

2003 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

프레온열수력실험장치를 이용한 5X5 봉다발 임계열유속 실험 연구

**Critical Heat Flux Experiments on a 5X5 Rod Bundle Using  
a Freon Thermal Hydraulic Experimental Loop**

홍성덕\*, 문상기, 천세영, 백원필

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

봉다발급 임계열유속 실험을 수행할 수 있는 프레온열수력실험장치를 제작하고 5x5 봉다발 실험을 수행하였다. 프레온 유체는 오존층을 파괴하지 않는 신냉매 R-134a를 사용하였으며 실험장치는 R-134a의 임계온도(100. C)와 임계압력(4000 kPa)에서도 실험을 수행할 수 있도록 설계하였다. 시험대는 최대 720kW의 전력을 공급할 수 있도록 설계하였으며 가열봉은 직경이 9.5mm이고 가열부는 2m이다. 부수로 기하형상은 KSNP 핵연료와 같다. 실험은 압력 1500~3000 kPa, 유량 50~3000 kg/m<sup>2</sup>-s, 입구과냉도 10~70 kJ/kg 범위에서 균등하게 선택하여 모두 151개의 실험자료를 생산하였다. 실험결과로부터 입구과냉도, 압력 및 유량에 대한 임계열유속 경향을 분석하였다. 입구과냉도가 증가함에 따라 임계열유속은 선형적으로 증가한 반면에, 압력이 증가함에 따라 감소하였다. 유량에 대한 임계열유속은 유량 350kg/m<sup>2</sup>-s 근처까지 급격하게 증가하였으며, 그 이후부터는 선형적으로 서서히 증가하는 경향이 나타났다. 5x5 봉다발에 대한 임계열유속의 경향은 원형관과 환형관 실험과 전체적으로 유사하였으나 유량이 350kg/m<sup>2</sup>-s이하의 조건에서는 봉다발인 경우에 임계열유속이 보다 급격하게 변화되는 경향을 보였다.

**Abstract**

Critical Heat Flux (CHF) experiments of a 5x5 bundle were carried out using *the Freon thermal hydraulic experimental loop* which was developed recently at KAERI. The working fluid of the loop is Freon R-134a which has free Ozone depletion potential not harmful to the environment. The loop designed to operate at the critical temperature(100. C) and the critical pressure(4000 kPa) of R-134a. 720 kW DC power supply inerted the direct current to the 5x5 array of heater rod that has the diameter of 9.5mm and the heated length of 2m. The subchannel geometry of test bundle is same with KSNP fuel assembly. The experiments were performed in the range of the pressure of 1500~3000 kPa, the mass flux 50~3000 kg/m<sup>2</sup>-s, and the inlet subcooling 10~70 kJ/kg. By using the 151 points of measured data, we studied the trend of CHF on the inlet subcooling, the pressure and the mass flux, respectively. While CHF was increased with increasing inlet subcooling, it was decreased with increasing pressure. For the mass flux, CHF was increased abruptly from 50kg/m<sup>2</sup>-s to 350kg/m<sup>2</sup>-s and increased gradually after 350kg/m<sup>2</sup>-s. Although the trend of CHF on 5x5 bundle showed similar trend with round tube and annulus channels, we found a more drastic change of CHF below the mass flux of 350kg/m<sup>2</sup>-s than the other channels.

## 1. 서론

프레온 유체는 기화열과 임계압력이 물보다 월등히 낮아 실험이 용이하면서 전력소모가 매우 적고, 실험장치 규모가 작아 실험장치 제작비용이 상대적으로 적게 든다. 또한 물로는 구현하기 어려운 임계열유속 현상의 가시화, 실험수행의 용이성 등 유리한 점이 많으면서 열전달 및 열역학적 성질이 잘 알려져 있어 해석의 신뢰성도 높다. 핵연료 개발과정에서 수행되는 임계열유속(CHF: Critical Heat Flux) 실험은 원자력발전소 생산전력의 1~2%를 차지하는 20MW의 전력과 고온 고압에 견딜 수 있는 대규모 실험장비 및 고가의 운영비가 요구된다. 1960년대에 핵연료 개발자들은 이와 같은 고가의 개발비를 절약하기 위해서 실험비용을 1/10이하로 줄일 수 있는 프레온 실험장치를 제작하고 유체간 모의 범칙을 연구하였다[1-10].

핵연료 개발 과정은 개념설계단계, 핵연료 최적화단계 그리고 핵연료 인허가를 위한 CHF실험 단계로 구분할 수 있다. 개념설계단계에서는 원자로 형태와 용량에 맞는 핵연료의 크기, 개수 선정하며 원자로의 개념설계 단계에서 같이 이루어진다. 핵연료 최적화 단계는 핵연료의 열적여유도 향상을 위한 것으로 봉직경, 피치, 간격체 거리, 혼합날개 형상을 결정하는 단계이다. 핵연료 최적화는 원자로를 가동하는 한 계속되며, 일반적으로 간격체의 혼합날개 개발에 중점을 둔다. 핵연료 인허가를 위한 CHF 실험단계는 규제기관에서 인증한 실험시설에서 임계열유속 실험을 수행하고 최적화된 핵연료를 개발하고 인·허가를 받는 과정이다. 프레온 유체의 역할은 핵연료를 최적화하는 2단계에 유용하게 활용될 수 있다. 그러나 현재 기술수준으로는 프레온 실험자료로 물의 비등 현상을 완벽하게 모의할 수 없으므로 핵연료 개발 마지막 단계인 핵연료의 인·허가를 얻어낼 수 없다. 그러므로 여러 가지 후보핵연료 중에서 우수핵연료를 선별하는데 프레온 실험의 의미를 부여할 수 있다. 즉 핵연료 개발 2단계에서는 경제적인 프레온 실험장치를 이용하고, 마지막 단계인 3단계에서 인·허가용 최종실험은 선별된 핵연료에 대하여 일부 원자력 선진국만이 대규모 물 CHF 실험장치에서 수행한다. 핵연료 개발의 대부분의 노력은 핵연료를 최적화하는 핵연료 개발 2단계에 집중되어있으므로, 프레온 실험장치는 핵연료 개발 환경에 유용하며 다음과 같은 실험적 연구도 병행할 수 있는 장점이 있다.

- SLB 사고시 임계열유속 실험연구,
- 부수로 열전달 연구,
- 초임계원자로의 열수력현상 연구
- 봉다발의 유체간 모의모형연구
- 핵연료 성능 비교

위와 같이 프레온열수력실험장치는 경제적이면서 활용도가 매우 높으므로 오존층을 파괴하지 않는 프레온 R-134a를 사용하는 다발급 프레온열수력실험장치를 설계/제작하였다. 임계열유속 실험용 시험대는 KSNP 핵연료 부수로 특성과 같도록 5x5 봉다발 형태로 제작하였으며 압력, 유량 및 입구과냉도를 변화시키면서 실험을 수행하였다.

## 2. 프레온열수력실험장치

### 2.1 실험루프

프레온열수력실험장치는 유체 이송장비인 펌프와 가열장비인 예열기 및 그밖에 가압기, 시험대, 세퍼레이터, 컨덴서, 열교환기 등으로 구성되어 있다. 열교환기, 컨덴서, 가압기 및 예열기는 Figure 1에 나타난 바와 같이 각 2대씩 병렬로 구성하였다. 작동유체는 신 냉매인 프레온 R-134a( $\text{CH}_2\text{FCF}_3$ )를 이며, 실험장치의 최대운전 압력 및 온도는 각각 45 기압, 150. C이며, 주요 실험장치의 사양을 Table 1에 수록하였다. 프레온은 50m 수두에 15kg/s 용량의 캔드모터펌프 두 대를 직렬연결하여 이송하였다. 직렬연결로 수두가 100m로 배가되었으며, 인버터 2대를 설치하여 0에서 3500RPM까지 펌프의 회전속도를 조절하여 유량조절을 수행하도록 하였다. 유량의 미세 조절은 우회밸브 및 입구 throttling 밸브를 설치하여 조절할 수 있도록 하였다. 가압기는 질소가스를 이용한 가압방식이다. 질소가 프레온 유체에 녹아 들어가는 것을 방지하기 위해서 프레온과 질소사이에 얇은 막이 있는 아큐브레이터(accumulator)를 가압기로 사용한다. 아큐브레이터에 질소가스를 주입하면 프레온 유체와 질소가스 사이에 있는 막이 팽창되면서 시스템압력은 증가된다. 압력은 아큐브레이터 상단에 있는 질소가스 배출밸브를 설치하여 감소시킬 수 있다. 막의 재질은 프레온 R-134a와 부식특성이 좋은 탄소중합체인 Buna-N 재질이며 아큐브레이터 내벽은 테프론으로 코팅하였다. 시험대 입구온도를 조절하는 25kW급 예열기 2대는 SCR (silicon controlled rectifier)로 동시 제어를 하도록 제작하였다. 제어방식은 PID (proportional integral differential) 조절방식과 가변저항기를 병행하여 시험대 입구의 온도조절을 하였다. 컨덴서는 증기를 응축하는 장치이다. 쉘튜브 형으로 제작한 컨덴서 한대의 용량은 40kW로 Figure 1과 같이 병렬로 설치하였다. 2대의 열교환기는 컨덴서와 같이 쉘튜브 형의 SUS 304로 제작된 것으로, 각각의 용량은 150kW이다. 실험루프의 주 배관은 모두 3 인치 seamless SUS304 파이프를 구성하고 2대씩 병렬로 연결되어 있는 각 컴포넌트의 입·출구는 2인치 파이프를 배열하였다. 펌프에서 토출되는 유량을 효율적으로 이용하고 안정된 실험여건을 유지하는데 유용한 우회로를 열교환기 입구와 펌프 토출 사이에 두었다. 우회된 유체는 열교환기에서 냉각되어 펌프 캐비테이션을 방지한다.

## 2.2 5X5 봉다발 시험대

5X5 봉다발에 필요한 25개의 가열 봉들은 인코넬 601 튜브를 사용하여 직접가열방식으로 핵연료를 모의하도록 제작하였다. 직접가열방식은 상용전기를 정류한 직류전원을 가열 봉에 직접 인가하여 봉의 자체저항으로 열을 발생시키는 방식으로, 열 출력을 내는데 제한이 없는 이점이 있다. 가열봉은 가열관 상·하부에 Figure 2와 같이 구리봉(상부)과 구리튜브(하부)를 통해서 가열된다. 5X5 봉다발의 반경방향 출력분포를 형성하도록 가열부분의 저항이 바뀌면 출력이 변화하는 성질을 응용하여 가열봉의 튜브 두께를 Type A 와 Type B 2가지로 조정하였다. 제작된 가열봉들의 반경방향전력분포도를 Figure 3에 도시하였다. 가열봉에 임계열유속을 감지는 평균출력분포가 1.12인 Type A의 경우 sheath 직경 0.5mm인 K-type 열전대를 Figure 4와 같이 가열구간 최상부에서 10mm 하단으로 90도 간격으로 4개를 설치하였다. 평균출력분포가 0.93인 Type B의 경우 임계열유속이 거의 감지되지 않으므로 열전대를 180도 간격으로 2개만 설치하였다. 위와 같은 가열봉으로 5X5 봉다발을 혼합날개가 없는 간격체 6개를 가지고 511mm 간격으로 조립하였다. 유동채널과 형성된 부수로에 대한 열수력특성자료를 Table 2에 수록하였다. 압력용기 내부는 유동채널을 이루기 위해서 Figure 5와 같이 4인치 크기의 배럴를 두고 내부에 세라믹으로 하우스를 만들었다. 하우스 재질을 세라믹으로 둔 것은 전기절연 때문이다. 시험대 상부에는 Tie Plate를 두어 봉다발을 고정시키고 직류전원을 봉다발에 전달하는 단자대 기능을 하도록 제작하였다. 시험대의 하부에

오링블럭(플랜지)을 두어 가열봉이 열팽창으로 늘어날 때 바닥 쪽으로 늘어나도록 하여 봉이 휘는 것을 방지하였다.

### 2.3 직류전원공급장치

프레온 열수력 실험장치의 전원공급장치는 전압이 최고 60V까지 공급되고 전류는 최고 12000 암페어까지 제공되는 직류전원장치이다. 440V 3상 AC전원을 6상 반파정류방식으로 정류하는데 이 방식은 실질적으로 12상으로 정류한 효과를 내어 이론적인 리플(Ripple)이 3%대에 있게된다. 리플은 측정오차를 유발하므로 정류 후단에 컨덴서를 설치하여 3%의 리플을 1% 이내로 줄였다.

### 2.4 측정장치

프레온 실험은 실험조건이 scale down된 상태이므로 오차를 물 실험 조건으로 환산하게되면 압력은 약 6배, 온도는 약 4배 가량 확대된다. 그러므로, 센서는 정밀급 센서를 선정하였으며, 센서 신호를 수송하는 모든 전선은 노이즈 차폐용 쉴드선을 사용하였다. 실험시 측정되는 것은 온도, 압력, 유량, 전압 및 전류이다. 프레온의 임계온도는 100℃이므로 이 부근에서 잘 맞는 구리-콘스탄탄 재질의 1/4인치 스페셜급 T-type을 루프 온도측정에 적용하였다. 측정범위가 -200~350℃인 T-type은 이 범위에서 온도에 대한 선형성이 뛰어나 실험에 많이 사용되는 K-type보다 두 배 이상 정확하다. 직경 1/4인치인 입구온도 측정용 열전대는 T-type으로 허용오차는 ±0.4%이다. 대기온도교정은 HP-3852a 자료획득시스템의 열전대용 멀티플렉서에 내장되어있는 Isothermal block에서 측정 시 자동으로 교정된다. 다이아프래임 형태의 압력센서에서 검출한 물리량은 변환기를 거쳐서 수신 측에 1~5V 전압신호로 변환하여 측정시스템에 전송된다. 시험대의 입·출구 및 루프의 압력 측정용 압력계는 오차가 ±0.5%인 로즈마운트사의 스마트타입 압력트랜스미터를 사용하였다. 유량측정에 사용된 센서는 마이크로모션사의 U-튜브형 질량유량계로 허용오차는 ±0.5% 이내이다. 전기단자대 양단에 전선을 내어 받아낸 전압은 HP3852a 자료획득시스템에서 5-1/2 digit의 디지털볼트미터로 직접 측정하였다. 전류측정용 센서로 15000암페어용 셉트를 직류전원장치 내부에 설치하였다. 셉트는 내부저항과 분류기의 저항을 병렬로 연결하고 전류가 흐르면 분류기의 저항에 의해 전압강하량이 변화하는 원리를 이용하여 전류를 측정한다. 15000암페어 측정용 셉트의 정확도는 ±1.0%이며 1~5V의 전압신호를 HP3852a 자료획득시스템에 송신한다. HP-3852a 자료획득시스템은 비주얼 프로그래밍 언어인 HP-VEE로 측정프로그램을 작성하여 구동하였으며, 측정사이클은 1.5초이다.

### 3. 5x5 봉다발 실험

가열봉이 CHF로 인하여 타는 것을 방지하기 위하여 전력공급장치에 전력자동트립장치를 별도로 구성하였다. 전력트립은 유체의 포화온도보다 가열봉의 벽면온도가 50. C 이상 높게 되면 자료획득시스템에서 트립시그널을 전력공급장치에 보내어 전력공급을 중단시킨다. 실험대의 열손실을 평가하기 위하여 실험 시작 전에 시험대의 Heat balance test를 수행하고 전원에서 인가된 열과 루프에서 측정된 열의 차이가 3% 이내에 있으면 실험을 수행하였다. 압력, 유량 및 입구과냉도에 대한 5x5 봉다발의 실험범위는 아래와 같다.

압력	1500 ~ 3000	kPa,
유량	50 ~ 3000	kg/m <sup>2</sup> -s,
입구과냉도	10 ~ 70	kJ/kg,

위의 실험범위 내에서 압력 5가지, 유량 11가지 및 입구과냉도 5가지를 조합하여 시험매트릭스를 만들고 실험을 수행하였다. 붕, 부수로 및 CHF 감지용 열전대에 번호를 매기고 자료획득프로그램

을 작성하여 임계열유속이 발생하는 부수로의 위치 정보를 측정치와 병행하여 얻어내었다. 실험 중에 CHF 근처가 되면 전력은 가열봉당 10W 미만으로 미세하게 증가시키고 루프의 열수력조건이 일정하게 될 때까지 기다린 다음 온도가 급하게 증가하지 않으면 다시 전력을 올리는 작업을 반복하면서 CHF 실험을 수행하였다. 프레온열수력실험장치는 유량이 작은 조건에서도 루프의 오실레이션을 펌프와 시험대 입구의 Throttling 밸브로 잘 제어할 수 있어서 문헌에서 찾아보기 어려운 저 유량( $50\sim 600\text{ kg/m}^2\text{-s}$ ) 실험을 성공적으로 수행할 수 있었다. 그러나 유량이 작은 시험매트릭스의 중에는 입구온도를 유지할 수 없는 조건이 있으며(압력이 1500 kPa인 조건에서는 입구온도가 대기온도보다 낮은 경우도 발생함), 이와 같은 조건을 제외한 151개의 조건에서 실험을 수행하고 임계열유속을 측정하였다.

#### 4. 실험결과 및 논의

Figure 3과 같이 부수로 중심부의 출력이 외곽보다 20%가량 높게 반경방향출력분포를 형성하였다. 그러므로 CHF 발생위치는 출력이 높은 가운데 4개의 부수로에서 항상 발생할 것으로 예상하였으나, 압력이 1500 kPa이고 유량이 150, 250, 350 $\text{kg/m}^2\text{-s}$ 인 실험조건에서는 중심부가 아닌 외곽 부수로에서 발생하였다. 생산된 총 151개의 실험자료를 이용하여 각 실험변수에 대한 임계열유속의 경향을 조사하였다. 입구과냉도, 유량 및 압력에 따른 프레온 임계열유속의 경향을 Figure 6-8에 도시하였다. Figure 6은 유량이 일정할 때 입구과냉도에 따라 임계열유속은 선형적으로 증가하고 있음을 보여주고 있다. 또한, 유량이 증가함에 따라 입구과냉도의 영향이 커지고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 원형관과 환형관 실험에서도 발견되었다[11, 12]. 압력이 3000kPa로 일정하게 유지시킨 경우 유량에 대한 임계열유속은 유량이 350 $\text{kg/m}^2\text{-s}$ 까지는 급격하게 증가하다가 그 이후부터는 선형적으로 서서히 증가하였다(Figure 7). 이러한 경향은 입구과냉도와 압력이 1500, 2000, 2500kPa인 조건에서도 비슷한 결과를 보여주었다. Figure 8에서 보듯이 압력이 증가함에 따라 임계열유속은 전체적으로 서서히 감소하였다. 감소경향은 유량이 작아 질수록 두드러졌으며 입구과냉도가 10kJ/kg인 경우(Figure 8-a)에는 감소 경향이 25kJ/kg(Figure 8-b)보다 약간 둔감하게 나타났다.

#### 5. 결론

봉 다발급 임계열유속 실험을 수행할 수 있는 프레온열수력실험장치를 제작하고 5X5 봉다발 실험을 수행하였다. 151개의 실험자료로부터 봉다발의 임계열유속 경향을 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 입구과냉도에 따라 임계열유속은 선형적으로 증가하였으며, 유량이 증가함에 따라 입구과냉도 변화에 대하여 임계열유속의 증가폭이 커졌다.
2. 임계열유속은 유량이 350 $\text{kg/m}^2\text{-s}$  근처까지는 급격하게 증가하다가 그 이후부터는 선형적으로 서서히 증가하였다
3. 압력이 증가함에 따라 임계열유속은 전체적으로 서서히 감소하였다. 감소경향은 유량이 작아 질수록 두드러졌다.
4. 5x5 봉다발에 대한 임계열유속의 경향은 원형관과 환형관 실험과 전체적으로 유사하게 나타났으나 유량이 350 $\text{kg/m}^2\text{-s}$ 이하의 조건에서는 봉 다발인 경우에 임계열유속이 보다 급격하게 변화되는 경향을 보였다.
5. 제작된 프레온열수력실험장치는 실험이 까다로운 저 유량 실험에서도 루프를 안정되게 유지하였다.

#### 후기

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

## 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. D. Hong, Y. J. Yoon, S. Y. Chun, W. P. Baek, "Critical Heat Flux Experiment of Freon R-134a and Estimation of Freon-to-Water Scaling Method in Annulus," Korean Nuclear Society, Spring Meeting, Gwangju, October, 2002.

Table 1. Specification of the Freon thermal hydraulic experimental loop

A. Main Loop

○ Working fluid	Freon R-134a
○ Max. operating pressure	4.5 MPa
○ Max. operating temperature	150 °C
○ Max. flow rate	15 kg/sec

B. Equipment

○ Power Supply	720 kW
○ Two Preheaters	50 kW
○ Two Condensers	80 kW
○ Two Heat Exchangers	300 kW
○ Two Pressurizers	70 liters
○ Two Pumps (serial connection)	
- Head	100 m
- Flow	15 kg/sec

Table 2. Thermal hydraulic characteristics of the 5X5 rod bundle

Parameter	5x5 Bundle
Total number of rods	25
Number of heated rods	25
Rod pitch (mm)	12.85
Rod diameter (mm)	9.5
Heated length (mm)	2000
Rod to wall gap (mm)	2.55
Corner radius (mm)	2.5
Bundle geometry data	
length of one-side (mm)	66.9
flow area (mm <sup>2</sup> )	2695.8
wetted perimeter (mm)	1008.6
heated perimeter (mm)	746.13
hydraulic diameter (mm)	10.69
heated equ. diameter(mm)	14.45
Hydraulic diameter of	
central channel	12.63
side channel	17.19
Axial power distribution	Uniform

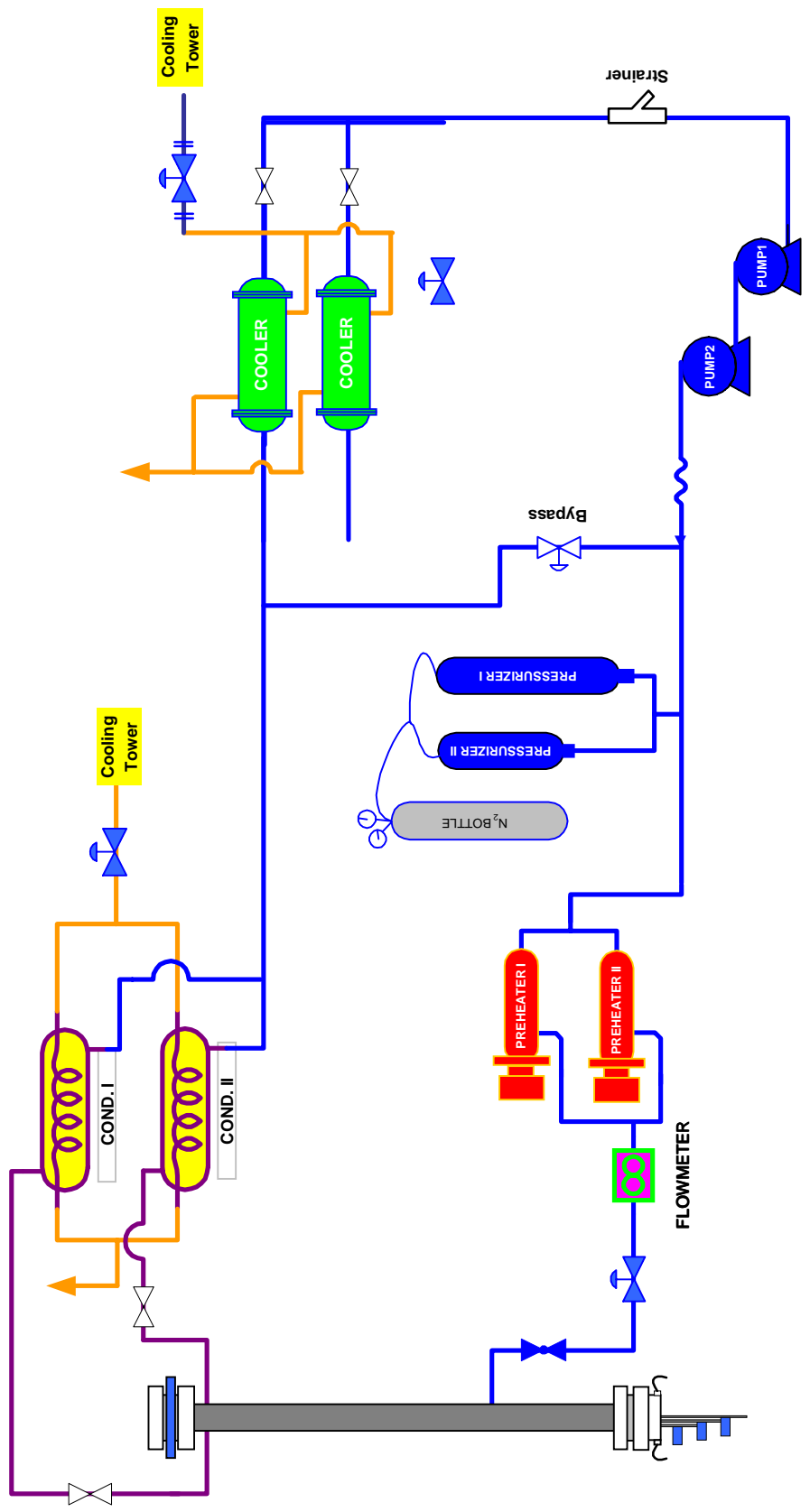


Figure 1. Freon thermal hydraulic experimental loop



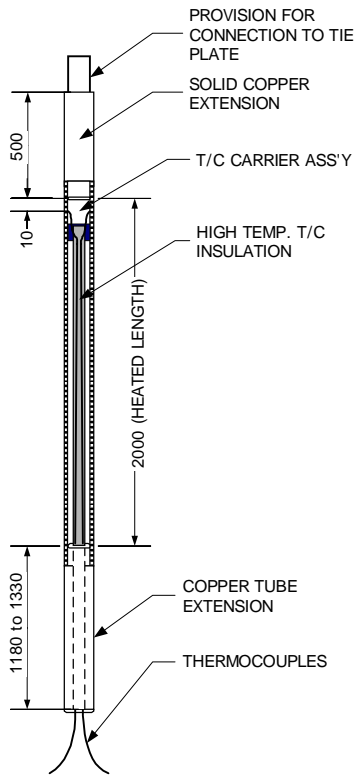


Figure 2. Heater rod

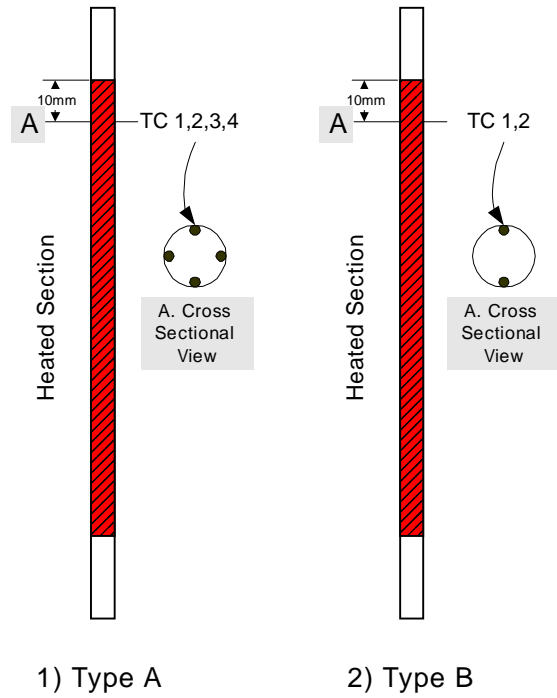


Figure 4. Thermocouple locations of the heater rods

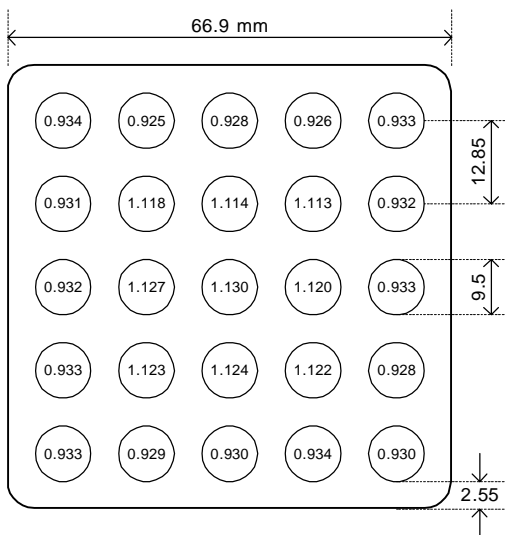


Figure 3. Radial power distribution and geometric data

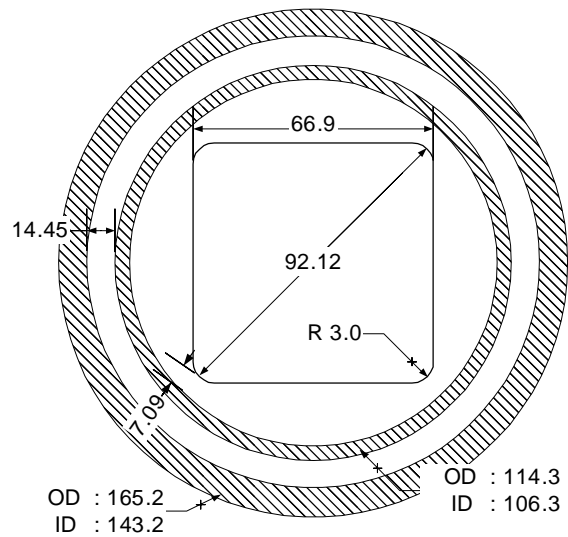


Figure 5. Cross section of the test section

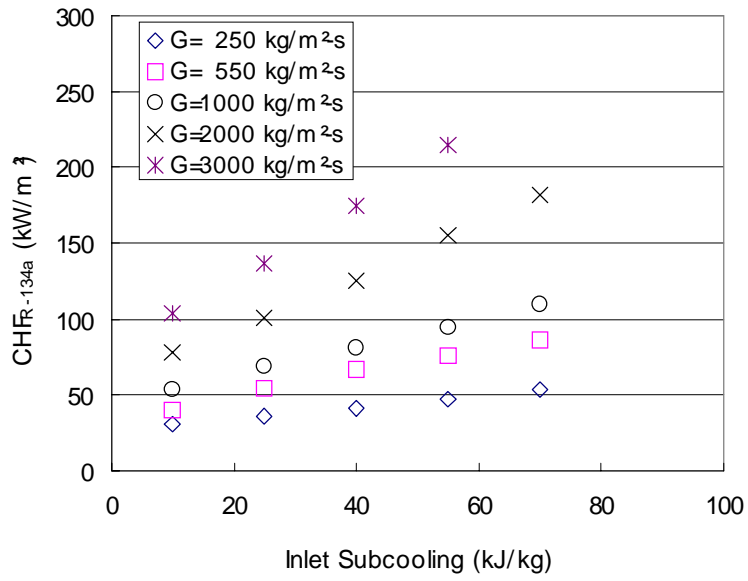


Figure 6. Critical heat flux on the inlet subcooling  
(Pressure = 3000kPa, L = 2m)

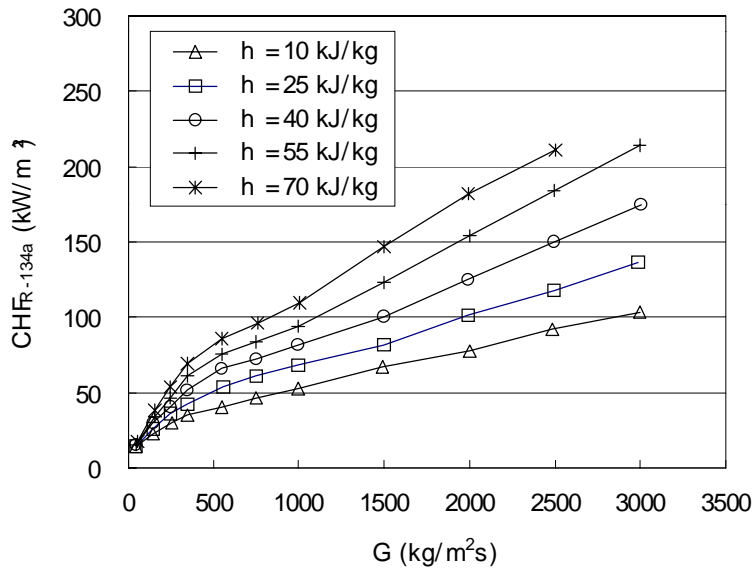
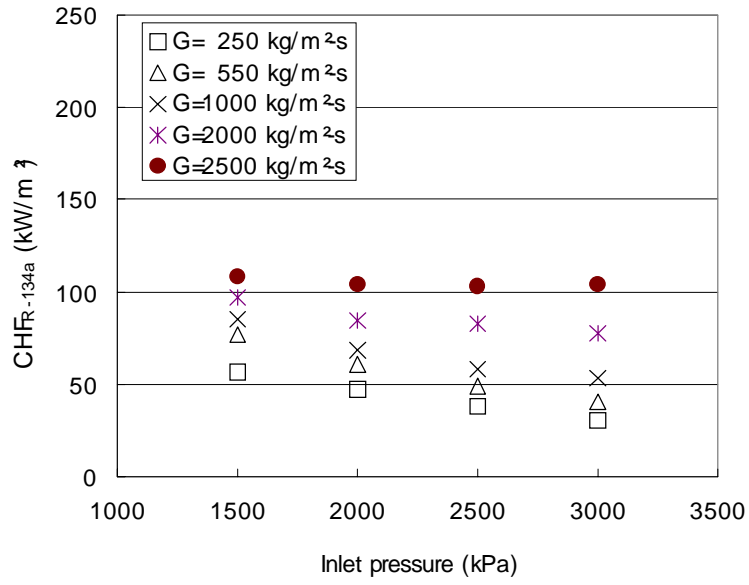
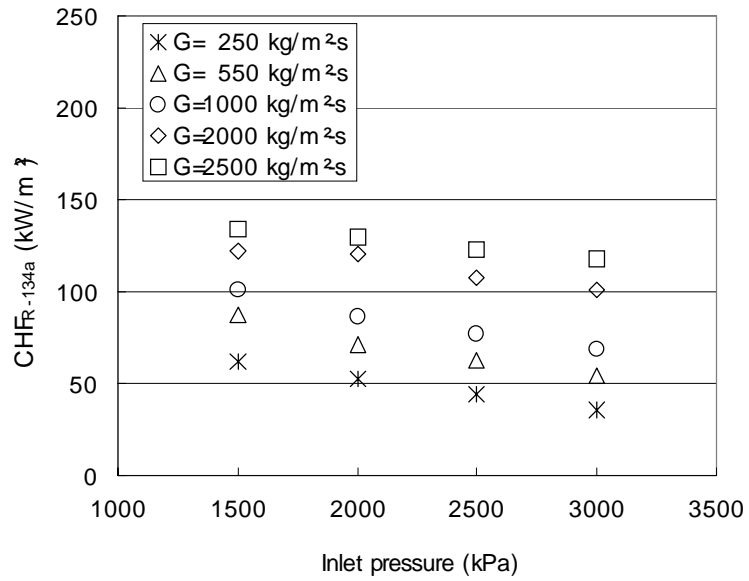


Figure 7. Critical heat flux on the mass flux  
(Pressure = 3000kPa, L = 2m)



(a) Inlet subcooling = 10 kJ/kg, L = 2m



(b) Inlet subcooling = 25 kJ/kg, L = 2m

Figure 8. Critical heat flux on the inlet pressure