

프레온 R-134a를 사용한 수직 원형관에서의 임계열유속 실험 및
유체간 모의모형 평가

Critical Heat Flux Experiment of Freon R-134a in a Vertical Tube
and Estimation of Fluid-to-Fluid Modeling Method

홍성덕, 장석규, 김복득, 정장환

한국원자력연구소

요 약

프레온 R-134a를 작동유체로 수직 원형관에 대한 임계열유속 실험을 수행하고, 실험결과를 유체간 모의모형을 적용하여 물의 임계열유속 자료를 산출하였다. 실험영역은 PWR 및 PHWR의 임계열유속 상관식 적용영역을 모두 포함한다. 실험결과 유량이 일정할 경우 입구 미포화도에 따라 임계열유속은 선형적으로 증가하였으며, 입구 미포화도가 일정할 경우 유량에 따라 임계열유속은 증가하였다. 실험자료를 Ahmad 및 Katto의 유체간 모의모형을 사용하여 물자료로 변환하고 물 실험자료인 Groeneveld의 1995 look-up table과 비교하였다. 두 방법 모두 전 실험영역에 걸쳐 낮게 예측하였으며, Katto의 방법이 Ahmad의 방법 보다 잘 예측하였다.

Abstract

Critical heat flux experiment was carried out using freon R-134a in a vertical round tube and the fluid-to-fluid modeling techniques are applied. The experimental range covers all the application ranges of critical heat flux correlations developed for both PWR and PHWR. The critical heat flux appears to increase linearly with inlet subcooling. For the constant inlet subcooling, increases in mass flow rate cause an increase in critical heat flux. The freon data are scaled to the water critical heat flux using both Katto and Ahmad's methods. Both methods under-predicted in experimental range when compared with the Groeneveld's 1995 look-up table. It was found that the Katto's method predicts better than the Ahmad's.

1. 서론

프레온 냉매를 모의유체로 원자력에 처음 적용한 예는 1961년 프랑스에서 비등형 원자로 (BWR)의 열수력 현상을 연구하기 위해서였다 [1]. 그 후 1963년에 Barnett[2]가 차원해석을 통하여 프레온의 임계열유속(critical heat flux) 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 [3,4,5].

실험에 사용되던 CFC (Clorofluorocarbon) 계통의 프레온 냉매는 대기권에서 오랜 기간 체류하면서 오존층을 파괴하는 성질이 밝혀져 사용이 규제되었다 [6]. 그러나, 최근에 오존층 파괴율이 적은 HCFC(Hydrochlorofluorocarbon) 계통 혹은 무해한 HFC (Hydrofluorocarbon) 계통의 냉매가 개발되어 모의유체실험에 다시 이용되고 있다. 프레온 냉매가 임계열유속 실험에 자주 쓰이는 주된 이유는 기화열과 임계압력이 물보다 월등히 낮아 실험이 용이하면서 전력소모가 매우 적고 (물의 5%), 실험장치 규모가 작아 실험장치 제작비용이 상대적으로 적게 들며, 해석에 중요한 열전달 및 열역학적 성질이 잘 알려져 있기 때문이다. 모의모형 연구 방향은 크게 차원해석법과 그래프해석법으로 분류된다. Stevens와 Kirby[3]는 물-프레온간의 밀도비 및 기하형태가 같을 경우 물 및 프레온의 임계열유속 경향이 유사하게 나타나는 원리를 이용하여 척도 비를 산출하는 그래프 해석법을 제시하였다. 이 방법은 적용이 간편하나 적용범위가 벗어날 경우 척도비가 달라져 예측 오차가 커진다. Barnett는 길이와 직경을 포함하여 임계열유속에 영향을 미치는 열 가지의 변수를 수집하고 차원 해석을 수행하여 척도 비를 구하였다. Andersen과 Pejtersen[7]은 임계열유속에 영향을 미치는 13개의 변수를 수집하고 차원 해석을 수행하였으나 만족할만한 성과를 얻지 못하였다. Ahmad[8]는 13가지의 무차원그룹들을 실험시 조정 가능한 그룹과 조정이 불가능한 그룹으로 나누고, 조정이 불가능한 그룹을 모아 다양한 유체에 적용되는 모델링 상관식을 얻었다. Katto[9]는 차원해석으로 얻은 임계열유속 일반화 상관식에서 다음과 같이 모델링 변수를 도출하였다. 이와 같이 차원해석법은 계속하여 연구되었으며 수평관[10] 및 핵연료 다발[11, 12]에 까지 확장되었다. 본 연구에서는 최근에 개발되어 대체 냉매로 확산되고 있는 프레온 R-134a를 작동유체로 수직 원형 관에 대한 임계열유속 실험을 수행하였다. 실험영역은 PWR 및 PHWR의 임계열유속 상관식 적용영역을 모두 포함한다. 실험 변수인 시험대 입구압력, 입구유량 및 입구 미포화도는 물 임계열유속 실험변수에 척도 비를 곱하여 산출하였다. 이때 척도 비는 다양한 유체에 잘 맞는 Ahmad의 유체간 모의 모형으로 산출하였다. 프레온 R-134a 작동유체의 임계열유속 실험 결과는 입구유량, 압력 및 출구건도에 따른 임계열유속 거동분석을 수행하고, Ahmad 및 Katto 등이 제시한 유체간 모의 모형을 적용하여 물의 임계열유속 값과 비교하였다.

2. 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 Φ_{CHF} 는 임계열유속을 나타내는 종속변수이다.

임계열유속 현상에 관여하는 기본차원은 질량, 길이, 시간, 온도 및 엔탈피 등 모두 5가지가 있으므로, Buckingham의 π 이론에 따라 (1)식은 총 변수에 기본차원 5가지를 뺀 수의 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. 우변 항의 12가지 무차원 그룹의 수는 해석 대상에 따라 줄여질 수 있다. 모의유체가 완벽한 모델이 되려면 아래 관계가 성립되어야 한다.

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

그러나, 위의 관계가 만족되려면 (2)식의 우변 항에 유도된 물 및 프레온간의 무차원그룹 또한 모두가 다음과 같은 관계를 유지하여야 한다.

$$\left(\frac{GD}{\mu_l}\right)_W = \left(\frac{GD}{\mu_l}\right)_F, \quad \left(\frac{\Delta h}{h_{fg}}\right)_W = \left(\frac{\Delta h}{h_{fg}}\right)_F, \quad \dots, \quad \left(\frac{\beta C_{pl}}{\gamma h_{fg}}\right)_W = \left(\frac{\beta C_{pl}}{\gamma h_{fg}}\right)_F.$$

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.

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

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

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

Purcupile[13]은 실험대상의 크기 및 구조가 다를 경우 유체-유체간 실험결과와의 변환시 오차가 항상 존재하므로 가능한 한 크기 및 구조를 일치시켜야 한다고 보고하였다. 즉, 임계열유속 실험시 모의 대상의 기하형태가 다를 경우 유로 내에 생성된 기포의 성장형태 혹은 액적의 크기가 달라질 수 있으므로 임계열유속 조건이 달라질 수 있다. Ahmad[8]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[9]는 차원해석으로 얻은 임계열유속 일반화 상관식에서 다음과 같이 모델링 변수를 도출하였다.

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

물 자료로 변환하기 위한 유량, 잠열인자 및 열유속인자는 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 (Katto의 경우) 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) 마지막으로 임계열유속을 계산한다

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

3. 실험 장치

3.1 실험루프

스테인레스 스틸로 제작된 프레온 임계열유속 실험장치의 구성도를 Figure 1에 도시하였다. 작동유체는 신 냉매인 R-134a(CH_2FCF_3)이며, 실험장치의 최대운전 압력 및 온도는 각각 40 기압, 100°C 이다. 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 아큐메레이터를 가압기로 사용하였다. 아큐메레이터에 질소가스를 주입하면 프레온 유체와 질소가스 사이에 있는 Buna-N 막이 팽창되면서 시스템압력은 증가된다. 압력은 또한 아큐메레이터 상단에 있는 질소가스 배출밸브를 통하여 감소시킬 수 있다.

온도조절: 25kW급 예열기에 SCR (silicon controled rectifier) 조절장치가 내장되어 있어 PID (proportional integral differential) 조절 혹은 가변저항기를 이용하여 미세 온도조절을 한다. 온도 피드백은 시험대 입구에 설치되어 있는 백금온도계(RTD)로부터 신호를 받는다.

유량조절: 130m 수두에 최고 2.5 kg/s의 유량을 흘려보낼 수 있는 3500 RPM의 터빈타입원심 펌프에 RPM 조절용 인버터를 설치하여 유량을 조절한다. 또한 미세 조절은 우회밸브 및 입구 throttling 밸브를 이용한다.

3.2 시험대

시험대는 상용 인코넬 600 원형관으로 제작되었으며 내경 9.4mm이고 가열길이는 2m이다 (Figure 2). 시험대는 직접가열방식으로 가열관 상 하단의 구리 단자대를 통해서 가열되며, 직류 전원공급장치에서 최대 50 볼트 800 암페어까지 전력을 공급받는다. 전기 가열부 상 하단 및 압력 계측선의 플랜지 이음사이에 테프론 가스킷을 끼워 전기적으로 절연하였다. 임계열유속을 감지하는 3개의 0.25mm K-type 열전대를 Figure 2와 같이 가열구간 최상부에서 10mm 하단부터 아래로 5mm 간격으로 설치하였다. 나무 조임틀로 고정된 열전대의 온도 시그널들은 직류전원공급장치를 보호하는 자동 shutdown 모듈과 임계열유속 위치에서의 온도를 모니터링하는 자료획득 시스템으로 보내진다. 시험대 시작점에서 유체가 충분히 발달되도록 입구 플랜지 이음에서부터 시작점까지 L/D 비가 60 이상 되도록 길이를 유지하였다. 시험대 입구온도 및 출구온도를 측정하기 위해 T-type 열전대를 교정하여 유로 중간에 설치하고, 시험대 입구압력, 출구압력 및 시험대 압력강하량을 측정하기 위해 로즈마운트사의 압력트랜스미터를 교정하여 설치하였다.

3.3 측정장치

직경 0.64mm인 입구온도 측정용 열전대는 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 전기 단자대 양단에 전선을 내어 HP3852시스템의 디지털 볼트미터에서 직접 측정하고, 전

류는 전선 사이에 0.2% 정확도의 최대 1000암페어 측정용 요코가와 센트를 설치하였다. 직류전원 공급장치의 안정성을 확인하기 위해서 텍트로닉스사의 100MHz 오실로스코프를 설치하였다. 센서 시그널을 수송하는 모든 전선은 노이즈 차폐용 쉴드선을 사용하였다. 전압신호로 변환된 측정신호는 HP3852 자료획득시스템으로 집약되어 486PC에 저장된다. HP3852 시스템은 HP-IB 카드가 설치된 486PC에서 HP-VEE 소프트웨어로 구동하였다.

4. 분석 및 토의

임계열유속 실험영역은 PWR 및 PHWR의 임계열유속 상관식 적용영역을 모두 포함하였다 [14, 15]. 실험 변수인 시험대 입구압력, 입구유량 및 입구 미포화도는 Ahmad의 물-프레온 모의모형으로 역산하였다. 본 실험조건은 다음과 같다.

압력	1.2 - 2.8	MPa,
유량	1400 - 3500	kg/m ² -s,
입구미포화도	30 - 86	kJ/kg,
내경	9.4	mm,
가열길이	2	m.

입구 미포화도 및 출구건도에 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. 출구건도의 영향은 Figure 4에서 보는 바와 같이 미포화 영역에서부터 출구건도 10% 근처까지 임계열유속의 변화가 급격하나 10% 이후부터는 완만하게 줄어드는 경향을 보였다. 이는 물 실험결과와 일치되는 것으로 임계열유속 발생 메커니즘이 건도 10% 근처에서 액체막 건조 현상에서 핵비등이탈 (DNB) 현상으로 천이 되고 있는 것으로 해석된다 [16]. 실험자료를 Ahmad 및 Katto의 유체간 모의모형을 사용하여 물의 임계열유속으로 변환하고, 8mm 원형관에 대한 물 실험자료인 Groeneveld의 1995 look-up table[17]과 비교하였다. 원형관 내경에 대한 보정은 아래와 같이 Doroshchuk[18]가 제시한 관계식을 사용하였다.

$$(\Phi_{CHF})_{9.4mm} = (\Phi_{CHF})_{8mm} \times \left(\frac{D}{8}\right)^{-1/2} \quad (13)$$

Ahmad 및 Katto의 방법에 따라 예측된 임계열유속과 물의 임계열유속의 비를 압력 및 유량에 따라 Figure 5에 도시하였다. 유량이 2000 kg/m²-s 일 때(Figure 5-a) PHWR 적용압력인 7에서 12MPa 사이에서는 압력과 함께 선형적으로 물 자료에 근접하였으나, PWR 적용압력인 12MPa 이후부터는 반대의 경향이 나타났다. 유량이 4000 kg/m²-s 일 때(Figure 5-b)는 모든 적용압력에 따라 물 자료에 선형적으로 근접하였다. 또한 실험영역에 대해 Katto의 방법이 Ahmad의 방법 보다 잘 예측하고있음을 볼 수 있다. Figure 6에 압력과 유량에 따른 Katto의 예측 성능을 보였다. PHWR 압력 범위에서는 유량에 변화에 영향을 받지 않았으나, PWR 범위에서는 유량 변화에 민감하였다.

5. 결론

환경에 무해한 프레온 R-134a를 작동유체로 수직 원형관에 대한 임계열유속 실험을 수행하고, 실험결과를 Ahmad 및 Katto의 유체간 모의모형을 적용하여 물의 임계열유속 자료를 산출하였다. 실험결과 R-134a의 임계열유속 거동은 물과 일치하였다. 실험자료를 유체간 모의모형을 적용하여

물 자료로 변환하고, 물 실험자료와 비교한 결과 전 실험영역에 걸쳐 낮게 예측하였으며, Katto의 방법이 Ahmad의 방법 보다 잘 예측하였다. 또한 PHWR 적용영역에서는 22%이내에서 비교적 잘 예측되었으나, PWR 영역에서는 오차가 심하여 개선이 필요한 것으로 분석된다.

참고문헌

- (1) "Influence of Centrifugal Twisted Tapes in Freon Burn-out Flux," Special Report No. 4, EURAEC-145, 1961.
- (2) P. G. Barnett, "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, 1964.
- (3) G. F. Stevens and G. J. Kirby, "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, 1964.
- (4) F. W. Staub, "Two-Phase Fluid Modeling—the Critical Heat Flux," Nucl. Science and Eng., Vol. 35, 1969.
- (5) R. D. Coffield Jr. *et al.*, "A Subcooled DNB Investigation of Freon-113 and Its Similarity to Subcooled Water DNB Data," Nucl. Eng. and Design, 11, 1969.
- (6) 정동수, "냉동공조 산업관련 에너지 기술과 환경문제," 대한기계학회지 3권 12호, 1992.
- (7) R. Andersen and V. S. Pejtersen, "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, 1969.
- (8) S. Y. Ahmad, "Fluid-to-Fluid Modeling of Critical Heat Flux: A Compensated Distortion Model," Int. J Heat Mass Transfer, Vol. 16, 1973.
- (9) Y. Katto, "A Generalized Correlation of Critical Heat Flux of Forced Convection Boiling in Vertical Uniformly Heated Tubes," Int. J Heat Mass Transfer, Vol. 21, 1978.
- (10) M. Merilo, "Fluid-to-Fluid Modeling and Correlation of Flow Boiling Crisis in Horizontal Tubes," Int. J Multiphase Flow, Vol. 5, 1979.
- (11) G. D. McPherson and S. Y. Ahmad, "Fluid Modeling of Critical Heat Flux in an 18-Element Bundle," Nucl. Eng. and Design, 1971.
- (12) A. Katsaounis, "Verification of Ahmad's Fluid-to-Fluid Scaling Law by Bundle Experiments," Proc. of Winter Annual Meeting of ASME, 1980.
- (13) J. C. Purcupile *et al.*, "Refrigerant-Water Scaling of Critical Heat Flux in round tubes-Subcooled Forced-Convection Boiling," J of Heat Transfer, May 1973.
- (14) 영광 3,4호기 FSAR Chapter 4.4, "Core Thermal and Hydraulic Design."
- (15) 월성 2,3,4호기 FSAR Chapter 4.4, "Core Thermal and Hydraulic Design."
- (16) 장순홍, 백원필, "임계열유속: 기초와 응용," 청문각, 1996.
- (17) D. C. Groeneveld *et al.*, "The 1995 Look-up Table for Critical Heat Flux in Tubes," Nucl. Eng. and Design, 163, 1996.
- (18) V. E. Doroshchuk, L. L. Levitan and F. P. Lantzman, "Investigation into Burnout in Uniformly Heated Tubes," ASME, 75-WA/HT-22, 1975a

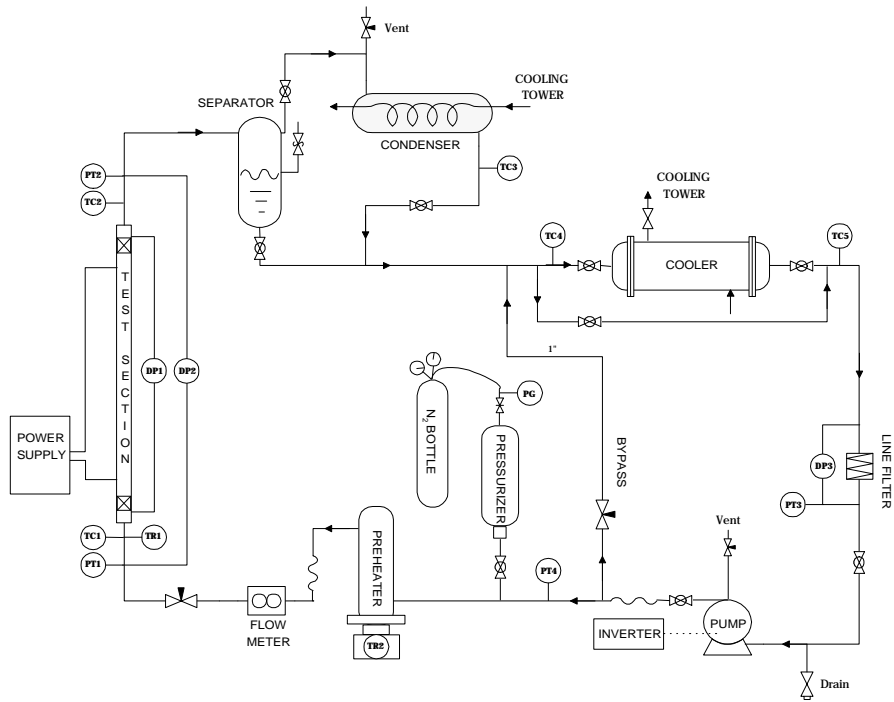


Figure 1. Schematic diagram of freon CHF loop

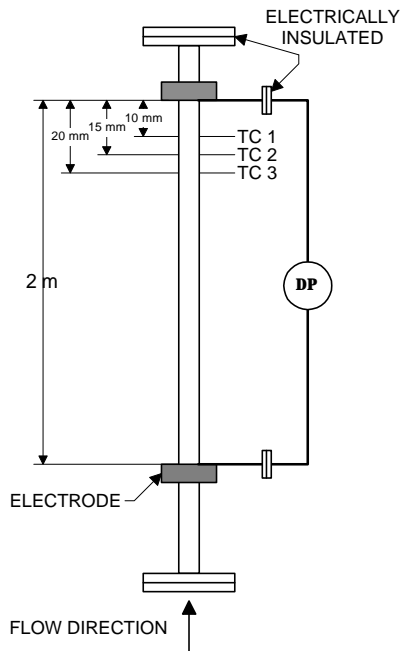


Figure 2. Test section

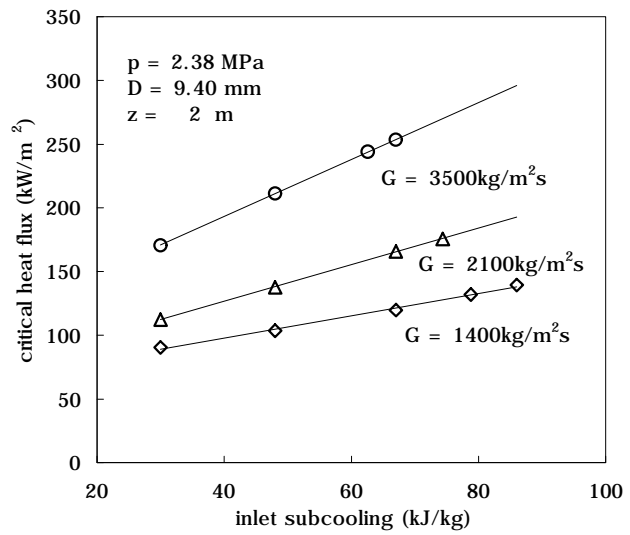


Figure 3. The effect of inlet subcooling on critical heat flux

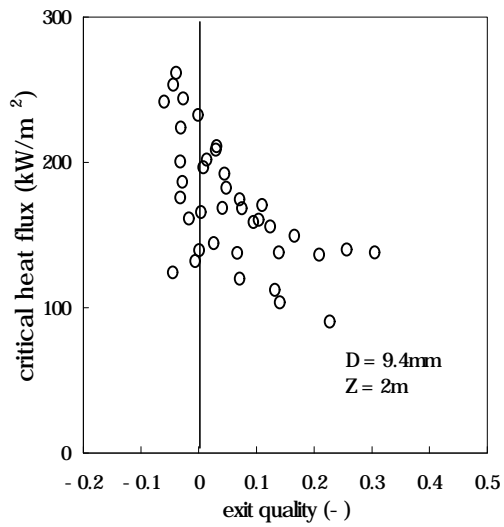


Figure 4. The influence of exit quality on critical heat flux

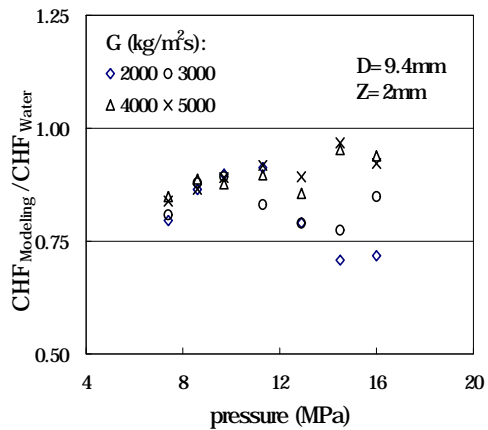


Figure 6. The trend of modeling accuracy on pressure and flow rate (Katto model)

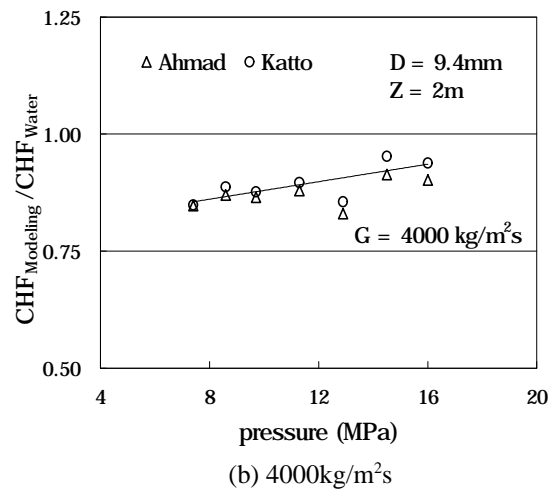
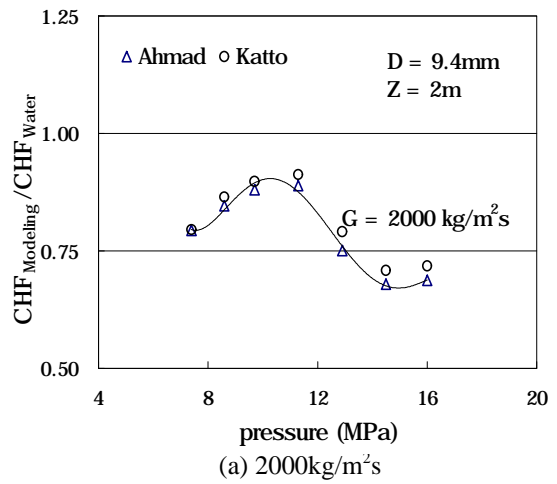


Figure 5. Comparison of modeled CHF values with the Groeneveld's 95 look-up table