

2003 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

5x5 봉다발의 프레온 R-134a 임계압력 근처에서 임계열유속 실험 연구

Critical Heat Flux Experiments of 5x5 Bundle  
near Critical Pressure of Freon R-134a

홍성덕\*, 천세영, 백원필  
한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

박군철

서울대학교

서울특별시 관악구 신림9동 산 56-1

요약

현재 개발 중인 초임계원자로의 냉각방식은 초임계화력발전소의 once-through-boiler 방식을 채용하고 있다. 이 냉각방식은 기동운전 과정에서 CHF (Critical Heat Flux)을 허용한다. 이는 압력이 임계압력 가까이에 이르면 CHF가 급격히 감소하는 경향이 있기 때문이다. 화력의 보일러관과 다르게 핵연료가 열원인 초임계원자로는 기동운전 중에 CHF가 발생하면 비록 그 열유속이 작더라도 문제가 될 수 있으므로 임계압력 근처에서의 CHF 정보는 초임계원자로 개발에 매우 중요하다. 본 연구에서는 KAERI의 프레온 R-134a 프레온열수력실험장치에서 5x5 봉다발 시험대를 가지고 임계압력 근처에서 CHF 실험을 수행하였다. 실험조건은 압력 3200~4030 kPa (R-134a의 임계압력 = 4059 kPa), 유량 50~1500 kg/m<sup>2</sup>s, 입구미포화도 40~85 kJ/kg 범위에서 균등하게 선정하였다. CHF는 압력이 증가함에 따라 완만하게 감소하였으며 임계압력에 가까워지자 급격히 줄어들었다. 이 급격한 감소 경향은 유량 및 입구미포화도가 커질수록 빨리 나타났다. 유량이 250 kg/m<sup>2</sup>s 인 경우 압력이 최대 4030 kPa까지 CHF 현상이 관측되었으나 유량이 커질수록 CHF 최대관측압력이 점점 작아져서 유량이 1500 kg/m<sup>2</sup>s일 때 3980 kPa로 최대관측압력이 줄어들었다. 입구미포화도도 크지는 않지만 CHF 최대관측압력에 영향을 주었다.

Abstract

The supercritical-water-cooled-reactors currently being developed adopt a once-through direct cycle as a heat removal system. In once-through design, Critical Heat Flux (CHF) must occur at some location during the reactor start-up and the associated temperature increase must be considered for in the design. Because the CHF decreases fast near the critical pressure region, information of CHF in this region is very useful for the protection of the nuclear fuels from melting. CHF experiments are carried out for the 5x5 bundle geometry at the Freon R-134a Thermal Hydraulic Experimental Loop developed in KAERI. The experiments were performed in the range of the pressure of 3200~4030 kPa (Critical pressure of R-134a = 4059 kPa), the mass flux 50~1500 kg/m<sup>2</sup>s, and the inlet subcooling 40~85 kJ/kg. We observed that CHF decreased very fast with system pressure near the critical pressure region and the CHF phenomena disappears at pressures higher than the critical pressure and the wall temperature of the heater rod increases from a low temperature to a high temperature monotonically with a power increase.

## 1. 서론

현재 Generation IV 프로젝트에 선정되어 연구 개발에 관심이 모아지고 있는 초임계원자로의 냉각방식은 초임계화력발전소의 once-through-boiler 방식이다[1]. 이 once-through-boiler 방식은 화력발전을 위한 시스템의 압력을 초임계까지 상승시키는 기동운전 과정에서 CHF (Critical Heat Flux)을 허용하고 안정된 Post-CHF를 형성하면서 냉각수의 압력을 초임계 조건으로 끌어올린다 [2,3]. 이 때 초임계화력발전소의 보일러관을 보호하기 위하여 기동운전 중에 최저유량을 설정하고 보일러관의 열유속을 가급적 낮게 유지한다. 노심에서 기포가 발생하여 국부적으로 열전달이 급격히 줄어들어 연료가 녹는 DNB(Departure from Nucleate Boiling)현상이나 연료표면에 있는 액막이 열에 의해 제거되면서 국부적으로 열전달이 급격히 줄어들어 연료가 녹는 dryout 현상은 모두 CHF 현상의 일종으로 기존의 subcritical 원자로인 PWR이나 BWR과 같은 일반 원자로에서 방사능 누출이 일어나지 않도록 꼭 피해야하는 중요한 열수력 설계인자이다. 보일러관은 열원이 아니므로 손상될 염려가 적고 손상되어도 원자력발전소와 같이 방사능 물질이 유출되지 않는 초임계 보일러와는 달리 원자로는 기동운전 중에 CHF가 발생하여서는 안된다. 그러므로 임계압력 근처에서의 CHF 연구는 초임계원자로를 개발하는데 있어서 초임계 운전 중 유사임계(Pseudo-Critical) 조건에서 급격한 열전달계수 감소로 인하여 연료의 온도가 급상승하는 “열전달 열화(heat transfer deterioration)”[4] 문제와 더불어 열수력 설계에 꼭 해결하여야 할 중요한 문제이다.

임계압력 근처에서의 CHF 연구는 1988년도에 Yin et. al.[5]은 원형관에서 물을 냉각수로 유량  $2030\text{kg/m}^2\text{s}$ 에서 대기압부터 임계압력까지 광범위한 압력 조건에서 CHF 실험을 수행하고 임계압력에 도달하면 CHF가 0이 된다고 주장하였다. 그러나 최근에 Hong et. al.[6]은 환형채널에서 프레온 R-134a 유체로 임계압력 근처에서 다양한 유량과 전반적인 압력 조건에 대한 CHF 실험을 수행하고 임계압력에서 CHF는 0이 아니며 적절한 heat flux가 존재한다고 주장하였다. 그 밖에 많은 연구자들이 광범위한 압력에서 원형관에 적용할 수 있는 CHF 상관식[7,8]과 그래프분석법[9] 그리고 CHF Look-up table[10,11] 등을 개발하였으나 임계압력 근처에 대한 CHF 실험 및 해석 정보가 미진하며, 임계압력 근처에서의 CHF 경향에 대한 특별한 설명이 없다. 앞에서 언급된 연구들은 Heater 자체가 열원인 Heat-flux controlled system(ex. 원자로심)에 적용하는 실험이다. 냉각수가 통과하는 관이 열원이 아닌 Temperature controlled system(ex. 화력발전소의 보일러)에 대한 임계압력 근처에서의 CHF 실험자료는 발표된 것이 없으나, 초임계화력발전소의 기동운전자료는 Heat-flux controlled system의 실험자료로부터 얻은 상관식으로부터 최저 유량을 도출하여 기동운전에 이용하고 있다.

본 연구에서는 KAERI의 Freon Thermal Hydraulic Experimental Loop (FTHEL)을 활용하여 아직까지 연구되지 않은 임계압력 근처 조건에서 5x5 봉다발에 대한 CHF 실험을 수행하였다.

FTHEL은 주로 차세대 원자와 상용원자로의 핵연료 개발과 안전연구를 위하여 개발한 다목적 열수력실험장치로서, 실험용 냉각수로 오존층을 파괴하지 않는 프레온 R-134a을 사용한다[12]. 임계압력 근처에서의 CHF 현상을 자세히 관찰하기 위하여 유량과 압력을 조밀하게 설정하고 입구미포화도를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 또한 초임계 상태에서 CHF를 넘는 heat flux에 대한 히터의 벽면온도 변화를 조사하였다.

## 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 두대를 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 아큐트레이터(accumulator)를 가압기로 사용한다. 아큐트레이터에 질소가스를 주입하면 프레온 유체와 질소가스 사이에 있는 막이 팽창되면서 시스템압력은 증가된다. 압력은 아큐트레이터 상단에 있는 질소가스 배출밸브를 설치하여 감소시킬 수 있다. 막의 재질은 프레온 R-134a와 부식특성이 좋은 탄소중합체인 Buna-N 재질이며 아큐트레이터 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 배설하였다. 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 하우징을 만들었다. 하우징 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°C이므로 이 부근에서 잘 맞는 구리-콘스탄탄 재질의 1/4인치 스페셜급 T-type을 루프 온도측정에 적용하였다. 측정범위가 -200~350°C 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 block 에서 측정 시 자동으로 교정된다. 다이아프라이프 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- $\frac{1}{2}$  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

프레온 R-134a(임계압력=4059 kPa, 임계온도=101.2. C)의 임계압력 근처에서 수행한 압력, 유량 및 입구과냉도에 대한 5x5 봉다발의 실험범위는 아래와 같다.

압력	3200 ~ 4030	kPa,
유량 (mass flux)	50 ~ 1500	kg/m <sup>2</sup> -s,
입구과냉도	40 ~ 85	kJ/kg,

가열봉이 CHF로 인하여 타는 것을 방지하기 위하여 유체의 포화온도보다 가열봉의 벽면온도가

15~50. C 이상 높게 되면 자료획득시스템에서 트립시그널을 전력공급장치에 보내어 전력공급을 중단시키도록 전력트립시스템을 구성하였으며, 실험 시작 전에 시험대의 Heat balance test를 수행하고 전원에서 인가된 열과 루프에서 측정된 열의 차이가 3% 이내에 있으면 실험을 수행하였다. 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. 측정된 CHF 값은 CHF가 발생한 부수로와 봉의 위치 정보와 함께 하드디스크에 저장하였다.

## 4. 실험결과 및 논의

### 4.1 매개변수에 따른 CHF 경향

임계압력 근처에서의 CHF 경향은 일반적인 CHF 경향과 같이 압력이 증가하면 감소하고 유량이 증가하면 증가하며, 입구 미포화도가 커지면 커지는 전반적으로 유사한 결과를 나타내었다(그림 6, 7). 그러나 임계압력 바로 앞에 도달하자 입구미포화도가 40 kJ/kg에서 CHF는 압력이 증가함에 따라 완만하게 감소하였으며 임계압력에 가까워지자 급격히 줄어들었다(그림 6). CHF가 급격히 줄어드는 경향은 유량이 커질 수록 빨리 나타났으며, 입구미포화도를 70 kJ/kg으로 증가시키자(그림 7) 입구미포화도가 40 kJ/kg인 경우보다 CHF는 더욱 일찍 감소하였다. 이 현상은 Yin et al.[5]의 원형관 실험에서나 Hong et. al.[6]의 환형관 실험에서도 나타난 것으로 그 원인은 그림 8에 도시한 바와 같이 임계압력에 도달할 때 급격히 감소하는 기화의 잠열이 주 요인으로 평가되고 있다. 또한 유량 50, 150, 250 kg/m<sup>2</sup>s에서는 압력 4030 kPa에서 CHF 현상이 관측되었으나 유량 550 kg/m<sup>2</sup>s이후부터는 압력 4030 kPa에서 CHF 현상이 관측되지 않았고, 가열봉의 전력을 높일 수록 가열봉의 벽면온도는 급격한 상승이 없이 선형적으로 증가하였다. 유량이 증가하면 CHF 현상이 관측되는 최대압력이 임계압에서 점점 멀어져서 그림 6과 같이 유량이 1500 kg/m<sup>2</sup>s일 때 3980 kPa까지 압력이 줄어들었다. 이 현상은 입구미포화도를 증가시킬 때도 나타났다. 그림 7은 입구미포화도를 70 kJ/kg로 고정시키고 CHF를 측정하는 것으로, 그림 6의 입구미포화도가 40 kJ/kg인 경우보다 유량에 따라 조금씩 CHF 관측 압력이 줄고 있음을 알 수 있으며, 유량이 1500 kg/m<sup>2</sup>s일 때 CHF 관측 압력이 3950 kPa까지 작게 나타났다. 이 현상은 원형관과 환형관 실험에서 아직까지 발견되지 않았던 것이므로 부수로 효과에 기인한 것으로 추정된다.

### 4.2 출구압력과 가열봉 내벽온도의 오실레이션 관측

유량이 550 kg/m<sup>2</sup>s이고, 입구미포화도가 70 kJ/kg인 조건에서 임계압력인 4059 kPa에 매우 근접한 압력 4030 kPa에서 CHF 관측을 하는 도중에 압력과 가열 봉의 내벽온도가 오실레이션하는 것을 관찰하였다. 그림 9는 실험시작 후 1750초 이후부터 2390초 가량 약 10분 동안 전력을 44.5~44.7 kW로 거의 일정하게 유지한 상태에서 시험대 출구 압력 변동과 가열봉 벽면온도를 도시한 그림이다. 실험시작 후 1750초 이후부터 출구압력은 진폭 11kPa, 주기 80초로 비교적 일정하게 최고 4041 kPa에서부터 최저 4001 kPa까지 서서히 감소하였으며, 가열봉 내벽온도는 실험시작 후 1750초 이후부터 완만하게 주기운동을 형성하다가 시간이 지날수록 진폭이 커지고 주기가 짧아지며 내벽온도를 상승시키는 방향으로 발산하였다.

## 5. 결론

KAERI의 프레온열수력실험장치에서 5X5 봉다발 시험대의 CHF실험을 수행하였다. CHF 실험조건은 프레온 R-134a의 임계압력 근처에서 유량과 입구미포화도를 변화시키면서 CHF 현상을 관찰하고 실험자료를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. CHF는 압력이 증가함에 따라 완만하게 감소하였으며 임계압력에 가까워지자 급격히 줄어들었다. 이 급격한 감소 경향은 유량 및 입구미포화도가 커질수록 빨리 나타났다.
2. 유량이 250 kg/m<sup>2</sup>s 인 경우 압력이 최대 4030 kPa까지 CHF 현상이 관측되었으나 유량이 커질수록 CHF 최대관측압력이 점점 작아져서 유량이 1500 kg/m<sup>2</sup>s일 때 3980 kPa로 최대관측압력이 줄어들었다. 입구미포화도도 크지는 않지만 CHF 최대관측압력에 영향을 주었다.
3. 유량이 550 kg/m<sup>2</sup>s이고, 입구미포화도가 70 kJ/kg인 조건에서 임계압력에 매우 근접한 압력 4030 kPa에서 CHF 관측을 하는 도중에 압력과 가열 봉의 내벽온도가 오실레이션하는 것을 관찰하였다.
4. 임계압력보다 낮으나 CHF가 관측되지 않는 압력에서는 가열 봉의 전력을 CHF가 관측된 압력에서의 값보다 높게 인가하여도 가열봉의 내벽온도는 급격한 상승이 없이 선형적으로 증가하였다.

#### 후기

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

#### 참고문헌

- (1) T. Nakatsuka, Y. Oka, S. Koshizuka, 2000, "Start-up of Supercritical-Pressure Light Water Cooled Reactors," Proceedings of the 8th Int. Conf. on Nucl. Eng., Baltimore, MD USA, ICONE-8304.
- (2) S. Kakaç, 1991, *Boilers, Evaporators, and Condensers*, 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (3) H. W. Byeon and J. L. Ulrey, 1997, "Designing a Standard Thermal Power Plant for Daily Startup/Shutdown: the HP Bypass Control and Safety Function," ISA Transactions, Volume 36, pp.71-77.
- (4) S. Yoshida and H. Mori, 2000, Heat Transfer to Supercritical Pressure Fluids Flowing in Tubes, Proceedings of the Supercritical Water-Cooled Reactor Conference in Japan, Tokyo, Nov. 6-8, Paper No. 106.
- (5) S. T. Yin, T. J. Liu, Y. D. Huang, R. M. Tain, 1988, "Measurements of Critical Heat Flux in Forced Flow at Pressures up to the Vicinity of the Critical Point of Water," Proceedings of the 1988 National Heat Transfer Conference in U.S.A., Houston, July 24-27, Vol. 1, pp.501-506.
- (6) S. D. Hong, S. Y. Chun, Y. J. Yoon, W. P. Baek, 2003 "Heat Transfer Characteristics of R-134a Fluid During the Pressure Transient from Supercritical Pressure to Subcritical Pressure," The 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10) Seoul, Korea, October 5-9.
- (7) R. W. Bowring, 1972, "An Simple but Accurate Round Tube, Uniform Heat Flux Dryout Correlation over Pressure Range 0.7-17.0 MN/m<sup>2</sup>(100-2500 psia)," UKAEA Report AEEW-R-789.
- (8) Y. Katto, and H. Ohno, 1984, "An Improved Version of the Generalized Correlation of Critical Heat Flux for the Forced Convective Boiling in Uniformly Heated vertical Tubes," Int. J Heat Mass Transfer, Vol. 27, pp. 1641~1648.
- (9) M. M. Shah, 1979, "A Generalized Graphical Method for Predicting CHF in Uniformly Heated vertical Tubes," Int. J Heat Mass Transfer, Vol. 22, pp. 557~568.

- (10) D. C. Groeneveld *et al.*, 1996, "The 1995 Look-up Table for Critical Heat Flux in Tubes," Nucl. Eng. and Design, 163.
- (11) "Tabula Data for Calculating Burnout when Boiling Water in Uniformly Heated Round Tubes," Teploenergetica, 23(9) 90-92, 1976, Translation in Thermal Engineering, pp. 77-79, September 1977.
- (11) 홍성덕, 문상기, 천세영, 백원필, 2003, " 프레온열수력실험장치를 이용한 5X5 봉다발 임계열유속 실험 연구 (Critical Heat Flux Experiments on a 5X5 Rod Bundle Using a Freon Thermal Hydraulic Experimental Loop)," KNS 춘계학술발표회, 경주.

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

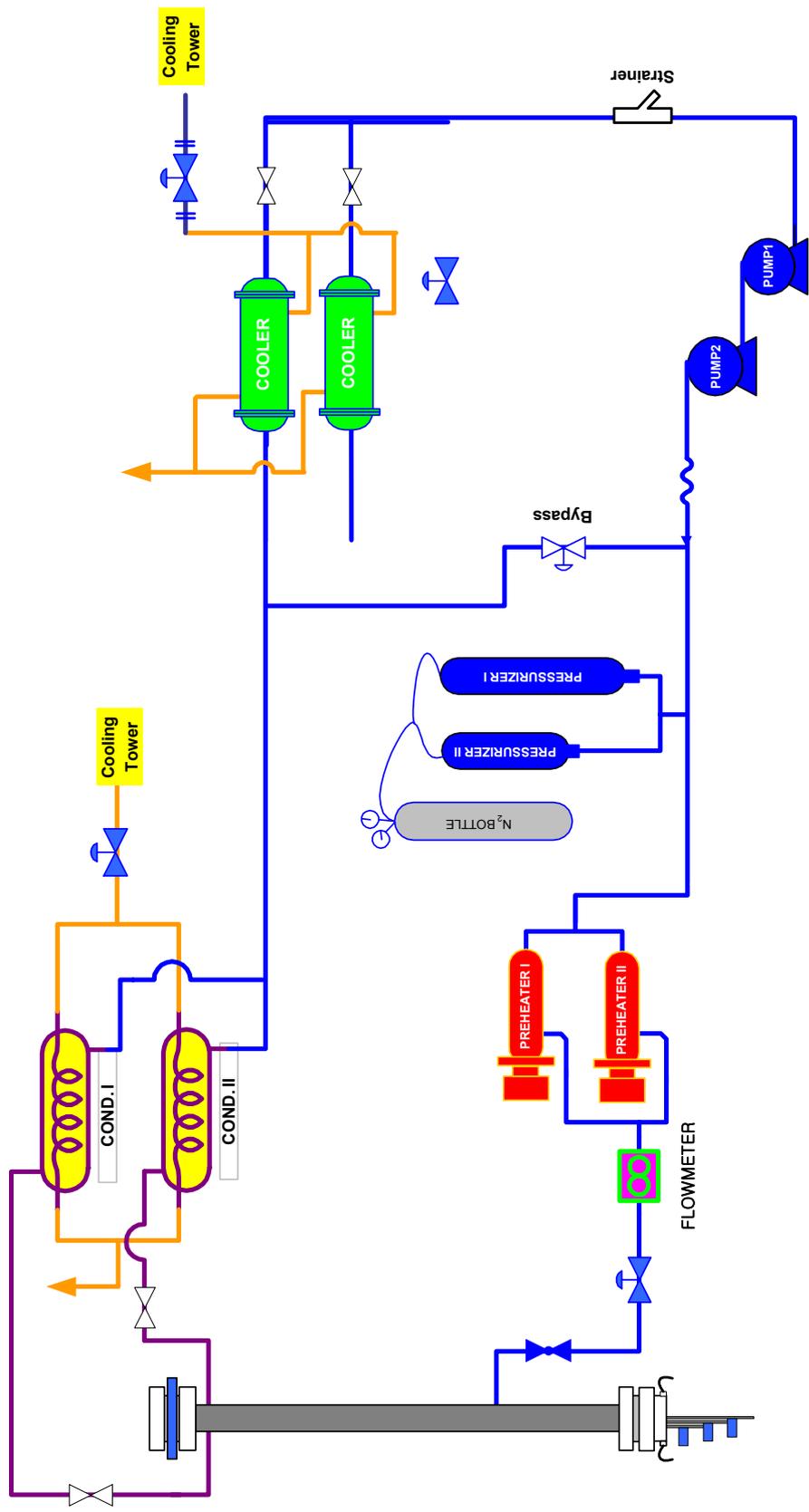


Figure 1. Freon thermal hydraulic experimental loop

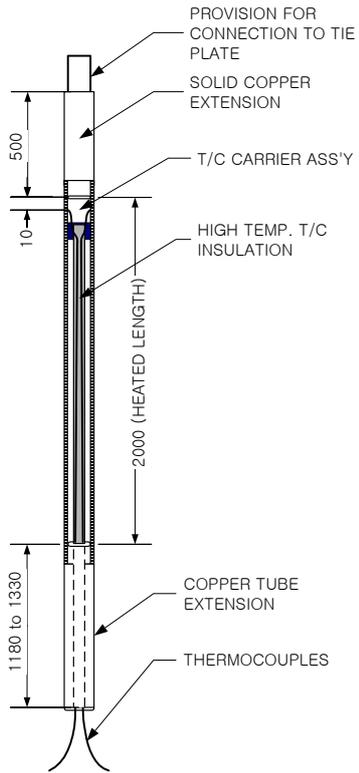


Figure 2. Heater rod

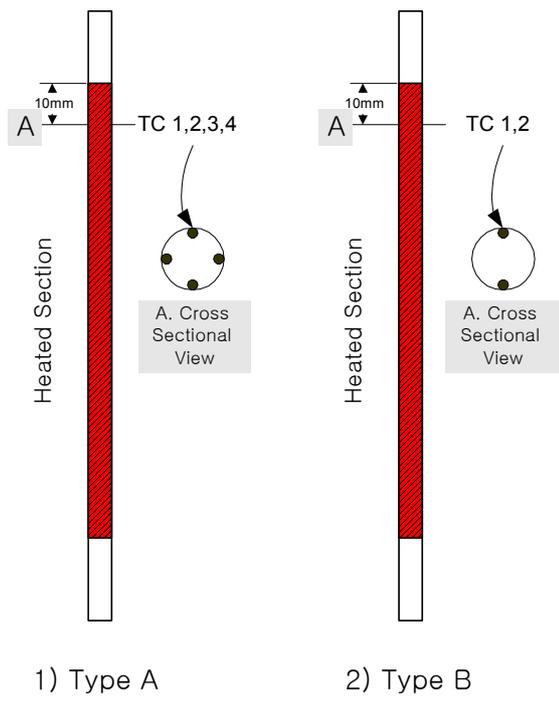


Figure 4. Thermocouple locations of the heater rods

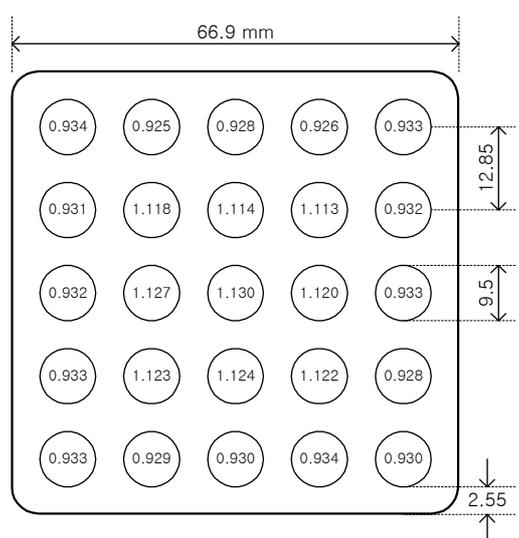


Figure 3. Radial power distribution and geometric data

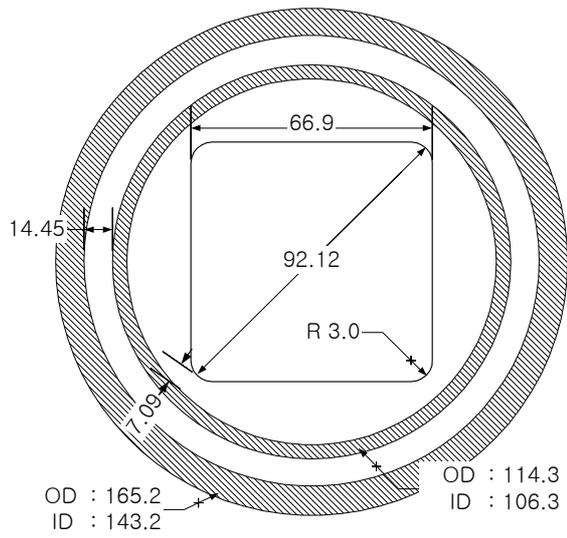


Figure 5. Cross section of the test section

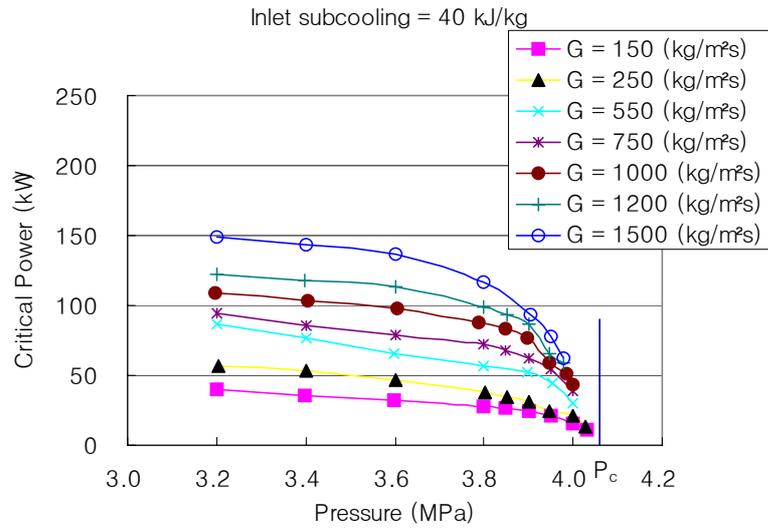


Figure 6. Critical power trend on the outlet pressure and inlet mass flux at the inlet subcooling 40 kJ/kg

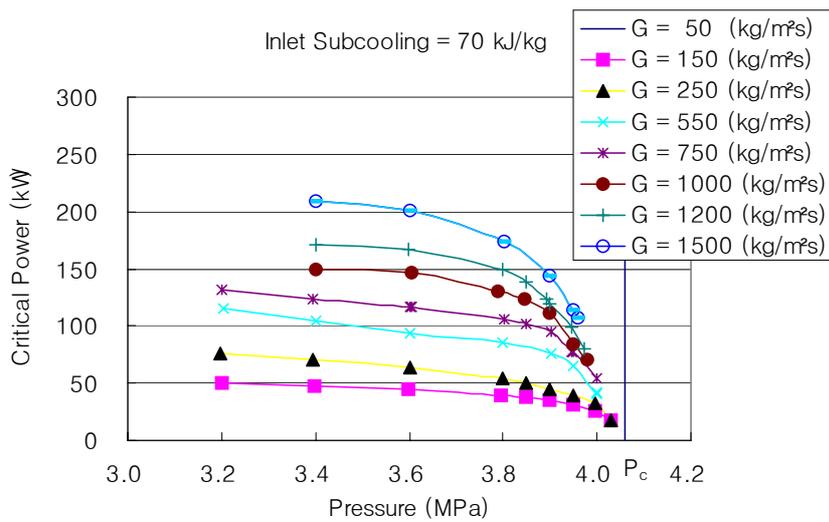


Figure 7. Critical power trend on the outlet pressure and inlet mass flux at the inlet subcooling 70 kJ/kg

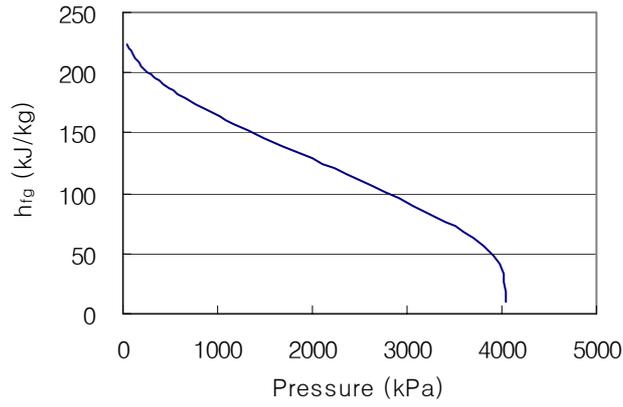


Figure 8. The latent heat of vaporization trend on pressure (R-134a fluid)

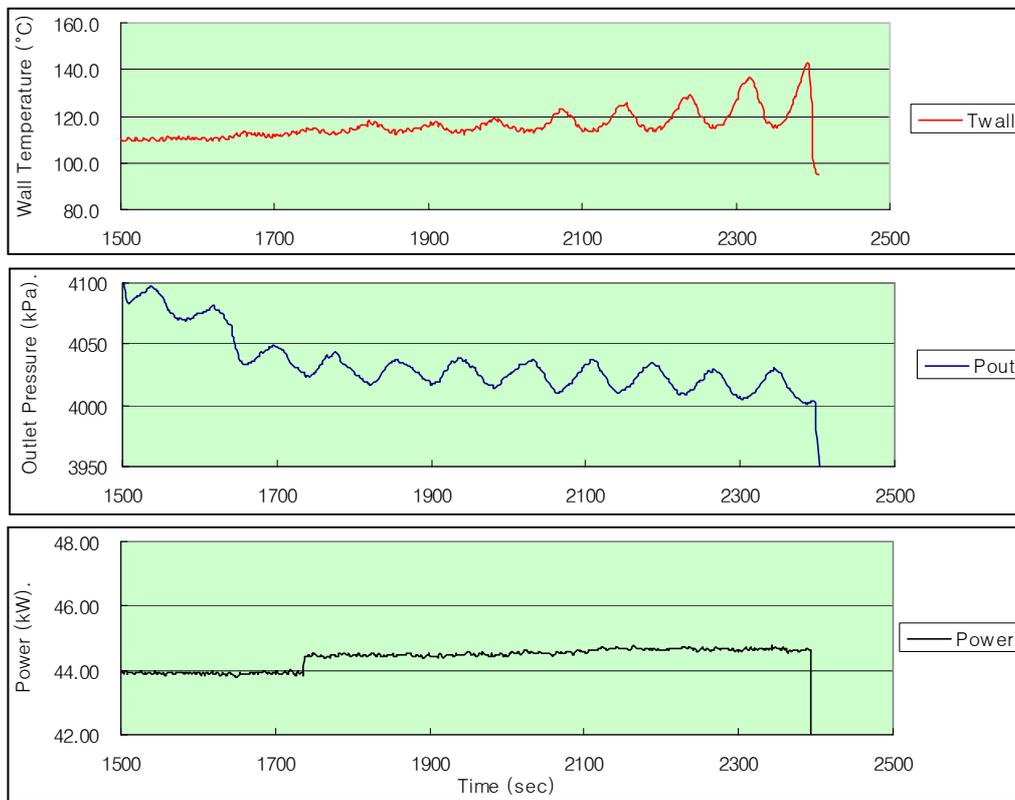


Figure 9. Exit pressure oscillation with heated wall temperature (mass flux = 550 kg/m<sup>2</sup>s, inlet subcooling = 70 kJ/kg, power = 44.5 ~44.7 kW)