

'99 춘계학술 발표회 논문집
한국원자력학회

용해가스가 정상 및 과도 상태시 자연대류 열전달계수에 미치는 영향

The Effect of Dissolved Gas on Natural Convection Heat Transfer Coefficients in Steady State and Transient

서정관, 박군철

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

배운영, 이두정

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

비응축기체를 사용하는 가압기의 열수력 설계에서 용해가스 존재시 열전달 특성을 파악하는 것은 중요하다. 본 연구에서는 자연 대류시 용해가스가 미포화 비등 개시와 핵비등 열전달 계수에 미치는 영향의 실험 결과를 제시한다. 가열되는 시험체적부(D=23 mm, L=500 mm)에서 벽면 온도의 강하를 측정하여 미포화 비등이 발생하는 열속을 평가하였다. 압력 강하에 의한 과도 실험에서는 용해가스의 분출 과정에서 각 부의 온도 변화를 측정하여 용해가스의 영향 평가를 수행하였다.

Abstract

The knowledge of the heat transfer characteristics in the presence of dissolved gas is of importance in thermal hydraulic design of pressurizer which is using noncondensable gas. This paper reports the results of an experimental investigation of the dissolved gas effect on the onset of subcooled boiling in water and the nucleate boiling heat transfer coefficients at natural convection. From the measurement of the wall temperature drop at heated test channel(D=23 mm, L=500 mm), it is possible to evaluate the heat flux at which the subcooled boiling occurs. In the transient experiments of depressurizing, the dissolved gas effects were investigated with the temperature variations of a local position when dissolved gas is liberated.

1. 서론

중소형 일체형 원전에서 채택하고 있는 자기가압 방식의 가압기는 원자로내 상부에서 질소가스 분압과 증기분압을 이용하여 스스로 압력을 조절하는 형태이며, 가압기에 용해되어 냉각재 속에 존재하는 질소는 계통의 열전달 현상에 영향을 주게 되어 실험적으로 평가할 필요가 있다.

용해 가스와 관련된 기존의 실험연구에서 McAdam(1949) 등은 증기를 용해시킨 물을 사용하여 미포화 비등 영역에서 강제대류 실험을 수행하였는데 부분 발달된 핵비등 영역에서는 열전달이 현저히 향상되었으나 단상과 완전 발달된 핵비등 영역에서는 용해가스의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. Yezhova(1985) 등은 전기적으로 가열되는 지름 8 mm의 관에서 압력 9.8,13.7,16.7 MPa, 질량유속 1000~3700 kg/m²s 조건의 강제순환 실험을 수행하였는데 가스의 분출은 벽면의 온도를 감소시키고 열전달계수를 증가시키는 것으로 나타났다. 아냉각도가 큰 영역에서는 임계열속이 약 20%까지 감소하였고 아냉각도가 작으면 가스가 제거된 경우와 가스를 포화시킨 경우의 차는 감소하였다. Chao(1994) 등은 연구용 원자로에 적용하는 열수력 안전 코드의 적절성을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 대부분의 연구용 원자로는 1~5기압에서 가스가 제거되지 않은 물을 냉각재로 사용한다. 상압에서의 실험 결과 용출된 가스는 더 낮은 벽면 온도에서 기포를 형성시켜 열전달을 향상시키고 유체의 온도를 높이게 되었다. 따라서 가스가 제거된 유체보다 가스가 포화된 유체는 더 빨리 이상유동이 된다. 미포화 비등영역에서 열전달 계수는 20~50% 증가하였고 유속은 발달된 이상유동으로 인해 10% 정도 감소하였다. You(1995) 등은 수조비등에서 FC-72를 작동 유체로 하여 용해 가스와 관계된 다양한 실험을 수행하였는데 용해가스가 존재하는 경우 비등이 시작되어 핵비등으로 진행되는 구간에서 hysteresis가 존재하고 이것은 용해가스의 농도가 증가할수록 감소하였다.

본 연구에서는 실험 조건에서의 결과를 일체형 원전에 적용하기 위한 Scaling 해석을 통하여 무차원수를 도출하였고, 이것으로 표현되는 단상 자연대류 열전달 상관식을 개발하였으며, 가스가 용해된 경우와 제거된 경우 각각에 대한 비등개시 열속 및 미포화 핵비등에 대한 해석을 수행하였다. 또한 초기 열속과 루프내 유속에 변화를 주며 압력강하에 의한 과도실험을 수행하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

본 연구의 실험장치는 그림 1에 나타낸 것과 같이 일체형 원전인 SMART를 대상으로 Scaling을 수행하여 설계하였다. 노심을 제외한 부분은 상부 공동과 하부 공동으로 설정하였고 상부 공동은 노심 상단에서 원자로펌프 하단까지 정하였다. 길이 방향의 비는 1/4이며 노심에서의 유로 면적은 1개의 channel을 선택하였다. 출력은 SMART의 평균 선출력밀도가 10.9 kW/m이므로 사고 후 잔열을 5%라고 가정하면 545 W/m가 되고 이것을 열속으로 나타내면 1.826×10^4 W/m²가 된다. 실험은 이 열속을 기준으로 상사해석을 한 후 필요한 범위에 따라 수행되었다. 실험 결과는 자연순환 열전달상관식에서 일반적으로 사용되는 무차원수로 표현되었는데, 실험에서의 Rayleigh 수 범위는 SMART의 Rayleigh 수 범위를 충분히 포함하고 있다.

주 루프 계통은 시험 제적부, 열교환기, 가압기, 순환펌프 등으로 구성되어 있고 2 인치 스테인레스관으로 연결되어 있다. 노심 하부는 4 인치 SUS304로 되어 있으며 우회 유로는 1 인치 스테

인레스관을 사용하였다.

시험 제작부에는 질소 분출 현상을 가시화하기 위해 내경 30 mm, 높이 500 mm인 시창을 설치하였다. 전열관은 외경 23 mm, 두께 1.5 mm, 길이 500 mm인 인코넬을 사용하고 교류 전원을 양단에 연결하는 직접가열 방식을 채택하였다. 인코넬에 전원을 연결하기 위해 상부는 외경 23 mm, 길이 70 mm인 구리봉을 은납용접하고, 외경 12.7 mm, 길이 960 mm인 구리봉의 끝 부분에 30 mm의 나사산을 내어 연결한 후 인코넬의 안쪽을 통하여 바깥으로 빼냈다. 인코넬 하부는 외경 22 mm, 두께 1.5 mm, 길이 384 mm인 동관을 용접한 후 루프에 고정시키고 루프 바깥으로 나온 부분에 전원을 연결하였다. 전열관과 실험 루프가 연결된 부위는 전류가 흐르지 않도록 테프론을 사용하여 절연하였다. 사용된 관의 저항값은 0.006오옴이고 출력은 6.3kW까지 가능하다. 전열관의 표면 온도를 측정하기 위해 인코넬의 표면에 2mm의 구멍을 내고 안쪽으로부터 K-type 열전대를 용접하여 유동에 영향을 주지 않도록 하였다. 위치는 다섯 곳이고 동일 간격(100 mm)의 나선형으로 부착하여 대칭성을 확인할 수 있도록 하였다. 그림 2에 시험 제작부의 상세도 및 열전대의 위치를 나타내었다.

열교환기에는 1/2 인치 동관을 나선형으로 세 개 설치하였고 가로/높이 방향의 피치는 SMART와 동일하게 각각 16.5/13.5 mm이다. 열교환기의 내경은 159.6 mm이고 높이는 662mm이며 하단은 노심 상단으로부터 217 mm가 되도록 하였다. 1차측 유체가 동관 사이로 흐르도록 내부에 외경 42.5 mm, 길이 600 mm인 원통형 구조물을 설치되었다. 2차측 유입수는 아래 부분으로부터 윗 방향으로 흐르며 1차측 온도 분포의 비대칭성을 줄이기 위해 120도 간격으로 주입된다. 열교환기의 하부에는 압력 강하에 의한 과도 실험시 질소분출 현상을 가시화하기 위한 시창이 설치되었다.

질소농도 조절 탱크인 가압기는 지름, 높이가 각각 500 mm이고 내부 용적은 98 리터로 20 리터인 순환용수의 양 보다 충분히 크게 하여 실험 조건이 유지되도록 설계하였다. 초기조건을 맞추는데 사용하기 위해 5 kW 전열봉을 2개 설치하였고 루프내 비유속성가스를 제거할 때 이용될 수 있도록 방출밸브를 부착하였다. 또한 과압이 발생할 경우를 위하여 안전밸브를 설치하였다.

초기 실험 루프에 균일한 질소농도를 맞추거나 강제순환 실험시 유체의 유동이 필요하다. 이를 위해 우회 유로를 만들어서 펌프를 설치하였는데 우회 유로에는 밸브를 부착하여 자연순환 실험시 분리할 수 있게 하였다.

본 실험 장치의 전열관은 균일한 열속을 필요로 하므로 직접가열 방식을 채택하였다. 이러한 전원 공급을 위해서는 저항이 작으므로 전압이 작고 전류가 커야 한다. 그래서 전원은 단상의 10Volt, 1000A가 흐를 수 있는 트랜스(10kW)에 슬라이더스(10kW)를 연결하여 출력전압을 조절하며 변화시키었다. 전압안정도는 설정치의 $\pm 1\%$ 이내이다.

압력계, 열전대 등의 센서 신호와 출력 전압, 전류는 자료획득장치(HP3852A)를 통해 처리되었다. 압력 측정 센서의 측정 범위는 0-20 kg/cm²이며 Moffat(1988)이 제안한 방법에 의한 측정 오차는 ± 0.002 MPa이다.(95% 신뢰구간) 온도 측정은 전열관을 제외한 곳은 T-type 열전대를 사용하였으며 가압기 상하부, 열교환기 입출구, 냉각수 입출구에는 직경 1.6 mm, 시험제작부 입출구에는 1 mm의 열전대를 설치하여 반응도를 향상시켰다. 전열관에는 직경 1.6 mm의 K-type 열전대를 다섯 곳에 설치하였다. 실험 전후에 항온조에서 Labfacility LTD사의 PT100 백금 온도 센서와 비교 검증을 통하여 보상 곡선을 도출하였고 이 백금온도 센서는 0°C ~ 100°C에서 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 의 오차를 가진다. 열전대의 측정 오차는 측정 위치에 따라 다르나 최대 $\pm 0.69^\circ\text{C}$ 이다.

2.2 실험 조건 및 방법

실험은 자연순환의 정상상태와 과도상태 실험으로 나뉘어 수행되었다. 자연순환 실험은 1, 3, 5, 10 bar에서 수행하였으며 2차측 냉각수 유량을 1.8 LPM으로 고정하여 냉각수를 일정하게 하였다. 열속의 범위는 $2.6 \times 10^4 \sim 1.69 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 이며 1.3 bar에서는 가스가 있는 경우와 없는 경우 각각에 대해 수행하였다. 이때 시험 제작부의 유체 온도는 $24.0 \sim 60.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 이며 벽면 온도는 $54.1 \sim 165.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 이다.

과도 실험은 질소를 주입하여 압력을 10 bar로 유지한 후 120초 이내에 상압으로 떨어뜨렸다. 1차측 유량을 자연순환과 노심에서의 질량속이 $722,483,407 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 으로 변화시키거나 자연순환시는 열속을 변화시키며 수행하였다. 질소 농도는 그림 3과 같으며 초기 조건의 온도와 압력에서의 포화 농도인데 최대 180 PPM까지이다.

실험 방법은 먼저 루프의 물에서 가스를 제거하기 위해 비등의 방법을 사용한다. 펌프로 유체를 순환시킨 후 보조 전열기와 주 전열관에 전원을 연결하고 상압에서 비등 온도 이상으로 가열한다. 그리고 냉각수를 회전시켜 초기 조건을 맞춘다. 질소를 용해시킬 때는 유체를 순환시키며 초기조건 보다 10% 높은 압력까지 주입한다. 이때 냉각수를 순환시켜 초기 조건이 유지되도록 한다. 질소가 물에 용해되면서 압력이 강하하는데 초기 조건의 압력까지 내려가면 다시 주입하고, 이와 같은 과정을 3회 이상 반복하여 주어진 온도와 압력에서의 포화 농도를 만든다.

자연순환 실험은 1, 3, 5, 10 bar에서 질소를 용해시킨 후 열속을 증가시키며 벽면과 유체의 온도, 열출력을 측정한다. 먼저 1.8 LPM의 냉각수를 회전시키고 전열관에 전원을 연결한 후 충분한 시간이 지나 평형에 도달하면 그때 위의 물리량들을 계측한다. 이와 같은 과정에서 단상(single phase)에서 이상(two phase)으로 되는 열속에서는 열속 증가를 작게 하며 비등이 개시되는 구간을 찾아낸다. 비등개시는 벽면의 온도가 감소할 때의 열속으로 잡는다.

압력강하에 의한 과도실험은 10 bar에서 정상순전으로 평형에 도달한 후 상부의 밸브를 개방하여 급격히 압력을 감소시키며 각 부의 유체 온도와 벽면 온도, 열속, 유량을 측정하여 과도상태시의 열전달 및 열교환기의 열제거율을 구한다. 이 실험은 1차측 유속과 열속을 변화시키며 질소의 분출에 따른 열전달 효과를 측정하는데 목적이 있다.

3. 실험 결과

3.1 자연대류 실험

그림 4는 가스를 제거한 물과 질소를 용해시킨 물 각각에 대하여 수행한 실험 결과를 나타낸 것이다. 실험은 압력의 효과와 동일 압력에서 가스의 유무에 따른 열전달 효과를 나타내고 있다. 먼저 압력의 효과는 압력 증가에 따라 비등 개시 온도가 증가하므로 높은 열속에서 비등이 발생함을 나타내고 있다. 1.3 bar에서는 가스가 제거된 경우와 질소를 용해시킨 곡선이 나타나 있는데 질소가 있는 경우에는 비등개시가 더 낮은 열속에서 발생함을 알 수 있다. 이것은 용해 질소가 핵 비등이 일어나기 전에 먼저 분출되므로 용해되지 않은 경우보다 낮은 열속에서 ONB를 유발하기 때문이다. 따라서 미포화 비등영역에서 열전달이 향상됨을 나타내고 열속이 증가하여 가스가 충분히 방출되었을 때에는 가스가 없는 곡선과 만나고 있음을 나타내고 있다. 이것은 열속이 증가하여 비등이 충분히 발달하면 가스 기포의 수가 줄어들 뿐만 아니라 수증기 기포가 열을 전달하는 주된 기능을 하기 때문이다.

단상유동 자연순환 열전달 상관식은 식 (1)과 같은 무차원수의 상관식으로 표현되고 본 실험에서의 결과는 식 (2)와 같다.

$$Nu = a(Ra)^b \quad (1)$$

$$Nu = 1.3306(Ra)^{0.1945} \quad (2)$$

$$\text{여기서 } Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (3)$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_w - T_b)D_h^3}{\nu^2} Pr \quad (4)$$

위의 실험상관식은 그림 6에 나타난 것과 같이 $\pm 5\%$ 의 범위에서 실험 결과를 포함하고 있다. 주어진 식에서 단상 자연대류 열전달에서는 압력의 효과와 가스 용해의 효과가 나타나지 않음을 알 수 있다. 따라서 이식은 SMART의 단상 자연대류 조건에 적용 가능하다.

그림 5에는 Nusselt 수와 Rayleigh 수의 관계가 나타나 있다. 단상의 경우에는 일정한 상관식의 형태로 주어지나 이상의 경우에는 데이터가 넓은 영역에 분포하고 있다. 이것은 비등이 개시되는 열속이 외형적으로 모든 조건을 동일하게 설정한 실험에서도 다르게 나타나기 때문이다. 이러한 hysteresis 현상은 상압에서 가스를 제거한 경우의 2개 곡선이 다른 열속에서 단상의 곡선으로부터 이탈하고 있음에서 확인할 수 있다. 따라서 부분적으로 발달된 비등영역(partially developed boiling region)에서는 열전달을 상관식의 형태로 표현하면 불확실성이 증가한다. 이러한 이유로 부분발달 비등영역에서의 열전달계수는 상관식의 형태로 나타내지 않고, 가스가 제거된 경우와 포화된 경우의 상대적 열전달 계수만을 비교하였다. 비교 결과 상압의 미포화 비등영역에서 가스가 용해된 물에서는 가스가 제거된 경우보다 열전달계수가 6.7%에서 17.6%의 범위에서 더 크게 나타났으며 이러한 경향은 3 bar의 경우 최대 26%까지 더 높게 나타났다.

3.2 과도 실험

압력강하에 의한 과도 실험은 그림 7에 나타난 것과 같이 120초 이내에 10bar에서 상압으로 압력을 감소시키며 열출력, 유량, 벽면 온도, 노심 입출구 온도, 열교환기 입출구 온도, 2차측 입출구 온도 등을 측정하였다. 실험은 강제순환시는 노심에서의 질량속이 $722,483,407 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 의 세 경우와 자연순환시는 열속이 $161,124,91.8 \text{ kW/m}^2$ 의 세 경우로 수행되었으나 자연순환 중 열속이 가장 낮은 결과만을 대표적으로 나타내었다.

그림 8은 압력 강하시 열전달을 결정하는 지배적 인자인 벽면의 온도가 시간에 따라 변하는 상태를 나타내고 있다. 강제순환의 경우 압력 강하가 시작되고 20~30초 경과한 후부터 30~40초 동안 급격히 온도가 감소하는데 이것은 질소가 감압에 따라 분출될 때 시간 지연이 있어서 급격한 분출이 시작되면서부터 벽면 온도를 낮추기 때문이다. 또한 이때 상승류가 증가하여 열제거가 활발히 진행된다. 벽면온도는 압력 강하에 따른 상승류가 감소하면서 최저점 이후 3~5 °C 정도 증가하게 된다. 1차측 유량의 영향은 유량이 감소할수록 벽면 온도의 강하는 증가하는 것으로 나타났다. 자연대류의 경우 벽면 온도의 강하는 압력 강하 곡선과 유사한 경향으로 나타난다. 이것은 압력강하에 따른 포화온도 감소로 비등이 발생하고 동시에 질소가 분출되면서 미포화 비등영역에서의 열전달을 향상시키고 있기 때문이다.

그림 9와 그림 10은 각각 감압에 따른 노심 입출구의 온도 변화를 나타낸 것이다. 노심 입구는 자연 순환의 경우 온도가 증가하다 감소하여 초기의 온도로 됨을 알 수 있다. 노심 출구에서는 감

제순환이나 자연순환 모두 동일한 경향의 온도 변화를 나타내는데 처음 200초 동안 감소하다 다시 증가하여 초기의 온도로 된다.

그림 11과 그림 12는 각각 열교환기 출구와 2차측 출구의 온도 변화를 나타낸다. 2차측 출구의 유체 온도는 1차측 출구의 유체온도와 유사한 경향으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 모두 압력 강하 후 유체의 온도가 증가하였는데 열교환기에서는 하향 유로가 형성됨에도 불구하고 질소가 분출되면서 상승하여 유체의 온도를 증가시킨 결과라고 해석된다. 이때 열교환기 하단의 가시화 시창을 통해 촬영한 결과를 분석하면 적정 유량에서는 열교환기의 하향 유로를 따라가던 유체에서 지속적으로 질소가 분출되어 상승하게 되나, 자연순환시는 하향 유동에 의한 질소의 공급이 지속되지 않아서 시간이 지나면서 분출량은 빨리 감소하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

용해가스가 열전달에 미치는 영향을 파악하기 위해 자연 대류시 비등 개시 및 미포화 비등영역에서의 열전달 특성을 평가했으며 감압에 의한 질소 분출시 각 부의 온도 거동을 측정하여 RELAP 전산코드의 비용축가스 모델 개선을 위한 데이터를 생성하였다. 본 연구에서의 결론은 다음과 같다.

- (1) 수직 환상관에서 자연대류시 단상 열전달 상관식을 도출하였다. 실험 상관식은 Rayleigh 수의 범위가 $2.2 \sim 28 \times 10^6$ 에서 구해졌으며 $k=1.3$ ($k=r_o/r_i$)이고 $H=143$ ($H=L/d$)이다. 상관식에서 압력의 효과는 나타나지 않으므로 SMART의 단상 자연대류 열전달 상관식에 적용 가능하다.
- (2) 미포화 비등영역에서 포화 가스 상태의 열전달 계수는 6.7~26% 증가하는 것으로 나타났고 비등개시에는 hysteresis가 있어서 비등개시 열속에 대한 확률적 표현이 요구된다.
- (3) 감압에 따른 질소 분출시 노심에서의 열전달은 급격히 증가하고 열교환기에서의 열제거율은 향상되는 것으로 나타났다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] Yezhova, L. I., Polyakov, V. K., Polyakov, R. YE, and Smolin, V. N., "The Effect of a Gas Dissolved in a Coolant on Boiling and Burnout Heat Transfer", Heat Trans.-Soviet Research , Vol. 17, No . 2, 84-89, 1985.
- [3] Chao, W. W., Kunze, J. F., Dai, W., and Loyalka, S. K., "The Effect of Dissolved Gas Bubble Nucleation on Natural Convection Heat Transfer in Narrow Channels", Nuclear Technology, Vol. 105, 261-270, 1994.
- [4] 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.
- [5] Moffat, R. J., "Describing the Uncertainties in Experimental Results", Exp. Thermal and Fluid Sci., 1:3-17, 1988.

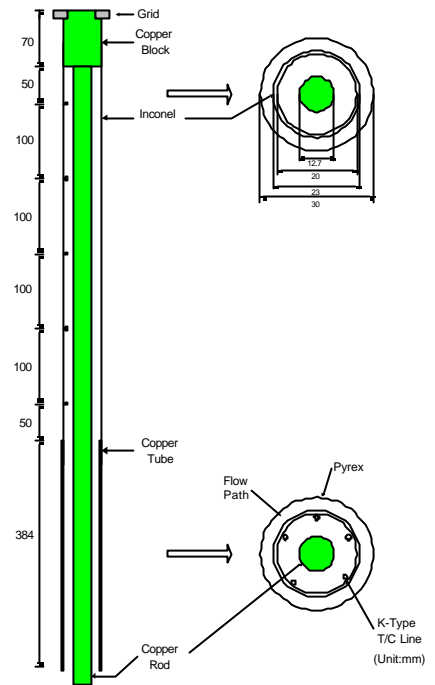
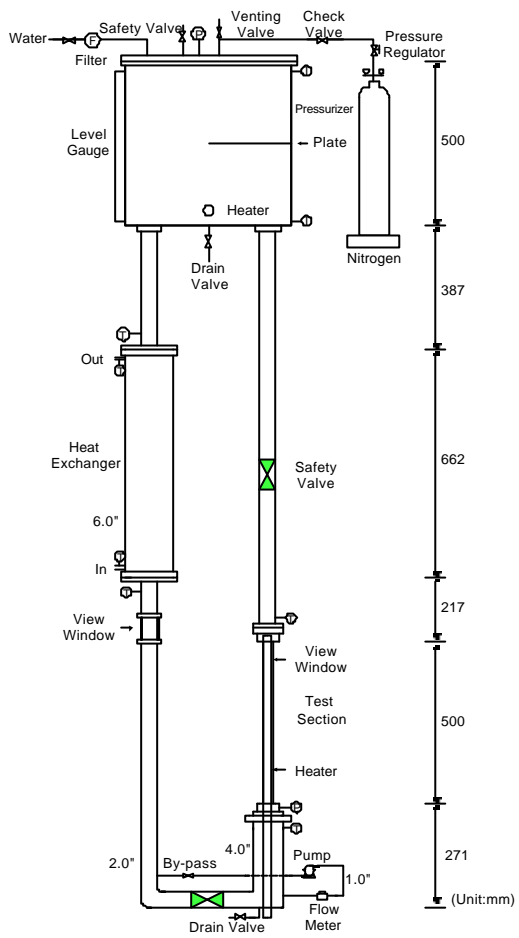
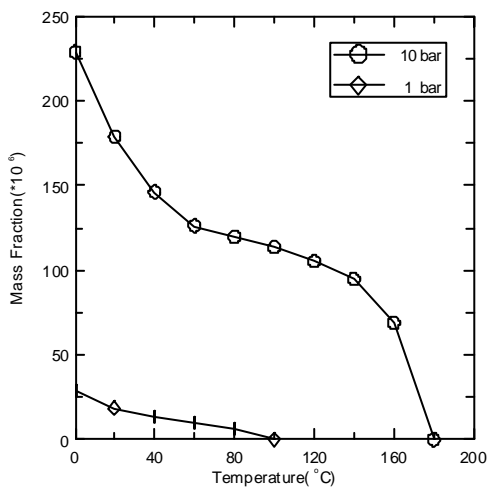


Fig 1. Schematics of Experimental Facility

Fig 2. Test Section



Nitrogen in Water
at the Experimental Conditions.

Fig 3.
Solubility

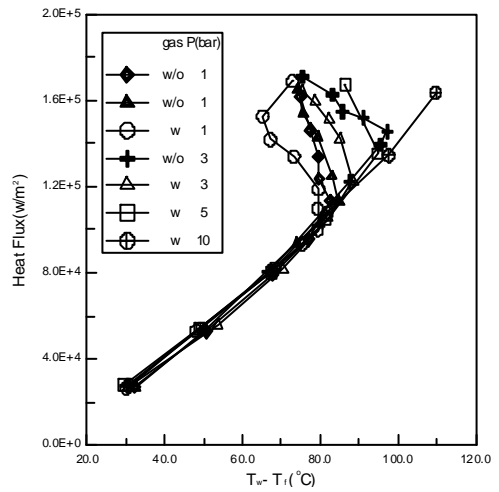


Fig 4. Onset of Degassing and
Vaporization (1/d=85,nat.conv.)

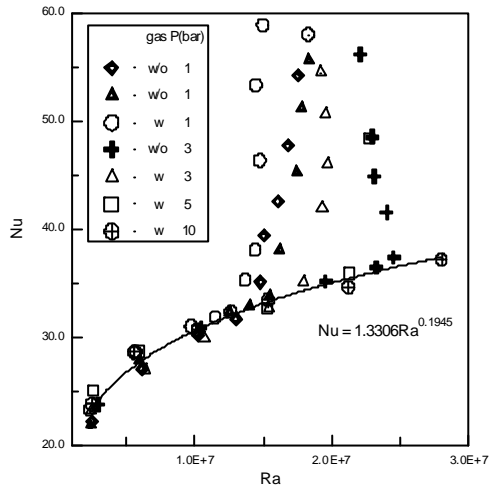


Fig 5. Experimental Nusselt Numbers vs. Rayleigh Numbers

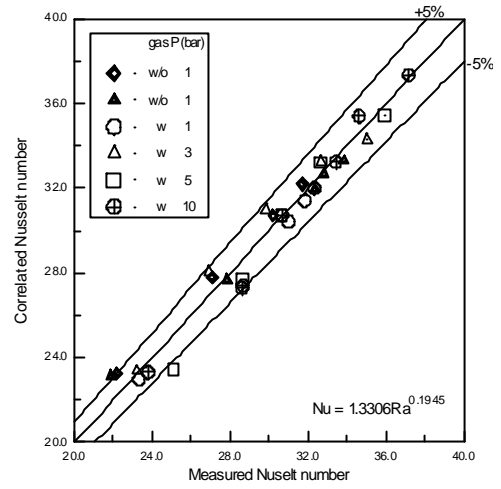


Fig 6. Correlated Nusselt Number vs. Measured Nusselt Number

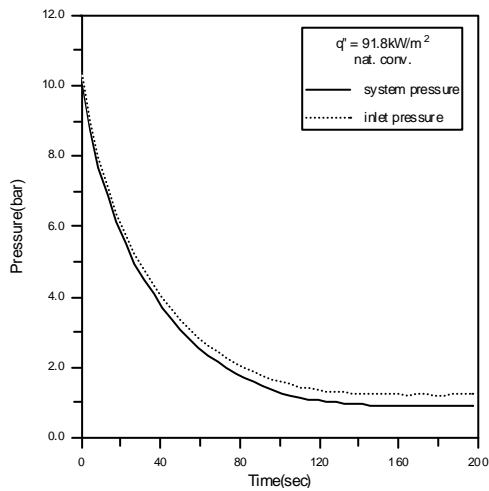


Fig 7. Typical Pressure Drop Curve

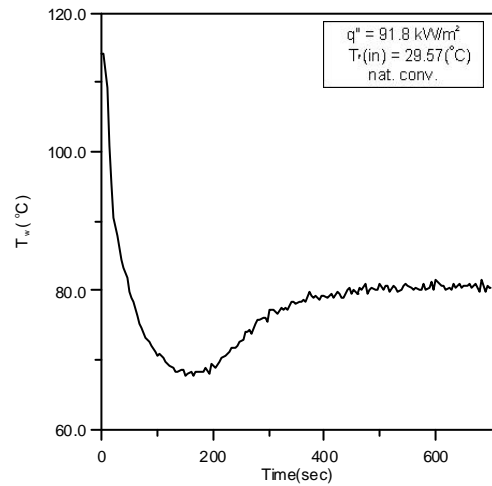


Fig 8. Wall Temp. Variation with Depressurizing ($l/d=85$)

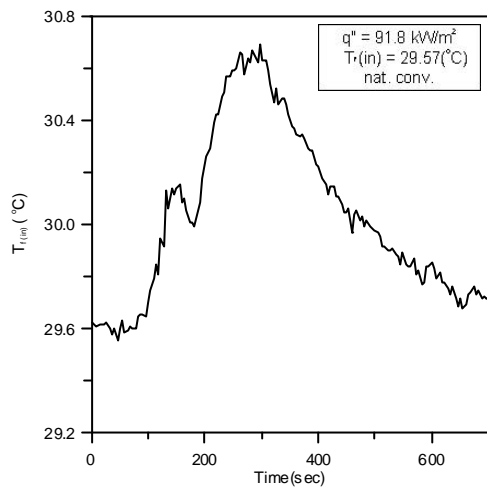


Fig 9. Core Inlet Fluid Temp. Variations

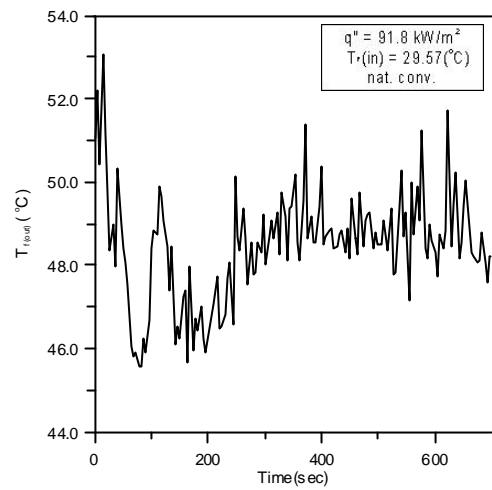


Fig 10. Core Outlet Fluid Temp. Variations

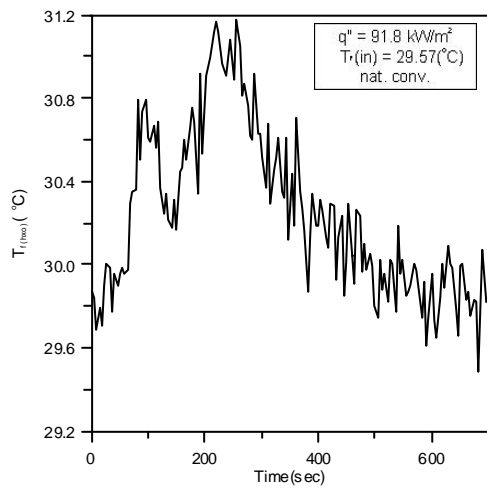


Fig 11. H/X Outlet Fluid Temp. Variations

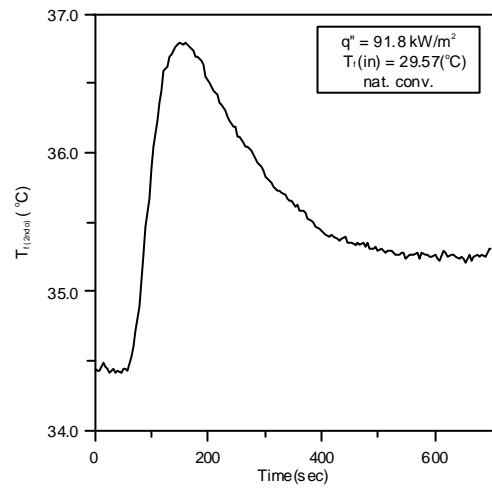


Fig 12. Secondary Coolant Outlet Temp. Variations