

## 환상유로에서의 임계열유속에 관한 실험적 연구

천세영, 전형길, 정홍준, 문상기, 민경호, 정문기  
한국원자력연구소

### 요 약

한국원자력연구소에서는 광범위한 열유동조건에서 CHF 실험을 수행하기 위해 고온, 고압으로 운전할 수 있는 RCS 열수력 Loop를 제작하고 기초 실험자료를 얻기 위해 환상유로에서 CHF 측정실험을 수행하였다. 실험은 압력 1.82MPa, 질량유속 300~566kg/m<sup>2</sup>·s Test Section입구 Subcooling 18℃ 및 47℃의 범위에서 수행되었다. CHF 실험자료와 Doerffer의 CHF 상관식을 비교한 결과 상관식은 실험치 보다 최고 160% 크게 예측하였고 Doerffer 상관식은 저유량 영역에서 적용이 어려워질 것으로 예상되었다. 따라서 저유량 영역의 체계적인 CHF 실험자료가 필요하다.

### 1. 서론

임계열유속(Critical Heat Flux, CHF)은 핵연료봉의 건전성을 유지하는 데 한계를 나타내는 열수력학적 인자이며, 이를 정확하게 예측하는 것은 원자로 안전성에 가장 중요한 과제이다. 이 때문에 과거 30여년 동안 CHF에 관한 많은 실험적 연구가 이루어졌고 또 일부 조건에서 이론 해석적 연구도 많은 진척을 보이고 있다.

그러나 이들 대부분의 연구는 정상상태조건을 대상으로 수행된 것들이며 아직 통일된 CHF 발생기구는 없는 실정이다. CHF 예측의 신뢰성은 원자로 안전성에 직결하는 문제이므로 새로운 핵연료를 개발하거나 새로운 원자로 개념이 도입될 때는 실험적으로 CHF를 예측할 수밖에 없는 상황이다. 앞으로 미래형 PWR이나 열병합원자로에는 수동안전개념(Passive Safety Feature)이 채택될 것으로 예상되며 특히 LOCA와 같은 비상사태시 노심의 냉각능력은 자연순환이 중요한 역할을 담당하게 되고 기존 원자로와는 다른 열수력 조건을 갖게 되므로 원자로 설계에 활용할 수 있는 기초 자료를 수집하고 해석 코드의 검증용 자료를 제공하기 위해서는 지속적인 CHF 연구가 필요하다.

국내에서의 CHF 연구는 저온, 저압 열유동조건 실험에 머물고 있으며 선진국에 비해 아주 미약하고 실험자료의 부족으로 인해 외국에 시험자료를 그대로 도입하여 설계자료나 상관식 개발에 이용되어왔다. 따라서 한국원자력연구소에서는 최근 PWR, 열병합원자로, 하나로 및 CANDU등의 핵연료에 대한 정상 및 사고시 과도상태에서의 열수력조건을 모의하여 CHF 실험을 수행할 수 있는 고온, 고압 CHF 실험장치인 RCS 열수력 Loop를 제작하여 실험을 수행하고 있다.

최근 CHF를 예측하는 방법으로서 원형관 실험자료의 Data Base를 기초로 개발된 CHF

Look-up Table<sup>1,2)</sup>이 사용되는 경우가 있는 데 저유량 조건일 때 유동의 불안정과 실험장치 고유의 열유동특성이 강하게 나타나기 때문에 저유량 조건이나 과도상태에서 CHF 예측에는 큰 불확실성이 내포되고 있는 것으로 예상된다. 따라서 본 연구는 핵연료다발에서의 CHF의 기초자료가 될 환상관 유로에서 비교적 유량이 작은 범위에서의 CHF 특성을 파악하는 것이 목적이다.

## 2. 실험 장치

실험장치는 정상 상태 및 과도 상태의 임계열유속실험을 수행할 수 있도록 제작되었다. 실험장치의 최고 운전압력이 16.0MPa, 운전 온도가 347 °C로 실제 원자로 운전 조건과 같 도록 하였다. Fig.1은 실험장치의 개략도이다. 주 Loop계통은 순환펌프, 유량계, 예열기, Test Chamber, 기수분리기, 응축기, 가압기, 열교환기 등의 주요 부품으로 이루어져 있다. 순환펌프는 양정이 180mH<sub>2</sub>O의 Non-Seal Type Canned Moter 펌프이다. 유량의 측정에는 3종류의 Orifice 유량계가 설치되어 있으며 실험유량의 범위에 적합한 것을 선택하여 사용한다. 유량의 제어 방법은 유량제어 밸브의 조절과 Bypass Line의 Open정도, 그리고 펌프의 회전 속도조절을 조합하여 제어한다. Test Section 입구의 용수 온도를 조절하기 위하여 예열기를 설치하였다. Test Chamber는 Lower Plenum, Upper Plenum, Test Section으로 이루어져 있다. Test Section은 교체가 가능하며 본 연구에 사용된 Test Section의 구조는 Test Section Pipe 내부에 핵연료봉을 모의한 출력분포가 Uniform 형태인 Heater Rod가 장전된 환상유로를 형성하고 있다. Table 1에 Test Section의 Dimension을 나타낸다. Heater Rod에는 표면 온도를 측정하고 CHF를 검출하기 위해 직경이 0.5mm인 K-Type 열전대가 6개 부착되어 있다. 열전대의 위치를 Fig.2에 보여준다. 기수분리기는 Test Chamber에서 수증기-물 2상 유동 상태로 나와 유입되는 순환용수를 수증기와 물로 완전히 분리하고 수증기는 응축기로 들어가도록 한다. 실험장치의 가압은 내부에 40kW의 가열용 Heater가 설치된 가압기가 사용된다. Test Section에서 발생하는 열을 제거하기 위하여 U-Tube Type의 열교환기를 설치되어 있다.

본 실험의 주요 측정변수는 Test Section 입구 및 출구의 유체온도와 압력, Test Section 유량, Test Section 차압, Heater Rod의 표면온도 및 Heater Rod에 투입되는 전력등이다. 온도의 측정은 모두 K-Type 열전대를 이용하여 총 43개의 위치에서 측정하였다. 측정된 신호는 모두 자료처리계통에서 자동으로 수집, 처리된다.

CHF 측정실험은 다음과 같은 순서와 방법으로 수행된다. Test Section 입구의 유량, 온도 및 압력을 설정된 조건에 맞춘 다음, Test Section Heater에 전원을 공급하고 서서히 가열전력을 증가시킨다. CHF 근방에서는 출력을 Step상태로 증가시키고 수분동안 유지하여 정상상태를 확인한 후 다음 Step으로 증가시킨다. CHF가 발생하면 Burnout 검출기에 위해 전력공급을 80% 수준으로 낮추거나 Trip시키도록 되어 있다. 이때 CHF 발생의 판단조건은 Heater Rod의 표면온도가 갑자기 증가하여 지속적으로 상승되는 현상으로 판단하며, 본 실험에서는 표면온도가 400 °C 이상 증가하면 CHF 발생한 것으로 판단하였다.

## 3. 실험결과

실험은 Test Section 입구 압력 1.82MPa, 질량유속 300 ~ 566kg/m<sup>2</sup>·s, 입구

Subcooling도 18°C(81kJ/kg) 및 47°C(210kJ/kg)의 범위에서 수행되었다. 이들 실험인자의 측정치의 불확실도는 압력 ±0.2%, 질량유속 ±1.5%, 온도는 ±0.6% 이하였다. CHF 측정결과는 797 ~ 1560kW/m<sup>2</sup>, 열평형에서 구한 CHF 건도(CHF 발생시 출구 건도)는 0.25 ~ 0.30의 범위였다.

Fig. 3에 CHF 발생시의 전형적인 Heater Rod 표면온도의 시간변화를 보여준다. CHF에 도달하는 과정은 불규칙적으로 표면온도가 급상승, 급저하를 반복하여 결국 CHF에 이르고 있다. 이는 본 실험범위와 같이 비교적 유량이 작고 CHF 건도가 높은 경우 CHF 발생 위치에서의 유동양식은 환상류 또는 Churn Turbulent류가 되고 Heater 표면에 액체의 상실, 유입이 반복되고 있는 것을 알 수 있다. 이때 Test Section 입구에서 유량의 변동은 관찰되지 않았다. 실험결과를 Fig. 4에 보여준다. CHF는 유량의 증가에 따라 거의 비례하여 증가하며 입구 Subcooling이 커지면 CHF는 증가하는 등 일반적인 CHF의 경향과 일치하고 있다. Fig. 5, 6은 Doerffer 등<sup>3)</sup>에 위해 AECL-UO CHF Look-up Table<sup>1)</sup>를 기본으로 환상유로에 대해 개발된 상관식과 실험자료를 비교한 것이다. CHF 실험치와 Doerffer의 상관식에서 예측된 CHF의 경향은 일치하나 Doerffer의 상관식이 CHF를 높게 예측하는 것을 알 수 있다. Fig. 7을 보면 유량이 감소함에 따라 Doerffer 상관식과 실험치의 차이는 커지고 예측치는 입구 Subcooling 47°C의 경우 유량 560kg/m<sup>2</sup>·s에서 120%, 유량 300kg/m<sup>2</sup>·s 일 때 145% 정도로 커진다. 입구 Subcooling이 18°C인 경우는 130%에서 160%로 입구 Subcooling이 작아지면 실험치와 상관식과의 차이가 커지고 있다. Doerffer 상관식은 저유량 영역에서 예측성능이 떨어지는 경향을 시사하고 있다. 이는 Doerffer 상관식 개발에 사용된 저유량 영역에서의 실험자료의 부족에 기인하고 있다.

#### 4. 결론

광범위한 조건에서 CHF 실험자료를 얻기 위해 최대 운전압력 16.0MPa의 RCS 열수력 Loop를 제작하여 환상유로 CHF 측정실험을 수행하고 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 본 실험조건 범위에서는 AECL-UO CHF Look-up Table를 기본으로 개발된 Doerffer의 환상유로 CHF 상관식은 실험치 보다 최고 160% 크게 예측하였고 Doerffer 상관식이 저유량 영역에서 적용성이 없어질 가능성이 있다.
- 이는 상관식의 개발에 사용된 실험자료중 저유량영역의 CHF 자료가 부족한 것에 기인한다. 따라서 저유량 영역에서의 CHF 기초자료의 수집이 필요하다.

#### 참고문헌

1. D.C. Groeneveld, et al., "1986 AECL-UO Critical Heat Flux Look-up Table," Heat Transfer Eng. 7(1-2), 1986, 46-62
2. P.L. Kirillov, et al., "On Standard Critical Heat Flux Data for Round Tubes," NURETH-4, 1989, 103-108
3. S. Doerffer, et al., "A Comparison of Critical Heat Flux in Tubes and Annuli," Nuclear Engineering and Design 149, 1994, 167-175

Table 1. Test Section Description

Parameter	Dimension
• Test Section Inner Dia. (mm)	: 19.4
• Heater Rod Dia. (mm)	: 9.54
• Heated Length (mm)	: 1842
• Gap Size of Annulus (mm)	: 4.93
• Heated Equivalent Dia. (mm)	: 29.91
• Heater Rod Power Distribution	: Uniform

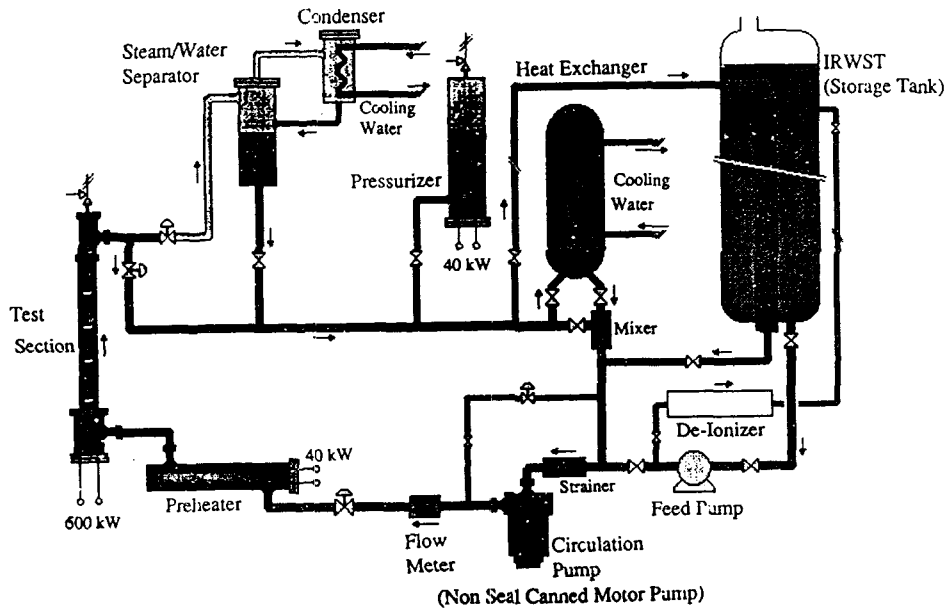


Fig. 1. RCS Thermal Hydraulic Loop Facility

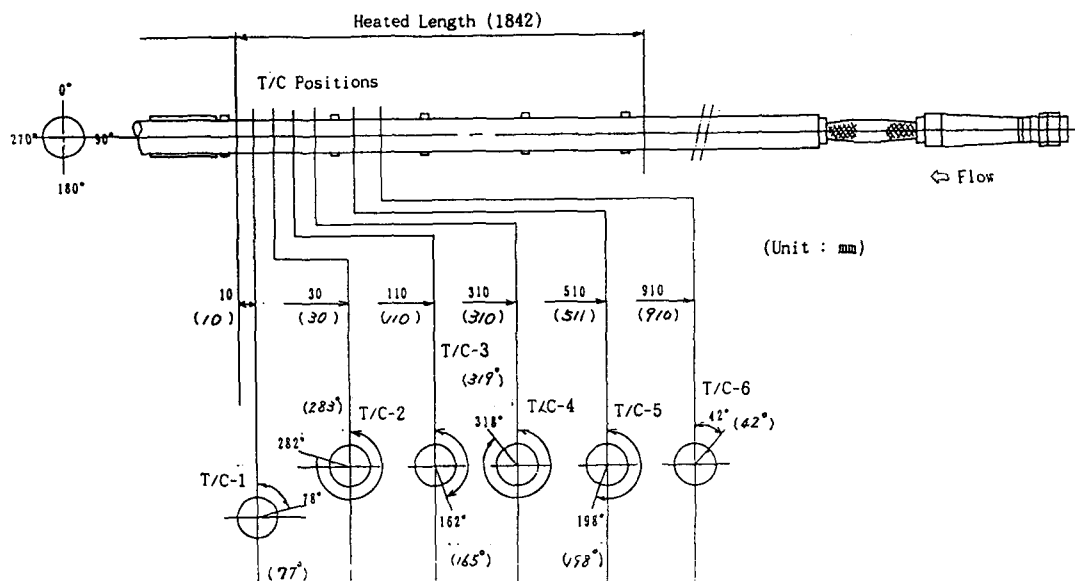


Fig. 2. Locations of Thermocouples in Heater Rod

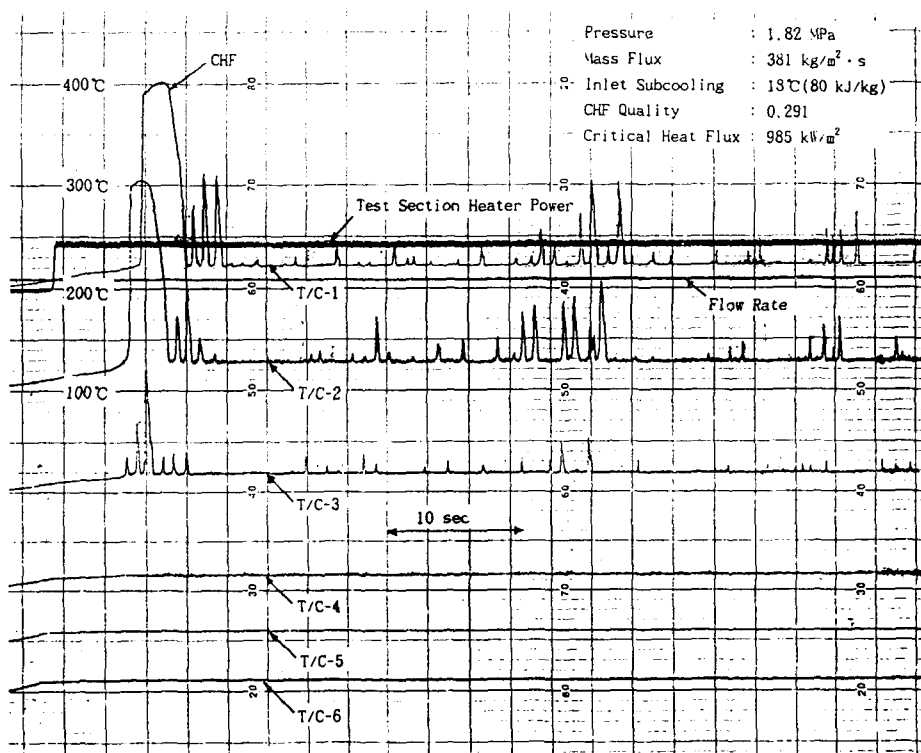


Fig. 3. Typical Temperature Characteristics in Heater Rod Surface during CHF Phenomenon

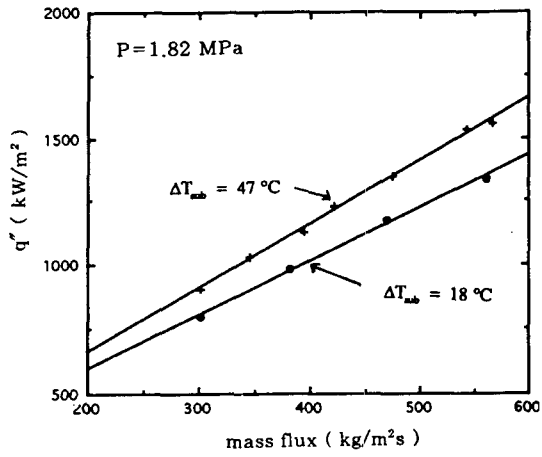


Fig. 4. Effect of Inlet Subcooling on CHF for Given Condition

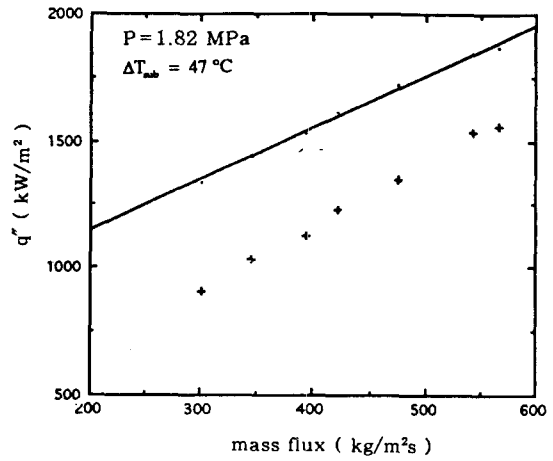


Fig. 5. Comparison between the Experimental Results and AECL-OU Look-up Table at  $\Delta T_{\text{sub}} = 47$  °C

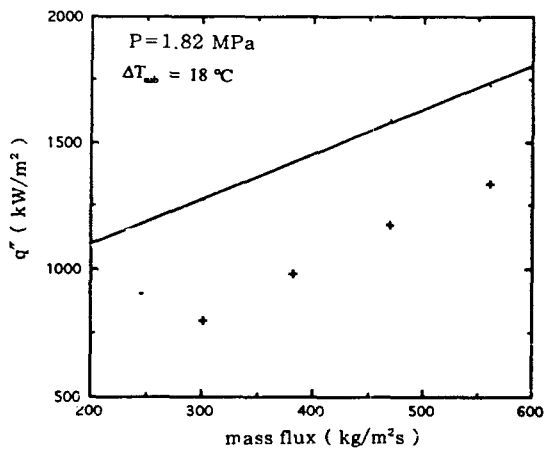


Fig. 6. Comparison between the Experimental Results and AECL-OU Look-up Table at  $\Delta T_{\text{sub}} = 18$  °C

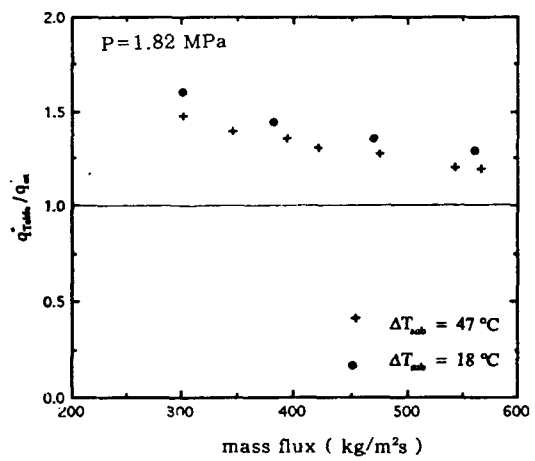


Fig. 7. Prediction of CHF Data by AECL Look-up Table