

비균일 가열 수직 봉다발을 이용한 주증기관 파단사고의 재임계
조건에서의 임계열유속에 대한 실험 연구

An Experimental Study of CHF for Return-to-Power Condition at
Main Steam Line Breaks Using a Non-Uniformly Heated Vertical
Rod Bundle

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

요 약

비균일 축방향 열유속 분포를 갖는 수직 3x3 봉다발을 이용하여 넓은 범위 압력의 저유속 조건에서 임계열유속(CHF) 연구를 수행하였다. 특히 본 논문에서는 주증기관 파단사고시 발생할 수 있는 재임계(Return-to-Power) 조건의 저유속, 중간 압력 및 높은 입구 과냉도에서의 임계열유속 경향을 규명하고, 기존 상관식의 적용 가능성을 파악하는데 중점을 두었다. 임계열유속에 대한 질량유속, 입구과냉도 및 압력의 영향은 일반적으로 알려져 있는 경향과 일치하였다. 임계열유속에 대한 질량유속의 영향은 저압에서 상대적으로 크게 나타났으며, 질량유속이 감소함에 따라 입구과냉도와 압력이 임계열유속에 미치는 영향은 작아졌다. 임계열유속의 거동은 낮은 압력에서 비교적 복잡하게 나타났으며, 낮은 질량유속에서는 압력의 영향이 상대적으로 작아졌다. 높은 질량유속 혹은 낮은 국부건도에서는 국부 임계건도가 증가함에 따라 국부 임계열유속 값이 크게 감소하며, 반면에 낮은 질량유속 혹은 높은 국부 건도에서는 국부 임계열유속은 국부 건도에 무관하게 거의 일정한 값을 보였다. 기존 임계열유속 상관식들은 재임계 조건에서의 평균 임계열유속을 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났지만, 질량유속이 약 $100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 이하인 경우에는 예측 성능이 크게 저하되었다.

Abstract

An experimental study on critical heat flux (CHF) has been performed for water flow in a non-uniformly heated vertical 3x3 rod bundle under low flow and a wide range of pressure conditions. Especially, this experiment was focused on the analysis of the CHF trend and the applicability of conventional CHF correlations in return-to-power condition of main steam line break accident whose conditions might be low mass flux, intermediate pressure, and high inlet subcooling. The effects of

mass flux, inlet subcooling and pressure on the CHF are consistent with previous understandings. The effects of mass flux on the CHF are relatively large in low pressure conditions. The effects of inlet subcooling and pressure on the CHF decrease as the mass flux decreases. The effect of pressure on the CHF shows complex behavior in low pressure conditions, and becomes relatively small as the mass flux decreases. As the local critical quality increases, the local heat flux at CHF location sharply decreases at high mass flux or low critical quality. However, at low mass flux or high critical quality, the local heat flux at CHF location shows nearly constant value regardless of the critical quality. Conventional CHF correlations predict the present return-to-power CHF data with reasonable accuracies. However, the prediction capabilities become worse in low mass flux of about $100 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

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. 따라서 저유량 조건에서의 임계열유속 현상을 파악하기 위하여 비교적 간단한 형상을 지닌 원형관 혹은 환상관을 이용한 임계열유속 연구들이 수행되어 왔다.¹⁻⁴⁾ 저자들도 단일 가열봉 환상유로를 사용하여 임계열유속 실험을 수행한 바 있으며⁵⁻⁷⁾, 원형관이나 환상유로에서의 저유량 임계열유속에 대한 연구는 상당한 진전을 보여주고 있다.

지금까지 수행된 저유량 조건에서의 임계열유속에 대한 대부분의 실험 연구는 주로 대기압 근처의 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 임계열유속에 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다. 봉다발에서의 임계열유속에 대한 연구도 광범위하게 수행되어 왔으나, 대부분의 연구는 원자로의 정상 운전 조건을 대상으로 수행되었기 때문에 봉다발을 이용한 저유량에서의 임계열유속에 대한 실험 연구는 거의 전무한 상태이다. 특히 원자력발전소의 주증기관 파단사고에서 발생하는 재임계 조건에서의 임계열유속 해석을 위해서는 낮은 유량, 중간 압력 및 높은 입구과냉도 조건에서의 봉다발 임계열유속 데이터가 필요하다.

본 저자들은 3×3 봉다발을 이용하여 축방향 열유속 분포(균일 및 코사인 분포)와 비가열봉의 영향을 관찰하기 위한 임계열유속 실험을 수행한 바 있다⁸⁻⁹⁾. 본 논문에서는 코사인 대칭 축방향 열유속 분포를 갖는 3×3 봉다발을 이용하여 재임계 조건에서의 임계열유속 실험을 추가로 수행하였다. 생산된 임계열유속 데이터를 이용하여 재임계 조건에서 각종 변수가 임계열유속에 미치는 영향을 분석하고, 기존 임계열유속 상관식들의 적용 가능성 및 예측 성능을 평가하였다.

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 있다.⁵⁻⁹⁾ 유량의 측정은 오리피스 유량계를 사용하였으며, 저유량영역에서 관찰되는 유동의 진동은 실험대 입구에 설치된 밸브를 Throttling하여 제거하였다. 실험장치의 압력은 가압기에 설치된 40 kW의 가열봉을 사용하여 조절하였다. 본 연구에 사용된 실험대는 핵연료봉을 모의하도록 수직방향 비균일 출력 분포를 갖는 가열 길이가 3673 mm인 9개의 가열봉이 압력용기 내에 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 가열봉 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 출력 분포는 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 유체 온도, 질량 유속 및 입구 압력을 설정된 조건에 맞춘 다음, 실험대 가열봉다발에 전원을 공급하고 서서히 가열 전력을 증가시킨다. 예상되는 임계열유속 값 근처에서 공급 전력을 미세하게 Step 상태로 증가시켜, 수 분 동안 유지하며 정상상태를 확인한 후 다음 Step으로 증가시킨다. 임계열유속의 발생 판단조건은 가열봉 표면 온도가 갑자기 지속적으로 상승하는 현상으로 판단하며, 본 실험에서는 가열봉 표면의 온도가 유체 포화 온도보다 110 K 이상 초과하면 임계열유속이 발생한 것으로 판단하였다.

본 실험의 주요 측정변수는 실험대 입구와 출구 플레넘에서의 압력 및 유체 온도, 실험대 입구 질량유속, 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 코드¹⁰⁾의 방법을 사용하여 평가하였으며, 관찰된 불확실도는 압력, 유량 및 온도에 대하여 각각 자료처리장치 지시치의 $\pm 0.3\%$, $\pm 1.5\%$ 및 ± 0.7 K 이하였다. 가열봉다발에 공급된 전력 측정에 대한 불확실도는 $\pm 1.8\%$ 이하였으며, 열손실은 가열봉에 인가된 총출력에 비해 무시할 수 있었다.

본 연구에서는 표 1에 나타난 것처럼 재임계 조건에서의 임계열유속 데이터 93개를 포함하여 총 277개의 임계열유속 실험 데이터를 얻었다. 본 실험에서는 재임계 조건을 낮은 질량유속, 중간 압력 및 높은 입구과냉도 조건으로 정의하였다.

3. 실험결과 및 논의

3.1 실험결과 및 주요 변수 경향

가열구간 출구에서의 건도가 커짐에 따라 출구 플레넘의 압력은 약간 불안정하게 된다. 따라서 본 논문에서는 실험대 입구 플레넘의 압력을 실험 조건으로 하였다. 실험대로의 유량이 낮기 때문에 본 실험대에서 발생하는 압력강하는 계통 압력에 비해 무시할 수 있으므로, 출구 플레넘 대신 입구 플레넘의 압력을 사용하는 것은 큰 문제가 없을 것으로 보인다.

일반적으로 수직 상향류 균일 가열봉의 경우 임계열유속은 가열구간 출구에서 발생한다. 그러나 대칭 코사인 출력 분포를 갖는 실험대에서는 일반적으로 출구가 아닌 가열구간 상단부에서 발생한다. 본 실험에서도 대부분의 임계열유속은 가열봉 R1, R2, R7, R5에서 발생하였으며, 열전대 3번과 2번에서 각각 60%, 32%의 임계열유속이 발생하였다(그림 2와 3 참조). 압력 및 질량유속이 약 7.0 MPa 및 350 kg/m²s 이하에서는 열전대 2번과 3번에서 비교적 고르게 임계열유속이 발생하였으며, 이 이상의 압력 및 질량유속 조건에서는 대부분의 임계열유속이 열전대 3번에서 발생하였다.

그림 4는 임계열유속 발생시 실험대 전체에 공급된 평균 열유속(평균 임계열유속)에 대한 질량유속의 영향을 보여준다. 그림에 나타난 것처럼 평균 임계열유속은 질량유속이 증가함에 따라 증가하며, 압력이 낮을수록 평균 임계열유속의 증가율이 커져 질량유속이 임계열유속에 미치는 영향은 압력이 낮을수록 커지는 것을 알 수 있다. 질량유속이 작거나 입구과냉도가 큰 경우에는 평균 임계열유속이 급격하게 선형적으로 증가하지만, 질량유속이 증가함에 따라 평균 임계열유속의 증가율은 감소하여 임계열유속은 완만하게 증가하는 경향을 보인다.

그림 5는 평균 임계열유속에 대한 압력의 영향을 보여준다. 약 3 MPa 이상의 압력에서는 평균 임계열유속이 압력의 증가에 따라 단조롭게 감소하는 경향을 보여준다. 그러나 그 이하의 낮은 압력에서는 평균 임계열유속이 질량유속의 값에 따라 증가 혹은 감소하는 경향을 보여주고 있다. 질량유속이 낮아질수록 임계열유속에 대한 압력의 영향은 상대적으로 작아져, 매우 낮은 질량유속에서는 압력의 영향이 거의 나타나지 않는다.

그림 6은 임계열유속 발생 위치에서의 임계건도(Critical Quality) 및 국부 임계열유속(Local Heat Flux at CHF Location)의 관계를 보여준다. 질량유속이 높을수록 낮은 임계건도에서 임계열유속이 발생하며, 임계건도에 따라 국부 임계열유속이 크게 감소하여 전형적인 액막 건조에 의한 임계열유속 거동을 보여주고 있다. 그러나 질량유속이 낮아질수록 국부 임계열유속은 높은 임계건도에서 나타나며, 임계건도 증가에 따른 국부 임계열유속의 감소는 크지 않다. 낮은 질량유속 조건에서 국부 건도가 1이상이 되는 경우에 임계열유속은 플러딩 등의 대향류에서 발생할 것으로 예측되며 실제 유량건도(Flow Quality)와 열역학적인 건도가 다르기 때문에 국부 건도(열평형에 의한 열역학적 건도)에 의한 임계열유속 거동을 명확하게 관찰하기는 어렵다. 질량유속 일정할 경우에 실험에서 얻어진 임계건도의 범위가 작기 때문에 뚜렷한 경향이 나타나지 않지만, 낮은 임계건도 조건에서는 동일한 임계건도일 경우 질량유속이 낮을수록 국부 임계열유속이 커짐을 알

수 있다. 또한 임계건도가 높은 경우에는 질량유속에 거의 무관하게 국부 임계열유속이 하나의 곡선으로 수렴해 가는 경향이 나타난다.

본 실험에서의 유동양식은 거의 대부분 환상류로 예상되기 때문에 임계열유속은 환상류 액막(Liquid Film)의 건조에 의해 발생할 것으로 판단된다. 일반적으로 임계건도가 낮은 경우에는 액막에서의 Entrainment, 액적(Liquid Droplet)의 Deposition 및 액막의 증발에 의해 임계열유속이 발생한다. 임계건도가 높은 경우에는 액막이 매우 얇기 때문에 Entrainment와 액막 증발이 임계열유속에 미치는 영향이 작아지고, 임계열유속은 액적의 Deposition에 의해 지배된다. 이러한 변수의 영향에 따라 그림 6에서처럼 임계건도 크기에 따라 국부 임계열유속이 변화하는 것으로 판단된다.

3.2 기존 상관식의 예측 성능 비교

재임계 조건에서 기존 상관식들의 적용 가능성 및 예측 성능을 살펴보기 위하여 세 가지의 상관식을 사용하여 재임계 조건에서의 임계열유속 데이터를 예측하였다. 사용된 상관식은 Groeneveld 등이 제안한 1995 CHF Look-Up Table¹¹⁾, EPRI 봉다발 상관식¹²⁾ 및 본 저자들이 개발한 상관식⁹⁾이다. 1995 CHF Look-Up Table은 전세계적인 원형관 임계열유속 데이터를 이용하여 개발되었으며, 임계열유속을 비교적 잘 예측하는 것으로 보고되고 있다. EPRI 상관식은 미국 컬럼비아 대학의 HTRF 실험 설비에서 다년간 측정된 실험 데이터들을 근거로 하여 개발된 것으로, 현재로서는 넓은 범위에서 사용 가능한 가장 신뢰할 만한 봉다발 상관식이라 할 수 있다. 그러나 Look-Up Table은 낮은 질량유속 조건에서의 임계열유속 데이터의 부족으로 인해, 저압, 저유속 조건에서 예측 성능이 약간 저하되는 것으로 보고되고 있다¹³⁾. 또한 EPRI 상관식의 유량 적용 범위는 270 ~ 5560 kg/m²s로서 재임계 조건에서 EPRI 상관식을 사용하기 위해서는 매우 적은 유량에서 상관식의 적용 가능성이 평가되어야 한다. 본 저자들이 개발한 상관식은 Mishima와 Nishihara¹⁴⁾에 의해 제안된 저유량 조건에서의 임계열유속에 대한 무차원수를 사용하며, 3x3 봉다발에 대해 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다⁹⁾. 1995 Look-Up Table과 EPRI 상관식을 이용한 임계열유속 예측은 실험대에 인가된 총출력을 가정하여, 각 위치에서의 국부 조건들을 사용하여 국부 임계열유속을 예측하였다. 실험대의 어느 위치에서 인가된 국부 열유속과 상관식에 의해 예측된 국부 임계열유속이 동일해질 경우 임계열유속이 발생하는 것으로 판단하였다.

표 2와 그림 7은 재임계 조건에서의 위의 세 가지 상관식의 예측 결과를 보여주며, 세 가지의 상관식은 재임계 조건에서의 임계열유속을 비교적 잘 예측하고 있다. 그러나 그림 8에 나타난 것처럼 낮은 질량유속에서는 예측 성능이 떨어지고 있다.

EPRI 상관식과 Look-Up Table은 국부조건의 상관식으로서 임계열유속 발생위치를 예측할 수 있다. 그러나 본 저자들이 개발한 상관식은 입구 조건에 대한 임계열유속 상관식이기 때문에 임계열유속 발생위치를 예측할 수 없고 단지 평균 임계열유속만을 예측할 수 있다. 본 실험에서 사용한 임계열유속 검출을 위한 벽면 온도 측정용 열전대는 가열봉에 고정되어 있어 정확한 임계열유속 발생 위치를 측정할 수는 없다. 따라서 측정된 임계열유속 발생위치에 대한 오차 범위를 고려한다면, Look-Up Table과 EPRI 상관식은 그림

9와 같이 비교적 신뢰성 있게 임계열유속 발생위치를 예측하는 것으로 보인다.

위에서 살펴본 바와 같이 기존 상관식들은 재임계 조건에서의 임계열유속 및 임계열유속 발생위치를 비교적 잘 예측하고 있다. 따라서 주증기관 파단사고시 재임계 조건에서의 임계열유속 분석을 위해서 Look-Up Table 및 EPRI 상관식을 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 만일 좀 더 정확한 총출력 혹은 평균 임계열유속 값이 요구될 경우에는 저자들이 개발한 형식의 상관식을 보완하여 사용할 수 있을 것으로 판단되며, 임계열유속 발생위치 등을 예측하기 위한 보조 수단으로 Look-Up Table 및 EPRI 상관식을 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 하지만 재임계 조건에서의 임계열유속 예측 성능 향상을 위해서는 약 $100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 이하의 저유속 조건에서 좀 더 많은 임계열유속 실험 데이터가 생산되어야 할 것이다.

4. 결론

대칭 코사인 수직방향 열유속 분포를 갖는 3x3 가열봉다발을 사용하여, 저유속, 중간압력 및 높은 입구과냉도의 주증기관 파단사고시 재임계 조건에서 임계열유속 실험을 수행하였다. 또한 재임계 조건에서 기존 임계열유속 상관식들의 적용 가능성 및 예측 성능을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 임계열유속에 대한 질량유속, 입구과냉도 및 압력의 영향은 일반적으로 알려져 있는 경향과 같다. 임계열유속에 대한 질량유속의 영향은 저압에서 상대적으로 크게 나타났으며, 질량유속이 감소함에 따라 입구과냉도와 압력이 임계열유속에 미치는 영향은 작아졌다.
- (2) 임계열유속의 거동은 낮은 압력에서 비교적 복잡하게 나타났으며, 낮은 질량유속에서 낮은 압력의 영향이 상대적으로 작아지는 것으로 나타났다.
- (3) 국부 임계건도가 증가함에 따라 국부 임계열유속 값은 크게 감소하며, 낮은 질량유속 또는 높은 국부 건도에서 국부 임계열유속은 거의 일정한 값을 보였다.
- (4) 세 가지의 기존 임계열유속 상관식은 재임계 조건에서의 임계열유속을 비교적 잘 예측하였지만, 약 $100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 이하의 낮은 질량유속에서는 예측 성능이 저하되었다. 따라서 낮은 질량유속 조건에서의 임계열유속 데이터를 이용한 상관식의 개선이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 과제의 지원으로 수행되었습니다.

기호 설명

ϵ	예측오차 (= 예측값/측정값 - 1)
G	질량유속
N	데이터 수

P	압력
$q(Z)$	수직 거리 Z 에서의 국부 열유속
$Q_{C,loc}$	Critical Power(CHF 발생시 실험대 입구에서 CHF 발생 위치까지의 총출력)
$q_{C,avg,T}$	평균 임계열유속(CHF 발생시 실험대 전체에 대한 평균 열유속)
$q_{C,loc}$	국부 임계열유속(CHF 발생 위치에서의 국부 열유속)
Z	가열봉 가열 시작지점부터의 수직 거리
Z_C	임계열유속 발생 위치
X_C	임계열유속 발생 위치에서의 국부 임계건도
Δh_i	입구과냉도

하첨자

avg	Average
C	CHF
loc	Local
m	Measured
p	Predicted
T	Total for whole test section

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) 문상기, 천세영, 최기용, 박종국, 백원필, "비균일 가열 수직 봉다발에서의 저유속 임계열유속에 대한 실험 연구," 2002 한국원자력학회 춘계학술대회 (2002).
- (10) ANSI/ASME PTC 19.1, "ASME Performance test codes, supplement on instruments and apparatus, Part 1, measurement uncertainty," ASME, New York (1985).
- (11) D. C. Groeneveld, L. K. H. Leung, P. L. Kirillov et al., "The 1995 look-up table for critical heat flux in tubes," *Nucl. Eng. Design*, **163**, 1-23 (1996).
- (12) 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).
- (13) 장순홍, 백원필, "임계열유속, 기초와 응용," 청문각 (1997).
- (14) 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).

표 1. 임계열유속 실험 데이터 조건

Parameter	Total Database	재임계 조건
압력 (MPa)	0.47 ~ 15.06	5.97 ~ 12.08
질량유속 (kg/m ² s)	49.66 ~ 654.44	49.66 ~ 250.58
입구과냉도 (kJ/kg)	67.90 ~ 722.70	206.59 ~ 722.70
임계건도 (-)	0.36 ~ 1.29	0.68 ~ 1.27
평균 임계열유속 (kW/m ²)	77.02 ~ 834.62	88.81 ~ 470.29
총임계출력 (kW)	76.69 ~ 828.36	88.37 ~ 466.78
데이터수 (-)	277	93

표 2. 기존 임계열유속 상관식의 예측 결과

Total data base (No. of data = 277)						
Correlation	Look-Up Table		EPRI		KAERI	
Parameter	평균오차 ¹⁾	RMS 오차	평균오차	RMS 오차	평균오차	RMS 오차
$q_{C, avg, T}$	-0.026	0.132	0.095	0.184	0.023	0.117
$q_{C, loc}$	-0.320	0.434	-0.255	0.366	N/A	N/A
$Q_{C, loc}$	0.058	0.148	0.193	0.278	N/A	N/A
Z_C	0.162	0.188	0.162	0.185	N/A	N/A
재임계 condition (No. of data = 93)						
Correlation	Look-Up Table		EPRI		KAERI	
Parameter	평균오차	RMS 오차	평균오차	RMS 오차	평균오차	RMS 오차
$q_{C, avg, T}$	-0.085	0.122	0.183	0.231	-0.004	0.114
$q_{C, loc}$	-0.278	0.403	-0.110	0.282	N/A	N/A
$Q_{C, loc}$	-0.027	0.088	0.266	0.333	N/A	N/A
Z_C	0.130	0.160	0.132	0.160	N/A	N/A

1) 오차: $\epsilon = (\text{Predicted value} - \text{Measured value}) / \text{Measured value}$

$$\text{평균오차} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon_i, \quad \text{RMS오차} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \epsilon_i^2}{N}}$$

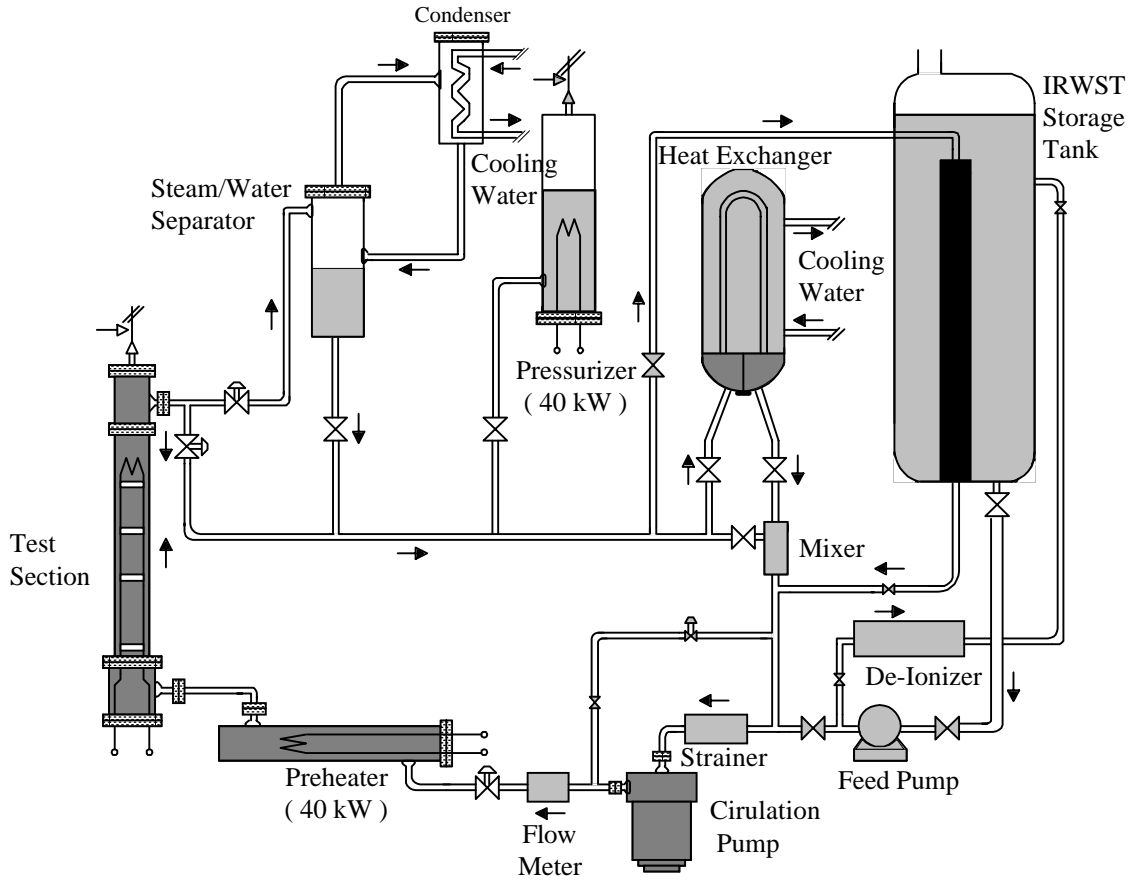


그림 1. 한국원자력연구소 RCS 열수력 Loop

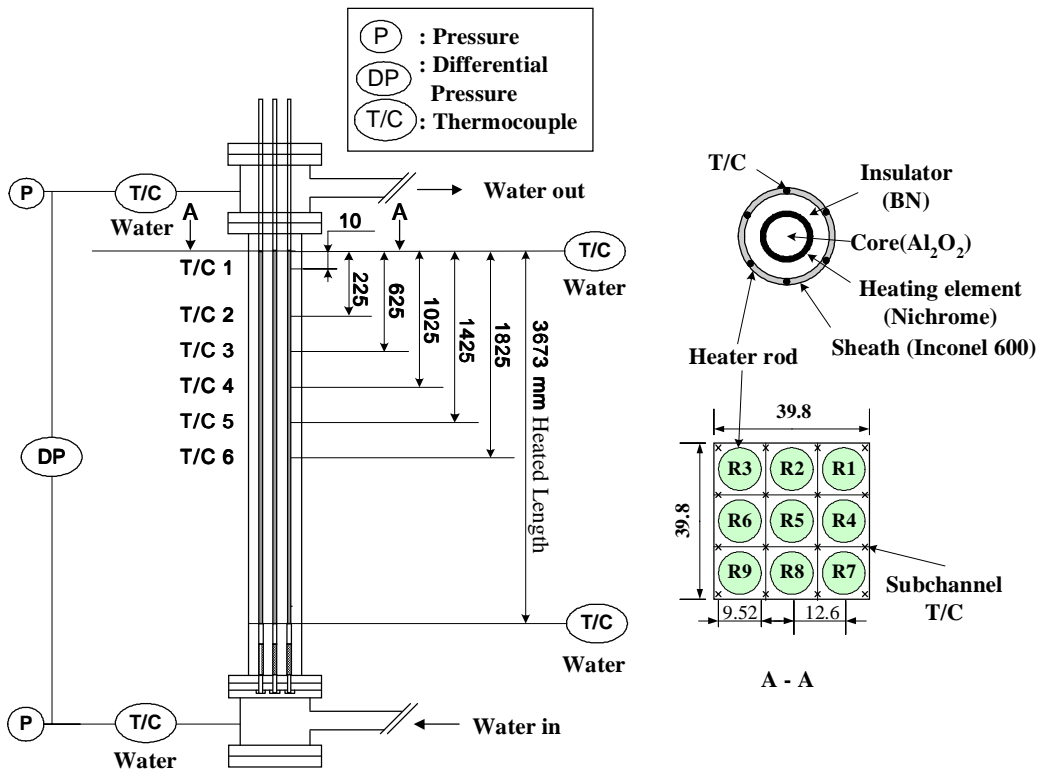


그림 2. 가열봉의 구조 및 열전대 위치

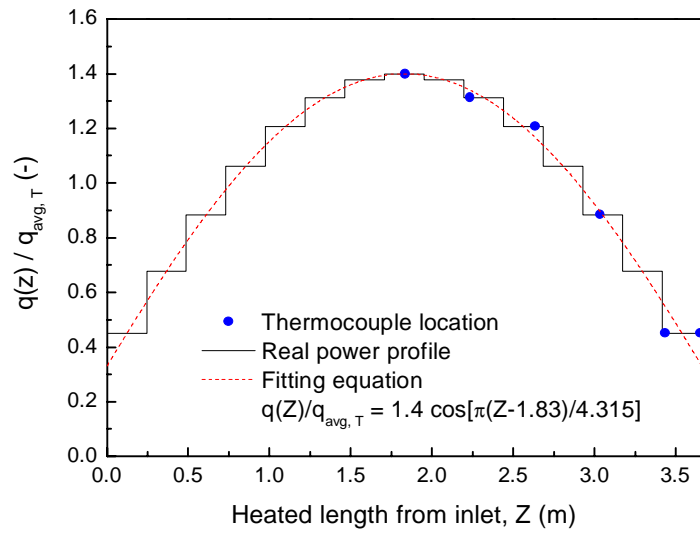
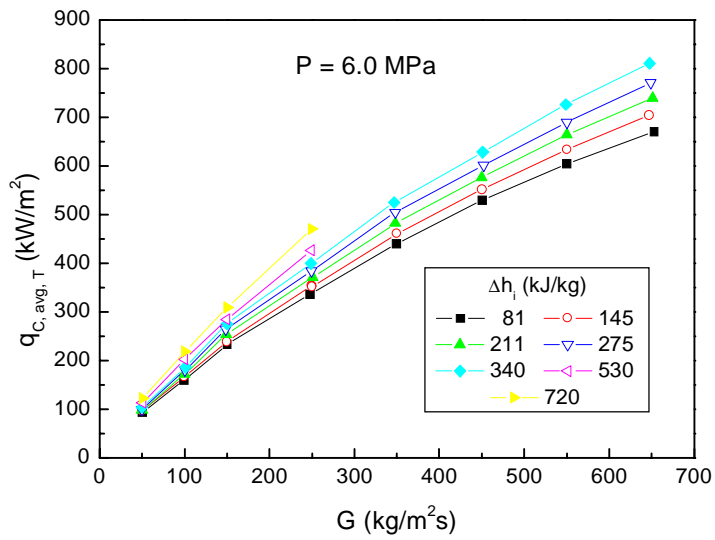
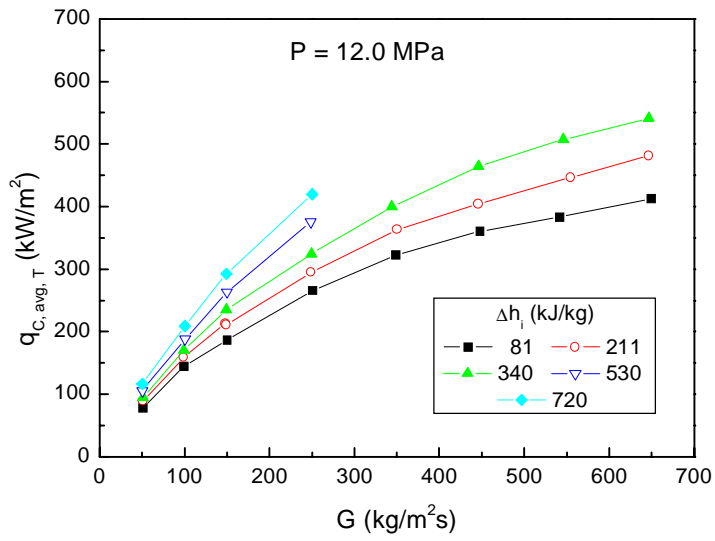


그림 3. 수직방향 열유속 분포



(a) $P = 6.0 \text{ MPa}$



(b) $P = 12.0$ MPa

그림 4. 평균 임계열유속에 대한 질량유속의 영향

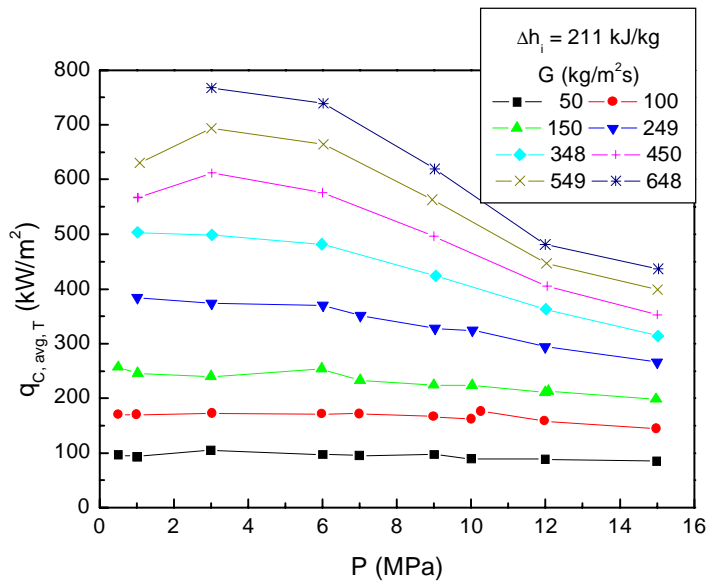
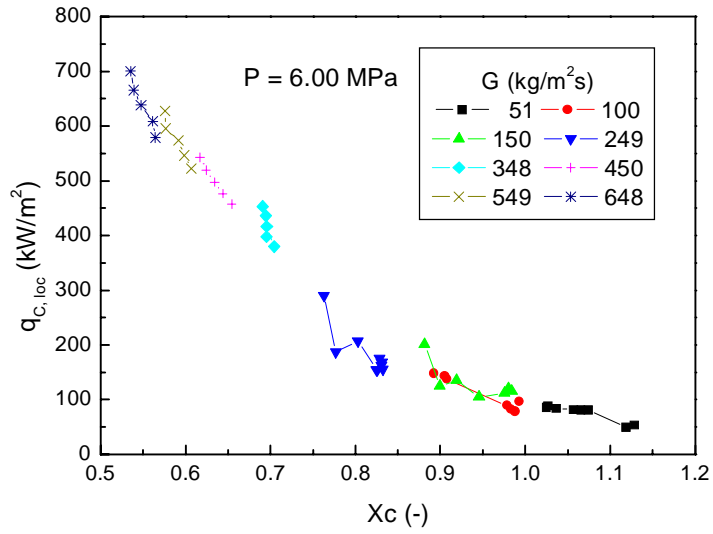
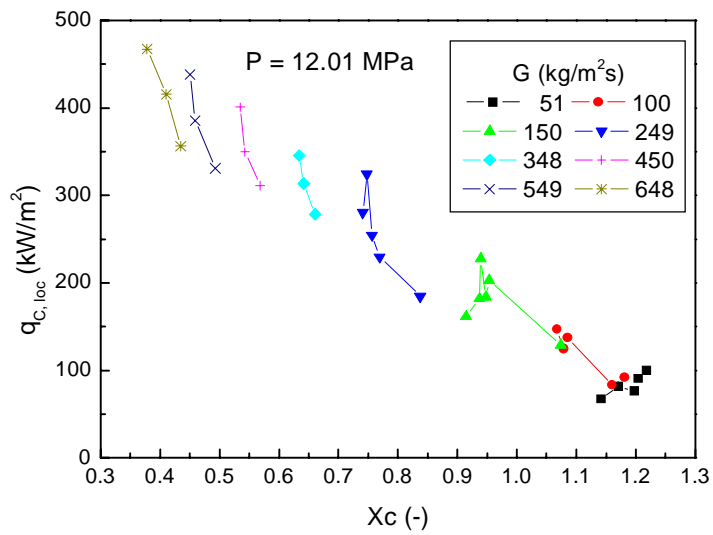


그림 5. 평균 임계열유속에 대한 압력의 영향



(a) $P = 6.00$ MPa



(b) $P = 12.01$ MPa

그림 6. 국부 임계열유속에 미치는 임계건도의 영향

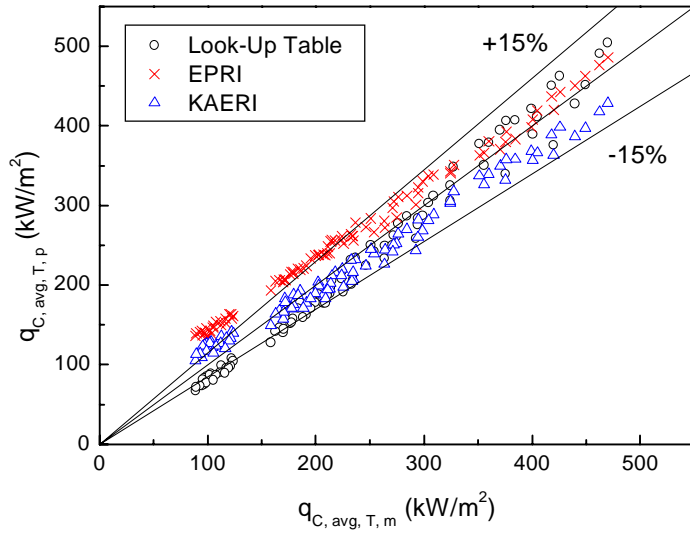
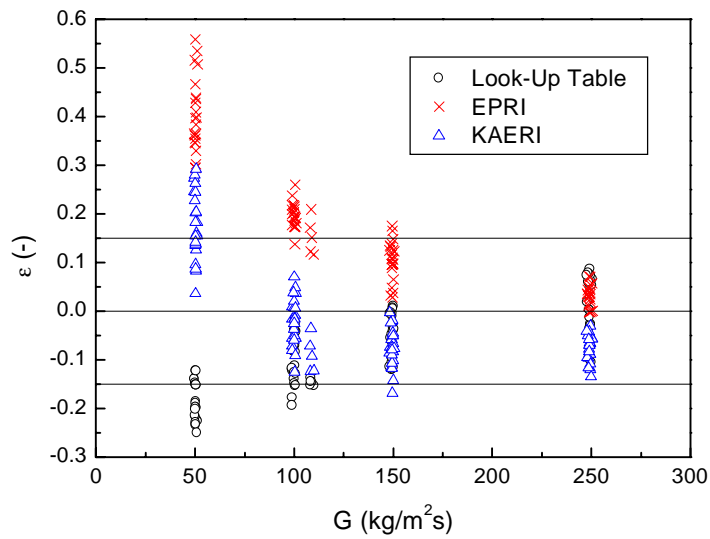
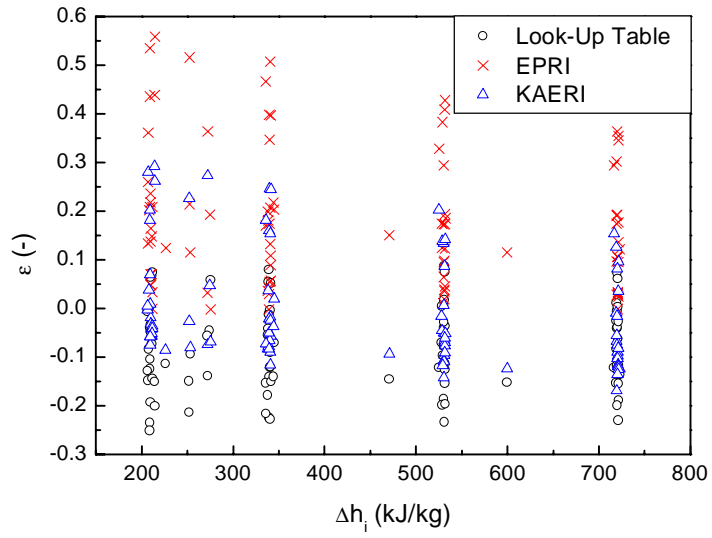


그림 7. 재임계 조건에 대한 평균 임계열유속 예측 결과



(a) Mass Flux



(b) Inlet subcooling

그림 8. 재임계 조건에서 평균 임계열유속 예측 오차

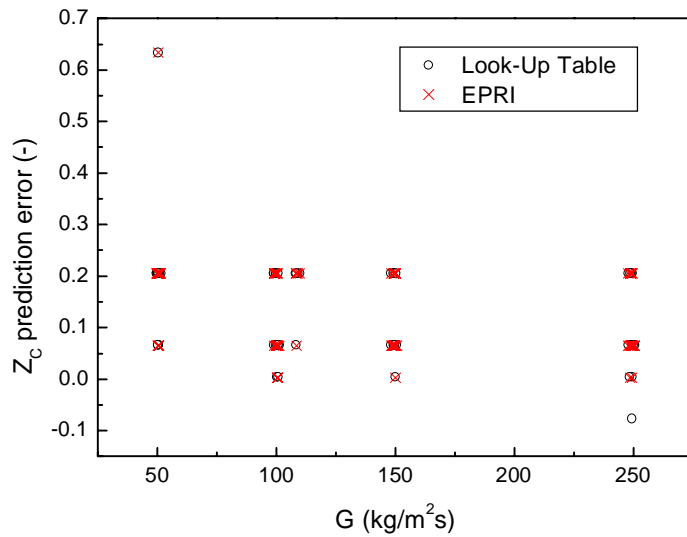


그림 9. 재임계 조건에서 임계열유속 발생 위치 예측 결과