

다양한 압력조건에서 과냉 유동비등의 가시화 실험 연구

Visualization Study of the Subcooled Flow Boiling under Various Pressure Condition

백기봉, 천세영, 문상기, 윤영중, 박종국

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

과냉 유동비등에서 기포 특성을 디지털 스틸 카메라를 사용하여 단면 가열, 수직 사각 채널에서 가시화 실험연구를 수행하였다. 실험대의 유동면적은 10×10 mm이고, 가열면적은 3×100 mm이다. 다양한 압력, 열유속, 질량유속과 국부건도 조건에서 de-ionized 물을 사용하여 실험을 수행하였다. 사진과 image processing 프로그램을 사용하여 가열 부 근처 영역의 평균 기포크기를 포함하는 여러 변수들을 측정하였다. 그 결과 압력이 증가됨에 따라 평균 기포크기는 감소하지만 기포수는 증가되었다. 압력이 증가하면서 1.50 ~ 4.00 MPa 범위일 때 가열벽과 유체의 온도차가 급격히 상승되었지만, 압력이 4.00 MPa를 초과하면서 가열 벽과 유체의 온도차가 급격히 감소되었다.

Abstract

The behavior of bubbles in subcooled flow boiling have been investigated photographically in vertical rectangular channel, one-side heat heating with aid of a digital still camera. The test section has a flow area of 10×10 mm and heated area of 3×100 mm. The test has been performed for de-ionized water with variation of pressure, heat flux, mass flux and local quality. The various parameters including average bubble size were measured near the heated surface with photos and image processing program. Consequently, as the pressure increased, the average bubble size decreased but the number of bubbles increased. As the pressure increased, the temperature difference between heater wall and bulk dramatically increased at pressures of 1.50 ~ 4.00 MPa. When the pressure exceeded about 4.00 MPa, the differential temperature dramatically decreased.

1. 서 론

과냉 유동비등 현상은 복잡한 특성을 가지고 있음에도 불구하고 단상유동에 비해 열전달 효율이 높아 원자력 발전의 비등경수로, 보일러, 증기발생기, 열교환기, 다양한 에너지 변환시스템 등에서 적용되고 있다. 또한 비등현상에 대한 기존 연구는 실험 측정값을 이용하여 열전달 계수를 예측하는 실험식 개발에 집중되어 있다. 하지만, 지금까지 제시된 실험식들은 비교적 정확한 열전달 계수를 예측할 수 있지만 대부분 그 적용범위가 좁고 특정 형상에 대해서만 적용되는 단점을 갖는다. 이는 과냉 유동비등 현상에 대한 정확한 이해가 부족하기 때문이다.

이러한 문제를 해결하기 위한 방법의 하나로 과냉 유동비등 현상에 관한 보다 정확한 이해를 도모하기 위해 가시화 실험이 1951년부터 지금까지 수행되어 왔다. Gunther¹⁾는 기포성장과 붕괴 과정을 조사하였고 평균 기포반경, 기포 수명, 단위 면적당 기포 수, 기포 면적비가 유체유속과 과냉도가 증가할수록 감소하고, 열유속이 증가할수록 기포 수, 기포 면적비가 크게 증가됨을 확인 하였다. Tong 등²⁾은 기포 크기에 대한 질량유속의 영향을 확인하였고, 과열된 벽면에 과열의 액체층이 존재함을 제시하였다. 또한 과냉 유동비등에서 가열표면 근처의 기포직경은 질량유속에 반비례함을 확인하였다. Valle와 Kenning³⁾은 낮은 벽면 과열도에서 기포수명은 0.6 ms 이하이고, 대다수의 기포들이 핵 생성지점에서 성장하고 뭉쳐지며, 단지 몇 개의 기포만이 벽을 따라 미끄러지는 것을 관찰하였다. Bibeau와 Salcudean⁴⁾은 대기압 조건에서 다양한 과냉조건과 질량유속에서 가열벽면에 존재하는 기포의 미끄러짐과 응축 동안 큰 기포보다 작은 기포들이 액체로 방출되고 최대 기포 크기는 0.8 - 3 mm로 다양하게 나타나는 것을 관찰하였다. Zeitoun 등⁵⁾은 과냉 유동비등에서 기포 특성과 평균 직경을 관찰하였다. Yin 등⁶⁾은 환상관에서 R-134a를 사용 핵비등 시작점에서 가시화 실험을 하였다. 기포생성빈도는 질량유속과 과냉도가 증가함에 따라 감소되고, 기포 크기는 과냉도에 큰 영향을 받는다고 제시하였다. Maurus, Warrior 등^{7,8)}은 CCD 카메라를 이용하여 기포 뭉쳐짐 현상을 관찰하였다. Prodanovic 등⁹⁾은 기포 크기와 기포 수명은 낮은 열유속 범위에서 열유속과 유속에 큰 영향을 받지만, 높은 열유속 범위에서는 압력과 과냉도가 증가하면서 기포 크기와 수명이 감소되는 것을 관찰하였다. Lim¹⁰⁾은 0.30 - 2.00 MPa의 압력조건에서 수조비등과 유동비등에서 압력이 증가하면 기포 크기는 작아지고 열유속이 증가하면 기포 크기와 개수가 증가함을 관찰하였다. Celata 등¹¹⁾은 0.50 - 3.00 MPa까지 실험을 수행하였지만, 빠른 유속조건에 의해 1 MPa 까지 기포 사진 데이터를 제시하였고, 기포의 양식을 4가지로 세분화 하였고, 열유속과 기포형태 및 가열표면 온도의 관계를 연구하였다. 이와 같이 많은 가시화 실험 연구가 이루어 졌지만 높은 압력조건에서 가시화 촬영기술의 어려움과 실험장치의 설계의 어려움으로 인해 주로 대기압이나 2.0 MPa를 넘지 못하는 압력조건에서 수행되었기 때문에 복잡한 비등현상을 보다 정확하게 관찰하는데 한계가 있다.

따라서 본 논문에서는 수직 사각채널 상향유동에서 물을 이용해 0.40 - 5.00 MPa의 다양한 압력 조건에서 가시화 장치와 Image Processing 프로그램을 이용해 과냉 유동비등 현상을 관찰하고, 압력이 기포에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 실험은 한국원자력연구소의 HHF(High Heat Flux) 열수력 루프를 이용하였다. 본 실험 장치의 최고 운전 압력은 10.0 MPa이고 최고 운전 온도는 310 °C를 갖는 순환형 폐 루프이다. 실험 장치의 개략도는 Fig. 1에 나타나 있다. 실험 장치는 순환펌프, 오리피스 유량계, 예열기, 실험대, 혼합기, 냉각기 및 가압기 등의 주요 부품으로 구성되어 있다.

순환유수가 펌프로부터 배출되어 오리피스 유량계의 밸브와 펌프의 회전수를 조절하여 유량이 제어되고, 예열기에서 실험조건에 맞는 실험대 입구 온도로 가열된다. 실험대의 압력은 고압 질소를 이용한 가압기를 통해 조절한다. Data Acquisition System을 통해 데이터를 수집하였고, 처리, 저장은 HP-VEE 프로그램을 이용하였다.

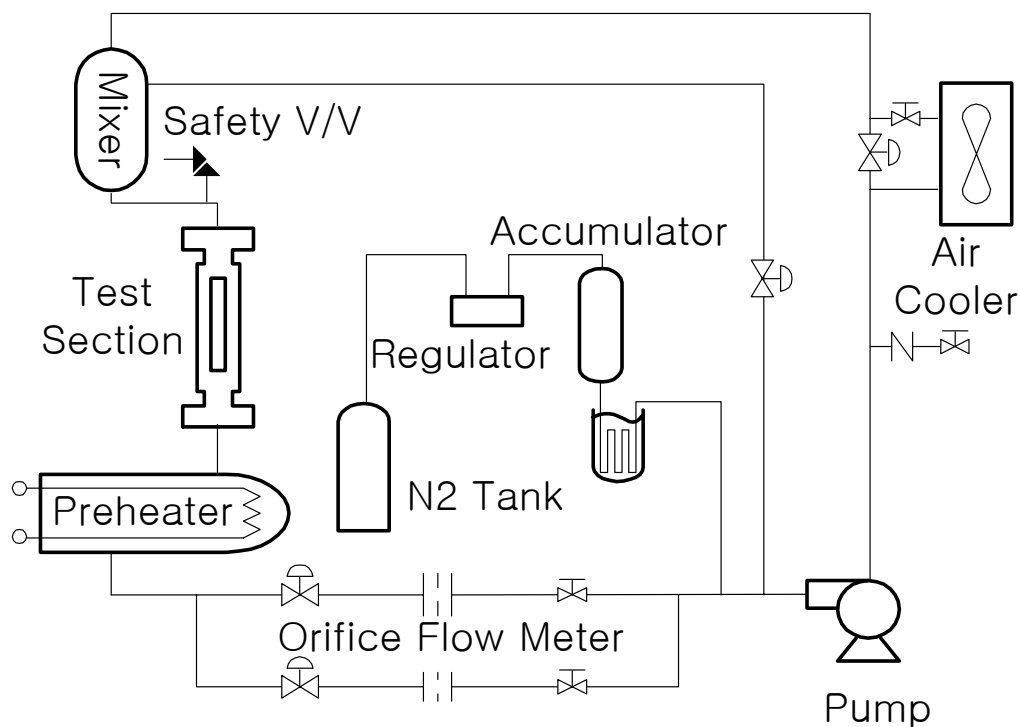


Fig. 1 Schematic of the experimental loop

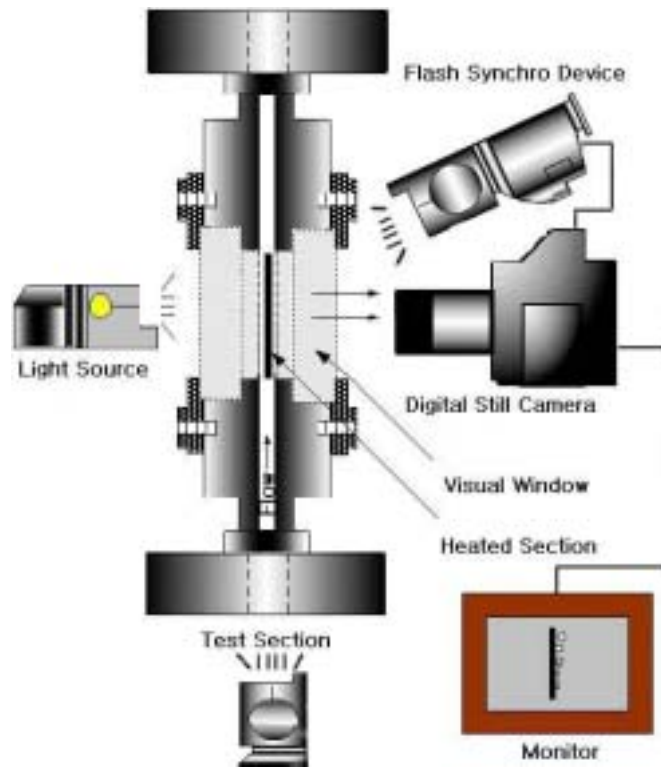


Fig 3. Illustration of the photographic system

재질의 절연체가 설치되어 있다. 부스바는 구리로 제작되었으며 히터의 열팽창을 흡수하기 위해 Flexible Joint를 설치하였다. 히터의 가열표면 온도 측정을 위해 0.5 mm K-type 열전대를 가열표면의 가운데에 설치하였다. 또한 가열표면에 부착된 열전대는 전력공급기의 한계 설정온도 제어용으로도 사용한다. 유체의 온도 분포를 측정하기 위해 가열표면 출구 부분에 가열표면으로부터 1.5 mm 간격으로 0.5 mm 열전대를 네 개를 설치하였다.

Fig. 3은 본 실험에서 사용된 가시화 실험 장치의 개략도를 보여준다. 가시화 장치는 Digital Still Camera를 사용하였다. Digital Still Camera는 KODAK DCS460C 모델을 사용하였으며, 본 카메라의 최대 해상도는 3060×2036 (6.23 Mpixels)이고 최대 노출 속도는 1/8700초이다. 렌즈는 105 mm MICRO NIKKOR 렌즈를 사용하였고, 조금 더 확대된 영상을 얻기 위해 Nikon PK-12 mm Extension 튜브를 추가 장착하여 사용하였다. 사진 촬영은 가열면의 정면과 양쪽 측면을 통해 이루어졌다. 유동비등은 유속이 빨라 Flash Duration은 1/28,000 sec인 Nikon Speedlight SB-28 플래시를 사용하여 촬영하였다. 카메라를 통한 영상은 노트북의 모니터를 통해 실시간으로 확인하였다.

유동 비등 가시화 실험은 다양한 압력조건에서 국부 건도(Local Quality), 열유속, 질량 유속을 실험변수로 실험을 수행하였다. 실험은 압력 0.40 ~ 5.00 MPa, 열유속 1.5 ~ 3.0

MW/m², 질량유속 500 ~ 2000 kg/m²s, 국부 건도 -0.101 ~ -0.060의 조건에서 수행되었다. 본 실험조건에서 불확실도는 압력 ± 0.5 %, 전력(power) ± 0.3 %, 유량 ± 1.8 %, 입구온도 ± 0.7 %이하 이다.

과냉 유동비등 실험에서 핵비등 현상은 국부조건에 많은 영향을 받는다. 또한 국부조건은 압력에 따라 변화된다. 이 논문은 다양한 압력조건에서 과냉 유동비등 실험이라는 점을 고려하여 일정한 국부 건도 조건에서 실험을 수행하였다. 일정한 국부 건도 조건을 만들어 주기위해 열역학적 평형상태를 이용한 식 (2)를 사용하여 입구온도를 계산하여 실험을 수행하였다..

$$x = \frac{h_{in} + \frac{q'' A_h}{GA_f} - h_f}{h_{fg}} \quad (1)$$

$$h_{in} = xh_{fg} - \frac{q'' A_h}{GA_f} + h_f \quad (2)$$

여기서 x 는 열전대 위치에서의 국부건도, h_{in} 는 실험대 입구 액체 엔탈피, q'' 는 히터에 가해진 열유속, A_h 는 실험대 입구로부터 열전대 위치까지의 열전달 면적, A_f 는 실험대 유로 단면적, G 는 질량유속, h_f 는 포화압력에서의 액체 엔탈피, h_{fg} 는 포화압력에서의 증발잠열이다.

각각의 가시화 사진들을 Image Processing 소프트웨어인 Image-Pro(plus)를 이용하여 기포변수를 측정하였고 측정변수 중 D_{eq} , 기포면적비 그리고 기포 밀도는 식 (3), (4), (5)로 정의된다.

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4 \times \text{기포 투사 단면적}}{\pi}} \quad (3)$$

$$\text{기포면적비} = \frac{\text{각 기포면적의 합}}{\text{사진 촬영된 가열 면적}} \quad (4)$$

$$\text{기포 밀도} = \frac{\text{기포 수}}{\text{사진 촬영된 가열 면적}} \quad (5)$$

3. 실험결과 및 논의

유동비등 실험 가시화 사진은 각 조건에 따라 정면과 측면에서의 기포 거동을 촬영되었다. 사진의 위치는 가열표면 온도측정을 위해 설치된 열전대를 중심으로 하였고, 각 사진의 크기는 정면 3×7.7 mm이고 측면은 2.1×7.7 mm이다.

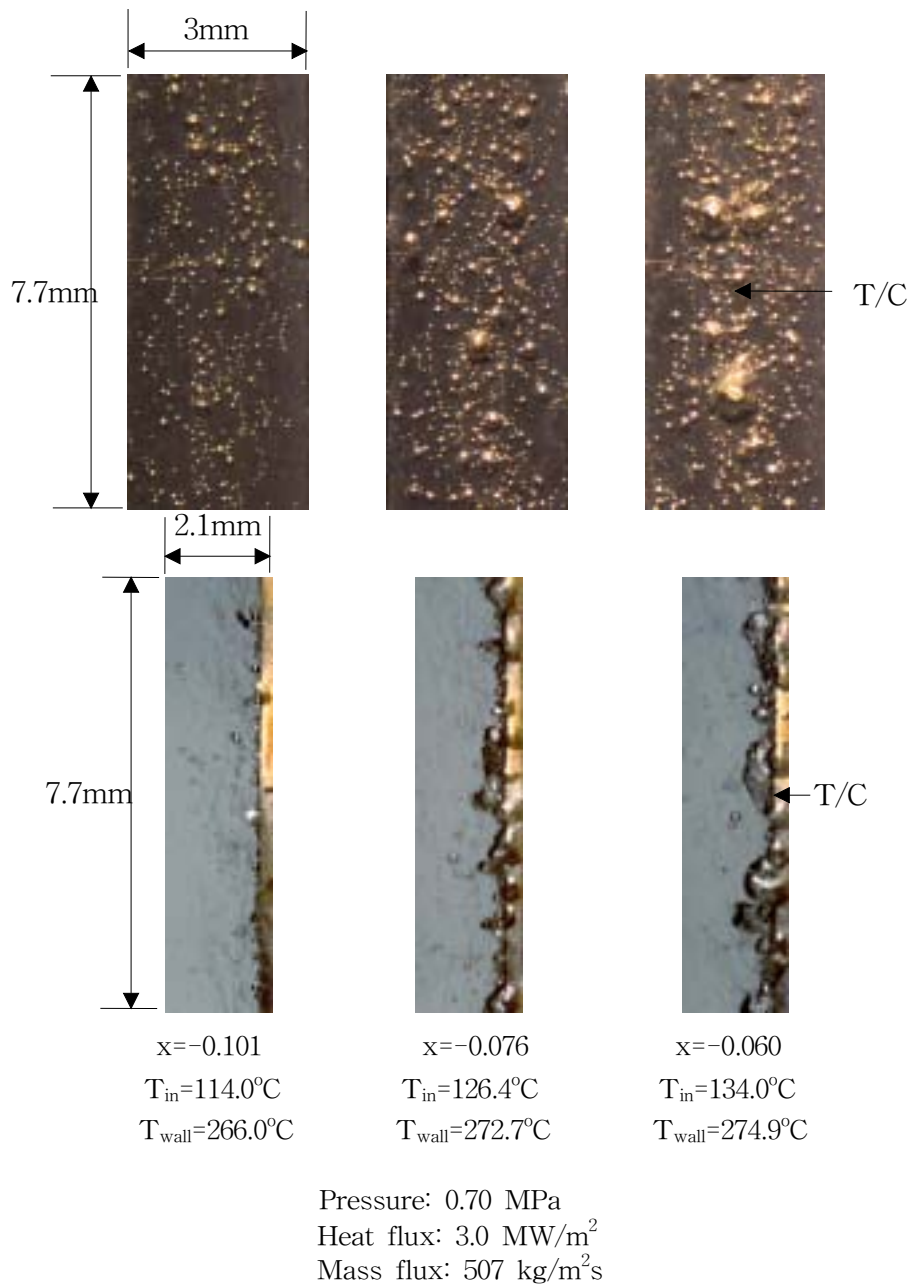


Fig. 4 Effect of local quality in flow boiling

Fig. 4는 일정 압력, 열유속, 질량유속 조건 하에서 국부 건도를 변경하면서 정면과 측면에서 촬영한 사진이다. 국부 건도가 증가함에 따라 기포 크기와 핵 생성지점의 수가 증가된다. 국부 건도가 커질수록 기포 뭉쳐짐에 의해 생성된 큰 기포들이 가열표면으로부터 떨어지지 않고, 유동방향으로 길게 늘어져 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 일정 압력, 열유속, 국부 건도 조건 하에서 질량 유속을 변경하면서 정면과 측면에서 촬영한 사진이다. 질량유속이 증가함에 따라 기포 크기와 핵 생성지점의 수가 감

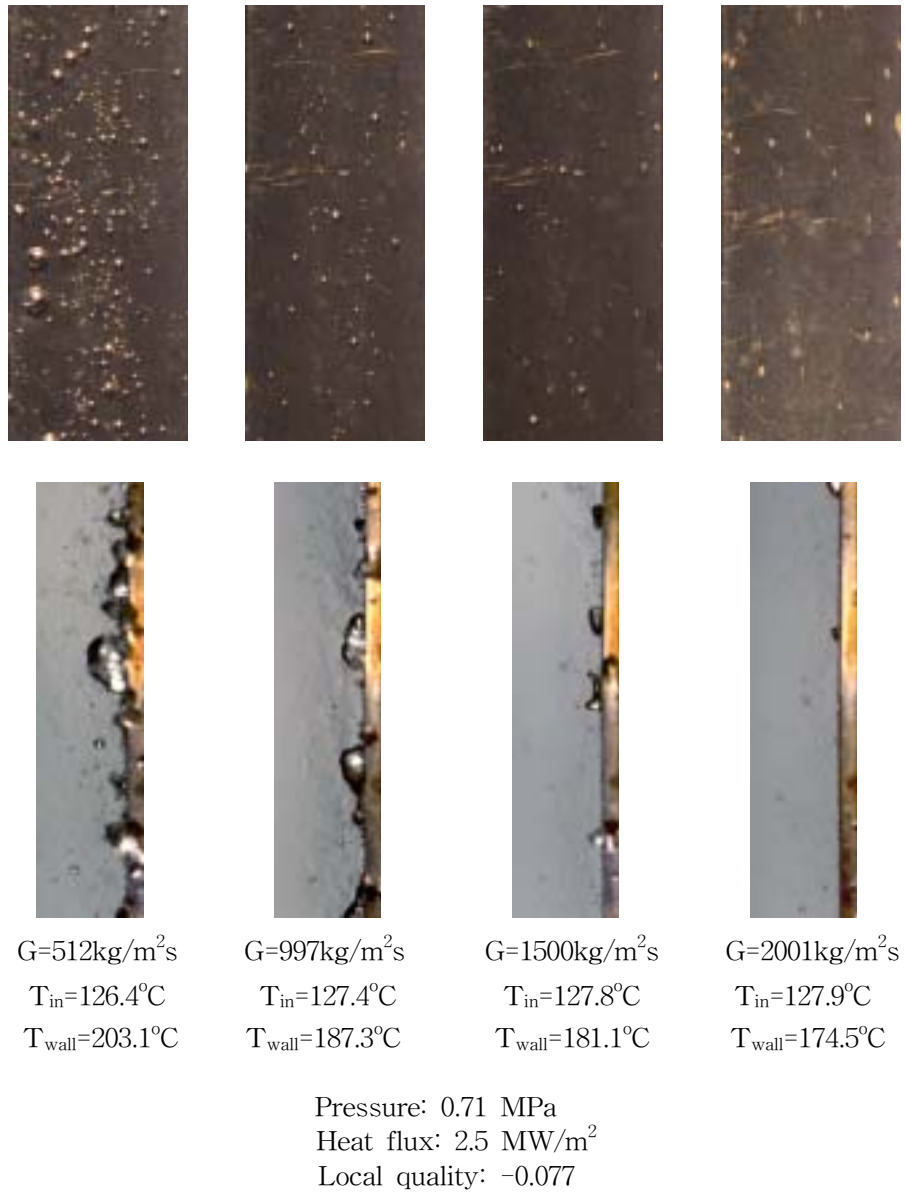


Fig. 5 Effect of mass flux in flow boiling

소된다.

Fig. 6은 일정 압력, 질량 유속, 국부 건도 조건 하에서 열유속을 변경하면서 정면과 측면에서 촬영한 사진이다. 열유속이 증가함에 따라 기포 크기와 핵 생성지점의 수가 증가된다. 높은 열유속 조건에서는 작은 기포들과 함께 큰 기포들이 관찰되었다.

기존 가시화 실험^{1),6),9),10)}에서 제시되었듯이 다양한 압력조건에서도 국부건도와 열유속이 증가할수록 핵 생성지점과 기포크기가 증가되어 기포 뭉쳐짐이 활발해 지고 질량유속이 증가할수록 핵 생성지점과 기포크기가 감소됨을 확인 할 수 있었다.

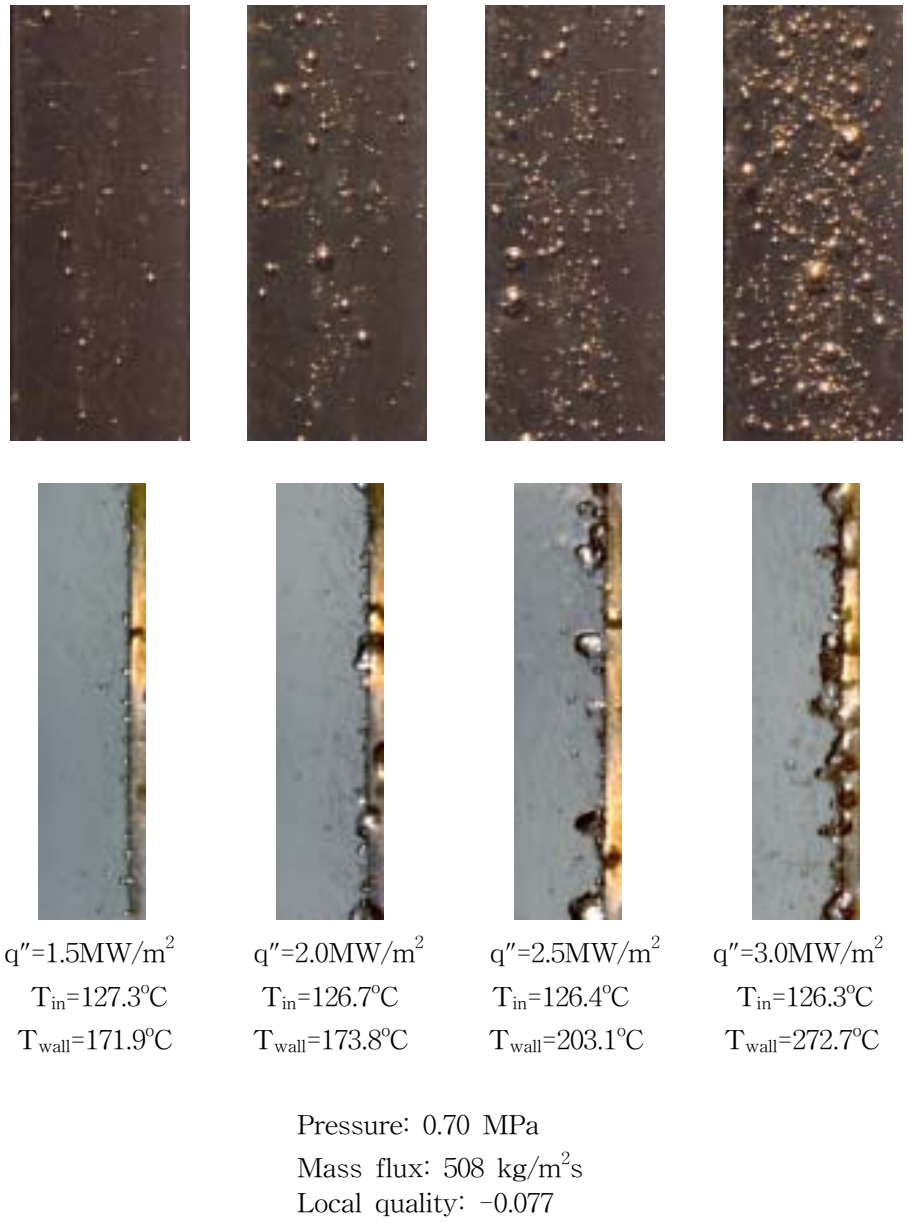


Fig. 6 Effect of heat flux in flow boiling

Fig. 7은 일정 질량 유속, 국부 건도, 열유속 조건 하에서 압력을 변경하면서 정면에서 촬영한 사진이다. 압력이 증가함에 따라 평균 기포 크기는 감소되고, 핵 생성지점은 증가된다. 실험의 3.02, 3.51, 4.03 MPa 조건에서 큰 기포가 생성되었고 압력이 4.03 MPa 이상이 되면서 큰 기포들이 사라지는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 7에 제시한 가시화 사진들을 Image Processing 소프트웨어인 Image-Pro(plus)를 이용하여 기포변수를 측정 한 값을 Table 1에 정리하였다. 압력이 증가할수록 평균기포크기는 감소되고 최대 기포직경의 크



P = 0.41 MPa
 $T_{in}=103.4^{\circ}\text{C}$
 $T_{wall}=154.9^{\circ}\text{C}$



P = 1.01 MPa
 $T_{in}=143.1^{\circ}\text{C}$
 $T_{wall}=251.7^{\circ}\text{C}$



P = 2.01 MPa
 $T_{in}=178.7^{\circ}\text{C}$
 $T_{wall}=298.7^{\circ}\text{C}$



P = 3.02 MPa
 $T_{in}=201.8^{\circ}\text{C}$
 $T_{wall}=279.0^{\circ}\text{C}$



P = 3.51 MPa
 $T_{in}=211.8^{\circ}\text{C}$
 $T_{wall}=276.5^{\circ}\text{C}$



P = 4.03 MPa
 $T_{in}=221.3^{\circ}\text{C}$
 $T_{wall}=254.6^{\circ}\text{C}$



P = 4.54 MPa
 $T_{in}=229.6^{\circ}\text{C}$
 $T_{wall}=260.9^{\circ}\text{C}$



P = 5.03 MPa
 $T_{in}=235.6^{\circ}\text{C}$
 $T_{wall}=266.2^{\circ}\text{C}$

Heat flux: 2.51 MW/m^2
 Mass flux: $504 \text{ kg/m}^2\text{s}$
 Local quality: -0.077

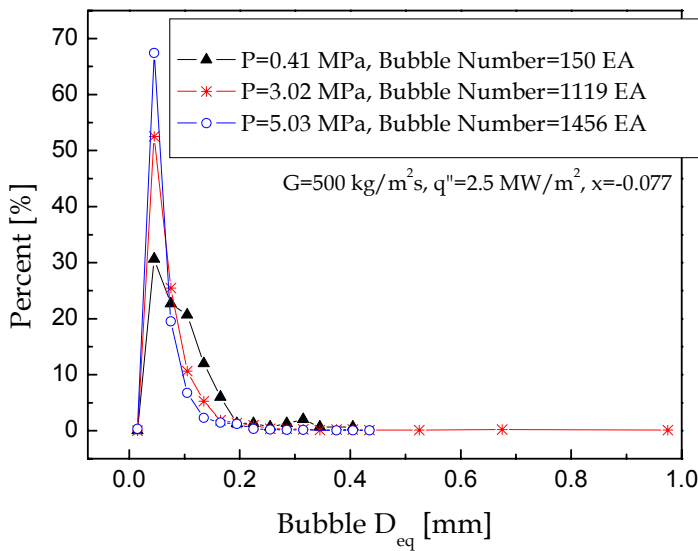
Fig. 7 Effect of pressure in flow boiling

기는 증가한다. 이는 3.51 MPa 이하의 압력조건에서는 압력이 증가할수록 증기밀도의 증가와 핵 생성지점이 크게 증가되어 뭉쳐짐과 성장에 의해 큰 기포가 형성된다. 압력이 3.02, 3.51, 4.03 MPa에서 기포수는 감소하다 증가되고, 최고 기포직경 크기는 감소하다 증가되고 다시 감소된다. 또한 압력이 4.03 MPa 이상 조건에서는 큰 기포가 사라지는 것

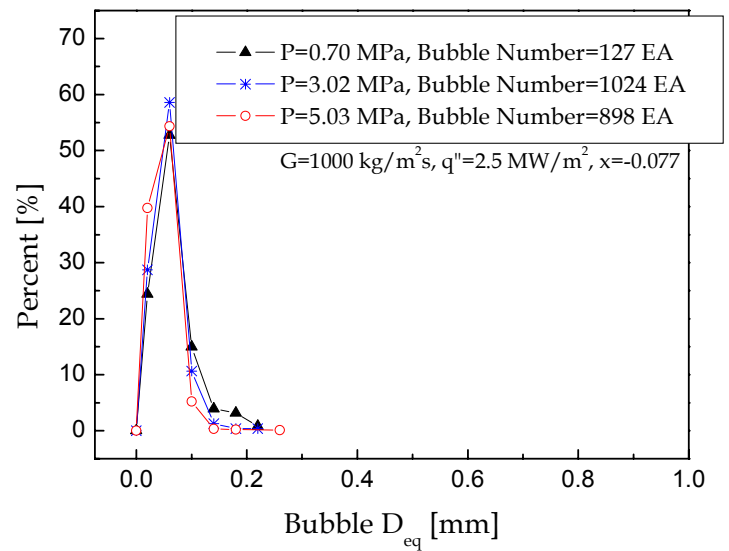
Table 1. Measurement of bubble behavior in flow boiling

압력 [MPa]	0.41	1.01	2.01	3.02	3.51	4.03	4.54	5.03
기포개수	150	427	721	1119	936	1048	1361	1456
Max. D_{eq} [mm]	0.415	0.400	1.074	0.975	1.214	0.916	0.407	0.424
Min. D_{eq} [mm]	0.030	0.032	0.029	0.030	0.028	0.028	0.028	0.028
Mean D_{eq} [mm]	0.119	0.111	0.127	0.097	0.074	0.062	0.062	0.062
기포면적비	0.07	0.17	0.39	0.35	0.35	0.23	0.25	0.26
기포 밀도 [$\#/mm^2$]	6.49	18.48	31.21	48.44	40.52	45.37	58.92	63.03

을 확인할 수 있다. 이는 기포가 가열표면으로부터 떨어지는 최대기포 직경은 유체의 표면장력에 비례하고, 유체와 증기의 밀도차에는 반비례하기 때문에 압력이 4.03 MPa를 초과하면서 유체와 증기의 밀도차는 거의 일정해 지지만 유체의 표면 장력은 계속 감소되어 기포가 일정 크기가 되면 부력과 유동의 영향에 의해 가열 표면으로부터 일찍 떨어지기 때문이다. 유동비등에서 기포수와 최대 기포직경의 크기의 변화가 일정하지 않지만 압력이 증가할수록 평균기포크기가 감소하는 이유는 Fig 8(a), (b)를 통해 확인할 수 있다. 압력이 증가하면서 기포직경의 크기가 0.03 ~ 0.08 mm의 크기를 갖는 기포가 더욱 증가되기 때문이다.



(a)



(b)

Fig. 8 Percent vs. bubble D_{eq} in flow boiling

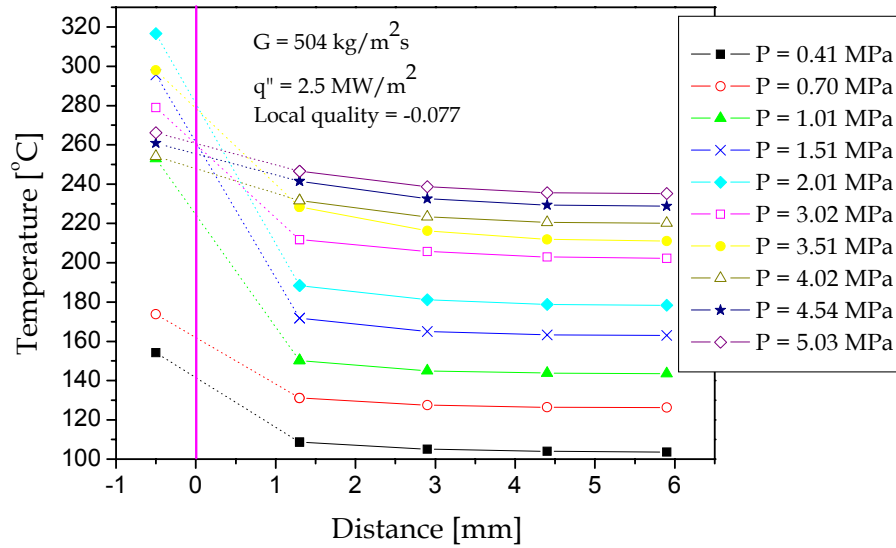


Fig. 9 Distribution of temperature vs. distance in flow boiling

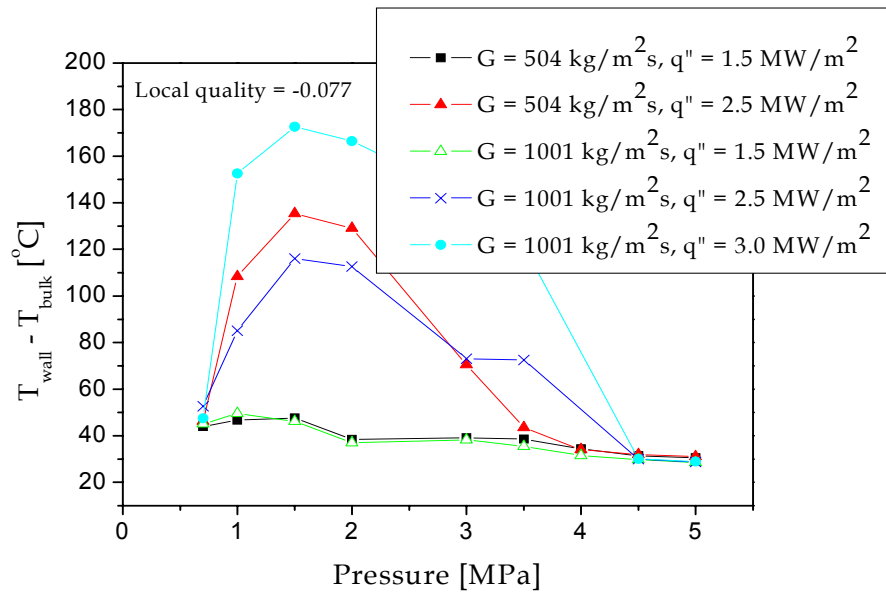


Fig. 10 Difference temperature vs. pressure in flow boiling

Fig. 9는 각각의 압력 조건에서 실험대의 가열면 온도와 가열 면으로부터 거리에 따른 유체 온도의 분포를 보여준다. 압력이 증가되면서 온도차가 급격히 증가되다가 다시 온도

차가 감소되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10은 각각의 질량유속과 열유속 조건에서 압력에 따른 가열면과 유체온도차를 보여준다. 열유속이 1.5 MW/m^2 의 조건에서는 압력이 증가되면 온도차는 조금씩 줄어들지만 열유속이 2.5 MW/m^2 의 이상의 조건에서는 압력이 증가되면 온도차가 상승되다가 다시 감소되는 것을 확인할 수 있다. 압력이 증가되면서 온도차가 급격히 증가되는 이유는 압력 증가에 의해 유체밀도는 감소되고 증기밀도는 증가되어 유동이나 부력의 영향보다 표면 장력의 영향을 많이 받아 기포가 뭉쳐져 큰 기포가 생성되어도 가열표면으로부터 떨어지지 못해 열전달을 감소시키기 때문이다. 압력이 더욱 증가되면 온도차가 다시 감소되는 이유는 압력이 약 4.0 MPa 이상이 되면 기포의 밀도 변화율이 거의 일정해 지는 반면 표면장력은 감소되어 기포들이 가열 표면으로부터 쉽게 떨어지고, 작은 기포들의 수가 크게 증가되어 열전달을 증가시키기 때문이다.

4. 결론

본 실험 연구에서는 기존 가시화 실험과 달리 보다 다양한 압력조건 $P = 0.40 \sim 5.00 \text{ MPa}$ 에서 물을 이용해 열유속, 과냉도, 질량유속, 국부 건도 조건에 따른 유동비등현상을 가시화 실험장치를 이용하여 관찰하였다. 가시화 장치를 통해 얻어진 자료를 Image Processing을 통해 여러 기포변수를 측정 분석하였고, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 기존 가시화 실험에서 제시되었듯이 다양한 압력조건에서도 국부건도와 열유속이 증가할수록 핵 생성지점과 기포크기가 증가되어 기포 뭉쳐짐이 활발해 지고 질량유속이 증가할수록 핵 생성지점과 기포크기가 감소된다.
- (2) 압력이 증가하면서 $0.03 \sim 0.08 \text{ mm}$ 의 기포직경 크기를 갖는 기포수의 증가로 인해 최고 기포직경 크기가 증가되지만 평균 기포직경 크기가 감소된다.
- (3) 열유속이 2.5 MW/m^2 이상의 조건에서 압력이 증가함에 따라 유체밀도는 감소되고 증기밀도는 증가되어 유동이나 부력의 영향보다 표면 장력의 영향을 많이 받아서 뭉쳐짐과 성장에 의해 큰 기포가 생성되어도 가열표면으로부터 떨어지지 못해 표면온도의 상승으로 인해 압력이 대략 $1.50 \sim 4.00 \text{ MPa}$ 범위에서 가열표면과 유체의 온도차가 증가된다. 압력이 4.00 MPa 이상이 되면 유체와 증기의 밀도차는 거의 일정해지고 유체의 표면 장력이 계속 감소하여 표면으로부터 일찍 떨어지는 기포가 증가되고, 작은 크기의 기포수가 크게 증가되어 가열표면과 유체의 온도차를 감소시킨다.

5. 기호설명

P	압력
q''	열유속
x	열전대 위치에서의 국부 전도
G	질량유속
A_h	실험대 입구로부터 열전대 위치까지의 열전달 면적
A_f	실험대 유로 단면적
D_{eq}	기포 등가 직경
h_{fg}	포화압력에서 증발잠열
h_{in}	실험대 입구 액체 엔탈피
T_{wall}	가열 표면 온도
T_{bulk}	실험대 내 액체 중심층 온도

6. 참고문헌

- 1) F. C. Gunther, Pasadena and Calif, 1951, "Photographic Study of Surface Boiling Heat Transfer to Water with Forced Convection", Trans. ASME, Vol. 73, pp. 115-121.
- 2) L. S. Tong, A. A. Bishop and L. E. Efferding, 1966, "A Photographic Study of Subcooled Boiling Flow and DNB of Freon-113 in a Vertical Channel", ASME, 66-WA/HT.
- 3) Victor H. Del Valle and D. B. R. Kenning, 1985, "Subcooled Flow Boiling at High Heat Flux", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, No 10, pp. 1907-1920.
- 4) E. L. Bibeau and M. Salcudean, 1994, "A Study of Bubble Ebullition in Forced Convection Subcooled Nucleate Boiling at Low Pressure", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 37, pp. 2245-2259.
- 5) O. Zeitoun and M. Shoukri, 1996, "Bubble Behavior and Mean Diameter Subcooled Flow Boiling", Trans. ASME, Vol. 118, pp. 110-116.
- 6) C-P. Yin, Y-Y. Yan, T-F. Lin and B-C. Yang, 2000, "Subcooled flow boiling heat transfer of R-134a and bubble characteristics in a horizontal annular duct", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 43, pp. 1885-1896.
- 7) R. Maurus, V. Ilchenko and T. Sattelmayer, 2002, "Study of the bubble characteristics and the local void fraction in subcooled flow boiling using digital imaging and analysing techniques", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol 26, pp. 147-155.

- 8) G. R. Warrier, N. Basu, V. K. Dhir, 2002, "Interfacial heat transfer during subcooled flow boiling", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 45, pp. 3947-3959.
- 9) V. Prodanovic, D. Fraser and M. Salcudean, 2002, "Bubble behavior in subcooled flow boiling of water at low pressures and low flow rates", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 28, pp. 1-19.
- 10) 임창하, 2002, "광범위한 압력 조건에서의 고 과냉 유동비등에 관한 가시화 실험 연구", 석사학위 논문, 고려대학교.
- 11) G. P. Celata, M. Cumo, A. Mariani and G. Zummo, 2000, "Burnout in Subcooled Flow Boiling of Water. A Visual Experimental Study," Int. J. Therm. Sci. Vol. 39, pp. 896-908