

2002 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

환상채널에 대한 R-134a의 임계열유속 실험 및  
프레온-물의 유체간 상사성 평가

Critical Heat Flux Experiment of Freon R-134a and Estimation of  
Freon-to-Water Scaling Method in Annulus

홍성덕\*, 윤영중, 천세영, 백원필

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

내환봉 직경 9.54mm, 외환봉 직경 19.4mm인 환상채널에서 프레온 R-134a를 사용하여 임계열유속 실험을 수행하였다. 실험의 주 목적은 유체간 모의모형을 평가검증하는 것으로 KAERI RCS 실험장치의 환상관 시험대와 같은 형태로 가열길이 1.842m의 시험대를 제작하였다. 유체간 모의모형 검증을 위한 실험조건은 RCS의 물 실험자료로부터 Katto의 유체간 모의모형으로 48개의 실험조건을 얻어내고, 실험은 이에 대한 실험조건을 포함하는 압력 990~2670 kPa, 유량 143~1140 kg/m<sup>2</sup>-s, 입구과냉도 7.9~39 kJ/kg에서 수행하여 총 229개의 실험자료를 생산하였다. 실험자료를 KAERI RCS 자료와 비교한 결과, 압력, 유량, 입구과냉도가 증가함에 따라 물 실험자료에 근접하는 경향을 보였으나 전체적으로 23% 과대예측하였다. 이와 병행하여 환상관에 대한 프레온 R-134a 유체의 압력, 입구과냉도, 유량, 건조도에 대한 임계열유속 경향을 분석한 결과 프레온 R-134a의 임계열유속 예측경향은 입구미포화도, 유량, 임계건도에 대하여 물의 경향과 전적으로 일치됨을 확인하였다. 그러나 물의 경우 고압영역에서 피크 점이 형성되나 프레온 실험에서는 피크점이 발생되지 않고 압력이 증가함에 따라 임계열유속이 감소되었다.

Abstract

Critical heat flux experiment was carried out using Freon R-134a in a vertical annulus channel which has 9.54mm in diameter of inner rod and 19.4mm of outer rod. The geometry of the test section keeps same as KAERI RCS loop's for the purpose of the verification of the fluid-to-fluid modeling method. The 48 experimental data of KAERI RCS loop were converted by the well-known Katto's fluid-to-fluid modeling techniques. Total 229 data were obtained by the freon R-134a experiment in the experimental range of pressure 982~2660 kPa, and of mass flux 200~1140 kg/m<sup>2</sup>-s, and of inlet subcooling 8~39 kJ/kg where including 48 converted data. The trend of critical heat flux of Freon R-134a concord to the water data for the inlet subcooling, flow rate and critical quality. But the pressure peak did not obtained at high pressure region that water has. 48 data for the verification of fluid modeling compared with the water critical heat flux data of KAERI RCS Loop. The Katto's methods over-predicted of 23% and we found that the modeling results closer to the water data if the pressure, mass flux, and inlet subcooling is increased.

## 1. 서론

원자로심의 Trip Set-point와 열적여유도는 임계열유속(CHF: Critical Heat Flux) 실험으로 얻어낸다. 일반적으로 임계열유속 실험은 대 전력과 고온 고압하의 대규모 실험장치에서 수행하는 반면에 프레온의 CHF 실험장치는 기화열과 임계압력이 물보다 월등히 낮아 실험이 용이하면서 전력소모가 상대적으로 매우 적어 제한된 시간과 제한된 경비 내에서 실험을 수행하기 유리하다. 국외에서는 1963년에 Barnett<sup>[1]</sup>가 차원해석을 통하여 프레온의 임계열유속 값을 물의 임계열유속 치로 변환하는 척도 법을 발표하면서 프레온 냉매를 통한 임계열유속 실험이 활성화되어, 연구자들이 관심 있는 영역에서 물 및 프레온 임계열유속 실험을 수행하고 특정영역에 적용되는 척도 비를 발표하였다<sup>[2,3,4]</sup>. 실험에 사용되던 CFC (Chlorofluorocarbon) 계통의 프레온 냉매는 오존층을 파괴하는 성질이 밝혀져 최근에는 무해한 HFC (Hydrofluorocarbon) 계통의 냉매가 모의유체실험에 사용되고 있다. 유체간 모의모형(Fluid-to-Fluid Modeling) 연구는 크게 차원해석법과 그래프해석법으로 분류 할 수 있다. 그래프 해석법은 유체간 모의 모형연구 초창기에 적용이 쉬워 연구된 방법으로 물-프레온간의 밀도비 및 기하형태가 같을 경우 물 및 프레온의 임계열유속 경향이 유사하게 나타나는 원리를 이용하여 척도 비를 산출하는 것으로 Stevens와 Kirby<sup>[2]</sup>가 제안하였다. 차원해석법은 그래프해석법보다 훨씬 복잡하고 어려우나 이상적인 모의를 할 수 있어 심도 있게 연구되었다. Barnett는 길이와 직경을 포함하여 임계열유속에 영향을 주는 열 가지의 변수를 선택하고 차원 해석을 수행하여 척도 비를 구하였다. Andersen과 Pejtersen<sup>[5]</sup>은 임계열유속에 영향을 미치는 13가지의 변수를 선택하고 차원 해석을 수행하였다. Ahmad<sup>[6]</sup>는 13가지의 무차원그룹들을 실험시 조정 가능한 그룹과 조정이 불가능한 그룹으로 나누고, 조정이 불가능한 그룹을 모아 한 개의 모델링 상관식으로 압축시키고 척도비를 구하였다. Katto<sup>[7]</sup>는 차원해석으로 얻은 임계열유속 일반화 상관식에서 모델링변수를 도출하였다. 이와 같이 차원해석법은 계속하여 연구 발전되었으며 수평관<sup>[8]</sup> 및 핵연료 다발<sup>[9, 10]</sup>에 까지 확장되었으나 그 연구가 미약하여 아직 단순한 원형관에 대한 모의만이 신뢰할 수 있는 수준이다. 최근에 Hong et. al.<sup>[11]</sup> HFC 계열의 프레온 R-134a 유체를 이용하여 원형관에서 임계열유속실험을 수행하고 잘 알려진 Katto와 Amhad의 유체간 모의모형을 평가하였다. 그는 Katto의 방법이 Ahmad의 방법 보다 잘 예측하고 비교된 유체간 모의모형은 적용압력이 7~12 MPa인 가압중수형 원자로 조건에서는 비교적 잘 예측되나, 적용압력이 12~17 MPa인 가압경수형원자로 조건에서는 오차가 커져 개선이 필요하다고 보고하였다. 본 연구에서는 프레온 R-134a를 작동유체로 내환봉 직경 9.54mm, 외환봉 직경 19.4mm인 환상채널에서 프레온 R-134a를 사용하여 임계열유속실험을 수행하였다. 실험의 주 목적은 유체간 모의모형을 검증하는 것으로 KAERI RCS 실험장치<sup>[12]</sup> 환상관 시험대와 같은 형태로 길이 1.842m의 시험대를 제작하였다. 유체간 모의모형 검증을 위한 실험조건은 RCS의 물 실험 자료로부터 Katto의 유체간 모의모형을 활용하여 실험조건을 얻어내었다. 실험은 48개의 실험조건을 포함하는 압력 982~2660 kPa, 유량 200~1140 kg/m<sup>2</sup>-s, 입구과냉도 8~39 kJ/kg에서 수행하여 총 229개의 실험자료를 생산하였다. 실험 후 KAERI RCS 자료와 비교하고, Katto가 제시한 유체간 모의모형을 적용하여 물의 임계열유속 값과 비교하여 유체간 모의모형의 예측도를 평가하였다. 또한 다양한 조건에서 임계열유속실험을 수행하고 환상관에 대한 압력, 입구과냉도, 유량, 건도에 대한 임계열유속 경향을 분석하였다.

## 2. 실험 장치

### 2.1 실험루프

스테인레스 스틸로 제작된 프레온 임계열유속 실험장치의 구성도를 Figure 1에 도시하였다. 작동유체는 HFC 계열의 신 냉매 R-134a (CH<sub>2</sub> FCF<sub>3</sub>) 이며, 실험장치의 최대운전 압력 및 온도는 각각 40 기압, 100 °C이다. 주요 실험장치는 유체 이송장비인 펌프와 가열장비인 예열기 및 그밖에 가압기, 시험대, 세퍼레이터, 컨덴서, 열교환기 등으로 구성되어 있다.

**냉각장치** : 시험대에서 생성된 이상유체는 15리터 용량의 세퍼레이터에서 증기와 액체로 분리되어 증기는 컨덴서로 액체는 열교환기로 보낸다. 컨덴서 및 열교환기는 모두 셸튜브 형으로 제작되었다.

압력조절 : 20리터 용량의 아큐메이터를 가압기로 사용하였다. 아큐메이터에 질소가스를 주입하면 프레온 유체와 질소가스 사이에 있는 Buna-N 막이 팽창되면서 시스템압력은 증가된다. 압력은 또한 아큐메이터 상단에 있는 질소가스 배출밸브를 통하여 감소시킬 수 있다.

온도조절 : 25kW급 예열기의 SCR (silicon controled rectifier) 조절장치와 이를 조정하는 가변저항기로 온도조절을 한다. 온도 피드백은 시험대 입구에 설치되어 있는 백금온도계(RTD)로부터 신호를 받는다.

유량조절 : 30m 수두에 최고 2.5 kg/s의 용량의 3500 RPM의 터빈타입원심펌프에 RPM 조절용 인버터를 설치하여 우회밸브와 함께 유량을 조절한다. 또한 미세 조절은 입구 throttling 밸브를 이용한다.

## 2.2 환상관 시험대

1 1/2" 튜브로 구성된 Vessel은 조립이 편리한 스웨즐락 피팅을 활용하여 제작하였다. 직류전원공급을 받도록 상부에 단자대 역할을 하는 25mm 두께의 Tie Plate의 중앙에 홈을 내어 외경 9.54mm의 히터를 고정시키고, 하부는 Blind 플랜지에 오링 홈을 내어 열팽창으로 인한 히터의 휨을 피하였다 (Figure 2-a). 가열봉과 vessel사이의 전기절연을 목적으로 테프론 실린더를 길이 10cm 내경 19.4mm로 제작하여 vessel에 삽입하였다(Figure 2-b). 유체의 입·출구에는 테프론실린더의 몸체에 10mm직경의 구멍 24개를 내어 유체가 원활히 통과되도록하였다. 또한 상부 플레넘에는 7mm 길이의 스프링을 설치하여 테프론의 열팽창을 흡수하도록 하였다. 가열봉은 가열구간과 전기 연결부 그리고 CHF 감지열전대로 구성되어 있다. 길이 1842mm의 인코넬 601 가열구간 상부는 구리봉으로 하부로는 두꺼운 구리관으로 연결되어있고, Figure 2-c와 같이 가열구간 상부에 2개의 열전대를 설치하였다. 열전대는 가열구간 끝단 10mm 및 30mm 하단에 0.5mm 굵기의 K-type으로 인코넬피막이 있어서 전기적인 노이즈가 차단되었다. 시험대 입구온도 및 출구온도는 T-type 열전대를 입·출구 노즐 전단 설치하여 측정하고, 시험대 입·출구압력 및 시험대 압력강하량은 다이아프라마형 압력트랜스미터를 설치하여 측정하였다.

## 2.3 측정장치

입구온도 측정용 열전대는 직경 4mm인 T-type으로 허용오차는  $\pm 0.4\%$ 이다. 대기온도교정은 열전대용 멀티플렉서에 내장되어있는 Isothermal block에서 측정 시 자동으로 교정되고, 열전대 자체는 요코가와 열전대 교정기로 교정하였다. 입구 및 출구압력 측정용 압력계는 오차가  $\pm 0.5\%$ 인 로즈마운트사의 스마트타입 압력트랜스미터를 사용하였고, 데드웨이트 교정기로 교정하였다. 유량측정 센서는 마이크로모션사의 U 튜브형 질량유량계로 허용오차는  $\pm 0.5\%$  이내이다. 전압은 vessel 상부 Tie-Plate와 가열봉 하부 연결용 단자대에 전선을 내어 HP3852시스템에서 직접 측정하고, 전류는 전선 사이에 0.2% 정확도의 최대 1000암페어 측정용 요코가와 센트를 설치하여 측정하였다. CHF 감지기는 가열봉에 설치되어 있는 2개의 K-type 열전대를 사용한다. 상부 1번 열전대는 40kW급의 직류전원장치 보호용으로 사용되고 2번 열전대는 DAS 측정장치로 보내져 파일에 저장된다. 센서 시그널을 수송하는 모든 전선은 노이즈 차폐용 쉴드선을 사용하였다. 전압신호로 변환된 측정신호는 HP3852 자료획득시스템으로 집약되어 컴퓨터에 저장된다. HP3852 시스템은 HP-IB 카드가 설치된 컴퓨터에서 HP-VEE 소프트웨어로 구동하였다.

## 3. 유체간 모의모형

임계열유속 현상은 다음과 같이 임계열유속에 영향을 미치는 독립변수들의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\Phi_{CHF} = f(G, \Delta h, L, D, g, h_{fg}, \rho_l, \rho_v, \mu_l, \mu_v, C_{pl}, C_{pv}, k_l, k_v, \sigma, \gamma, \beta) \quad (1)$$

여기서  $\Phi_{CHF}$ 는 임계열유속을 나타내는 종속변수이다. Buckingham의  $\pi$  이론에 따라 (1)식은 다음과 같

은 무차원 그룹으로 유도될 수 있다.

$$\frac{\Phi_{CHF}}{Gh_{fg}} = f \left( \frac{GD}{\mu_l}, \frac{\Delta h}{h_{fg}}, \frac{\rho_l}{\rho_v}, \frac{L}{D}, \frac{\mu_l}{\sqrt{\sigma D \rho_l}}, \frac{\mu_l}{\mu_v}, \frac{gD^3 \rho_l^2}{\mu_l^2}, \frac{\mu C_{pl}}{k_l}, \frac{\mu C_{pv}}{k_v}, \frac{k_l}{k_v}, \frac{\gamma \mu_l^2}{\rho_l D^2}, \frac{\beta C_{pl}}{\gamma h_{fg}} \right). \quad (2)$$

여기서 좌변 항은 무차원화된 임계열유속이다. 모의 유체가 완벽한 모델이 되려면 아래 관계가 성립되어야 한다.

$$\left( \frac{\Phi_{CHF}}{Gh_{fg}} \right)_W = \left( \frac{\Phi_{CHF}}{Gh_{fg}} \right)_F \quad (3)$$

실제로 임계열유속과 관련된 많은 무차원그룹 수로 알 수 있듯이 임계열유속 현상이 매우 복잡하여 물 및 프레온간의 모든 무차원 그룹을 맞추는 것은 사실상 불가능하다. 일반적으로 유체간 모의관계식을 산출할 때 아래 식 (4)-(6)와 같이 유체의 기하학적 상사성과 일부 열역학적 및 수력적 상사성을 일치시킨다.

$$\text{기하학적 상사성 : } \left( \frac{L}{D} \right)_W = \left( \frac{L}{D} \right)_F \quad (4)$$

$$\text{열역학적 상사성 : } \left( \frac{\Delta h}{h_{fg}} \right)_W = \left( \frac{\Delta h}{h_{fg}} \right)_F \quad (5)$$

$$\text{수력적 상사성 : } \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)_W = \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)_F \quad (6)$$

Ahmad<sup>[6]</sup>는 13가지의 무차원그룹들을 실험시 압력, 입구엔탈피, 가열길이, 직경 등 조정 가능한 그룹을 일치시키고, 조정이 불가능한 그룹을 모아 수직 원형관에서 측정된 물 및 프레온-12 데이터로부터 아래와 같이 모델링 변수의 상관식을 얻었다.

$$\psi_{CHF} = \left( \frac{GD}{\mu_l} \right) \left( \frac{\mu_l}{\sqrt{\sigma D \rho_l}} \right)^{2/3} \left( \frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{1/5} \quad (7)$$

Katto<sup>[7]</sup>는 차원해석으로 얻은 임계열유속 일반화 상관식에서 다음과 같이 모델링변수를 도출하였다.

$$\psi_{CHF} = \frac{G\sqrt{D}}{\sqrt{\sigma \rho_l}} \quad (8)$$

## 4. 분석 및 토의

### 4.1 KAERI RCS 물 자료 변환

KAERI RCS의 물 실험자료<sup>[12]</sup>로부터 유체간 모의모형검증을 수행하기 위해서는 물의 실험조건으로부터 프레온 R-134a 실험조건으로의 변환작업이 필요하다. 변환방법은 가장 잘 맞는 것으로 알려진 Katto의 방법을 사용하였다. 물 자료로 변환하기 위한 유량, 잠열인자 및 임계열유속인자는 다음과 같은 순서로 구한다.

- 1) 변환하고자 하는 프레온의 압력으로부터 액체 기체간 밀도 비를 구하고 식(6)과 같이 밀도 비에 해당되는 물의 압력을 계산한다.
- 2) 모델링 변수가 같아지는 물의 질량유속( $G_W$ )을 계산하고 아래 식으로 유량인자를 계산한다.

$$F_G = \frac{G_W}{G_F} = \frac{(\sqrt{\sigma\rho l})_W}{(\sqrt{\sigma\rho l})_F} \quad (9)$$

3) 잠열인자 및 열유속인자를 구한다.

$$F_{\Delta h} = \frac{(h_{fg})_W}{(h_{fg})_F} \quad (10)$$

$$F_Q = F_G \times F_{\Delta h} \quad (11)$$

4) 임계열유속을 계산한다

$$(\Phi_{CHF})_W = F_Q \times (\Phi_{CHF})_F \quad (12)$$

208개의 KAERI RCS 실험자료를 Katto의 유체간 모의모형을 사용하여 변환한 결과 입구온도가 20 °C 이상인 48개의 자료만 검증실험에 사용하였다. 제작된 실험장치는 2차측 냉각유체가 물이므로 입구온도가 20 °C 이하인 경우 입구조건을 유지하기 어렵기 때문이다.

#### 4.2 프레온 R-134a 실험

KAERI RCS 실험장치의 환상관 시험대와 같은 형태로 가열길이 1.842m의 시험대를 제작하고, 유체간 모의모형 검증을 위한 48개의 실험조건을 포함하는 환상채널의 실험조건은 다음과 같다.

압력	990 ~ 2670	kPa,
유량	143 ~ 1140	kg/m <sup>2</sup> -s,
입구미포화도	7.9 ~ 39.0	kJ/kg,

실험 조건 설정범위는 아래와 같다.

입구온도	±0.7 °C 이내
입구압력	±20 kPa 이내
유량	±1% 이내

#### 4.3 실험변수에 따른 임계열유속의 경향

생산된 총 229개의 실험자료를 이용하여 각 실험변수에 대한 임계열유속의 경향을 조사하였다.

입구 미포화도 및 압력에 따른 프레온 임계열유속의 경향을 Figure 3 및 4에 도시하였다. 물 실험 결과와 마찬가지로, Figure 3은 유량이 일정할 때 입구 미포화도에 따라 임계열유속은 선형적으로 증가하고 있음을 보여주고 있다. 또한, 유량이 증가함에 따라 입구 미포화도의 영향이 커졌다. 압력이 증가함에 따라 임계열유속은 서서히 감소하다 압력이 2500 근처 이후부터 상대적으로 급격히 감소되었다. 물의 경우 고압영역에서 피크 점이 형성되나 프레온 실험에서는 발견되지 않았다. 저압의 피크는 형성점이 100 kPa 근처로 예상되나 프레온 실험가능영역을 벗어나 저압피크 영역은 확인하지 못하였다. 임계건도의 영향은 Figure 5에서 보는 바와 같이 미포화 영역에서부터 임계건도 25% 근처까지 임계열유속의 변화가 급격하나 25% 이후부터는 완만하게 줄어드는 경향을 보였다. 이러한 양상은 입구 미포화도가 클수록 심화되고 있음을 알 수 있다. 임계건도 25% 근처에서 임계열유속이 분기되는 것은 물 실험자료와도 잘 일치된다(Doerffer et. al.<sup>[13]</sup>). 원형관의 경우 10% 근처에서 분기되는 경향을 보이는 것과는 매우 다른 실험결과를 보여주고 있다. Figure 6은 유량에 대한 임계열유속의 경향을 나타낸 것이다. 유량이 증가할수록 임계열유속은 완만하게 증가하고 유량이 높을수록 압력에 대한 영향력이 증가하는 결과를 보였다.

#### 4.4 유체간 모의모형 검증

48개의 프레온 R-134a 실험자료를 KAERI RCS 물의 임계열유속 자료와 비교하도록 다시 Katto의 유체간 모의모형을 사용하여 물 자료로 변환하였다. 유량과 입구미포화도 효과를 Figure 7에 나타내었다. 전체적으로 과대예측하고 유량이 증가하거나 입구미포화도가 증가할수록 물의 임계열유속에 근접하는 경향을 보였다. 그리고 Figure 7-a의 압력이 9900kPa인 경우보다 큰 압력이 15000kPa인 (Figure 7-b) 경우에도 같은 경향을 보였다. 임계건도 관점에서는 Figure 8과 같이 건도가 작아질수록 물의 임계열유속에 근접함을 보여주고 있다. 원형관의 경우 모의모형이 잘 맞는 것에 비하여 환상관에 대하여는 예상외로 과대예측 하였고 표준편차도 크게 나타났다. 즉, KAERI RCS 실험조건에서 선택한 48개의 실험 자료의 평균은 23% 과대예측하고 표준편차는 9.3%나 되었다(Figure 7). KAERI RCS 자료는 유량이 매우 적은 조건( $650 \text{ kg/m}^2\text{-s}$  이하)에서 얻어진 실험자료이며, 유량이 증가할수록 물의 임계열유속 값에 근접하는 경향을 보이고 있어 모의모형에 대한 전체적인 결론을 내리기 어려우나 원형관 보다는 예측도가 떨어지는 것을 확인하였다. 앞으로 유량이 원자로조건 이상까지 확장된 조건에서 추가적인 검증이 더 필요하다.

## 5. 결론

내환봉 직경 9.54mm, 외환봉 직경 19.4mm인 환상채널에서 프레온 R-134a를 사용하여 임계열유속 실험을 수행하고 물-프레온 유체간 모의모형을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 프레온 R-134a의 임계열유속 예측경향은 입구미포화도, 유량, 임계건도에 대하여 물의 경향과 전적으로 일치됨을 확인하였다.
2. 압력에 대한 임계열유속의 경향은 중압 구간에서는 물의 경향과 일치되나 고압영역에서 물의 실험에서 발생하는 피크가 프레온 실험에서는 발견되지 않았다.
3. 48개의 KAERI RCS 물 실험자료를 이용하여 유체간 모의모형의 정확도를 비교한 결과 압력, 유량, 입구과냉도가 증가함에 따라 물 실험자료에 근접하는 경향을 보였으나 전체적으로 23% 과대예측하고 표준편차가 9.3%로 크게 나타났다.
4. KAERI RCS 비교자료는 유량이 매우 적은 조건( $650 \text{ kg/m}^2\text{-s}$  이하)에서 얻어진 실험자료이다. 유량이 증가할수록 물의 임계열유속 값에 근접하는 경향을 보이고 있어 유체간 모의모형에 대한 신뢰성있는 비교검증을 위해서는 유량이 높은 영역에서의 비교가 추가적으로 필요하다.

## 후기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기연구개발사업의 일환으로 이루어졌으며 이에 대하여 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 기호설명

$C_p$	정압 비열
$D$	봉 직경
$g$	중력가속도
$G$	단위 면적당 유량
$h$	엔탈피
$h_{fg}$	기화의 잠열
$k$	열전도 계수
$L$	가열길이

$p$	압력
$T$	온도
$x$	증기 건도
$\beta$	$\frac{dT}{dp}$
$\gamma$	$\frac{d(\rho_l/\rho_v)}{dp}$
$\mu$	역확점성계수
$\rho$	밀도
$\sigma$	표면장력
$\Phi_{CHF}$	임계열유속
$\psi_{CHF}$	모델링 변수

#### 첨 자

$F$	모의 유체 (프레온)
$l$	액체
$v$	기체
$W$	물

#### 참고문헌

- (1) Barnett, P. G., 1964 "An Experimental Investigation to Determine the Scaling Laws of Forced Convection Boiling Heat Transfer, Part 1: The Preliminary Examination Using Burn-out data for water and Action 12," AEEW-R363.
- (2) Stevens, G. F. and Kirby, G. J., 1964, "A Quantitative Comparison between Burn-out Data for Water at 1000 psia and Freon 12 at 155 psia Uniformly Heated Round Tubes Vertical Upflow," AEEW-R327.
- (3) Staub, F. W., 1969, "Two-Phase Fluid Modeling - the Critical Heat Flux," Nucl. Science and Eng., Vol. 35, pp. 190~199.
- (4) Coffield, R. D. Jr. et al., 1969, "A Subcooled DNB Investigation of Freon-113 and Its Similarity to Subcooled Water DNB Data," Nucl. Eng. and Design, 11, pp. 143~153.
- (5) Andersen, R. and Pejtersen, V. S., 1969, "A Critical Literature Study on Scaling Laws for Heat Transfer and Burn-out in Two Phase Flow with Special Reference to Boiling-Water Reactors," Danish Atomic Energy Commission, Report No. 207.
- (6) Ahmad, S. Y., 1973, "Fluid-to-Fluid Modeling of Critical Heat Flux: A Compensated Distortion Model," Int. J Heat Mass Transfer, Vol. 16, pp. 641-662.
- (7) Katto, Y., 1978, "A Generalized Correlation of Critical Heat Flux of Forced Convection Boiling in Vertical Uniformly Heated Tubes," Int. J Heat Mass Transfer, Vol. 21, pp. 783~794.
- (8) Merilo, M., 1979, "Fluid-to-Fluid Modeling and Correlation of Flow Boiling Crisis in Horizontal Tubes," Int. J Multiphase Flow, Vol. 5, pp. 313~325.
- (9) McPherson, G. D. and Ahmad, S. Y., 1971, "Fluid Modeling of Critical Heat Flux in an 18-Element Bundle," Nucl. Eng. and Design, pp. 409~427.

- (10) Katsaounis, A., 1980, "Verification of Ahmad's Fluid-to-Fluid Scaling Law by Bundle Experiments," Proc. of Winter Annual Meeting of ASME, Chicago, pp. 37~43.
- (11) S. D. Hong, S. K. Chang, B. D. Kim, C. H. Chung, "Critical Heat Flux Experiment of Freon R-134a in a Vertical Tube and Estimation of Fluid-to-Fluid Modeling Method," Korean Nuclear Society, Autumn Meeting, Seoul, October, 1998.
- (12) S. Y. Chun, H. J. Chung, S. D. Hong, S. K. Yang, M. K. Chung, "Critical Heat Flux in Uniformly Heated Vertical Annulus under a Wide Range of Pressures 0.57 to 15.0 MPa," Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 32, Number 2, pp.128-141, 2000.
- (13) S. Doerffer, D. C. Groeneveld, S. C. Cheng and K. F. Rudzinski, A Comparison of Critical Heat Flux in Tubes and Annuli, Nucl. Eng. & Des., 149, 167-175, 1994.



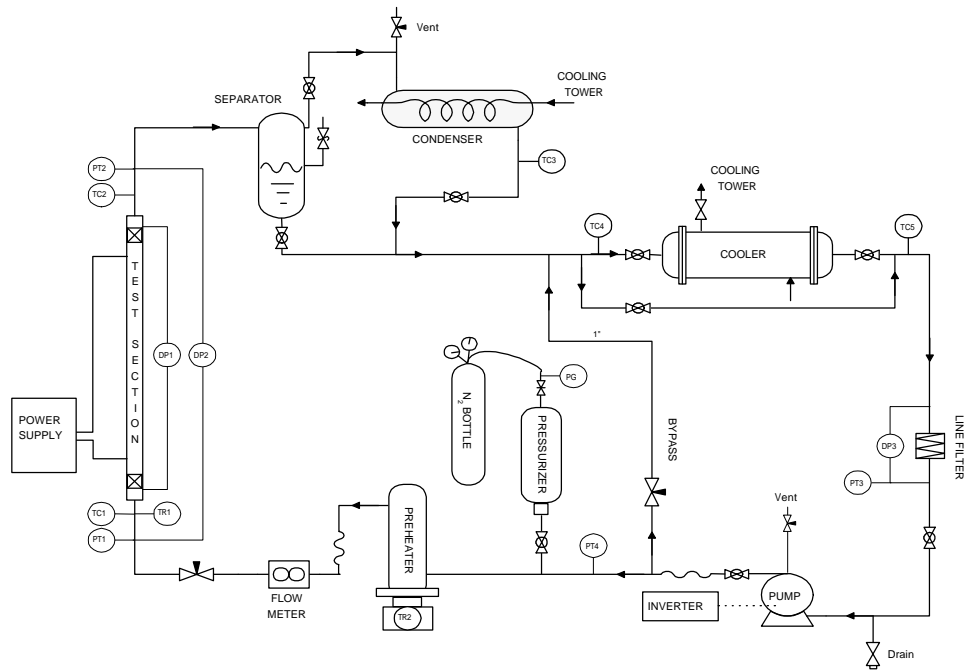


Figure 1. Schematic diagram of Freon CHF loop

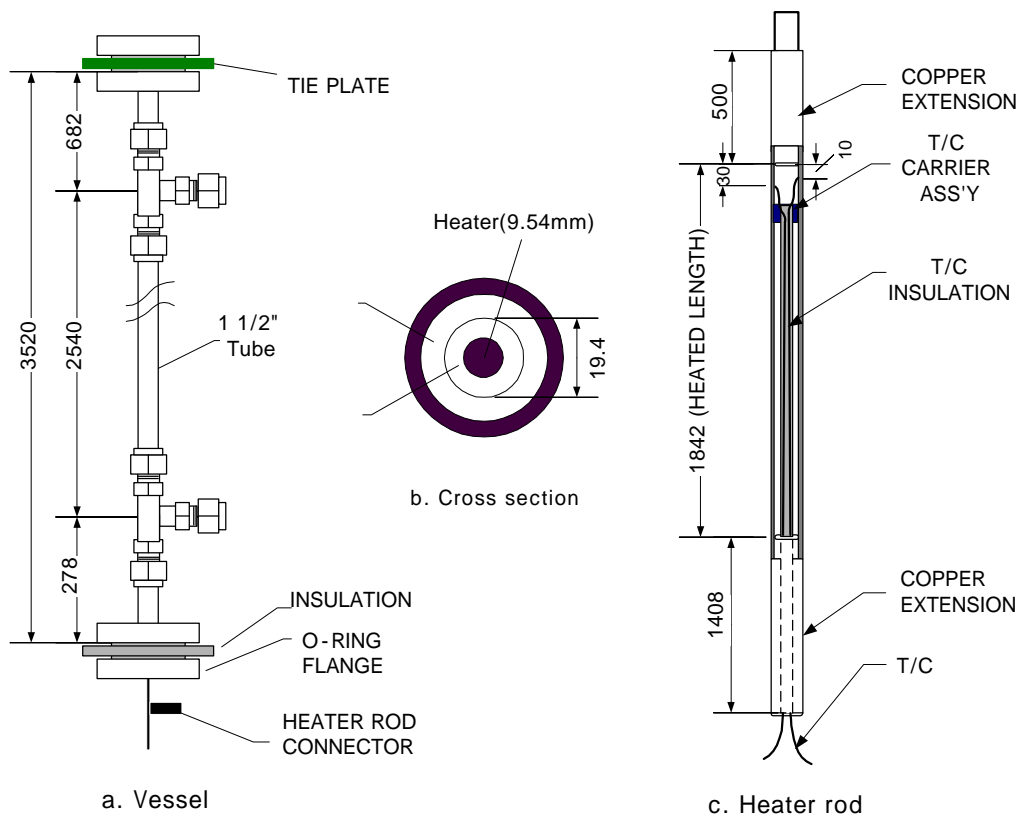


Figure 2. Test section

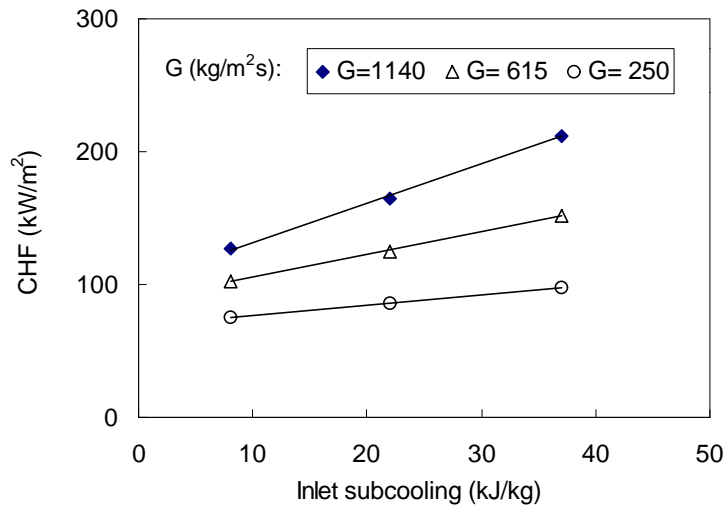


Figure 3. Critical heat flux on the inlet subcooling

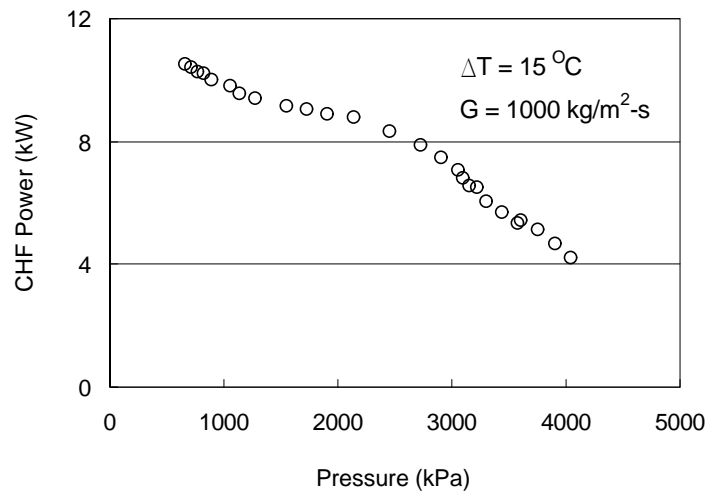
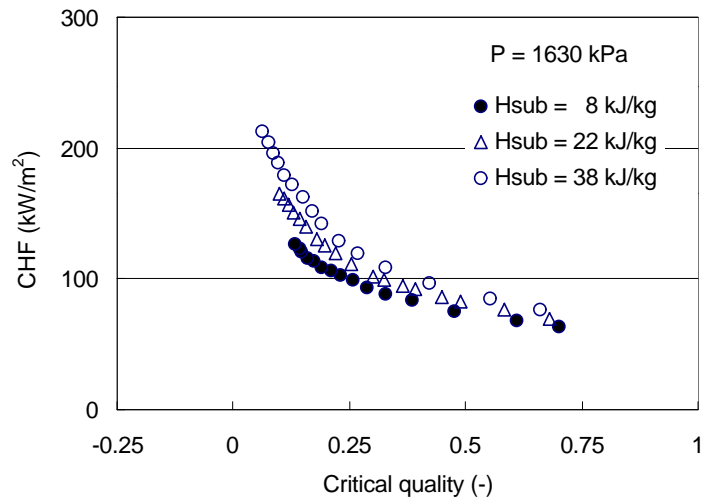
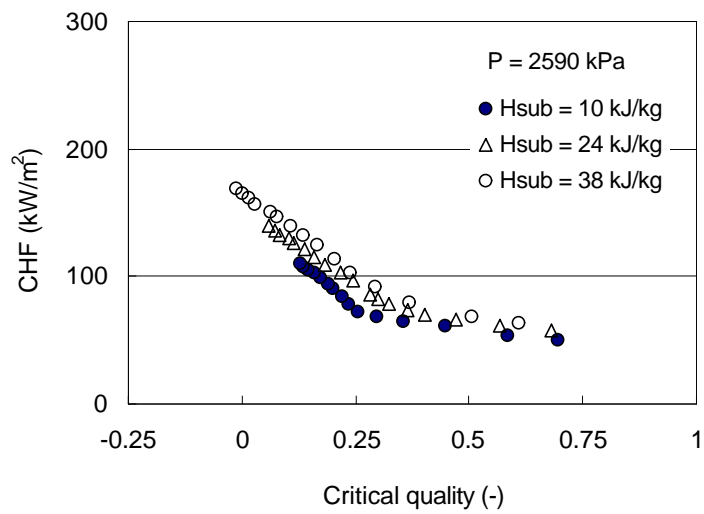


Figure 4. Critical heat flux on the pressure

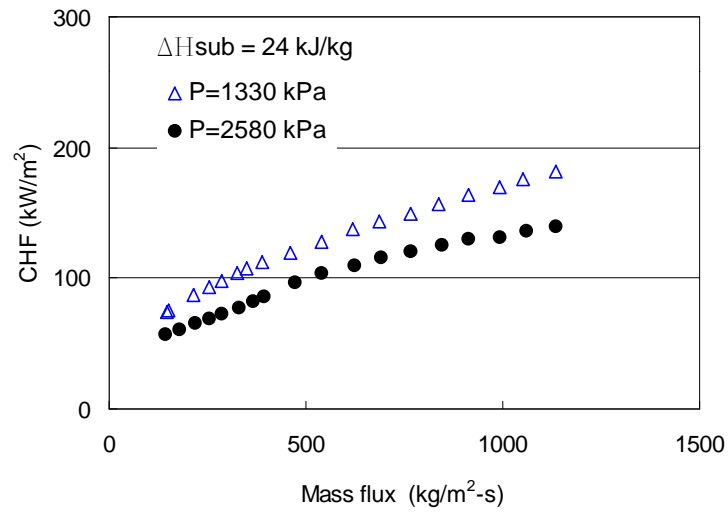


(a)  $P = 1630 \text{ kPa}$

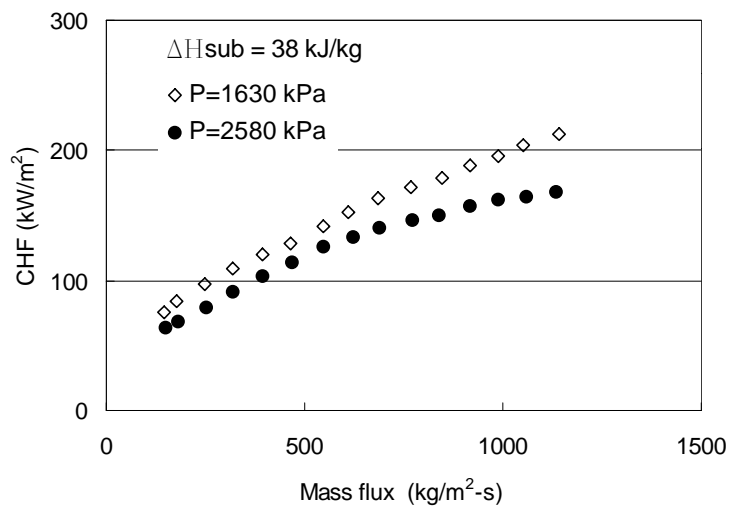


(b)  $P = 2590 \text{ kPa}$

Figure 5. Critical heat flux on the critical quality

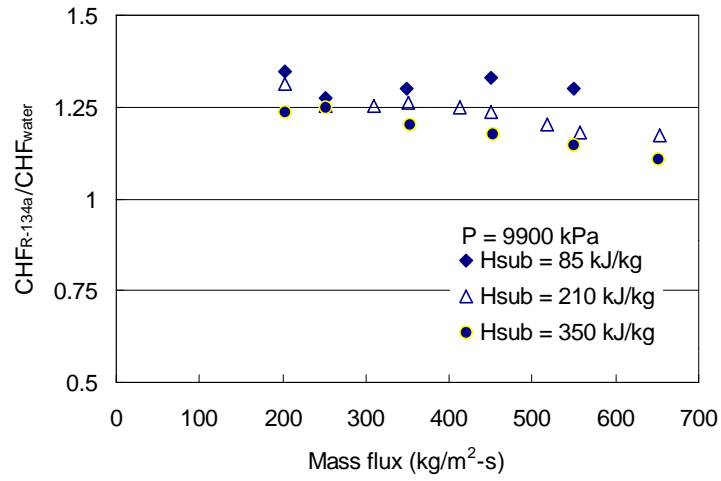


(a) Inlet subcooling = 24 kJ/kg

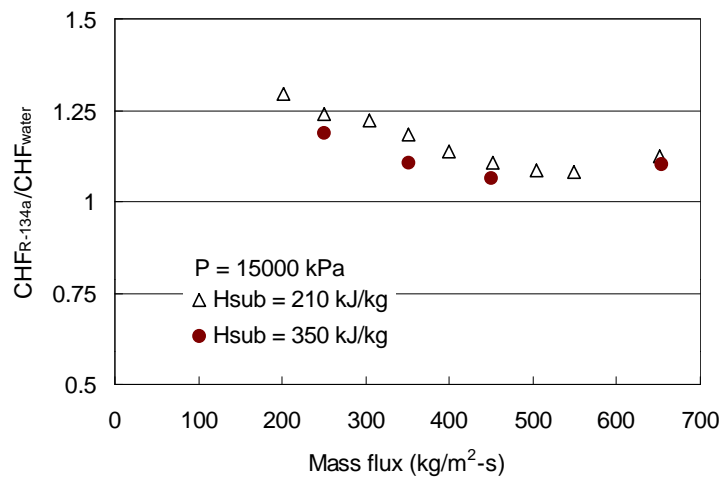


(b) Inlet subcooling = 38 kJ/kg

Figure 6. Critical heat flux on the mass flux



(a) P = 9900 kPa



(b) P = 15000 kPa

Figure 7. Modeling results on the mass flux, inlet subcooling and pressure (Katto's fluid-to-fluid modeling method)

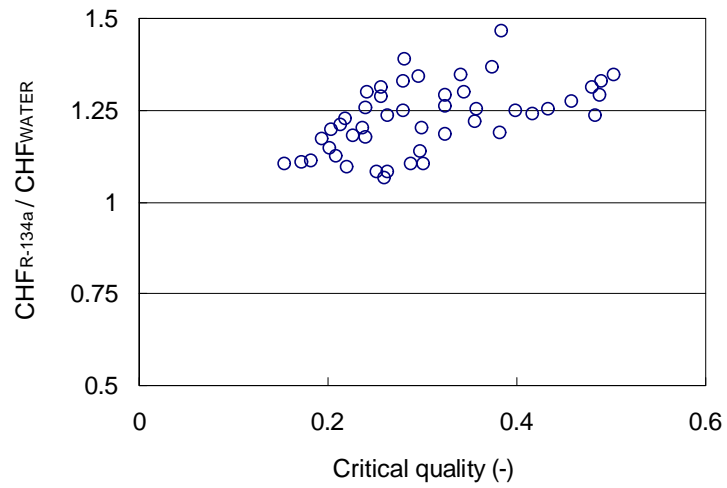


Figure 8. Modeling results on the critical quality  
(Katto's fluid-to-fluid modeling method)

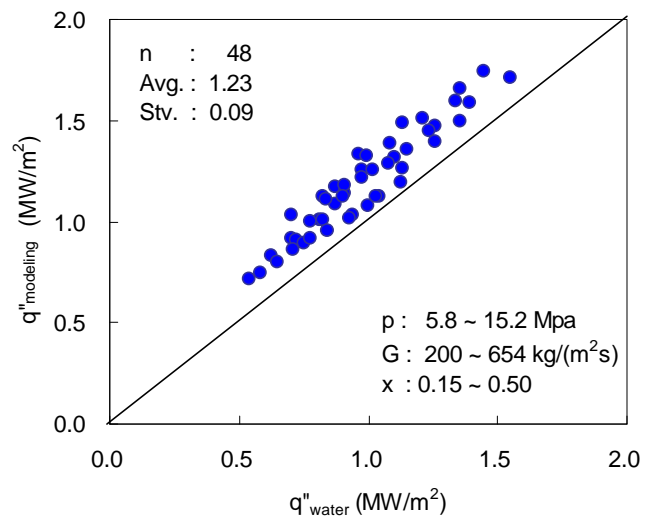


Figure 7. Comparison of KAERI RCS water vs. data from R-134a  
data converted by Katto's fluid-to-fluid modeling method