

비균일 가열 수직 봉다발에서의 저유속 임계열유속에 대한 실험 연구  
Experimental Study on the Low Flow CHF in Vertical Rod Bundle  
with Axial Heat Flux Distribution

문상기, 천세영, 최기용, 박종국, 백원필  
한국원자력연구소  
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

비균일하게 가열되는 수직 3 x 3 봉다발을 이용하여 저유속 및 광범위한 압력 조건하에서 임계열유속에 대한 실험 연구를 수행하였다. 임계열유속에 대한 질량유속의 영향은 낮은 계통 압력 조건에서 상대적으로 크게 나타났으며, 질량유속이 감소함에 따라 입구과냉도와 계통압력이 임계열유속에 미치는 영향은 작아졌다. 특히 계통 압력이 증가하고 질량유속이 작아지면, 임계열유속에 미치는 입구 과냉도의 영향은 거의 무시할 수 있었다. 매우 낮은 질량유속 및 약 3 MPa 이상의 계통 압력 조건에서는 임계열유속이 발생하는 위치에서의 임계건도가 1이상의 값을 보여주었으며, 이는 실험대 상부에서의 대향류에 의한 것으로 판단된다. 계통 압력에 대한 임계열유속의 거동은 상대적으로 낮은 계통 압력에서 복잡한 거동을 나타냈다. 본 실험 데이터에 대해 새로 개발된 상관식 및 EPRI 상관식은 전반적으로 임계열유속을 신뢰성 있게 예측할 수 있었으나, 아직도 매우 낮은 유속 조건에서는 개선할 필요가 있는 것으로 나타났다.

Abstract

An experimental study on critical heat flux (CHF) has been performed for water flow in a non-uniformly heated vertical 3 by 3 rod bundle under low flow and a wide range of pressure conditions. The effects of mass flux on the CHF are relatively large in low system pressure conditions. In addition, the effects of inlet subcooling and system pressure on the CHF decrease as the mass flux decreases. As the system pressure increases and the mass flux decreases, the effect of inlet subcooling on the CHF can be negligible. At low mass flux and system pressure above 3 MPa,

some critical qualities are larger than 1.0 due to a counter-current flow in the upper part of the test section. The parametric trends of CHF against system pressure show complex behaviors in low system pressure conditions. Newly developed CHF correlation and conventional EPRI CHF correlation predicted present CHF data with reasonable accuracies, but some improvements are necessary in very low flow conditions.

## 1. 서론

지금까지의 임계열유속 연구는 주로 원자력 발전소의 운전조건을 대상으로 수행되었다. 그러나, 원자력발전소의 냉각재 상실사고(LOCA: Loss of Coolant Accident) 및 운전 과도기에서 발생하는 저유량 조건에서의 임계열유속 거동은 비교적 명확하지 않다. 저유속 조건에서의 임계열유속은 부력의 영향, 다양한 유동 불안정성의 발생 등으로 인하여 더욱 복잡한 거동을 보인다. 최근 원자로 냉각재 상실사고나 운전 과도기와 같은 저유량 조건에서의 임계열유속 현상을 파악하기 위한 실험적 연구가 수행되고 있다.<sup>1-4)</sup> 저자들도 단일 가열봉 환상유로를 사용하여 CHF 실험을 수행한 바 있으며<sup>5-7)</sup>, 원형관이나 환상유로에서의 저유량 CHF에 대한 연구는 상당한 진전을 보여주고 있다. 지금까지 수행된 대부분의 저유량 조건에서의 CHF에 대한 실험 연구는 주로 대기압 조건의 낮은 압력조건에서 원형관 및 환상관 등의 비교적 단순한 실험대를 이용하여 수행되었다. 그러나, 실제 원자로 노심은 연료봉 다발로 구성되어 있고, 연료봉 사이에는 제어봉 안내관, 계측관 등 가열되지 않는 벽면들이 존재하며, 이들은 부수로 내에서의 엔탈피 분포 및 CHF에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다. 봉다발에서의 CHF에 대한 연구도 광범위하게 수행되어 왔으나, 이들 연구는 대부분 원자로의 정상 운전 조건을 대상으로 수행되었고 저유량 조건에서 봉다발을 이용한 실험적 연구는 전무한 상태이다. 따라서 광범위한 계통 압력 및 저유량 조건에서 실제 원자력발전소의 노심과 같은 봉다발 형상을 사용한 임계열유속에 대한 체계적인 연구와 실험 데이터의 확보가 필요하다. 저자들은 본 실험에서 사용한 것과 동일한 기하학적 형상을 갖는 3 x 3 균일 열유속 봉다발에서 비가열봉의 영향을 관찰하기 위한 실험을 수행한 바 있다.<sup>8)</sup> 본 실험은 이러한 봉다발 임계열유속 실험의 연장으로서 비균일한 열유속 분포의 영향을 관찰하기 위한 것이다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

임계열유속 실험은 한국원자력연구소의 RCS 열수력 Loop를 사용하여 수행되었으며, 실험장치는 그림 1에 나타난 것처럼 순환펌프(Circulating Pump), 예열기(Preheater), 시험관, 기수분리기(Steam/Water Separator), 응축기, 가압기, 열교환기 등으로 이루어져 있

다.<sup>5-7)</sup> 유량의 측정은 오리피스 유량계를 사용하였으며, 저유량영역에서 관찰되는 유동의 진동은 실험대 입구에 설치된 밸브를 Throttling하여 제거하였다. 실험장치의 계통압력은 가압기에 설치된 40 kW의 가열봉을 사용하여 조절하였다. 본 연구에 사용된 실험대는 핵연료봉을 모의하도록 수직방향 출력분포를 갖는 길이 3673 mm인 9개의 가열봉이 압력 용기내에 설치된 Flow Housing 내부에 장전되어 있는 구조를 갖는다. 가열봉의 직경 및 피치는 각각 9.52 mm 및 12.6 mm이다. 실험대에는 단순한 형상을 갖는 지지격자가 11개 설치되어 있다. 그림 2는 실험대의 구조 및 열전대의 위치를 보여준다. 가열봉에는 표면 온도를 측정하고 임계열유속을 검출하기 위해 Sheath 직경이 0.5 mm인 K-Type 비접지형 열전대가 6개 혹은 4개씩 부착되어 있다. 또한 같은 형태의 열전대가 가열구간 입구 및 출구에서의 부수로 유체 온도를 측정하기 위해 각각 16개씩 설치되어 있다. 그림 3에 나타난 것처럼 수직방향 출력분포는 15개의 Step으로 균일하게 나뉘어져 있으며, 대칭적인 Cosine 분포를 모사한다. 가열봉의 평균 열유속에 대한 최대 열유속 및 최소 열유속의 값은 각각 1.40 및 0.45이며, 가열봉은 내부에 설치된 저항선에 교류를 통과시켜 간접적으로 가열된다.

실험은 다음과 같은 순서와 방법으로 수행되었다. 먼저 실험대 입구의 유량, 온도 및 압력을 설정된 조건에 맞춘 다음, 실험대 가열봉다발에 전원을 공급하고 서서히 가열 전력을 증가시킨다. 예상되는 CHF 값 근처에서 공급 전력을 미세하게 Step 상태로 증가시켜, 수 분 동안 유지하여 정상상태를 확인한 후 다음 Step으로 증가시킨다. CHF의 발생 판단조건은 가열봉 표면 온도가 갑자기 지속적으로 상승하는 현상으로 판단하며, 본 실험에서는 표면 온도가 포화 온도보다 110 K 이상 상승하면 CHF가 발생한 것으로 판단하였다.

본 실험의 주요 측정변수는 실험대 입구 및 출구 플레넘의 압력, 실험대 입구 유량, 가열봉다발의 가열구간 입구 및 출구의 유체 온도, 가열봉 표면 온도, 가열봉다발에 공급된 전력 등이며, 측정된 신호는 모두 Workstation급 자료처리장치에서 자동적으로 수집/처리된다. 이들 측정변수의 불확실도는 Sensor 및 계측기기의 정밀도와 교정결과로부터 ANSI/ASME PTC 19.1 코드<sup>9)</sup>의 방법을 사용하여 평가하였으며, 관찰된 불확실도는 압력, 유량 및 온도에 대하여 각각 자료처리장치 지시치의  $\pm 0.3 \%$ ,  $\pm 1.5 \%$  및  $\pm 0.7 \text{ K}$  이하였다. 가열봉다발에 공급된 전력 측정에 대한 불확실도는  $\pm 1.8 \%$  이하였다.

본 연구에서는 다음과 같은 조건에서 181개의 임계열유속 실험 데이터를 얻었다.

- 가열봉 배열 : 3 x 3
- 가열봉수 : 9 개
- 가열봉 외경 : 9.52 mm
- 가열봉 피치 : 12.6 mm
- 가열길이 : 3673 mm
- 수직방향 출력분포 : 비균일 (15 Step 대칭 코사인 축방향 출력 분포)

- 계통 압력 ( $P$ ) : 0.47 ~ 15.06 MPa
- 질량유속 ( $G$ ) : 50 ~ 654 kg/m<sup>2</sup>s
- 입구 과냉도 ( $\Delta h_{in}$ ) : 68 ~ 723 kJ/kg
- 출구 건도 ( $X_{ex}$ ) : 0.46 ~ 1.52

### 3. 실험결과 및 논의

가열구간 출구에서의 건도가 커짐에 따라 출구 플레넘의 압력은 약간 불안정하게 된다. 따라서 본 논문에서는 실험대 입구 플레넘의 압력을 계통 압력으로 사용하였다. 본 실험대에서 발생하는 압력강하는 계통압력에 비해 무시할 수 있으므로, 출구 플레넘 대신 입구 플레넘의 압력을 사용하는 것은 큰 문제가 없을 것으로 보인다.

일반적으로 수직 상향류 균일 가열봉의 경우 CHF는 가열구간 출구에서 발생한다. 그러나, 대칭 코사인 출력분포를 갖는 실험대에서는 일반적으로 출구가 아닌 가열구간 상단부에서 발생한다. 본 실험에서도 대부분의 CHF는 가열봉 R1, R7, R5, R2번에서 발생하였으며, CHF 발생위치는 약 93 %가 열전대 3번과 2번에서 발생하였다(그림 2와 3 참조).

그림 4는 질량유속과 CHF(실험대 전체에 공급된 평균 열유속으로 정의함)의 관계를 보여주며, CHF는 질량유속이 증가함에 따라 증가하며, 저압에서의 CHF는 그 기울기가 고압에 비해 커서 CHF에 대한 질량유속의 영향은 저압에서 커지는 것을 알 수 있다. 또한 질량유속이 작은 경우에는 CHF가 급격하게 선형적으로 증가하지만, 질량유속이 증가함에 따라 CHF의 증가율은 감소하여 CHF는 완만하게 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 그림 5는 유량을 고정된 경우 CHF가 입구 과냉도의 증가에 따라 선형적으로 증가함을 보여준다. 그림 4와 5에 나타난 것처럼 질량유속이 작아질수록 CHF에 대한 입구 과냉도 및 계통 압력의 영향은 작아지는 것을 알 수 있다. 특히 계통 압력이 크고 질량유속이 작아지면 CHF에 미치는 입구 과냉도의 영향은 거의 무시할 수 있다.

CHF 조건에서 CHF가 발생한 축방향 위치의 단면 평균 건도를 열역학적 평형을 가정하여 구한 값으로 정의한 임계건도(Critical Quality)와 질량유속과의 관계를 나타내면 그림 6과 같다. 본 실험조건에서 임계건도 범위는 0.36 ~ 1.35로 나타났다. 질량유속이 증가함에 따라 임계건도는 감소하는 경향을 보여주며, 낮은 질량유속에서 임계건도의 감소율이 상대적으로 크게 나타난다.

CHF 현상은 2상유동의 양식과 밀접한 관계가 있다. 즉 CHF의 발생기구는 기포류 ~ 슬러류(Slug Flow) 영역에서는 핵비등 이탈(DNB), 환상류에서는 액막의 건조(Dryout)로 크게 구분된다. 저유량 조건에서의 CHF 발생기구는 다음과 같이 분류할 수 있다.<sup>2, 10-12)</sup>

- 매우 낮은 유량 조건에서 플러딩(Flooding)에 의한 CHF 발생
- 슬러류 또는 처연(Churn)류에서 환상류로의 유동양식 천이 조건에서 CHF가 발생
- 환상류에서 액막의 건조(Liquid Film Dryout)에 의한 CHF 발생

- 액상의 완전한 증발, 즉 출구건도가 약 100 %가 될 때 CHF 발생

그림 7은 임계건도에 대한 압력의 영향을 보여준다. 그림 6 및 7에서 3 MPa 이상의 압력 및 51 또는 150 kg/m<sup>2</sup>s의 아주 낮은 유량에서는 임계건도가 100 %를 넘어서고 있다. 이는 가열구간에서 발생한 수증기가 실험대 상부 Plenum에서 응축되어 생성된 포화수가 가열봉다발의 가열구간에 하향류로 공급되고 있는 것을 나타낸다. Mishima와 Ishii<sup>13)</sup>의 유동양식 선도에 의해 CHF 발생위치에서의 유동양식을 구해보면 환상류 혹은 환상-분무류인 것으로 나타난다. 따라서 임계건도가 100 % 이상이 되는 저유량에서는 플러딩에 의해 CHF가 발생하고, 나머지 조건에서는 환상류에서의 액막 건조에 의해 CHF가 발생한 것으로 판단된다.

그림 8은 CHF에 대한 계통 압력의 영향을 보여준다. 약 3 MPa 이상의 계통 압력에서는 CHF는 압력의 증가에 따라 단조롭게 감소하는 경향을 보여준다. 그러나, 그 이하의 낮은 계통압력에서는 CHF가 질량유속의 값에 따라 증가 혹은 감소하는 복잡한 경향을 보여주고 있다. 질량유속이 낮아질수록 CHF에 대한 압력의 영향은 상대적으로 작아져, 압력의 영향이 거의 나타나지 않는다. Bowditch 등<sup>14)</sup>의 5 x 5 가열봉다발에서의 CHF 실험 및 Chun 등<sup>5)</sup>의 환상유로에서의 CHF 실험에 의하면 유량이 클 경우(300 kg/m<sup>2</sup>s 이상) CHF는 압력이 증가함에 따라 2 ~ 4 MPa 근방에서 최대치가 된 후 15.0 MPa 까지 천천히 선형적으로 감소하는 것으로 보고되고 있다. 그러나, 본 실험에서는 이러한 최대치에 대한 경향을 뚜렷하게 볼 수 없다.

Mishima와 Nishihara<sup>15)</sup>에 의해 제안된 저유량 조건에서의 CHF에 대한 무차원수를 이용하여, 본 실험에서 얻어진 임계열유속 데이터에 대한 상관식을 다음과 같이 개발하였다.

$$q_{CHF}^* \left( \frac{A_H}{A_f} \right) = \left[ C_1 + C_2 \left( 1 + C_3 \frac{\Delta h_{in}}{h_{fg}} \right) G^* + \frac{C_4}{10000} G^{*2} \right] \quad (1)$$

$$\text{여기서, } q_{CHF}^* \equiv q_{CHF} / (h_{fg} \sqrt{\lambda \rho_g g \Delta \rho}), \quad \lambda \equiv \sqrt{\sigma / g \Delta \rho}, \quad G^* \equiv G / \sqrt{\lambda \rho_g g \Delta \rho} \quad (2)$$

$$C_1 = 2.2489, \quad C_2 = 0.72465, \quad C_3 = 0.91215, \quad C_4 = -42.19535 \quad (3)$$

그림 9에 나타난 것처럼 개발된 상관식은 CHF를 비교적 잘 예측하고 있으며, 평균오차 및 RMS 오차는 각각 2.3 % 및 10.9 %였다. 기존 봉다발에 대한 상관식중 ERPI 상관식<sup>16)</sup>을 사용하였을 경우 CHF에 대한 평균오차 및 RMS 오차는 각각 3.0 % 및 14.4 %였으며, 그림 10에 나타난 것처럼 두 상관식은 모두 약 150 kg/m<sup>2</sup>s 이하의 저유량에서는 CHF를 Overestimation 하는 것으로 나타났다. 유량 150 kg/m<sup>2</sup>s 이하의 저유량 조건에서 본 상관식 및 EPRI 상관식의 RMS 오차는 각각 14.7 % 및 21.8 %였으며, 따라서 저유량에서 CHF 상관식을 개선할 여지가 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 대칭 코사인 수직방향 열유속 분포를 갖는 3 x 3 가열봉다발을 사용하여, 광범위한 계통 압력 및 저유량 조건에서 CHF 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) CHF에 대한 질량유속 및 입구 과냉도의 영향은 일반적으로 알려져 있는 경향과 같다. CHF에 대한 질량유속의 영향은 저압에서 상대적으로 크게 나타났으며, 질량유속이 작아질수록 CHF에 대한 입구 과냉도 및 계통 압력의 영향은 작아지는 것으로 나타났다.
- (2) 특히 계통 압력이 크고 질량유속이 작아지면 CHF에 대한 입구 과냉도의 영향은 거의 무시할 수 있었다.
- (3) 질량유속이 증가함에 따라 CHF 발생위치에서의 임계건도는 감소하는 경향을 보였으며, 낮은 질량유속 조건에서 그 감소율이 크게 나타났다.
- (4) 질량유속 51 또는 150 kg/m<sup>2</sup>s 및 압력 3.0 MPa 이상에서는 가열구간에서 발생한 수증기가 실험대 상부에서 응축하여 생성된 포화수가 가열구간에 하향류로 공급되어 임계건도가 100 %를 넘어서는 경우가 있다.
- (5) CHF는 압력의 증가에 따라 2~4 MPa 근방에서 최대치를 나타내는 것으로 알려져 있으나, 본 실험에서는 그러한 압력 거동을 뚜렷하게 볼 수 없었으며, 저압에서 CHF의 거동은 복잡하게 나타났다.
- (6) Mishima와 Nishihara에 의해 제안된 저유속에서의 CHF 무차원수를 이용하여 개발한 상관식 및 기존 봉다발에 대한 ERPIR 상관식은 CHF를 비교적 잘 예측하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 과제의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) M. Mishima and H. Nishihara, "Effect of channel geometry on critical heat flux for low pressure water," *Int. J. Heat Mass Transfer*, **28**, 1115-1129 (2001).
- (2) M. S. E-Genk et al., "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).
- (3) J. W. Park et al., "Critical heat flux and flow pattern for water flow in annular geometry," *Nucl. Eng. Design*, **172**, 137-155 (1997).
- (4) T. Schoesse et al., "Critical heat flux in a vertical annulus under low upward flow and near atmospheric pressure," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **34**[6], 559-570

(1997).

- (5) S. Y. Chun et al., "Effect of pressure on critical heat flux in uniformly heated vertical annulus under low flow conditions," *Nucl. Eng. Design*, **203**, 159–174 (2001).
- (6) S. Y. Chun et al., "Critical heat flux under zero flow conditions in vertical annulus with uniformly and non-uniformly heater sections," *Nucl. Eng. Design*, **205**, 265–279 (2001).
- (7) S. Y. Chun et al., "Critical heat flux in an internally heated annulus with a non-uniform axial heat flux distribution under low flow conditions," *2nd Japan-Korea Symp. on Nucl. Thermal Hydraulics and Safety* (2000).
- (8) 문상기, 천세영, 최기용, "Critical heat flux in uniformly heated rod bundle under wide range of system pressures," '2001 대한기계학회 춘계학술대회 (2001).
- (9) ANSI/ASME PTC 19.1, "ASME Performance test codes, Supplement on instruments and apparatus, Part 1, Measurement uncertainty," ASME, New York (1985).
- (10) K. Mishima and M. Ishii, "Experimental study on natural convection boiling burnout in annulus," *Proc. of the 7th Int. Heat Transfer Conf.*, Munchen, Vol. 4, 309–314 (1982).
- (11) J. T. Rogers et al., "Flow boiling critical heat fluxes for water in a vertical annulus at low pressure and velocities," *Proc. of the 7th Int. Heat Transfer Conf.*, Munchen, Vol. 4, 339–344 (1982).
- (12) H. Kumamaru et al., "Critical heat flux for annulus under high-pressure, low-flow and mixed inlet conditions," *J. Nucl. Sci. Tech.*, **27**[1], 68–80 (1990).
- (13) K. Mishima and M. Ishii, "Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical flow in vertical tubes," *Int. J. Heat Mass Transfer*, **27**[5], 723–737 (1984).
- (14) F. H. Bowditch and D. J. Mogford, "An experimental and Analytical study of fluid flow and critical heat flux in PWR fuel elements," AEE Winfrith, AEE-R 2050 (1987).
- (15) K. Mishima and H. Nishihara, "Critical heat flux at low velocity and pressure conditions," *Proc. of Second International Topical Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations*, Tokyo, 1A-1 (1986).
- (16) D. G. Reddy and C. F. Fighetti, "Parametric study of CHF data, Vol. 2. A generalized subchannel CHF correlation for PWR and BWR fuel assemblies," EPRI Report NP-2609 (1983).

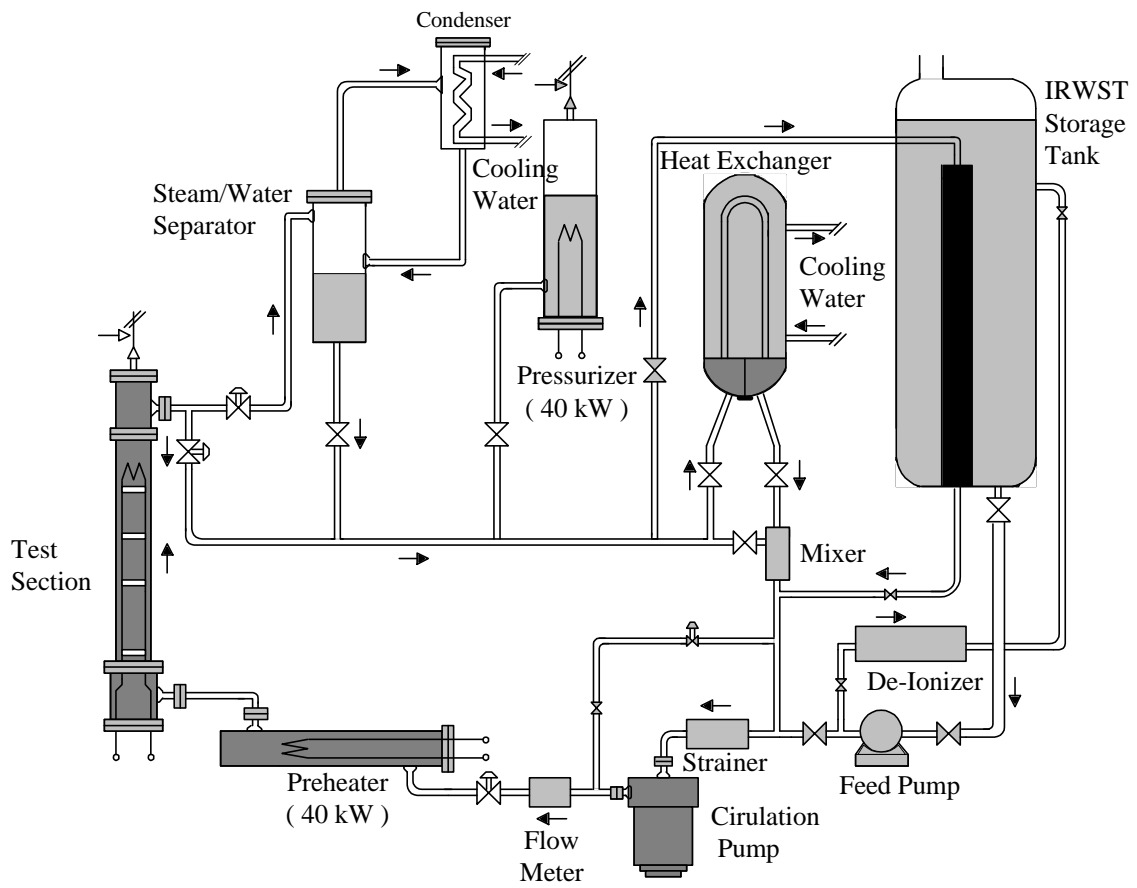


그림 1. 한국원자력연구소 RCS 열수력 Loop



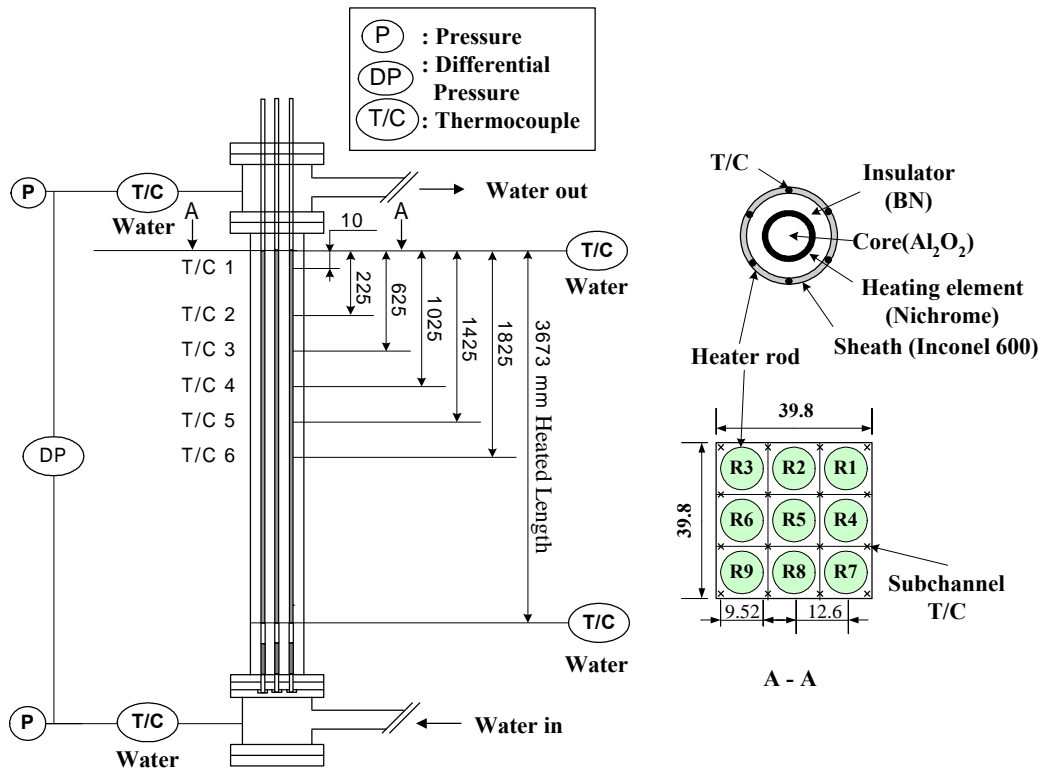


그림 2. 가열봉의 구조 및 열전대 위치

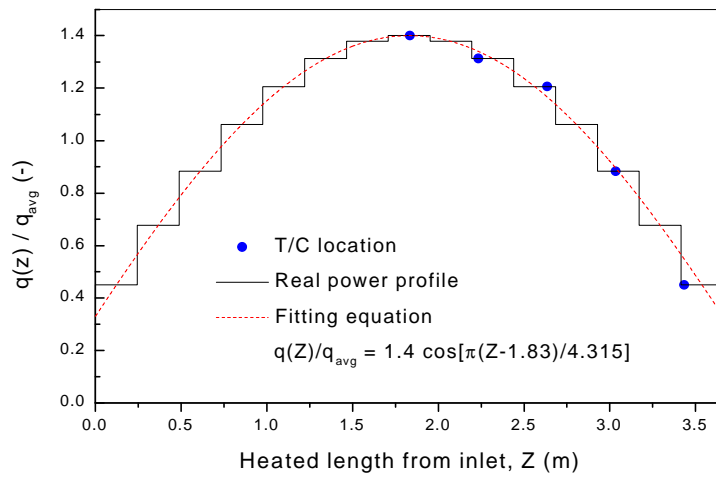
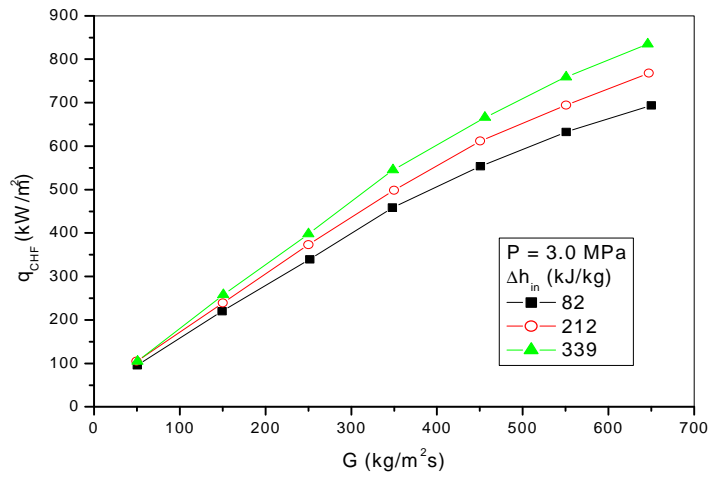
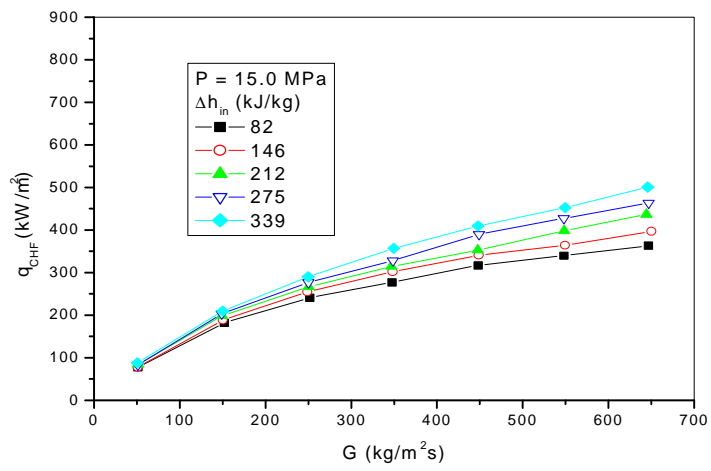


그림 3. 수직방향 열유속 분포

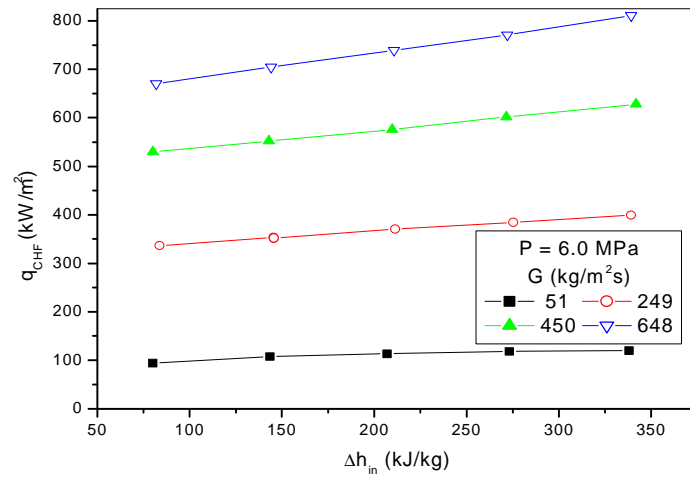


(a)  $P = 3.0$  MPa

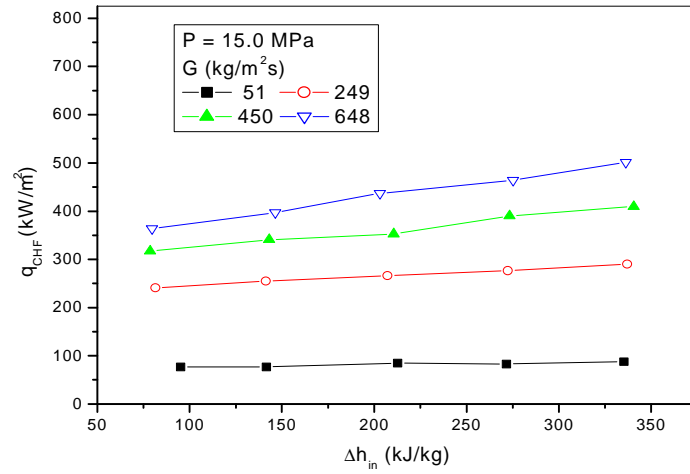


(b)  $P = 15.0$  MPa

그림 4. 임계열유속에 대한 질량유속의 영향



(a) P = 6.0 MPa



(b) P = 15.0 MPa

그림 5. 임계열유속에 대한 입구 과냉도의 영향

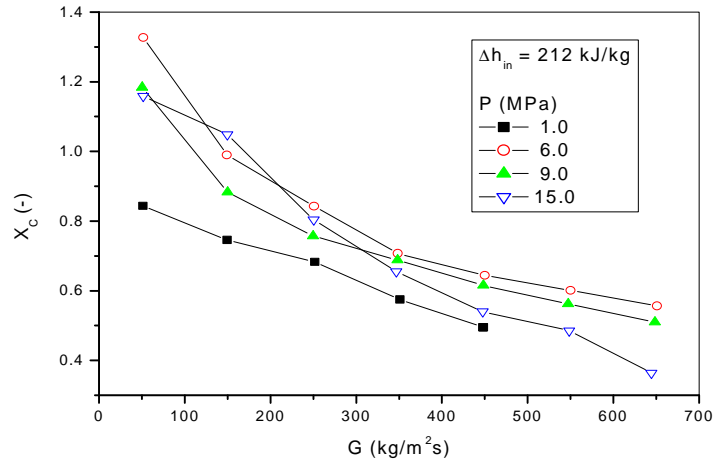


그림 6. 질량유속과 임계건도의 관계

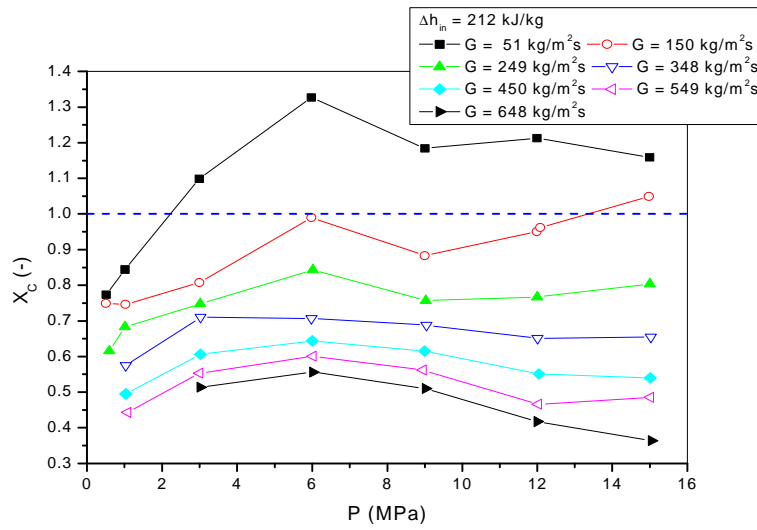


그림 7. 계통 압력과 임계건도의 관계

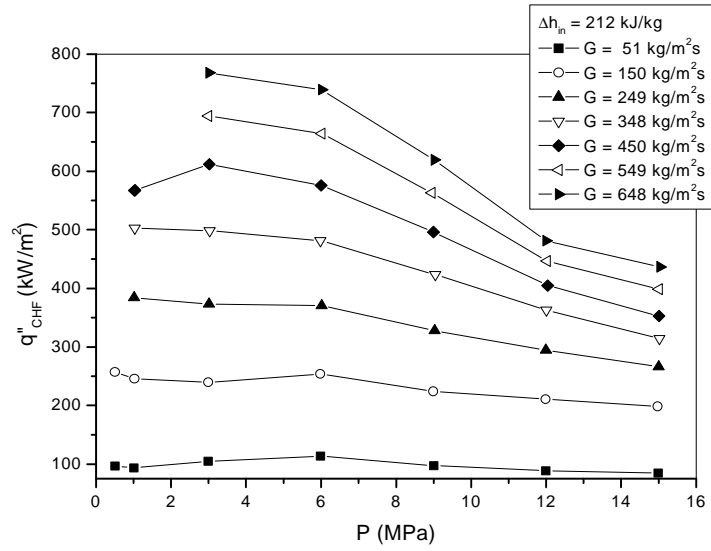


그림 8. 임계열유속에 대한 계통 압력의 영향

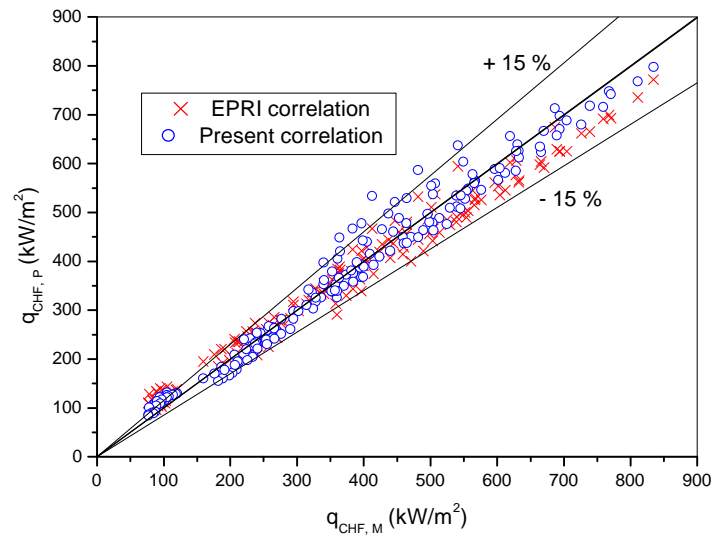


그림 9. CHF 상관식 예측 결과

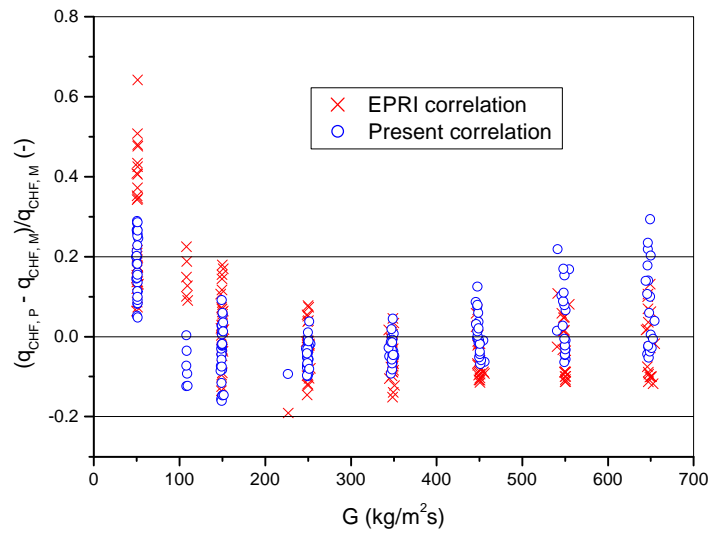


그림 10. 질량유속에 대한 CHF 예측 오차