

환상유로에서의 고압, 저유량조건하의 임계열유속

천세영, 전형길, 정홍준, 문상기, 정문기
한국원자력연구소

요약

한국원자력연구소에서는 최고 16MPa에서 운전할 수 있는 RCS 열수력 Loop를 제작하고 CHF 측정실험을 수행하고 있다. 본 연구에서는 저유량조건에서 압력이 CHF에 미치는 영향을 조사하기 위해 압력 12MPa, 질량유속 $300 \sim 550 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, Test Section 입구 과냉도 210 kJ/kg의 범위에서 CHF 실험을 수행하였다. 본 실험조건에서 CHF는 환상류영역에서 발생하였으며 발생기구는 Entrainment-Limited CHF가 지배적이었다. Doerffer의 CHF 상관식은 저압에서 예측능력이 현저하게 떨어지나 고압조건에서는 실험자료를 잘 예측하였다. Bowring의 상관식은 고압 및 저압에서도 양호한 예측능력을 보여주었다.

1. 서론

임계열유속(Critical Heat Flux : CHF)은 핵연료봉의 건전성을 유지하는 데 한계를 나타내는 열수력특성 인자이며 CHF 예측의 신뢰성은 원자로의 안전성에 직접 영향을 미치기 때문에 과거 30여년 동안 이에 관한 많은 실험적 연구가 수행되어 왔다. 이러한 노력으로 개발된 실험상관식들은 원자로 노심 설계에 적용되고 있으며 일부 조건에서 이론, 해석적 연구도 많은 진척을 보이고 있다. 그러나 이들 연구는 대부분 정상상태조건을 대상으로 수행된 것들이며 SBLOCA나 ATWS (Anticipated Transient without Scram)와 같은 사고시의 안전성 평가에 중요한 저유량 과도상태 조건하에서의 CHF 거동은 아직 명확하지 않다. 또 앞으로 미래형 PWR이나 열병합원자로에는 수동 안전장치(Passive Safety Feature)가 도입될 것으로 예상되며 이 경우 사고시 노심의 냉각능력은 자연순환이 중요한 역할을 담당하게 된다. 따라서 저유량영역의 CHF에 대한 체계적인 연구와 Data Base의 정비가 필요하다.

최근 CHF를 예측하는 방법으로서 원형관 실험자료의 Data Base를 기초로 개발된 CHF Look-up Table¹⁾을 사용하는 경우가 있는 데 저유량 조건일 때는 부력의 영향이 커지고 유동의 불안정과 실험장치 고유의 열유동특성이 강하게 나타나기 때문에 CHF Data Base에는 큰 불확실성이 포함되어 있다. 저유량 CHF에 주안점을 둔 실험적 연구는 다소 보고되고 있으나 이들은 거의 대부분 원형관을 사용한 저압력조건에서의 실험들이었으며 압력의 영향을 조사한 실험적 연구는 아직 없다. 본 연구는 한국원자력연구소의 고온, 고압 CHF 실험장치인 RCS 열수력 Loop를 이용하여 SBLOCA와 같은 사고시의 안전성을 평가하는 데 중요한 고압, 저유량조건에서의 환상유로의 CHF 실험을 수행하여 저압 CHF 실험결과²⁾ 및 기존 CHF 예측방법과 비교, 조사하였다.

2. 실험 장치 및 실험방법

실험장치는 최고 운전압력 16MPa, 운전온도 347℃로 실제 원자로 열수력조건을 모의하고 정상상태 및 과도상태시의 CHF 실험을 수행할 수 있도록 제작되었다. 그림 1은 실험장치의 개략도이다. Test Section에 들어가는 유량의 측정에는 3종류의 Orifice 유량계가 설치되어 있으며 실험유량의 범위에 적합한 것을 선택하여 사용한다. 유량은 순환펌프의 회전속도 조절, Bypass Line의 유량조절 그리고 유량제어 밸브의 조절을 조합하여 제어된다. 예열기는 Test Section 입구의 용수온도를 조절하기 위하여 설치되어 있다. Test Section은 교체가 가능하며 본 연구에 사용된 것은 Test Section Pipe 내부에 핵연료봉을 모의한 출력분포가 균일한 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 Section 입구 및 출구의 순환용수 온도와 압력, Test Section 유량 및 차압, Heater 봉의 표면 온도 및 Heater 봉에 투입되는 전력등이며 측정된 신호는 모두 자료처리계통에서 자동으로 수집, 처리된다.

CHF 실험은 다음과 같은 순서와 방법으로 수행된다. Test Section입구의 유량, 온도 및 압력을 설정된 조건에 맞춘 다음, Test Section Heater에 전원을 공급하고 서서히 가열전력을 증가시킨다. CHF 근방에서 출력을 Step 상태로 증가시키고 수분동안 유지하여 정상상태를 확인후 다음 Step으로 증가시킨다. CHF가 발생하면 Burnout 검출기에 의해 전력공급을 80% 수준으로 낮추거나 Trip시키도록 되어있다. 이때 CHF의 발생 판단조건은 Heater 봉 표면 온도가 갑자기 지속적으로 상승하는 형상으로 판단하며, 본 실험에서는 표면 온도가 400℃를 넘으면 CHF가 발생한 것으로 판단하였다.

3. 실험결과

실험은 Test Section 입구압력 12MPa, 질량유속 300~550kg/m²·s, 입구과냉도 210 kJ/kg의 범위에서 수행되었다. 주요 변수의 측정치의 불확실도는 압력 ±0.2%, 질량유속 ±1.5%, 온도 ±0.6%, Heater 봉 출력 ±1% 이하였다. 저유량 영역에서 흔히 관찰되는 유량의 진동은 본 실험범위에서는 Test Section 입구측의 밸브를 Throttling 함으로써 피할 수 있었다.

그림 3에 본 실험결과와 RCS Loop에서 수행된 저압 CHF 실험결과²⁾를 비교하였다. 고압에서의 CHF는 저압 CHF 보다 낮게 나타났으며 그 차이는 유량의 증가에 따라 커지고 유량을 감소시키면 작아지는 경향을 보였다. CHF와 열평형에서 구한 CHF 건도(CHF 발생시 출구 건도)의 관계를 그림 4에 보여준다. 저압 CHF와 고압 CHF의 기울기는 현저한 차이를 나타내고 있다. 저유량 CHF의 특성을 파악하기 위해 Mishima등³⁾의 방법을 적용하였다. 즉 무차원 열유속 $q^* = q/[h_{fg} \cdot (\lambda \cdot \rho_g \cdot g \cdot \Delta \rho)^{1/2}]$ 와 무차원 질량유속 $G^* = G/(\lambda \cdot \rho_g \cdot g \cdot \Delta \rho)^{1/2}$ 를 사용하여 실험자료를 정리한 결과를 그림 5 및 6에 보여준다. 여기서 $\lambda = (\sigma/g \cdot \Delta \rho)^{1/2}$ 이며, q : 열유속, G : 질량유속, h_{fg} : 기화 잠열, ρ_g : 증기밀도, $\Delta \rho$: 물과 증기의 밀도 차이, σ : 표면장력 그리고 g 는 중력가속

도를 나타낸다. 본 실험범위에서 CHF 실험결과는 Churn 유동과 Annular 유동의 천이 경계선을 넘어, CHF 발생기구가 환상류에서의 Entrainment-Limited CHF로 판단된다.

그림 7 및 8에서 실험자료를 Doerffer의 CHF 상관식⁴⁾ 및 Bowring의 CHF 상관식⁵⁾과 비교하였다. Doerffer의 상관식은 고압에서 CHF 예측능력은 뛰어나지만, 저압에서의 예측능력은 현저하게 떨어지는 경향이 있다. 이는 상관식 개발에 사용된 저유량영역에서의 실험자료의 부족과 그림 4에 지적한 바와 같이 저유량에서 CHF 건도에 대한 압력의 영향을 고려하지 않고 있는 데 기인하고 있다. 이에 비해 Bowring의 상관식은 저압, 고압 및 입구과냉도에 상관 없이 양호한 예측능력을 보여주고 있다. Doerffer 상관식의 평균오차 및 R.M.S. 오차는 각각 22.3% 및 9.9%였다. Bowring 상관식의 평균오차는 3.7%, R.M.S. 오차는 6.6%이었다.

4. 결론

고압, 저유량조건에서의 환상류로의 CHF 실험을 수행하여 저압 CHF 실험결과 및 기존 CHF 예측방법과 비교, 조사한 결과, 본 실험범위에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) CHF와 출구 건도의 관계에서 저압 CHF와 고압 CHF의 기울기에는 현저한 차이가 나타났다.
- (2) Mishima의 방법에 의하여 실험자료를 정리한 결과, CHF 발생시 유동양식은 환상류이었으며 발생기구는 Entrainment-Limited CHF가 지배적이다.
- (3) Doerffer의 CHF 상관식은 고압에서는 예측능력이 뛰어나지만 저압에서는 신뢰성이 현저하게 떨어진다.
- (4) Bowring의 CHF 상관식은 저압 및 고압에 상관 없이 양호한 예측능력을 보여주고 있다.

참고문헌

1. D. C. Groeneveld, et al., "1986 AECL-OU Critical Heat Flux Look-up Table", Heat Transfer Eng. 7(1-2), pp46-62 (1986)
2. 천세영, 외, "환상류에서의 입계열유속에 관한 실험적 연구", '96 춘계 학술발표회 논문집, 한국원자력학회, pp343-348 (1996)
3. K. Mishima, et al., "Critical Heat Flux at Low Velocity and Pressure Conditions", 2nd International Topical Meeting on Nuclear Power Plant, Thermal Hydraulics and Operations, 1A-1 (1986)
4. S. Doerffer, et al., "A Comparison of Critical Heat Flux in Tubes and Annuli", Nuclear Engineering and design 149, pp167-175 (1994)
5. Bowring, R. W., "A New Mixed Flow Cluster Dryout Correlation for Pressures in Range 0.6~15.5MN/m² (90~2550psia)-for Use in a Transient Blowdown Code", Heat and Fluid Flow in Water Reactor Safety, Inst. Mech. Engrs., pp175-182 (1977)

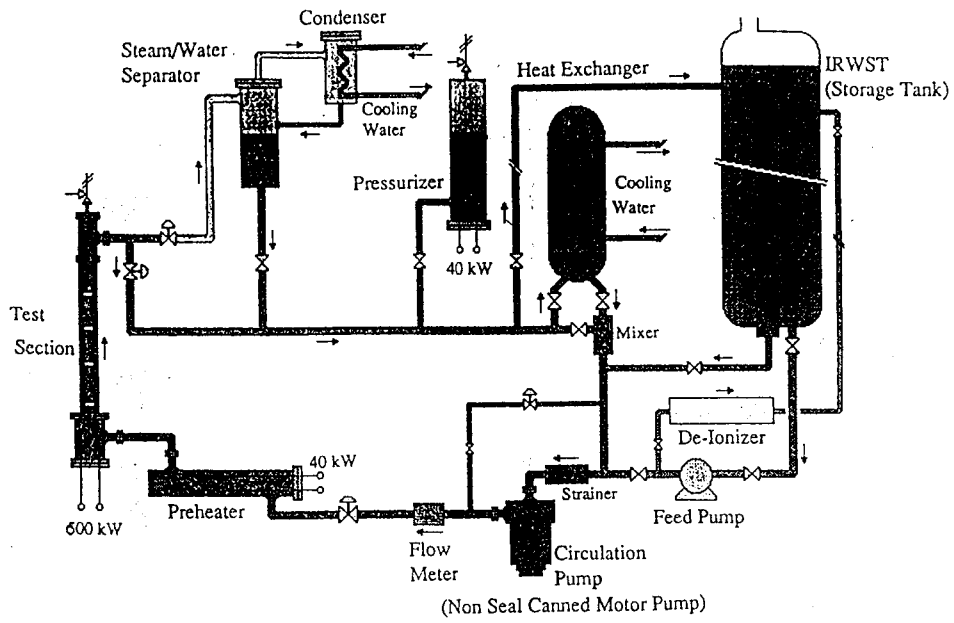


그림 1. RCS 열수력 Loop 장치의 개략도

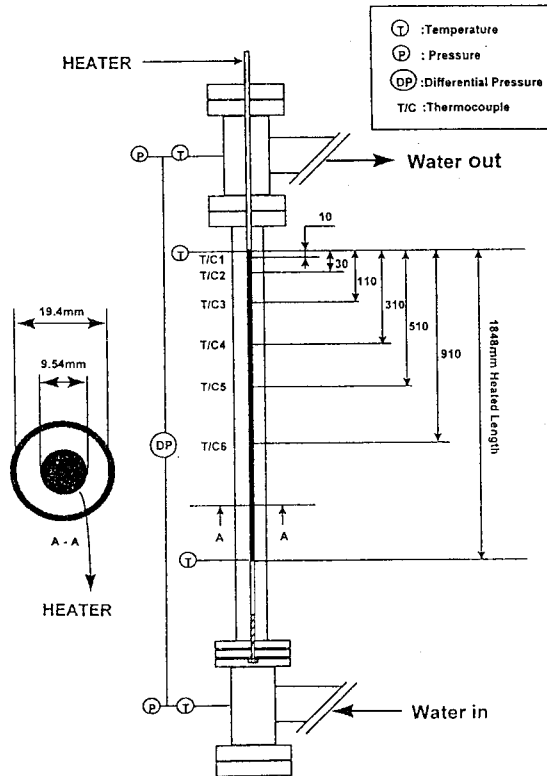


그림 2. Test Section 구조 및 열전대 위치

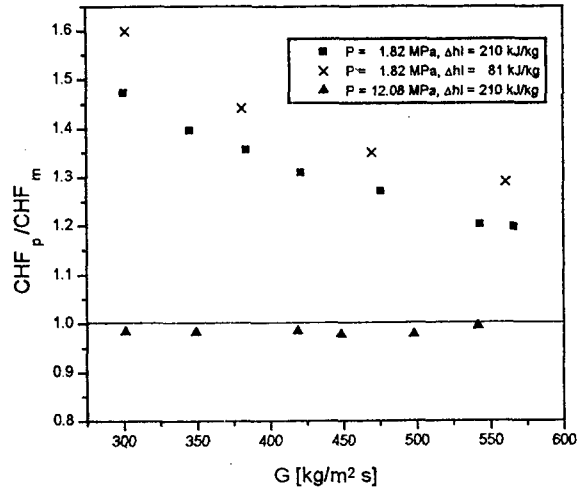


그림 7. CHF 실험결과와 Doerffer 상관식과의 비교

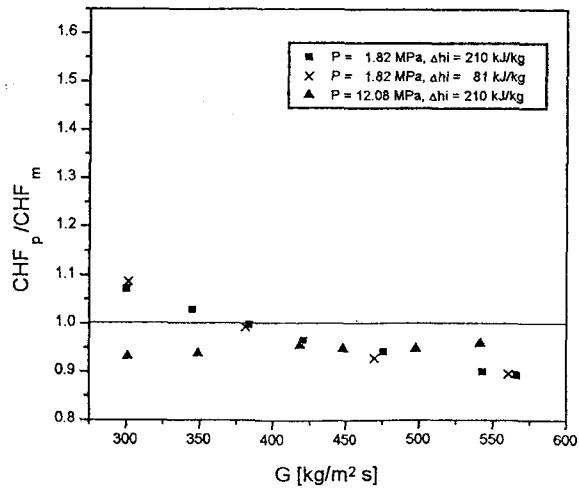


그림 8. CHF 실험결과와 Bowring 상관식과의 비교