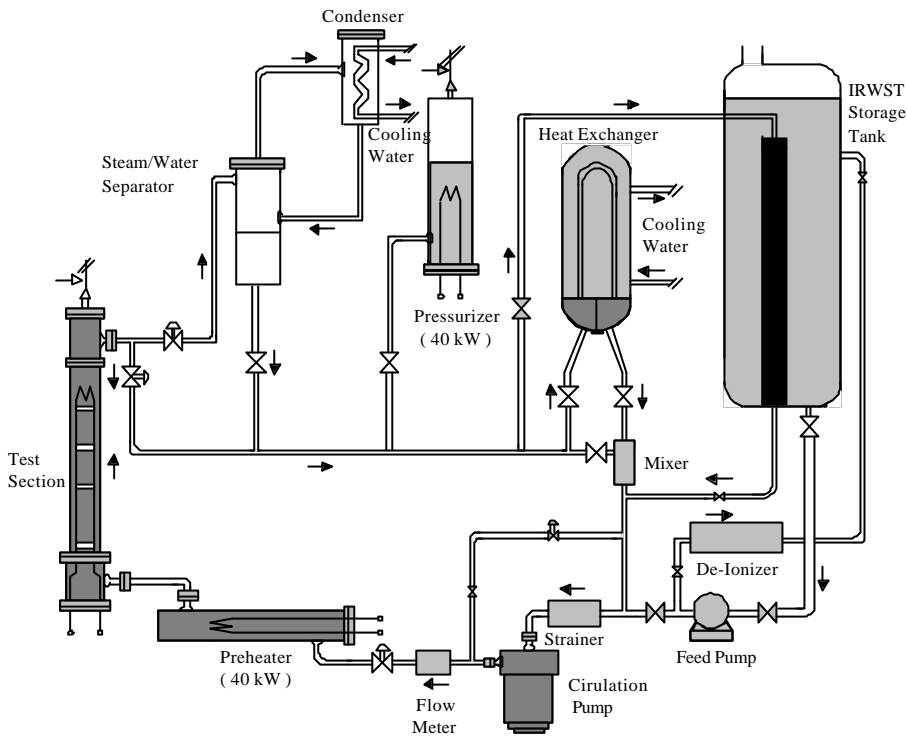


그림 1 KAERI RCS 열수력 Loop

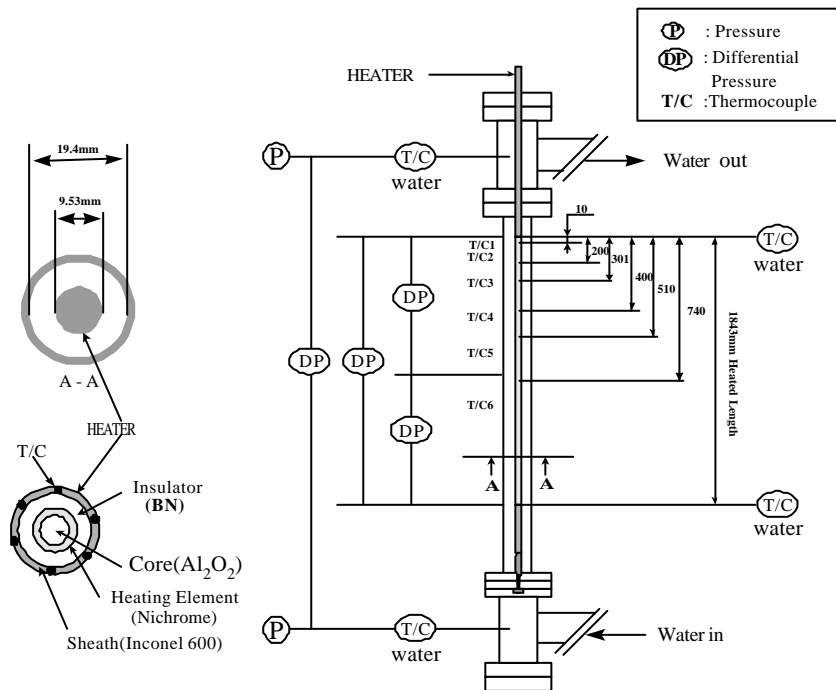


그림 2 Test Section 구조

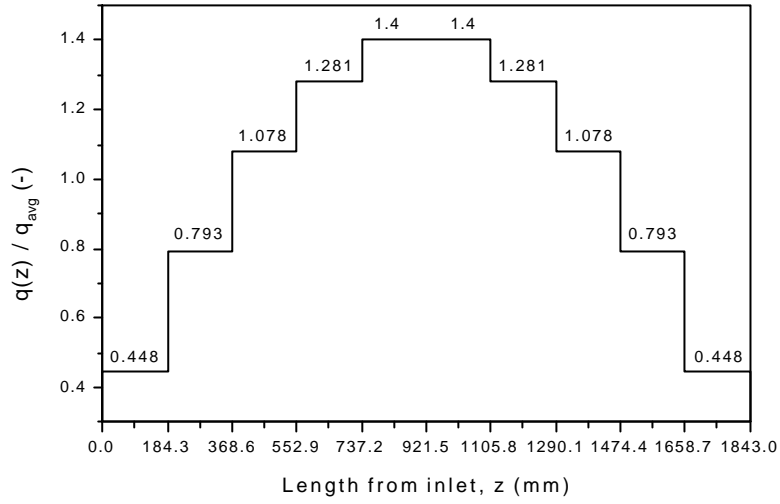


그림 3 Test Section의 출력분포

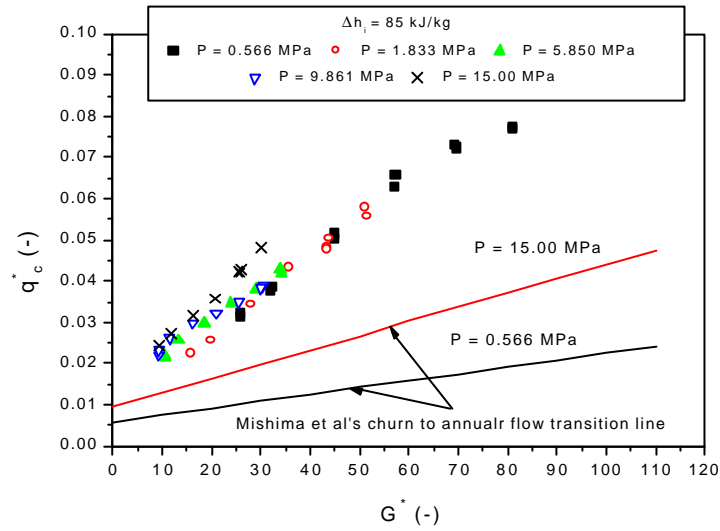


그림 4 무차원 질량유속에 대한 무차원 CHF (입구과냉도 85 kJ/kg)

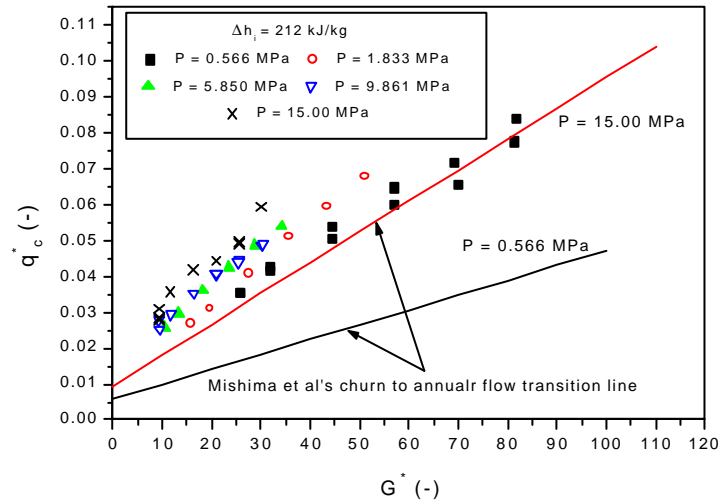


그림 5 무차원 질량유속에 대한 무차원 CHF (입구과냉도 212 kJ/kg)

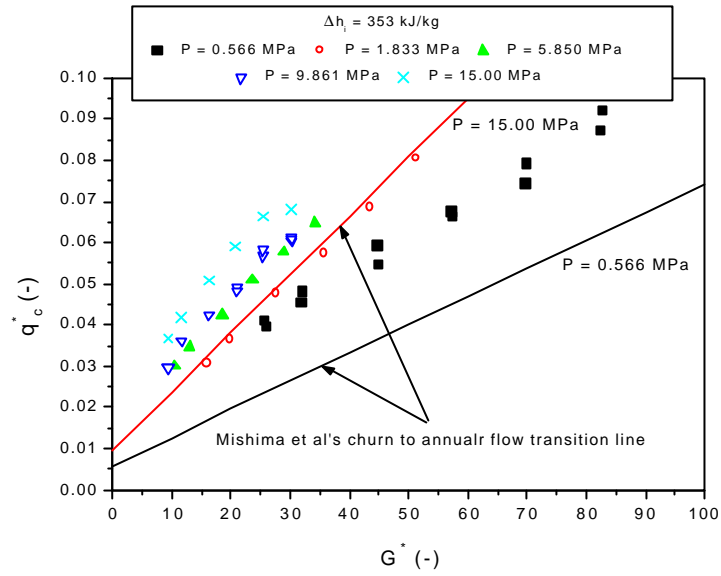


그림 6 무차원 질량유속에 대한 무차원 CHF (입구과냉도 353 kJ/kg)

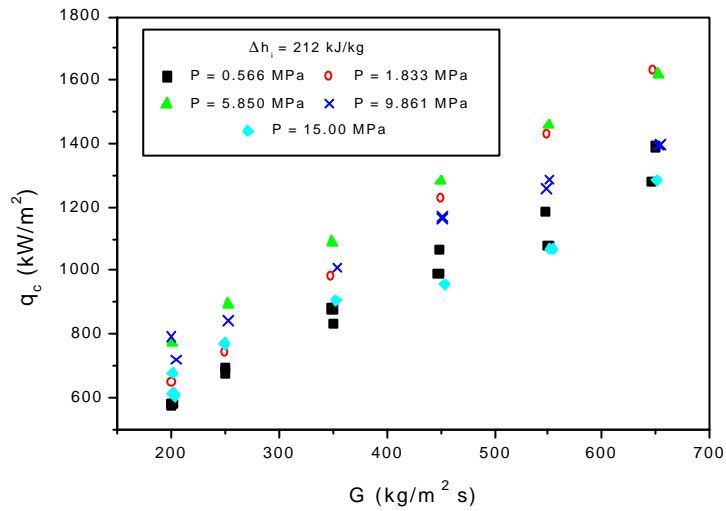


그림 7 임계열유속에 대한 질량유속의 영향

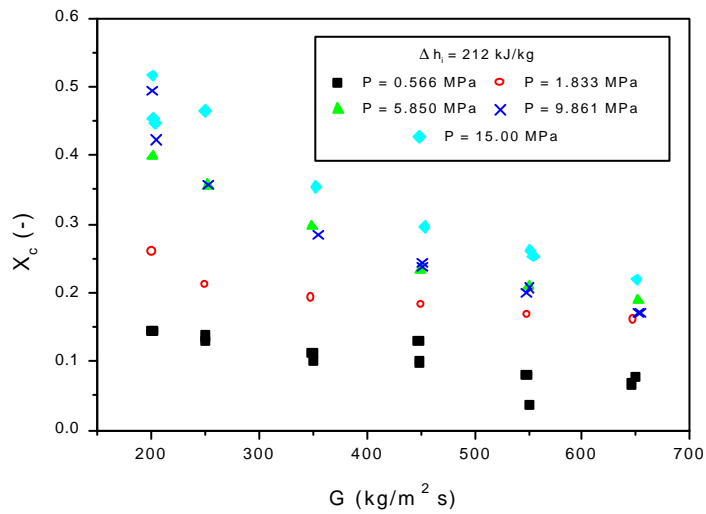


그림 8 임계건도에 대한 질량유속의 영향



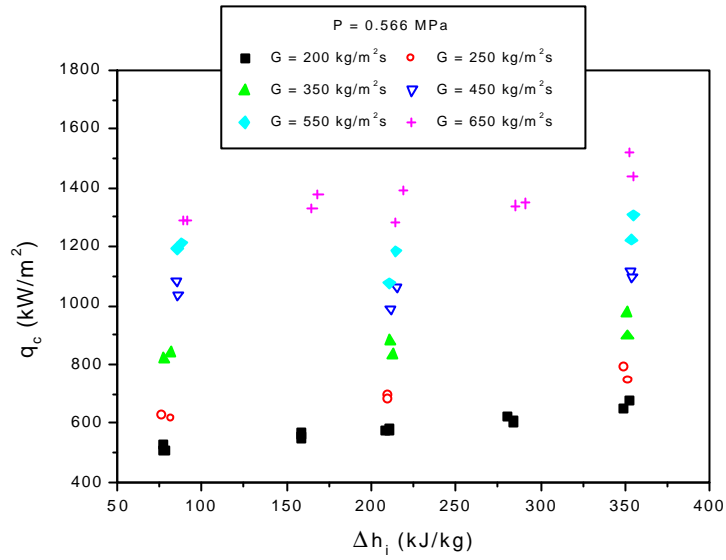


그림 9 입구과냉도의 영향 ( $P = 0.566$  MPa)

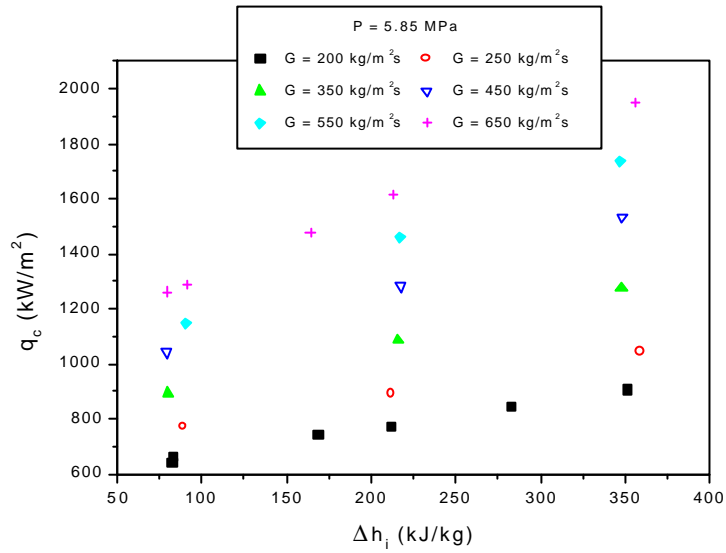


그림 10 입구과냉도의 영향 ( $P = 5.85$  MPa)

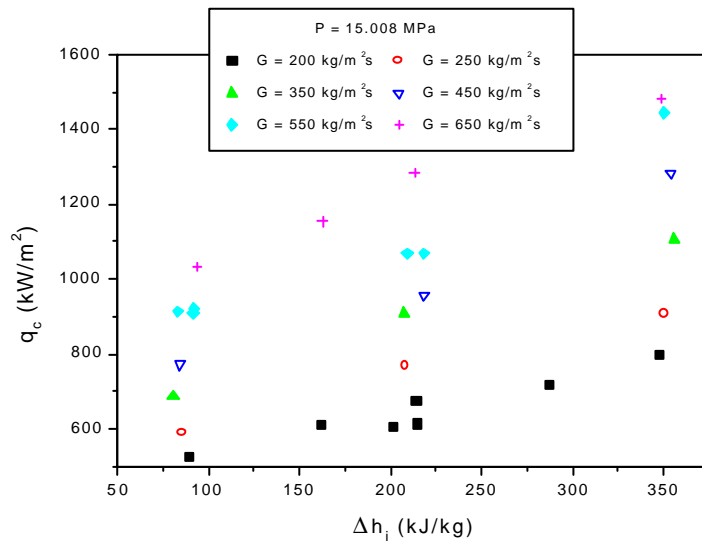


그림 11 입구과냉도의 영향 ( $P = 15.008$  MPa)

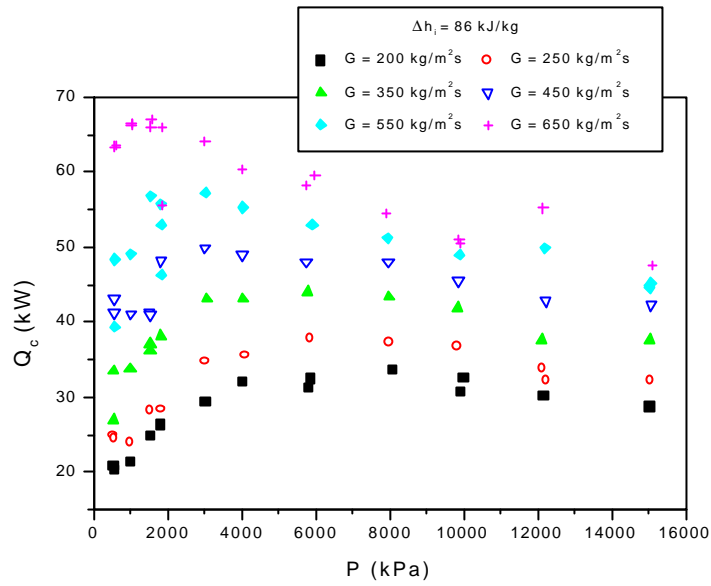


그림 12 압력의 영향 (입구과냉도 = 86 kJ/kg)

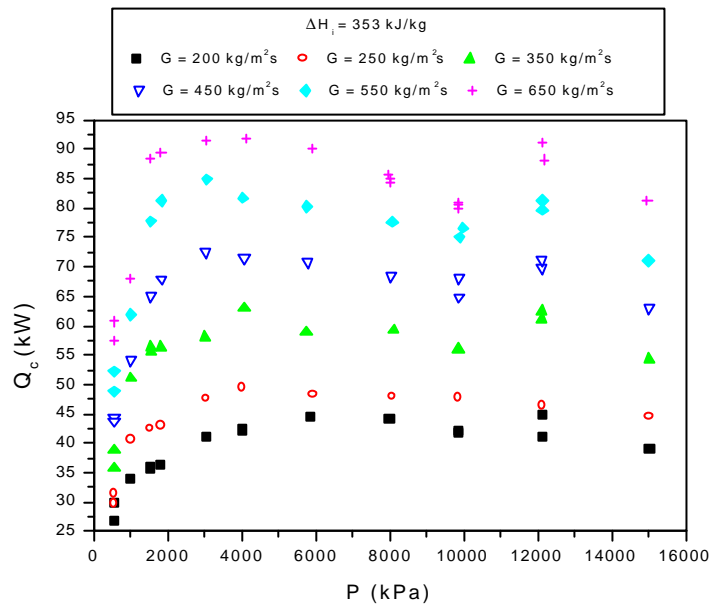


그림 13 압력의 영향 (입구과냉도 = 353 kJ/kg)

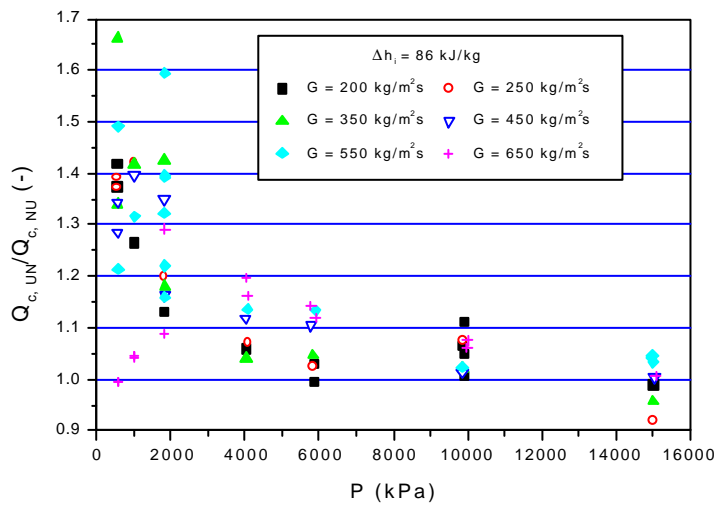


그림 14 압력에 따른 임계출력비 (입구과냉도 = 86 kJ/kg)

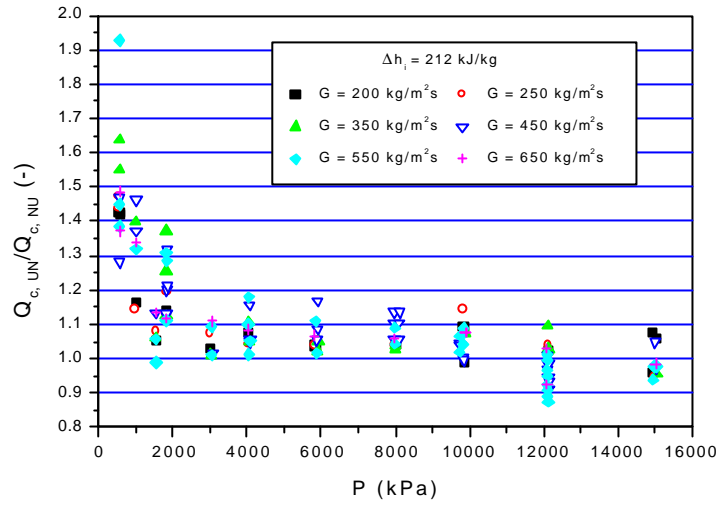


그림 15 압력에 따른 임계출력비 (입구과냉도 = 212 kJ/kg)

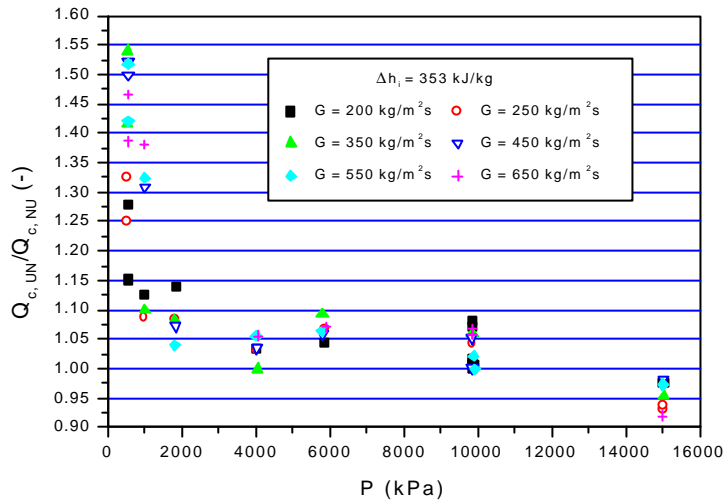


그림 16 압력에 따른 임계출력비 (입구과냉도 = 353 kJ/kg)

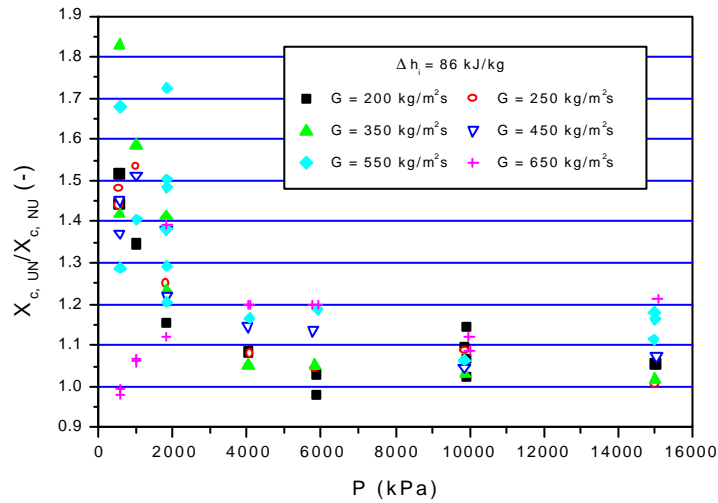


그림 17 압력에 따른 임계건도비 (입구과냉도 = 86 kJ/kg)

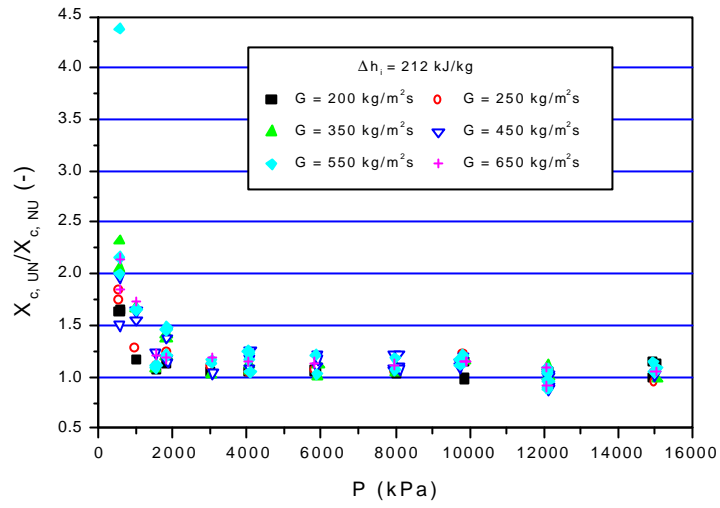


그림 18 압력에 따른 임계건도비 (입구과냉도 = 212 kJ/kg)

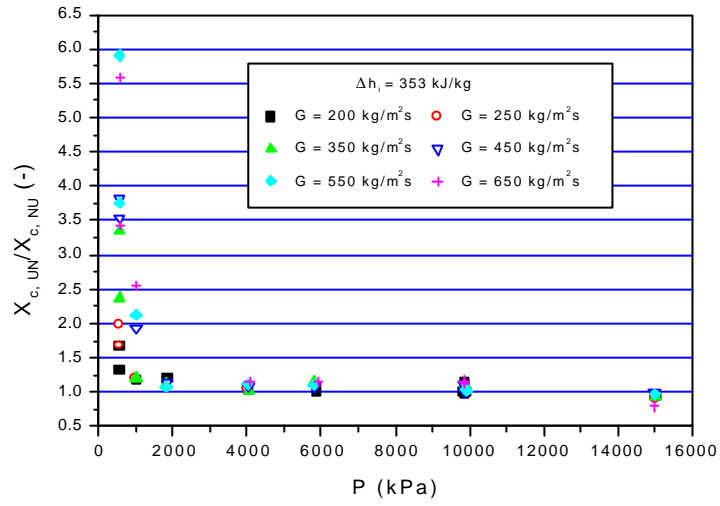


그림 19 압력에 따른 임계건도비 (입구과냉도 = 353 kJ/kg)