'2000춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

큰 반구형 간극에서의 임계출력에 대한 실험 연구

An Experimental Study on Critical Power in Hemispherical Narrow Gaps of Large Size

박래준, 하광순, 김상백, 김희동

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

정지환

천안외국어대학
충남 천안시 안서동

요 약

크기가 상대적으로 큰 반구형 간극에서 자연적 열전달 과정으로 용융물이 냉각되는 것을 평가하기 위하여 CHFG 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 증류수와 프레온 R-113을 사용하여 간극의 크기가 큰(2.0, 5.0, 10.0 mm) 간극에서 압력변화(1-10 기압)에 따라 임계출력을 결정하는 실험을 수행하여 기존의 간극 크기가 작은(0.5, 1.0 mm) 실험결과와 비교.분석하였다. 또한 증류수를 사용한 실험결과는 기존의 상관식들과 비교.분석하였다. 실험 수행결과, 간극의 크기가 증가할수록 CCFL 영향이 작아지고 수조비등 형태를 보이는 것으로 나타났고, 간극의 크기 증가는 임계출력을 증가시키는 것으로 나타났다. 간극에서의 임계출력에 대한 실험결과는 기존 상관식들보다 조금 낮게 나타났으며, 압력 영향도 작게 나타났다.

Abstract

An experimental study of CHFG (Critical Heat Flux in Gap) has been performed to investigate the inherent cooling mechanism in hemispherical narrow gaps of large size. The CHFG test has been performed to measure a critical power using distilled water and Freon R-113 with experimental parameters such as system pressure from 1 to 10 atm and gap thickness of 2.0, 5.0, and 10.0 mm. The present experimental results were compared with experimental results on small size of the gap. The CHFG test results have shown that an increase in the gap thickness leads to a decrease of CCFL effect and to change boiling mechanism to pool boiling. An increase in the gap thickness leads to an increase in critical power. The present experimental results on critical power are lower than other correlations. The pressure effect on the critical power was found to be much milder than predictions by CHF correlations of other researches.

1. 개요

원전에서의 노심용융 사고시 노심용융물이 원자로용기 하부 반구에 재배치되었을 때 용기 내에 남아 있는 냉각수에 의해 노심용융물이 자연적으로 냉각되는 현상에 대한 연구인 SONATA-

IV(Simulation Of Naturally Arrested Thermal Attack In-Vessel)[1] 프로그램을 수행하고 있다. 이 연구는 TMI-2 원전의 노심용융 사고시 노심 용융물이 원자로용기 하반구로 재배치된 후 원자로용기가 파손되지 않고 단시간 내에 냉각율 10 -100。C/min로 냉각된 현상을 규명하기 위하여 시작하였다. SONATA-IV 연구의 노심용융물 노내냉각 기본 원리는 고온의 노심용융물이 원자로용기 하부의 냉각수와 접촉하면서 노심용융물과 원자로용기 사이에 좁은 간극(gap)이 형성되고 이 간극으로 냉각수가 스며들어 노심용융물이 냉각되는 것이다. 이때 간극에서 제거될 수 있는 최대 열유속이 임계열유속(CHF: Critical Heat Flux)이 되며 노심용융물에서 전달되는 열량이 임계열유속을 일으키는 임계출력(critical power)을 넘게 되면 원자로용기의 온도가 급격하게 상승하여 원자로용기 파손 위험을 초래하게 된다.

반구형 간극을 통하여 제거할 수 있는 최대 열량인 임계출력(critical power) 값을 정량화하는 SONATA-IV/CHFG(Critical Heat Fux in Gap) 실험을 수행하였다[2]. 이 실험은 전 세계적으로 유일한 반구형 발열체 주변에 형성된 좁은 간극을 통해서 제거할 수 있는 임계출력을 결정하는 실험이다. 본 실험 수행의 목적은 반구형 간극에 있을 수 있는 고유의 냉각기구를 밝히고 이러한 구조에 적용 가능한 임계열유속 상관식을 개발하는 것이다. 외벽[3]이나 평판 간극 및 곡면 간극에서의 임계열유속 실험에 관한 자료는 많이 있으나 반구형 간극에서 수행된 연구결과는 전혀 없다. 본 실험에서는 증류수와 비등점이 낮은 프레온 R-113을 이용하여 상대적으로 큰 간극의 크기(2.0, 5.0, 10 mm)와 계통압력(1-10 기압)을 변화시키면서 실험을 수행하였으며, 내부용기의 온도를 측정하여 간극의 크기 증가에 따른 비등 열전달 과정을 조사하였다. 간극에서의 임계출력에 대하여 증류수를 냉각수로 사용한 실험결과와 프레온 R-113을 냉각수로 사용한 실험결과를 비교.분석하였고, 이들 결과는 기존의 평판과 환형에서 개발한 상관식 및 CCFL 실험결과, 구형 한부분에서의 임계출력에 대한 실험결과 등과 비교.분석하였다.

2. 실험내용 및 방법

반구형 간극을 통하여 제거할수 있는 최대 열량인 임계출력을 결정하기 위한 실험을 증류수와 프레온 R-113(대기압에서 비등점이 47.5。C)을 이용하여 수행하였다. 본 실험에서는 간극의 크기가 작은 경우(0.5, 1.0 mm)에 이어 간극의 크기가 큰 경우(2.0, 5.0, 10.0 mm)에 압력(1-10 기압)의 변화에 따라 출력을 증가시키면서 임계출력을 결정하는 정상상태 실험을 수행하였다. 그림 1은 CHFG 실험장치의 전체 개략도를 보여주고 있으며, 그림 2는 실험장치에 대한 사진을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 본 실험장치는 실험용기, 냉각수 주입계통, 밀폐 냉각수 유동계통, 열교환기, 열교환기 2차측 냉각수 유동계통, 실험결과 획득 및 처리장치(DAS: Data Acquisition System)로 구성하였다. 실험용기는 전기 봉히터를 장착한 가열 반구, 반구형 구리곽(shell)의 내부용기, 외부 압력용기로 구성하였다. 열 발생 가열 반구는 크기가 큰 간극에 대한 실험을 수행하기 위하여 기존의 최대출력 40 kW의 반구형 전기 히터를 제거하고 총 출력 200 kW의 봉 히터를 제작하여 반구에 장착하였다. 내부 구리반구는 제작 정밀도를 높이기 위하여 CNC 선반으로 정밀하게 가공하여

제작하였다. 내부 구리용기의 두께와 외경은 각각 25 mm, 498 mm이며, 발열부에서 발생된 열은 구리곽을 통해 외부의 간극으로 전달되므로 히터는 구리곽의 안쪽 표면과 잘 접촉하도록 제작하였다.

탄소강으로 제작하는 외부 압력용기는 내부 구리용기와의 사이에 2.0, 5.0, 10.0 mm의 간극을 형성할 수 있도록 직경을 각각 달리하는 3개의 외부용기를 제작하였다. 즉, 실험인자인 간극의 크기는 외부 압력용기를 교체하면서 설치하여 조절할 수 있게 하였다. 외부 압력용기는 내부 구리반구와의 사이에 균일한 간극을 만들고 반구형 부분과 원통형 부분이 정확하게 같은 표면상에 위치할 수 있도록 하기 위해서 하부의 반구 부분, 중간의 원통 부분, 상단의 플렌지 부분으로 구분한후 강철 주물로 한 몸체로 제작하였다. 이후 내부 구리반구와 같이 제작 정밀도를 높이기 위하여 CNC 선반으로 가공하였다. 실험에서의 간극의 크기는 매우 작으므로 냉각수의 비등점에서도 이 간극이 균일하게 유지되도록 하기 위하여 바닥으로부터 45도 위치에 등 간격의 네 방향에 간극의 크기와 두께가 동일한 크기의 핀을 설치하였다.

냉각수 주입계통은 실험 수행전에 실험용기 내에 냉각수인 증류수와 프레온 R-113을 주입하는 계통으로서 탱크와 고압 주입펌프로 구성하였다. 냉각수 유동계통은 실험과 동시에 밀폐계통을 유지하며 실험용기에서 생성된 기포가 열교환기에서 응축되어 다시 실험용기로 돌아오는 유로이다. 열교환기는 1차측의 비등된 증류수와 R-113을 응축시킬수 있도록 2차측에 외부냉각수인 물을 공급하고 이 냉각수량을 조절하여 1차측 압력을 조절할 수 있도록 하였다. 실험용기 내에는 magnetic flow 형태의 수위 측정기가 설치되어 있어서 히터가 항상 물 속에 잠겨 있도록 운전하여 히터가 과열로 손상되는 것을 방지하였다.

실험수행중 간극에서의 임계출력 발생여부는 내부 구리반구의 그림 3과 같은 위치에 설치한 K형 열전대로 감지하였다. 열전대는 각 위치에 두 개씩 설치하였으므로 이들로부터 열속을 계산할 수 있도록 하였다. 실험장치의 성능운전 결과 33 곳에 설치된 열전대 쌍으로부터 측정된 열속의 변화폭이 20% 내로 나타나 내부 구리용기 표면에서의 열속 분포는 비교적 균일하다고 할 수 있다. 히터에서 발생된 총 열량은 히터 제어기에서 알려주는 전압과 전류량을 측정하여 계산하였다.

내부 구리반구와 외부 압력용기 사이의 간극에 있는 물과 프레온 R-113의 냉각수가 반구형 히터에서 생성되는 열로 인하여 비등하게 된다. 발생된 증기는 강철로 제작된 배관을 통해서 열교환기로 보내진다. 바닥으로부터 1.5 m 상부에 설치된 열교환기는 2차측의 외부 수도물을 이용하여 1차측 비등 냉각수를 응축한다. 열교환기 1차측에서 응축된 냉각수는 실험용기 내로 다시 돌아와 간극으로 공급된다. 실험장치는 안전 여유도를 고려하여 설계압력을 15기압으로 하였다.

실험 시작 전 계통안에는 공기가 존재한다. 공기는 비응축성 기체로서 열전달을 방해하기 때문에 실험 초기에 배출시킬 수 있도록 열교환기 최상부에 공기배출 밸브를 설치하였다. 또한 압력 과부하를 방지하기 위하여 실험용기 상부에는 안전밸브를 설치하였다. 전술한 바와 같이 계통압력은 열교환기 2차측의 외부 냉각수 유량을 조절하여 일정하게 유지되게 하였다. 냉각수 유량은 압력신호를 입력값으로하고 밸브 개폐정도를 제어값으로하는 자동제어기에 의해서 제어된다. 히터는 열출력 밀도가 높아서 냉각이 부족할 경우 쉽게 손상되므로 실험중 항상 냉각수 속에 잠겨 있어야 한다. 모든

계측기의 신호는 휴렛 페커드사의 VXI 데이타 획득 장치로 읽혀지고 HP 9000 735 컴퓨터에 기록하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 4는 간극이 2 mm이고 압력이 3기압일때 출력증가에 따라 내부반구 온도변화에 대한 프레온 R-113 사용 실험결과를 보여주고 있다. 그림은 반구형 내부용기 하부에서 투영하여 본 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 열속이 40.1 kW/m^{2}일때 반구 바닥에서 초기 dryout이 발생하고 열속이 45.8 kW/m^{2}로 증가하면 반구 상부 일부분에서 CCFL(counter Current Flow Limit)이 발생하여 온도가 상승하였다. 이후 열속이 48.9 kW/m^{2}로 증가하면 반구의 한쪽 부분 전체가 온도가 상승하고 열속이 50.1 kW/m^{2}로 증가하면 임계열유속이 발생하여 반구 전체면의 온도가 상승한다. 그림 5는 간극이 5mm이고 압력이 3기압일때 출력증가에 따라 내부반구 온도변화에 대한 프레온 R-113 사용 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 출력 증가에 따라 반구 상부의 일부분의 온도가 상승하고 임계열유속에 도달하면 반구 전체의 온도가 상승한다. 그림 6은 간극이 10 mm이고 압력이 1기압일 때 출력증가에 따른 내부반구 온도변화에 대한 프레온 R-113 사용 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 간극의 크기가 10 mm인 경우는 간극의 크기가 2 mm와 5 mm 인 경우와는 달리 열출력 증가에 따라 반구 전체의 온도가 상승하는 것으로 나타났다. 따라서 간극이 10 mm인 경우에는 반구상부에서의 CCFL보다는 수조비등 형태가 나타남을 알 수 있다. 그림 7은 간극이 2 mm이고 압력이 3기압일 때 반구면이 전체적으로 dryout된 이후 출력을 정지시켜 반구면이 냉각한 경우에 대한 프레온 R-113 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 시간 증가에 따라 반구 상부의 한쪽 부분부터 온도가 내려가는 것을 알 수 있다.

그림 8과 9는 임계출력값에 대한 증류수 사용 실험결과와 프레온 R-113 사용 실험결과를 각각 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 간극의 크기 증가에 따라 임계출력값이 상승하는 것을 알 수 있고 압력 증가에 따라 임계출력값은 조금 증가한다. 따라서 압력이 임계출력에 미치는 영향은 미미하다는 것을 알 수 있다. 간극의 크기와 압력에 따라 측정한 임계출력에 대한 증류수 사용 실험결과와 프레온 R-113 사용 실험결과를 비교하면 간극이 1 mm인 경우에는 프레온 R-113 사용 실험결과가 증류수 사용 실험결과의 51.5 %이다. 간극이 2 mm인 경우에는 프레온 R-113 사용 실험결과가 증류수 사용 실험결과의 44.4 %이고 간극이 5 mm인 경우는 21.6 %로 각각 나타났다. 이는 간극이 작을수록 수조비등에서 관찰된 결과와 큰 차이를 보인다. 수조비등시 임계 열유속에 대한 Zuber [4]의 상관식은 다음과 같다.

$$q_{CHF} = \frac{p}{24} r_g h_{fg} \cdot \sqrt[4]{\frac{g s \Delta r}{r_g^2}} \qquad (1)$$

위 식에서 q_{CHF}, σ, g, r_g, h_{fg}, Δρ는 임계열유속, 증기와 물 사이의 표면장력, 중력가속도, 기체 밀도, 기화열, 액체밀도와 증기밀도의 차이를 각각 나타낸다. 위 식에 증류수와 프레온 R-113의 대기압 물성치를 대입하면 1.1 $\times 10^6$ W/m^{2}와 1.9 $\times 10^5$ W/m^{2}의 임계 열유속 값을 각각 예측한다. 즉, 작동 유체를 증류수에서 R-113으로 바꾸면 임계 열유속 값의 크기가 약 17 %로 줄어든다. 그러나 본 실험에서는 간극이 작을수록 이와 차이가 크게 난다. 이것은 작은 크기의 반구형 간극에서 dryout을 일으키는 기구가 수조비등과는 다르다는 것을 보여주고 간극의 크기가 증가할수록 수조비등과 가까워 진다는 것을 의미한다.

4. 실험결과 비교.고찰

그림 10은 증류수와 프레온 R-113을 이용한 2 mm 크기의 간극에서 임계출력에 대한 CHFG 실험결과, Monde 등[5] 및 Chang과 Yao[6]의 임계 열유속 상관식, Koizumi 의 CCFL 실험결과를 이용한 상관식[7], Schmidt의 상관식[8]을 비교하여 보여주고 있다. Monde 등은 수직 직각 유로를 이용하여 대기압에서 CHF 실험을 수행하였다. 이들은 길이가 20, 35, 50 mm이고 넓이가 10 mm인 세 종류의 가열면에 대하여 간극의 크기가 0.45 - 7.0 mm 범위에서 실험을 수행하고 다음의 상관식을 제시하였다.

$$\frac{q_{CHF}}{r_g h_{fg}} \cdot \sqrt[4]{\frac{r_g^2}{g s \Delta r}} = \frac{0.16}{1 + 6.7 \times 10^{-4} (r_l / r_g)^{0.6} (L/s)} \tag{2}$$

위 식에서 q_{CHF}, σ, g, r_l, r_g, h_{fg}, L, s 는 임계열유속, 증기와 물 사이의 표면장력, 중력가속도, 액체 밀도, 기체 밀도, 기화열, 가열부 길이, 간극의 크기를 각각 나타낸다. Chang 과 Yao 는 수직 환상관을 이용하여 대기압에서 CHF 실험을 수행하고 다음의 상관식을 제시하였다.

$$\frac{q_{CHF}}{r_g h_{fg}} \cdot \sqrt{\frac{r_g}{g D \Delta r}} = \frac{0.38}{\left(1 + \sqrt[4]{r_g / r_l}\right)^2 \cdot (L/s)} \tag{3}$$

위 식에서 D는 관의 직경이다. 이들 상관식을 본 CHFG 실험결과와 비교하기 위하여 식 (2)와 (3)에 실험 장치의 규격과 간극 2.0 mm를 대입하여 임계 열유속을 결정하였다. Koizumi 등은 간극이 좁은 환형 유로에서 CCFL 실험을 수행하여 측정값을 제시하였다. 외부 파이프의 내경은 100 mm 이고 내부 파이프를 바꾸어 간극의 크기를 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 mm에서 실험을 수행하였다. 이들은 어떠한 상관식도 제시하지 않았으므로 이들의 측정값을 회귀분석하여 다음의 CCFL 상관식을 만들었다.

$$j_g^{*1/2} + 0.23 j_l^{*1/2} = 0.32 \quad \text{(간극크기 = 2 mm)} \tag{4}$$

$$\text{여기서,}\quad j_k^* = j_k \cdot \sqrt{\frac{r_k}{gD_{eq}\Delta r}},\quad D_{eq} = D_o - D_i$$

위 식에서 기체의 겉보기 속도를 같은 질량유속의 증기를 만드는데 필요한 열속으로 변환시켜 CHFG 실험결과와 비교하였다. 독일 Siemens AG/KWU의 Schmidt 등은 TMI-2 사고를 모의하여 반구형 간극의 일부분을 모의하여 실험을 수행하였다. 이들은 1, 3, 5, 10 mm의 간극의 크기와 10, 50, 100, 155기압의 압력에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 상관식을 개발하였다.

$$Q_{crit} = 145\ s^{0.406}\ p^{0.163} + 2.14\ \Delta T_u \qquad (5)$$

여기서 Q_{crit} 는 임계출력값 (kW/m^2), s는 간극의 크기 (mm), p는 압력(기압), ΔT_u 는 용기내 냉각수의 아냉(K) 을 각각 나타낸다. 위 식에서 CHFG 실험값을 대입하여 CHFG 실험결과와 비교하였다.

그림에서 보는 바와 같이 Chang과 Yao 및 Monde 등의 상관식은 본 실험 측정결과보다 큰 값을 예측하고 있으나 Koizumi 등의 CCFL 실험식이 크기와 경향에서 본 측정값과 유사하게 예측하고 있다. 전술한 바와 같이 본 실험에서는 CCFL이 발생하여 간극으로의 냉각수 공급을 방해함으로써 전역건조를 유발시켰기 때문에 전통적인 CHF 실험보다 낮은 열속에서 전역건조가 일어난 것으로 판단된다. Chang과 Yao 및 Monde 등의 상관식은 압력 영향이 크게 나타났으나 본 실험의 측정결과는 계통 압력의 영향이 크게 나타나지 않았다. 그러나 두 CHF 상관식은 대기압 조건에서 수행된 실험의 측정값을 가지고서 개발되었으므로 두 상관식이 정확한 압력 경향을 보일 것이라고 기대할 수 없다. 특히 Monde 등의 상관식은 계통의 압력이 증가함에 따라 CHF 값이 계속적으로 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서 Monde 등의 실험식을 대기압이 아닌 고압 영역에서 사용하는 것은 적절치 못한 것으로 판단한다. 반구형 간극 일부분에서 수행된 Schmidt 실험결과가 본 CHFG 실험결과보다 높게 나타난 것은 반구형 간극 전체를 모의하지 않고 일부분을 모의하였기 때문일 것으로 판단된다.

5. 결론

반구형 간극에서의 비등 열전달 기구를 규명하고 반구형 간극이 제거할 수 있는 최대 열량을 결정하기 위하여 간극의 크기가 상대적으로 큰 경우에 대한 CHFG 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 반구면의 온도분포 변화를 분석한 결과, 간극의 크기가 증가하수록 임계열유속에 CCFL이 미치는 영향이 작아지고 수조비등 영향이 커진다.
- 간극에서 임계출력에 대하여 프레온 R-113을 냉각수로 사용한 실험결과와 증류수를 사용한 실험결과를 비교한 결과, 간극의 크기가 1 mm, 2 mm인 경우에는 프레온 R-113을 사용한 임계

출력이 증류수 사용 임계 출력의 51.5 %, 44.4 %로 각각 나타나 수조 비등의 약 17 %보다는 매우 높았다. 이는 작은 간극에서의 비등 열전달 과정이 수조에서의 비등 열전달 과정과는 다르다는 것을 보여주었다. 그러나 간극이 5 mm인 경우에는 프레온 R-113을 사용한 임계 출력이 증류수 사용 임계 출력의 21.6 %로 나타나 수조 비등에 많이 접근하였다.

- 반구형 간극에서의 임계출력에 대한 증류수 사용 CHFG 실험결과는 기존의 CHF 상관식들이 예측하는 값보다 낮게 나타났고 계통압력의 영향도 작게 나타났다. 따라서 대기압에서 수행한 실험결과를 이용하여 개발한 기존 상관식을 고기압 조건에 사용하는 것은 다소 문제가 있음을 밝혔다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 과제의 일환으로 수행하였습니다.

참고문헌

(1) S. B. Kim et.al., "Recent Progress in SONATA-IV Project," OECD/NEA CSNI PWG-2, The Third Mtg. Of TG-DCC, Rockville, MD, USA, May 9-10, 1997

(2) J. H. Jeong, R. J. Park, S. B. Kim, "Thermal-Hydraulic Phenomena Relevant to Global Dryout in a Hemispherical Narrow Gap," Heat and Mass Transfer 34, 321-328, 1998

(3) S. H. Yang et al., "An Experimental Study of Pool-Boiling CHF on Downward Facing Plates," J. of KNS, V. 26 (4), pp. 493-501, 1994

(4) N Zuber, "Hydrodynamic Aspects of Boiling Heat Transfer," AECU-4439, 1959

(5) M. Monde., H. Kusuda, and H. Uehara, "Critical Heat Transfer during Natural Convective Boiling in Vertical Rectangular Channels Submerged in Saturated Liquid," J. Heat Transfer 104, pp. 300-303, 1982

(6) Y. Chang and S. Yao, "Critical Heat Flux of Narrow Vertical Annuli with Closed Bottoms," J. of Heat Transfer 105, pp. 192-195, 1983

(7) Y. Koizumi, H. Nishida, H. Ohtake, and T. Miyashita, "Gravitational Water Penetration into Narrow-gap Annular Flow Passages with Upward Gas Flow," Procs. Of NURETH-8 1, pp. 48-52, 1997

(8) H. schmidt et al., "Experiments on Heat Removal in a Gap between Debris Crust and RPV Wall, 1st European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting, Portoroz, June 1-5, 1998

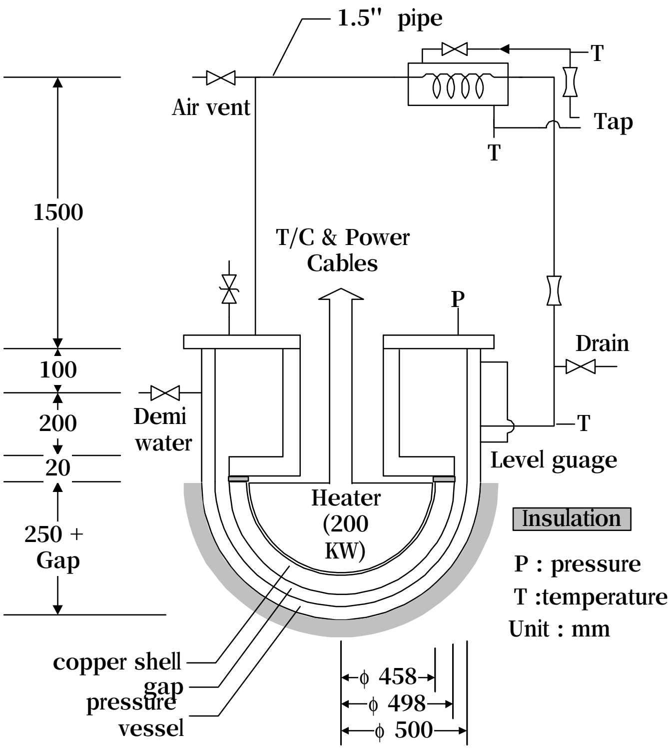

그림 1. CHFG 실험장치 개략도.

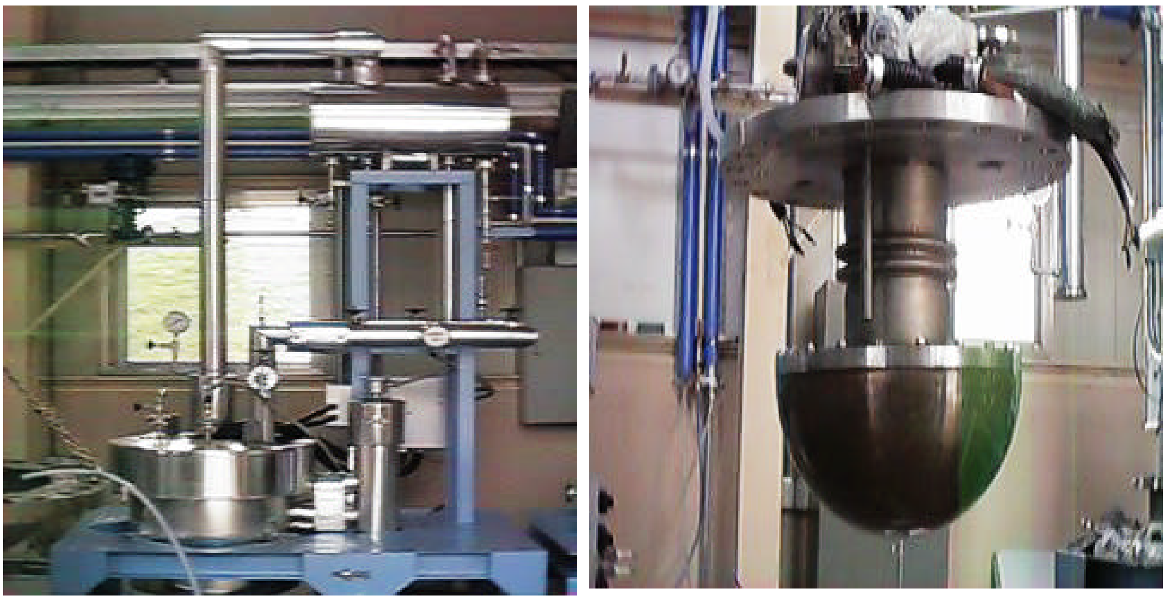

그림 2. CHFG 실험장치 사진.

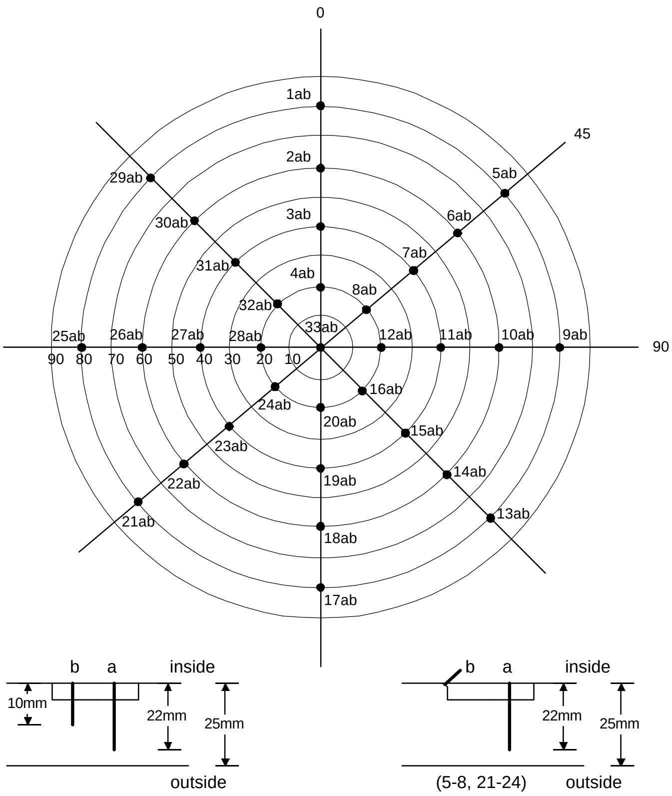

그림 3. 내부 실험용기에서의 열전대 설치 위치도.

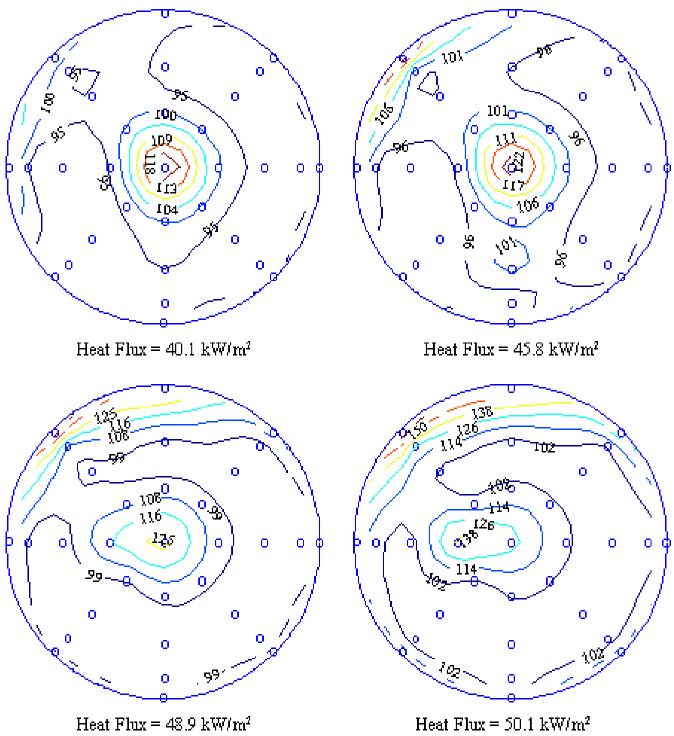

그림 4. 열출력 증가에 따른 내부반구의 등온선 변화 (프레온 R-113, 간극 = 2.0 mm, 압력 = 0.3 MPa).

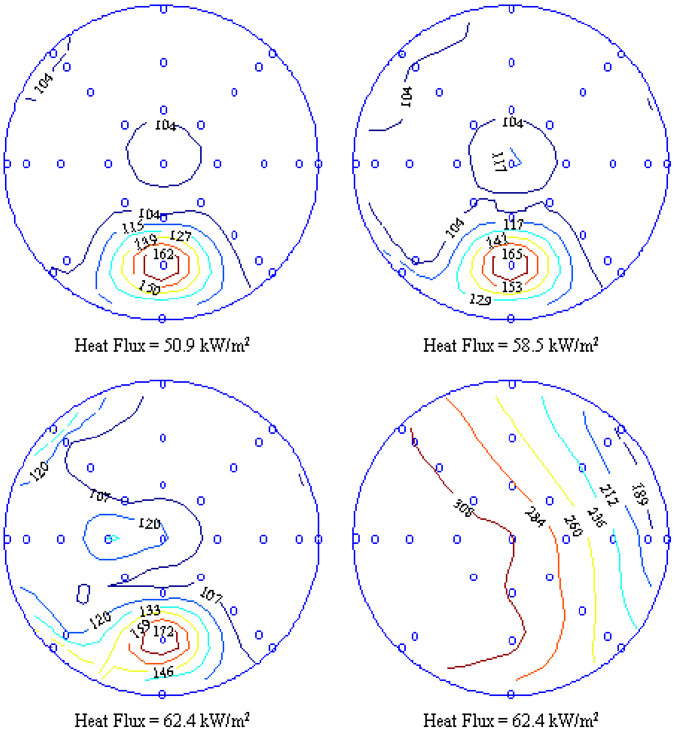

그림 5. 열출력 증가에 따른 내부반구의 등온선 변화 (프레온 R-113, 간극 = 5.0 mm, 압력 = 0.3 MPa).

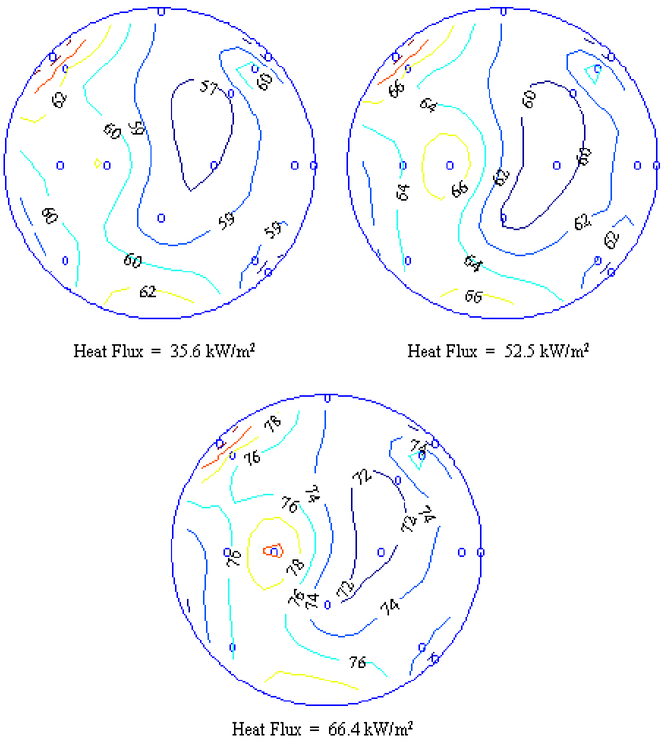

그림 6. 열출력 증가에 따른 내부반구의 등온선 변화 (프레온 R-113, 간극 = 10.0 mm, 압력=0.1 MPa).

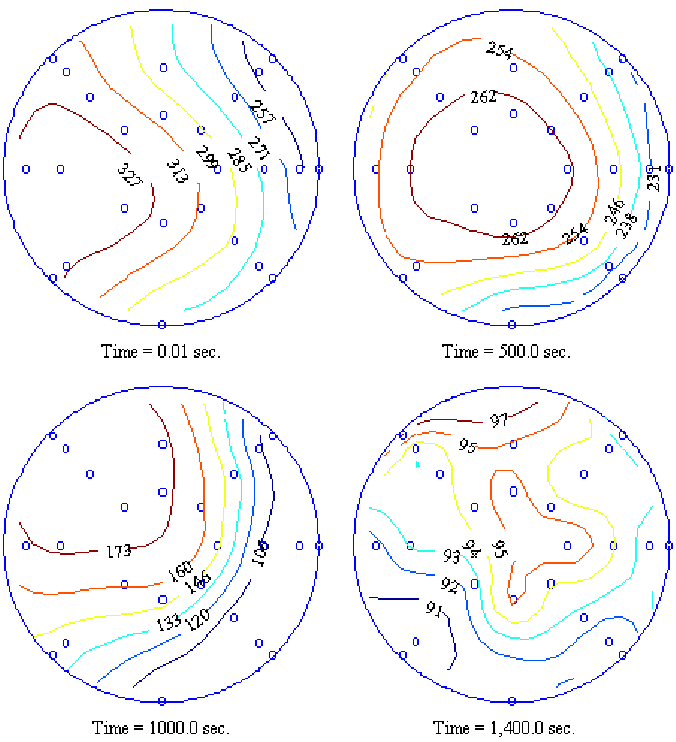

그림 7. 냉각과정 동안의 등온선 변화 (프레온 R-113, 간극 = 5.0 mm, P = 0.3 MPa).

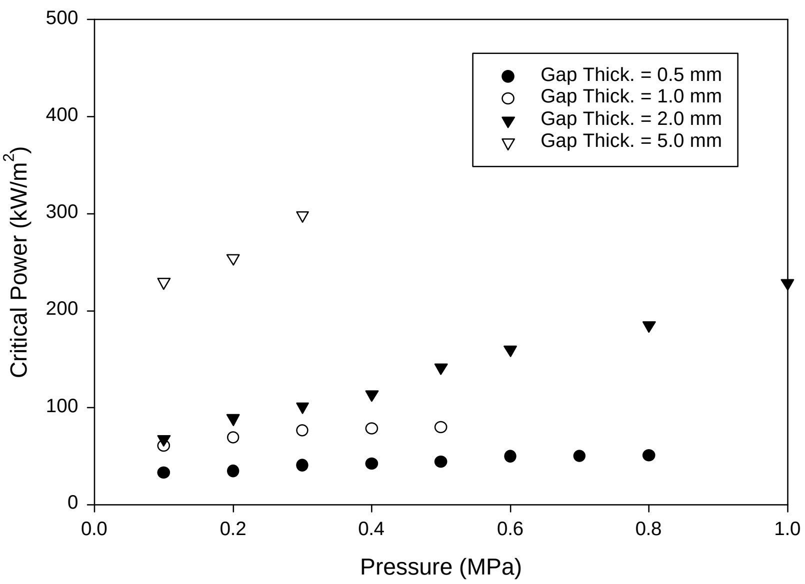

그림 8. 증류수를 사용하였을 때 임계출력에 대한 실험결과.

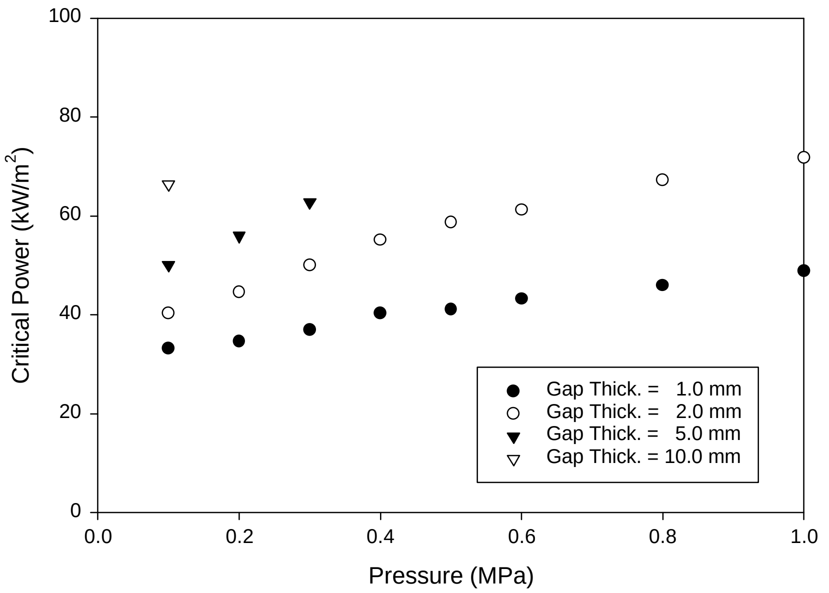

그림 9. **프레온** R-113**을 사용하였을 때 임계출력에 대한 실험결과**.

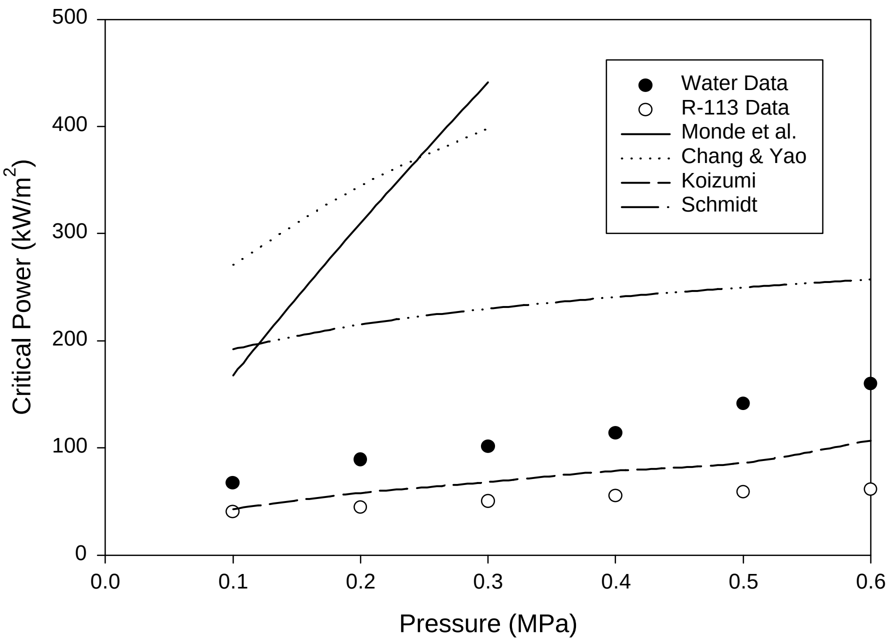

그림 10. **임계출력에 대한 실험결과와 기존 상관식들과의 비교** (**간극** = 2.0 mm).