

중수로 원전에서 용해가스가 비등개시 및 미포화 비등열전달에 미치는 영향

Dissolved Gas Effects on Boiling Incipience and Subcooled Boiling Heat Transfer in Pressurized Heavy Water Reactor

서정관, 성창경

전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

김학준, 박군철

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

요 약

중수로 원전에서 재장전시 기체가 용해되어 열전달에 영향을 줄 수 있다. 또한 중수로로는 부분적인 비등을 허용하므로 용해가스가 미포화 비등열전달에 미치는 영향을 이해하는 것은 중요하다. 본 연구에서는 1, 3, 5 bar로 압력을 변화시키며 용해가스의 유무에 따른 실험을 수행하여 용해가스가 비등개시 및 미포화 비등열전달에 미치는 영향을 평가하였다. 가스가 포화된 조건에서의 비등개시 상관식은 Bergles-Rohsenow의 실험상관식과 같은 형식으로 표현되어, 가스가 제거된 조건에서의 비등개시와 정량적으로 비교하여 평가되었다.

Abstract

The air can dissolve into the primary coolant and affect the heat transfer phenomena when the Pressurized Heavy Water Reactor(PHWR) is refueled. In addition, as the partial boiling is allowed at PHWR, it is important to understand the effect of dissolved gas on subcooled boiling heat transfer. In this study, the dissolved gas effects on the onset of nucleate boiling (ONB) and the subcooled boiling heat transfer were investigated at pressures of 1, 3, 5 bar for both conditions of gas-saturated and degassed. The ONB correlation at the condition of gas-saturated was expressed in the form of Bergles-Rohsenow's correlation to quantitatively evaluate the boiling incipience compared with the condition of degassed.

1. 서 론

현재 국내에서 4기가 운전중인 중수로 원전은 8-12개의 연료다발을 1일 주기로 교체하고 있다. 이때 연료다발과 함께 1차계통으로 기체가 유입되어 열전달에 영향을 줄 수 있게 된다. 또한 중수로의 연료관 집합체에서는 부분적인 비등이 발생하므로 용해가스 존재시 미포화 비등열전달 현상을 이해하는 것은 중요하다. 용해가스와 관련된 열전달 해석은 질소기체 분압과 증기 분압을 이용하여 압력을 조절하는 방식을 채택중인 일체형원자로의 설계에서도 필수적이다. 일체형원자

로의 가압기는 피동적으로 압력이 조절되도록 하는 자기가압 방식으로 원자로내 상부에서 압력을 조절한다. 가압기에 용해된 질소기체는 주냉각 계통으로 이동하여 원자로내 열전달 현상에 중요한 영향을 줄 것으로 예상되어 이에 대한 실험적 평가의 필요성이 제기되었다.[1]

용해가스가 열전달에 미치는 영향에 대한 실험 연구는 1949년 McAdams 등이 처음으로 제시하였다. 공기를 용해시킨 물을 사용하여 미포화 비등 조건에서 강제대류 실험을 수행하였는데 부분 발달된 핵비등 영역에서는 열전달이 현저히 향상되었으나 단상과 완전 발달된 핵비등 영역에서는 용해가스의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 압력을 감소시키면 작아졌는데 저압에서는 용해가스의 농도가 적기 때문이다. 또한 용해가스가 있는 모든 경우에는 가스를 제거시킨 경우보다 기포를 형성시키는 벽면의 온도가 낮게 나타났다.[2]

You 등은 수조비등 조건에서 FC-72를 작동 유체로 하여 용해가스와 관련된 다양한 실험을 수행하였다. 가스의 농도에 따라 비등이 시작되는 벽면 온도를 측정된 결과 매 실험마다 다른 온도에서 비등이 발생하였다. 이러한 이유로 비등개시를 확률적으로 표현하는 방법을 제안하였고, 확률적으로 표현된 비등개시 온도는 가스가 많이 녹은 경우에 더 낮게 나타났다. 핵비등 영역에서 용해가스의 영향은 두드러지게 나타났는데 비등 열전달이 현저히 증가하였다.[3]

지금까지의 실험 결과에서 용해가스의 영향은 대부분 정성적으로 평가되었고 특히 자연대류 조건에서의 실험 결과는 매우 부족한 것으로 나타났다. 따라서 원자로 사고시 노심 잔열이 냉각재의 자연순환에 의해 제거된다고 가정하면, 자연대류 조건에서 용해가스가 열전달에 미치는 영향에 대한 정량적인 평가가 필요하다.

본 연구에서는 압력을 1, 3, 5 bar로 설정하고 가스가 용해된 경우와 제거된 경우에 대하여 열속을 증가시키며 정상상태 실험을 수행하였다. 본 연구에서 제시된 가스가 포화된 조건에서의 비등개시 상관식은 용해가스의 영향을 표현하는 방법론에 대한 깊이 있는 통찰을 제공할 것이다.

2. 실험 장치

주 루프 계통은 다음과 같이 구성되어 있고 2 인치 스테인레스관으로 연결되어 있다. 시험 체적부 하부와 우회 유로는 각각 4 인치와 1 인치 스테인레스관을 사용하였다. 그림 1에 실험 장치의 개략도 및 센서의 위치를 나타내었다.

시험 체적부

시험 체적부에는 질소 분출 현상을 가시화하기 위해 내경 30mm, 높이 500mm인 시창을 설치하였다. 전열봉은 외경 19mm, 두께 1.5mm, 길이 500mm인 인코넬을 사용하였고, 저항값은 상온에서 7.8 mΩ이다. 균일한 열속을 발생시키기 위해 교류 전원을 양단에 연결하는 직접가열 방식을 채택하였으며, 전원은 단상의 10Volt, 1000A가 흐를 수 있는 트랜스(10kW)에 슬라이닥스(10kW)를 연결하여 출력전압을 조절하며 변화시켰다. 인코넬에 전원을 연결하기 위해 상부는 외경 19mm, 길이 70mm인 구리봉을 은납용접하고, 외경 12.7mm, 길이 960mm인 구리봉의 끝 부분에 30mm의 나사산을 내어 연결한 후 인코넬의 안쪽을 통하여 바깥으로 빼냈다. 인코넬 하부는 외경 22mm, 두께 1.5mm, 길이 384mm인 동관을 용접한 후 루프에 고정시키고 루프 바깥으로 나온 부분에 전원을 연결하였다. 전열봉과 실험 루프가 연결된 부위는 전류가 흐르지 않도록 테프론을 사용하여 절연하였다. 전열봉이 아래 부분으로부터 위 부분으로 삽입되므로 유동이 생길 때의 흔들림을 방지하기 위하여, 인코넬 상부에 용접된 구리봉의 끝 부분에 높이 10mm인 그리드를

세 방향으로 부착하였다. 전열봉의 표면 온도를 측정하기 위해 인코넬 표면에 2mm의 구멍을 내고 안쪽으로부터 T-type 열전대를 용접하여 유동에 영향을 주지 않도록 하였다. 위치는 다섯 곳이고 동일 간격(100mm)의 나선형으로 부착하여 대칭성을 확인할 수 있도록 하였다. 그림 2에 시험 체적부의 상세도 및 열전대의 위치를 나타내었다.

열교환기

열교환기에는 1/2 인치 동관을 나선형으로 3개 설치하였고 가로/높이 방향의 피치는 각각 16.5/13.5mm이다. 열교환기 하단은 시험체적부 상단으로부터 217mm가 되도록 하였으며, 내경은 159.6mm이고 높이는 662mm이다. 1차측 유체가 동관 사이로 흐르도록 내부에 외경 42.5mm, 길이 600mm인 원통형 구조물을 설치하였다. 2차측 유입수는 아래 부분으로부터 위 방향으로 흐르며 1차측 온도 분포의 비대칭성을 줄이기 위해 120도 간격으로 주입된다.

질소농도 조절 탱크(가압기)

가압기는 지름, 높이가 각각 500mm이고 내부 용적은 98리터이며, 20리터인 순환용수의 양보다 충분히 크게 하여 실험 중 질소가 분출되더라도 초기 조건이 유지되도록 설계하였다. 루프내의 가스를 제거하는 과정에서 비등을 발생시키기 위해 5kW 전열기를 2개 설치하였고, 상부에 분출 가스를 제거할 때 이용될 수 있도록 솔레노이드 밸브를 부착하였다. 또한 과압을 방지하기 위해 안전밸브를 설치하였으며 압력은 질소 탱크에서 질소를 주입하여 조절된다.

순환 펌프

초기 실험 루프에 균일한 질소 농도를 맞추기 위해 유체의 유동이 필요하다. 이를 위해 우회 유로를 만들어서 펌프를 설치하였으며 우회 유로는 밸브를 부착하여 자연순환 실험시 분리할 수 있게 하였다. 위치는 시험 체적부에서의 공동화를 방지하기 위해 열교환기 아래 부분의 시험체적부 앞쪽에 설치하였다.

불확실성 평가 및 자료 획득

Moffat[4]이 제안한 방법에 의해 95% 신뢰구간에서 열속, 압력, 온도 측정에 대한 불확실성을 평가하였다. 열속의 불확실성은 설정치의 $\pm 1\%$ 이내이며 압력은 $\pm 0.002\text{MPa}$ 이다. 온도는 시험체적부, 열교환기, 2차 냉각관의 입출구에서 측정되었으며 불확실성은 각 위치마다 다르게 나타났다. 불확실성이 가장 큰 곳은 시험체적부의 출구이며 $\pm 0.69^\circ\text{C}$ 로 계산되었다. 전압 센서와 압력 센서, 열전대에서 나온 자료는 자료획득장치(HP3852A)에 의해 수집되었다.

3. 실험 조건 및 방법

실험은 1, 3, 5 bar에서 수행되었으며 2차측 냉각수 유량을 1.8 LPM으로 고정하여 냉각률을 일정하게 유지하였다. 열속의 범위는 $32\sim 200\text{kW/m}^2$ 이며 가스를 용해시킨 경우와 제거된 경우 각각에 대해 수행하였다. 시험 체적부의 유체 온도는 $13.2\sim 67.5^\circ\text{C}$ 이며 벽면 온도는 $68.0\sim 186.1^\circ\text{C}$ 이다.

실험 수행시에는 먼저 루프의 물에서 가스를 제거하기 위해 비등의 방법을 사용한다. 펌프로 유체를 순환시킨 후 보조 전열기와 주 전열봉에 전원을 연결하고 상압에서 비등온도 이상(105°C , 1 atm)으로 가열한다. 그리고 냉각수를 순환시켜 초기 조건을 맞춘다.

질소를 용해시킬 때는 유체를 순환시키며 초기 조건보다 10% 높은 압력까지 주입한다. 이때

냉각수를 순환시켜 초기 온도조건이 유지되도록 한다. 질소가 물에 용해되면서 압력이 강하하는데 초기 조건의 압력까지 내려가면 다시 주입하고, 이와 같은 과정을 반복하여 주어진 온도와 압력에서의 포화 농도를 만든다. 그림 3은 질소기체를 10기압에서 포화 농도로 만드는 과정인데 1회 주입 후에는 비교적 짧은 시간에 초기 조건의 압력까지 떨어지나 반복할수록 시간이 지연됨을 나타내고 있다. 이것은 질소기체가 포화농도에 가까워지면서 용해되는 양이 감소하기 때문이다.

자연대류 실험은 냉각수를 순환시키고 전열봉에 전원을 연결한 후 충분한 시간이 지나 평형에 도달하면 벽면과 유체의 온도, 열출력을 측정한다. 이 과정 중 단상(single phase)에서 이상(two phase)으로 되는 열속에서는 열속 증가를 작게 하며 비등이 시작되는 구간을 찾아낸다. 비등개시는 벽면 온도가 감소할 때의 열속으로 설정하였다.

초기 압력을 설정하고 압력의 변화를 측정하기 위해 가압기 상단과 시험 체적부의 입구에서 정압을 측정하였다. 센서는 Green Sensor사의 TPT100이고 측정 범위는 0~20kg/cm²이다.

유체의 온도 측정에는 구리-콘스탄탄으로 된 직경 1.6mm의 T-type 열전대가 사용되었고, 전열봉에는 표면 온도를 측정하기 위해 직경 1mm의 비접지형 열전대를 은납 용접하였다. 그러나 그림 4에 나타난 것과 같이 1.5mm의 전열봉 내부 온도에는 출력에 따른 구배가 있으므로 표면 온도를 구하기 위해서는 열전대의 깊이를 알아야 한다. 또한 열적 저항에 의해 오차가 발생할 수 있으므로 이를 보정해 주어야 한다. 본 연구에서는 실험을 통해 그림 5와 같이 오차를 보정하는 열전대의 열적 깊이를 정의하여 도출하였고, 식 (1)에 의해 표면 온도와 차를 계산하여 벽면 온도를 구하였다.

$$T_r - T_w = \frac{Q}{4k\pi(r_2^2 - r_1^2)L} [(r_2^2 - r_r^2) + 2r_1^2 \ln(r_r/r_2)] \quad (1)$$

여기서 T_r = temperature of measuring point
 T_w = temperature of heating surface
 r_1 = inner radius of heater
 r_2 = outer radius of heater
 r_r = radius of measuring point
 L = heating length
 Q = power rated at heater
 k = conductivity of inconel

4. 실험 결과

4.1 용해가스가 비등개시에 미치는 영향

그림 6은 가스를 제거한 유체와 질소를 용해시킨 유체 각각에 대하여 수행한 실험 결과를 나타낸다. 주어진 곡선은 압력의 효과와 동일 압력에서 가스의 유무에 따른 열전달 효과를 나타내고 있다. 그림에서 단상 영역에서는 곡선들 사이에 용해가스의 유무에 따른 두드러진 차이가 발생하지 않고 있다. 이것은 용해가스의 영향이 단상에서는 나타나지 않음을 의미한다.

비등개시는 그림 6에서 열전달 곡선이 단상의 곡선으로부터 이탈되는 열속으로 설정하였다. 비등개시 열속에서는 벽면의 온도가 감소하고, 열속이 증가하여도 벽면 온도는 완만한 증가 곡선을 나타내고 있다. 그림 7은 열속 증가에 따른 전열봉의 축방향 온도 분포를 나타낸다. 열속이 증가하면서 벽면 온도가 증가하는데 2771W에서 $z/L=0.9$ 인 위치에서의 온도는 감소하였다. 이것은 이 부분에서 비등이 발생하였기 때문이다.

그림 8에서는 용해가스가 비등개시에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 식 (2)와 같은 Bergles-Rohsenow의 실험상관식과 비교하였다.

$$\Delta T_{sat} = 0.555 \left(\frac{q''}{1082 p^{1.156}} \right)^{p^{0.0234}/2.16} \quad (2)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Delta T_{sat} &= T_w - T_{sat} \\ T_{sat} &= \text{saturation temperature} \\ q'' &= \text{heat flux (W/m}^2\text{)} \\ p &= \text{pressure (bar)} \end{aligned}$$

가스가 제거된 경우 비등개시 열속에서의 벽면 과열은 Bergles-Rohsenow 실험상관식에 의한 값보다 8.0-8.3배로 크게 나타났고, 가스가 포화된 경우는 3.95-4.28배로 크게 나타났다. 이것은 Bergles-Rohsenow 실험상관식이 포화 비등조건에서 구한 벽면과열(wall-superheat)이므로 본 실험과 같은 미포화 비등조건에서는 벽면과열이 더 큰 상태에서 비등이 발생함을 나타내고 있다. 따라서 미포화 비등조건에서는 위 상관식의 계수만을 변경하여 비등개시 상관식으로 적용할 수 있고, 가스가 포화된 경우는 가스가 제거된 경우와 비교하여 표현할 수 있게 된다. 정확한 계수를 설정하기 위해서는 더 많은 경우의 실험을 수행하여야 하고 신뢰구간을 나타내어 제시하여야 한다.

그림 6에서 압력의 효과는 압력이 증가함에 따라 포화 온도가 증가하므로 더 높은 열속에서 비등이 발생함을 나타내고 있다. 질소가 용해된 경우에는 비등개시가 더 낮은 열속에서 발생함을 알 수 있는데 이것은 용해질소가 증기기포 형성에 의한 핵비등이 일어나기 전에 먼저 분출되기 때문이다.

이러한 비등개시 현상은 You[3]등이 발표한 식 (3)과 (4)를 이용하여 설명할 수 있다.

$$[P_b - P_1] = [(P_{bv} + P_{bg}) - P_1] = 2\sigma_w/r_b \quad (3)$$

$$\text{여기서 } P_{bv} = P_{sat}(T_w), P_{bg} = \alpha P_g, 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (4)$$

식 (3)에서 $P_1 (= P_v + P_g)$ 과 T_w 는 측정된 값이므로 기포 내부의 가스 분압, P_{bg} 만이 알 수 없는 값이다. P_{bg} 의 값을 평가하는 것은 가스가 유체 내부에서 균일하게 용해되어 있지 않으므로 상당히 복잡하다. 왜냐하면 가스는 비등의 초기 단계에서 기포로 형성되어 벽면에서 이탈하므로 벽면 근처에서의 가스 농도는 감소하기 때문이다. 그러나 이러한 과정에서도 기포 내부의 가스 분압은 식 (4)에 주어진 것처럼 0에서 시스템의 가스 분압(P_g) 사이의 값이 될 것이다. 따라서 시스템의 가스 분압(P_g)이 증가하면 기포 내부의 가스 분압(P_{bg})도 증가할 수 있다. 결과적으로 기포 내부의 주어진 전체 압력을 형성하기 위해 벽면 온도는 감소할 수 있게 된다.

4.2 용해가스가 미포화 비등열전달에 미치는 영향

그림 6에는 또한 용해가스가 미포화 비등열전달에 미치는 영향이 나타나 있다. 이 영역에서 용해가스의 영향은 가스가 제거된 경우와 비교하여 현저히 드러나 있는데 가스가 용해된 경우 열전달이 증가하였다. 가열되는 표면에서의 비등 현상에도 뚜렷한 차이가 나타났는데 가스기포는 증기기포보다 작은 크기이고 유체를 따라 상부로 이동한다. 그러나 증기기포는 높은 빈도로 표면에

서 형성되고 이탈한 후 유체를 따라 상승하지 못하고 미포화 상태이므로 곧 소멸되었다.

열속이 증가함에 따라 유체 온도가 상승하여 가스가 방출되면 가스가 제거된 곡선과의 차는 감소하게 된다. 이것은 열속이 증가하여 비등이 충분히 발달되면 가스기포의 수가 줄어들 뿐만 아니라 증기기포가 열을 전달하는 주된 기능을 하게 되기 때문이다. 그럼에도 지속적으로 상승하는 가스기포는 미포화 비등열전달을 증가시키게 된다.

단상의 경우에는 열전달을 일정한 상관식의 형태로 표현할 수 있으나 이상의 경우에는 데이터가 넓은 영역에 분포하게 된다.[5] 이것은 비등이 개시되는 열속이 외형적으로 모든 조건을 동일하게 설정한 실험에서도 다르게 나타나기 때문이다. 이러한 현상은 가스가 제거된 경우와 포화된 경우의 곡선들이 서로 다른 열속에서 단상의 곡선으로부터 이탈하고 있음에서 확인할 수 있다.

이와 같은 이유로 미포화 비등 영역에서의 열전달계수는 상관식의 형태로 나타내지 않고, 표 1에 제시된 것처럼 가스가 제거된 경우와 포화된 경우의 상대적 크기만을 비교하였다. 상압의 미포화 비등 영역에서 가스가 용해된 경우 열전달계수는 37%까지 증가하였으며 이러한 경향은 3 bar와 5bar의 경우 최대 18%까지 더 높게 나타났다.

5. 결론

중수로에서 용해가스 존재시 열전달 현상을 파악하기 위해, 자연 대류조건에서 비등개시 특성 및 미포화 비등 영역에서의 열전달 특성을 평가하였다. 본 실험 연구에서의 결론은 다음과 같다.

- (1) 용해가스가 존재하는 경우 비등개시는 가스가 제거된 경우와 비교하여 더 낮은 열속에서 발생하고, 비등개시 상관식은 Bergles-Rohsenow의 실험상관식과 같은 형식으로 표현되어 가스가 제거된 조건에서의 비등개시와 정량적으로 비교하여 평가되었다.
- (2) 부분 발달된 미포화 비등 영역에서의 열전달계수는 상압의 경우 37%까지 증가하였고 3bar와 5bar에서는 최대 18%까지 증가하였으며, 완전 발달된 미포화 비등 영역에서는 그 차가 감소하였다. 이것은 부분 발달된 미포화 비등 영역에서는 가스가 용해된 경우 분출되면서 증기기포와 같은 역할을 하기 때문이고, 완전 발달된 미포화 비등 영역에서는 가스기포 뿐만 아니라 증기기포가 열전달에 지배적인 영향을 주게 되기 때문이다.

향후 연구 과제로는 본 실험에서 구한 미포화 비등 열전달계수를 정량적으로 표현하기 위해 보다 많은 실험 자료를 생성할 필요가 있다. 여기에는 본 실험에서 포화 농도로 가정한 용해가스의 농도가 포함되어야 할 것이다. 또한 수직 환형관에서는 자연대류 열전달 상관식의 개발이 부족한 상황이므로 전열봉의 외경에 변화를 주면서 열전달 상관식을 개발하는 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] 장문희 외, '신형원자로로서의 일체형 가압경수로 설계특성 분석', 기술보고, Journal of the Korean Nuclear Society, Vol 27, Number 2, April 1995.
- [2] McAdams, W. H., Kennel, W. E., Minden, C. S., Carl, R., Picornell, P. M., and Dew, J. E., "Heat Transfer at High Rates to Water with Surface Boiling", Ind. and Engrg. Chem., Vol. 41, No. 9, 1945-1953, 1949.
- [3] You, S. M., Simon, T. W., Bar-Cohen, A., and Hong, Y. S., "Effects of Dissolved Gas

Content on Pool Boiling of a Highly Wetting Fluid”, ASME J. of Heat Trans., Vol. 117, 687-692, 1995.

[4] Moffat, R. J., “Describing the Uncertainties in Experimental Results”, Exp. Thermal and Fluid Sci., 1:3-17, 1988.

[5] Suh, J. K., Kwon, H., Lee, U. C., Park, G. C., “The Effect of Dissolved Gas on Boiling Incipience and Subcooled Boiling Heat Transfer”, Second Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety Fukuoka, Japan, October 15-18, 2000

표 1. 미포화 비등 열전달계수 비교

Pressure (bar)	Heat Flux [W/m ²]	h(w/o) [W/m ² k]	h(w) [W/m ² k]	%[$\frac{h(w)-h(w/o)}{h(w/o)} \times 100$]
1	0.662×10^9	856	888	3.7
	0.928×10^9	974	1342	37.7
	1.117×10^9	1245	1508	21.1
	1.321×10^9	1477	1709	15.7
	1.628×10^9	1770	1938	9.5
	1.902×10^9	2030	2199	8.3
3	0.989×10^9	1007	1038	3.0
	1.319×10^9	1215	1436	18.1
	1.489×10^9	1468	1637	11.5
	1.706×10^9	1796	1891	5.2
	1.957×10^9	1867	2193	17.4
5	1.305×10^9	1196	1211	1.2
	1.458×10^9	1273	1362	6.9
	1.601×10^9	1381	1570	13.6
	1.777×10^9	1560	1833	17.5
	1.898×10^9	1680	1954	16.3
	1.982×10^9	1758	1836	4.4

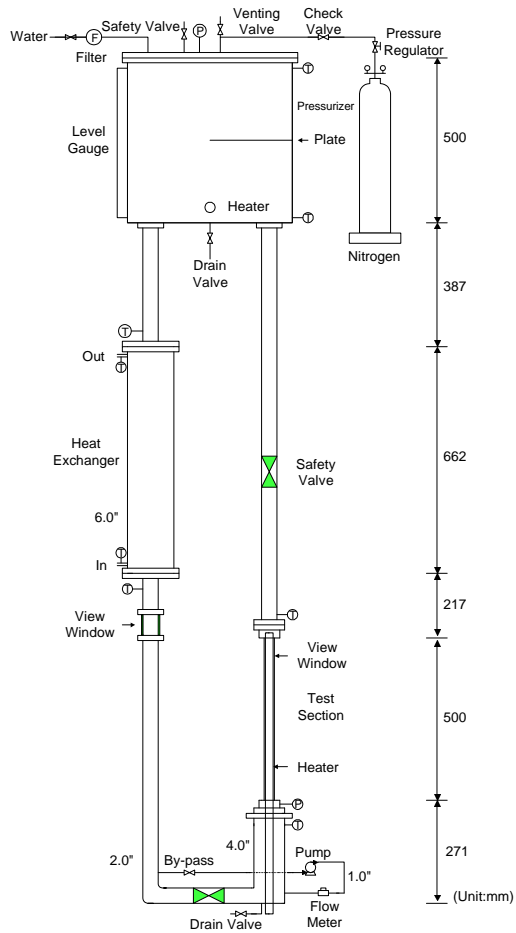


그림 1. 실험장치 개략도

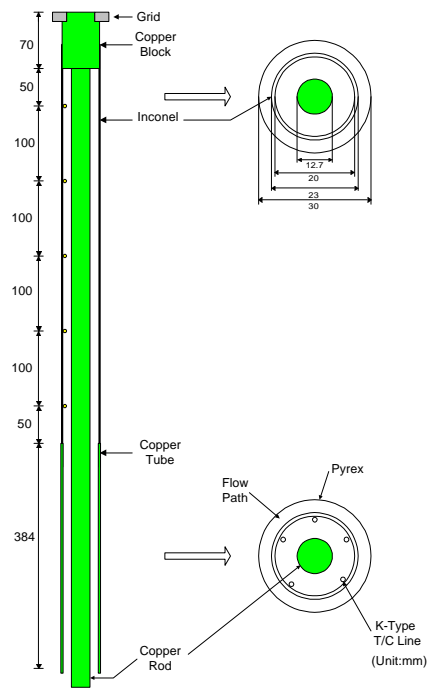


그림 2. 시험체적부 및 열전대 위치

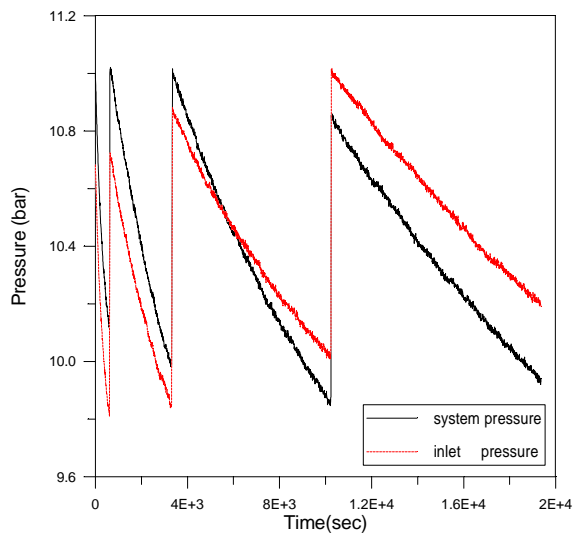


그림 3. 가스를 유체에 포화시키는 과정

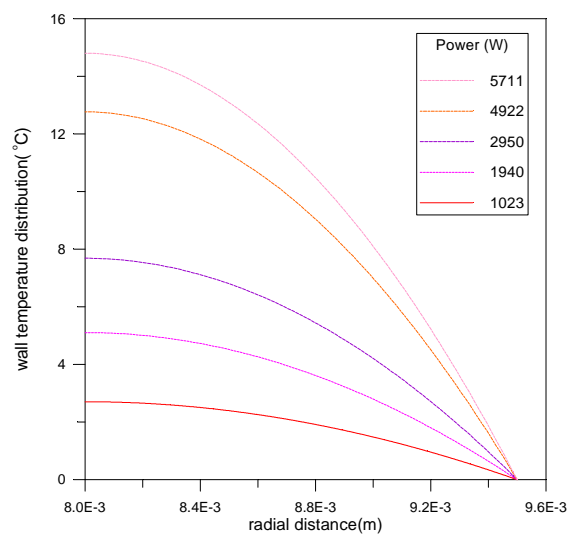


그림 4. 출력에 따른 전열봉 내부의 온도 분포

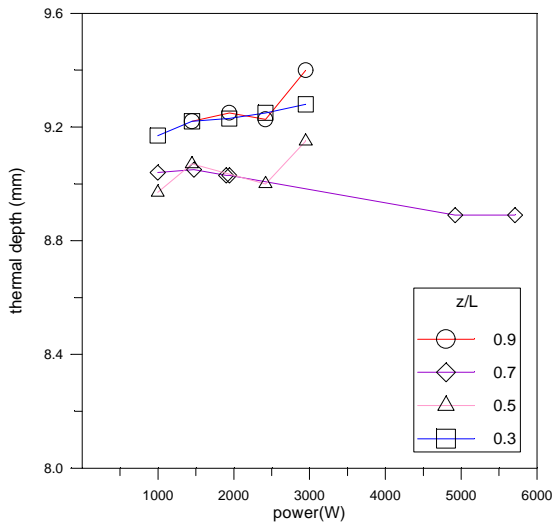


그림 5. 열전대의 열전 깊이

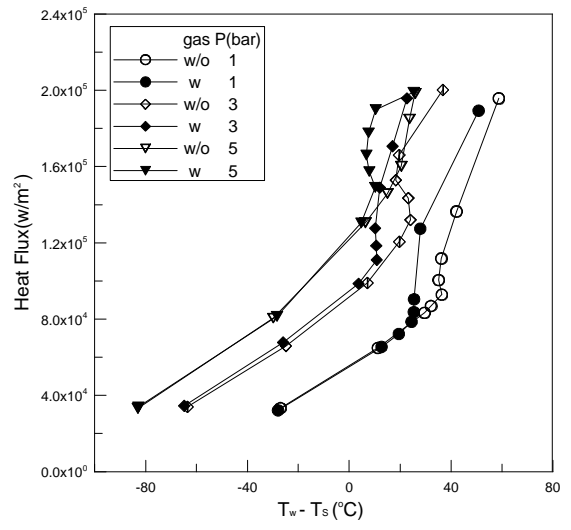


그림 6. 열속 증가에 따른 열전달 곡선

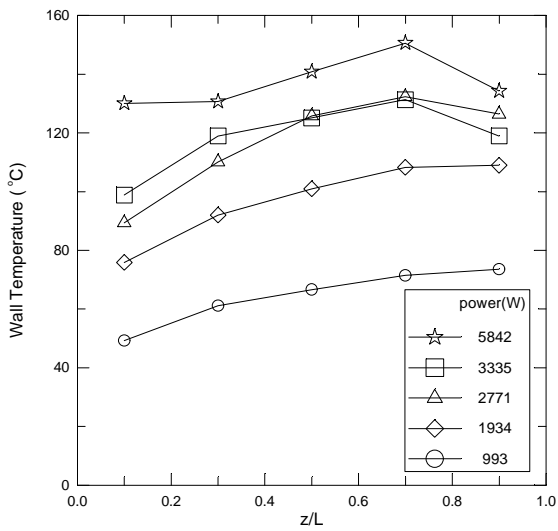


그림 7. 축방향 벽면 온도 분포

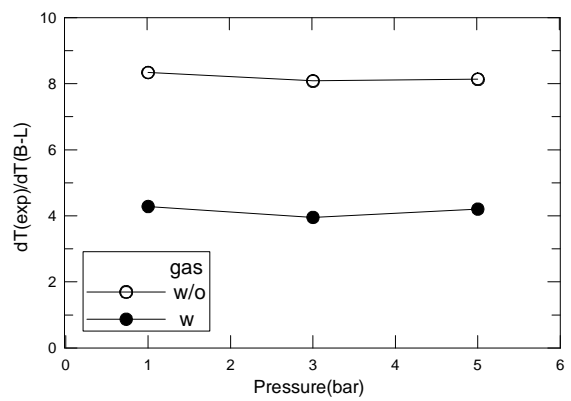


그림 8. Bergles-Rohsenow의 비등개시 상관식과 비교