

일정 벽면 온도 조건에서 이성분 혼합물의 핵비등시 벽면 열유속 거동

배성원* · 이한춘** · 김무환***
(2000년 3월 16일 접수)

Wall Heat Flux Behavior of Nucleate Pool Boiling Under a Constant Temperature Condition in a Binary Mixture System

Sungwon Bae, Hanchoon Lee and Moohwan Kim

Key Words : Nucleate Boiling, Microscale Heater, Bubble Growth, Binary Mixture, Constant Temperature Condition

Abstract

The objective of this work is to measure space and time resolved wall heat fluxes during nucleate pool boiling of R113/R11 mixtures using a microscale heater array in conjunction with a high speed CCD. The microscale heater array is constructed using VLSI techniques, and consists of 96 serpentine platinum resistance heaters on a transparent quartz substrate. Electronic feedback circuits are used to keep the temperature of each heater at a specified temperature and the variation in heating power required to keep the temperature constant is measured. Heat flux data around an isolated bubble are obtained with triggered CCD images. CCD images are obtained at a rate of 1000 frames/second. The heat transfer variation vs. time on the heaters directly around the nucleation site is plotted and correlated with images of the bubble obtained by using the high speed CCD. For both of the mixture(R11/R113) and pure system(pure R11, pure R113), the wall heat fluxes are presented and compared to find out the qualitative difference between pure and binary mixture nucleate boiling.

기호설명

b : van Stralen 의 모델에 사용된 실험변수
 c : 비열 [J/kg K]
 D : 물질 확산계수 [m²/s]
 G : 기화된 휘발성 물질(more volatile component)의 몰분율 [-]
 Ja : Jakob 수 ($Ja = \frac{\rho_l c \theta}{\rho_v L}$) [-]
 k : 열전도도 [W/m K]
 h_{fg} : 잠열 [J/kg]

R : 기포반경 [mm]
 R_m : 혼합물에서의 기포반경 [mm]
 t : 시간 [sec]
 t_g : 기포성장주기 [sec]
 T : 온도 [K]
 ΔT : 혼합물의 상변화에서 포화온도의 상승 [K]
 그리스문자
 α : 열확산계수 [m²/s]
 ρ : 밀도 [kg/m³]
 θ : 벽면과열도 [K]

* 한라공조 주식회사
 ** 포항공과대학교 대학원 기계공학과
 *** 회원, 포항공과대학교 기계공학과
 E-mail : mhkim@postech.ac.kr
 TEL : (054)279-2165 FAX : (054)279-3199

1. 서 론

비등 열전달은 산업현장에서 많은 응용을 이루는 중요한 열전달 현상이다. 따라서 비등 열전달

현상에 대한 정확한 이해와 해석이 필요하다. 이를 위해서는 먼저 비등에 의한 단일 기포의 성장에 대한 이해가 선행되어야 한다.

지금까지 많은 연구자들이 단일 기포 성장에 대해 연구해왔다. 그 중에 하나로서, Forster 와 Zuber⁽¹⁾가 기포가 성장하는 과정에서 기포의 움직임이 기포 주위에 반지름 방향으로 속도장을 생성케 하여 미세대류(micro convection)를 일으킨다는 이론을 제시하였다. 또 Hsu 와 Graham⁽²⁾은 기포가 벽면으로부터 이탈할 때 기포가 있던 위치에 주위의 액체가 밀려들어오면서 대류효과를 증가시킨다는 액체-증기 교환(liquid-vapor exchange)이라는 이론을 제시하였다. 또 다른 메카니즘으로는 기포 성장 초기에 기포 아래쪽에 아주 얇은 액체막이 형성되어 활발한 증발이 일어난다는 미세막 증발(microlayer evaporation)에 대한 이론이 있다. 기포 바로 아래쪽의 미세막은 Snyder 와 Edwards⁽³⁾에 의해 처음으로 가설화 되었다. 기포가 벽면으로부터 이탈하면서 벽면의 열경계층(thermal boundary layer)을 해체시킨 후 발생하는 또 다른 비등 열전달 메커니즘으로 천이전도(transient conduction)가 있다. 비등 열전달 현상에 대한 위의 여러 이론을 서로 연관시켜 해석한 이론들도 있다. 한 예로 Han 과 Griffith⁽⁴⁾가 액체-증기 교환과 천이 전도에 대한 이론을 접목시켜서 핵비등에 대한 해석을 시도하였다.

기포 성장에 관한 많은 이론들중에서 최근에 나온 것으로는 van Stralen 의 모델⁽⁵⁾이 있다. van Stralen 은 과열된 열경계층이 기포 옆면의 일정 위치까지 형성된다는 가설하에 기포의 높이에 대한 미세막 높이의 비를 나타내는 실험적 변수를 이용하여 이완된 미세막 개념(relaxation microlayer concept)을 제안하였으며, 혼합물에 대한 기포 성장에 관한 다음과 같은 식을 얻었다.

$$R = \left(\frac{12\alpha}{\pi}\right)^{1/2} b \left(\frac{\rho_L c}{\rho_G h_{fg}}\right) [\theta \exp(-t/t_g)]^{1/2} t^{1/2} \quad (1)$$

$$R_m = \left(\frac{12}{\pi}\right)^{1/2} \frac{b\theta}{(\rho_G/\rho_L)(h_{fg}/c + (\alpha/D)^{1/2} \Delta T/G)} \times \exp(-t/t_g)^{1/2} (\alpha)^{1/2} \quad (2)$$

최근에는 이성분 혼합물의 상변화 현상에 대한 관심이 높아지고 있다. 이성분 혼합물의 경우, 기포 성장 뿐만 아니라 열유속의 감소 경향도 관심의 대상이 되고 있다. 이에 대하여 거시적 관점에서 여러 연구가 있었다. Calus 와 Rice⁽⁶⁾는 기포 성장 속도의 감소와 열전달 계수의 감소를 정량적으로 구하였다. 기포의 성장 속도가 느려질수록 기

포의 이탈 시 기포 크기가 작아지는 결과를 보였다.

권영철 등^{(7),(8),(9)}은 핵비등 시 전기장을 형성하여 비등 열전달을 촉진시키는 연구를 수행하였다. 이들은 전기장에 의하여 기포의 생성이 활발해져서 비등열전달이 촉진됨을 보였으며, 기포의 거동과 비등 열전달 현상이 밀접한 관련이 있음을 보였다.

비등에 의한 기포의 성장에 대한 지금까지의 연구는 주로 일정 벽면 열유속 상태(constant wall heat flux condition)에서 거시적인 관점에서의 실험과 해석이 주류를 이루었다. 그러나 일정 벽면 열유속 조건 하에서의 결과를 일정 벽면 온도 조건의 비등에 그대로 적용하기에는 무리가 따른다. 그럼에도 불구하고 실험상의 어려움으로 인하여 일정 벽면 온도 조건 하에서의 비등 열전달 현상에 대한 결과들이 매우 부족한 것이 현실이다.

미시적 관점에서 핵비등 열전달 현상을 해석하기 위해서는 단일 기포의 거동에서의 열전달 현상을 분석하는 것이 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 일반적인 측정기구들보다 시간적, 공간적 해상력이 뛰어난 미세히터를 이용하여 단일 기포의 성장과 열전달 거동에 대하여 결과를 도출하였다. 새로운 기법의 미세히터를 이용하여 일정 벽면 온도 조건(constant wall temperature condition)에서 핵비등 열전달 과정의 벽면 열유속의 거동을 관찰할 수 있었다.

2. 실험

2.1 미세히터(microscale heater)

미세히터는 투명한 수정판에 Rule et al.⁽¹⁰⁾의 논문에서 기술된 VLSI 기술을 이용하여 제작되었다. 먼저 열증착(thermal evaporation deposition)방법을 이용하여 Ti/Pt 층(히터)을 만들고, 파워라인(power lead)으로 사용될 알루미늄층을 도포하였다. 96 개의 히터 위에서 핵비등이 일어나고 있는 사진이 Fig. 1 에 나타나 있다. 각각의 히터의 크기는 0.27×0.27 mm 이다. 각각의 히터의 온도는 열선풍속계(hot wire anemometer)에 사용되는 회로와 같은 구조를 가진 96 개의 회로들에 의해서 일정 온도로 유지된다. 본 실험에 사용된 회로의 구성도가 Fig. 2 에 나타나 있다. 그림에서 히터는 R_h로 표시된 저항으로 구성된다. 히터는 온도계수가 0.002/°C 인 백금이 사용되었다. 히터의 저항은 온도의 함수이므로 곧 히터의 온도를 나타낸다고 할 수 있다. 히터의 온도, 즉 히터의 저항은 우측의

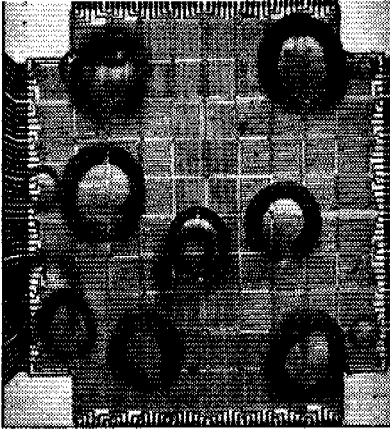


Fig. 1 Image of bubble generating on microscale heater

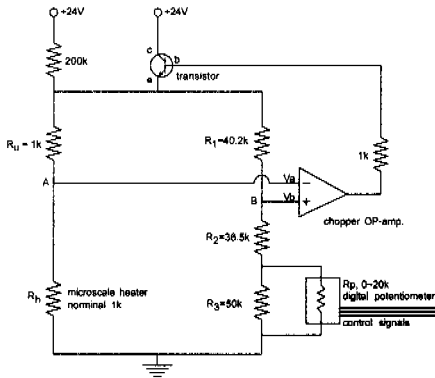


Fig. 2 Schematic diagram of microscale heater control circuit

디지털 가변저항(digital potentiometer)에 의하여 조정된다. 본 연구에 사용된 디지털 가변저항은 0~20kΩ까지 512 단계(wiper position)로 나누어 조정되는 제품을 사용하였다. 가변저항의 저항값은 PC와 디지털 임출력 카드에 의해서 원하는 값으로 조절을 할 수 있다. 휘트스톤 브릿지(Wheatstone bridge)상에서 A 점과 B 점의 전압차를 OP 앰프가 감지하여 브릿지 양단의 전압이 평형을 이루도록 필요한 만큼의 전압을 증폭시켜서 출력한다.

각 히터로부터 데이터를 8kHz의 속도로 계속할 수 있는 데이터 수집장치⁽¹⁰⁾를 제작하여 사용하였다. 계측 시작 신호는 CCD 카메라에도 동시에 전달되어 영상 데이터가 히터의 열유속 데이터와 동기되어(synchronized) 저장된다. 미세히터를 이용한 자세한 실험 기법은 Bae et al.⁽¹¹⁾의 논문에 기술되어 있다.

2.2 주 실험부

Fig. 3은 비등 실험이 수행된 주 실험부에 대한

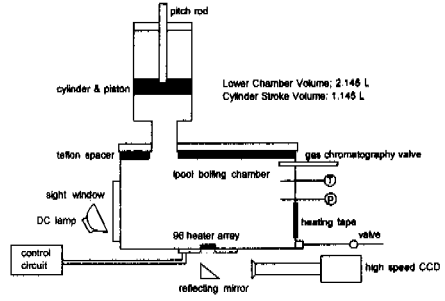


Fig. 3 Schematic diagram of the main chamber



Fig. 4 Photographic view of the main chamber

개략도이다. 주 실험부는 알루미늄으로 이루어져 있다. 실험부의 압력을 조절하기 위하여 윗 부분에 압력 조절용 실린더가 부착되어 있다.

혼합물의 농도를 측정하기 위하여 샘플을 채취할 수 있는 샘플링 포트가 설치되어 있으며, 실험부의 온도를 포화온도로 유지하기 위해서 용량이 10W인 히팅테이프 10개가 부착되어 있다. 실험부의 윗면은 테프론 원판을 설치하여 단열효과와 함께 CCD 카메라 촬영을 위한 간접 조명 효과를 얻을 수 있도록 하였다. 조명은 250W 용량의 할로겐 램프를 사용하였다. 주 실험부 아래쪽에 거울을 45°로 설치하여 히터 아래쪽에서 촬영이 가능하도록 하였다. Fig. 4에 압력 조절용 실린더가 제거된 실험부의 사진이 나타나 있다.

2.3 보정(calibration)

히터의 온도에 대한 디지털 가변저항값을 알아야 가변 저항값을 이용하여 역으로 히터의 온도를 조절할 수 있다. 이를 위해서 디지털 가변 저항값과 그와 평형을 이루는 히터 저항값, 즉 히터의 온도를 본 실험을 수행하기 전에 미리 측정해 놓아야 한다. 96개의 히터들은 각각 상온에서의 저항값이 모두 다르기 때문에, 일정 온도에 대하여 각 히터의 가변 저항값이 모두 다르게 되므로 각 온도에 대하여 96개의 히터 모두에 대하여 보정

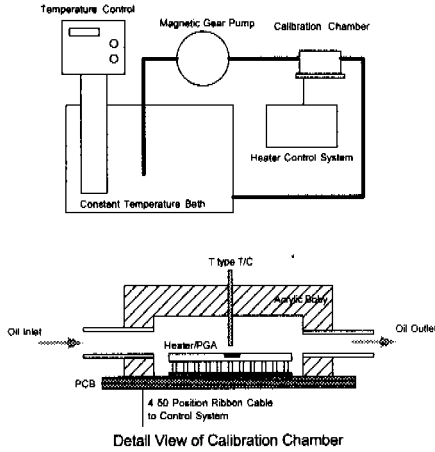


Fig. 5 Schematic diagram of the heater calibration loop

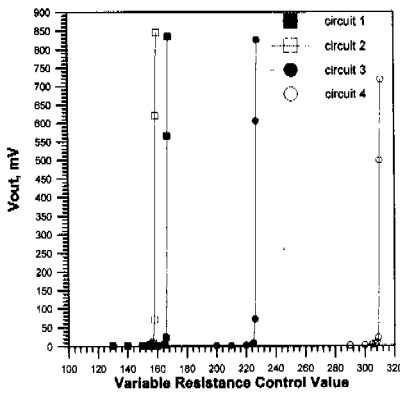


Fig. 6 Microscale heater output threshold behavior

과정을 수행하여야 한다.

보정을 위한 실험을 수행하기 위하여 Fig. 5와 같은 보정 실험장치를 구성하였다. 온도 보정을 위한 유체로는 올리브유를 사용하였다. 올리브유의 온도는 항온조를 이용하여 조정하였다. 히터 위의 온도가 일정 온도로 유지되도록 하여 미세 히터가 보정하고자 하는 온도가 되면, 히터는 그 온도에 상응하는 저항값을 가지게 된다. 이때 가변 저항값을 변화시켜가면 Fig. 6과 같이 갑자기 히터가 발열을 시작하는 가변 저항값을 찾을 수 있다. 이때의 가변 저항값이 보정 온도에 상응하는 가변 저항값이 된다. 이러한 방법으로 실험에 적용될 각 온도에 대한 보정 실험을 수행하였다.

2.4 히터표면 전도에 의한 열손실

히터 온도에 대한 디지털 가변 저항값이 보정된 후에 히터 표면을 통한 열전도에 의한 열손실량을 보정해 주어야 한다. 히터로부터 수정판으로의 열손실은 기포로 전달된 열유속량을 측정하기

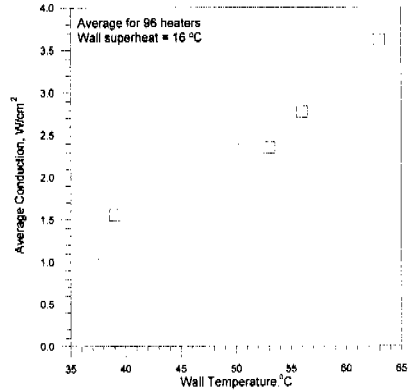


Fig. 7 Measured conduction heat loss of microscale heater

Table 1 Experimental cases and conditions

Matrrial	Wall temp. (°C)	Saturation temp. (°C)	Wall superheat (°C)	Jakob Number Ja^1
Pure R113	63	47	16	21.4
Pure R11	39	23	16	19.8
R113/R11 14.8%	58	40	18 (+2)	23.5
R113/R11 23.0%	54	37	17 (+1)	22.0
R113/R11 56.1%	45	29	16	20.3

$$1 \quad Ja = \frac{\rho_l c \theta}{\rho_v L}$$

위하여 측정된 벽면 열유속으로부터 빼주어야 한다. 전도에 의한 열손실량을 측정하기 위하여 기포가 생성되지 않도록 가압 가열 실험을 수행하였다. 가압 실험을 수행하여 벽면에서 공급된 총열 전달량에서 자연 대류에 의하여 액체로 전달되는 열전달량을 빼주면 히터 표면을 통해 전도되어 손실되는 양을 구할 수 있다. 그러나 본 연구를 위해 수행된 실험 조건에서는 레이레이수(Rayleigh number)가 매우 작아서 자연대류로 액체로 전달되는 열전달량을 무시할 만 하였다. 따라서 가압 가열 실험에서 측정된 벽면 열유속량을 그 온도에서의 전도에 의한 열손실량으로 볼 수 있다. Fig. 7에 각 온도에서 전도에 의한 열전도량을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 표면 온도가 증가할수록 열전도에 의한 손실량이 증가하는 것으로 나타났다. 약간의 자연대류에 의한 열전달량의 영향으로 완전한 선형적 증가의 양상은 보이지 않고 있다. 이로 인해 전도에 의한 열손실량 예측값이 증가하게 되었다.

2.5 실험 조건

본 연구에서 순수 R11 과 R113 의 경우는 벽면 온도의 과열도를 16°C 로 유지하여 실험을 하였다. 1 기압에서 R11 과 R113 의 포화온도는 각각 23°C 와 47°C 이므로, 실험상에서 벽면의 온도는 각각 39°C 와 63°C 이다. R11/R113 혼합물의 경우 R11 이 각각 14.8%, 23.0%, 56.1%의 질량비를 가지고 혼합되어 있는 경우에 대하여 실험하였다. 각 실험 조건들을 Table 1 에 표시하였다.

2.6 실험오차분석

본 실험에서 측정된 값들은 CCD 카메라를 이용하여 촬영한 기포의 성장과정에서의 기포지름, 전자회로를 이용하여 조정된 벽면 온도, 그리고 히터에 인가된 전압을 측정하여 계산한 벽면 열유속 등이다.

기포의 크기는 히터 사이즈인 0.27mm 를 눈금 7 로 기준하여 측정하였다. 불확실성은 일반적으로 눈금의 절반이므로 0.02mm 가 된다. 측정된 기포의 최소 지름이 약 0.15mm 이었으므로 기포지름 측정에 있어서 최대 불확실성은 13%이다. 기포 측정 시간에 대한 불확실성은 고속 CCD 카메라로 최대 1kHz 의 속도로 촬영하였으므로 1ms 의 불확실성을 가진다.

벽면의 온도는 히터 온도 보정 시에 OMEGA 사의 열전대 보정기를 이용하여 보정된 열전대를 사용하여 0.5°C 의 오차를 가지고 있다. 히터의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 전자회로 내에 0-512 의 디지털수에 따라 0-20kΩ의 변위를 가지는 디지털 가변저항을 사용하였다. 본 연구에서는 히터온도의 변화폭을 175°C 가 되도록 보정하였다. 따라서 디지털 조정숫자 1 에 대한 온도변화 폭은 0.34°C 가 된다. 이에 따라 디지털 조정 숫자에 대한 히터 벽면 온도의 불확실성은 0.17°C 가 된다. 따라서 벽면 온도의 불확실성은 보정 시 사용된 열전대의 불확실성과 디지털 조정에 의한 불확실성을 합한 0.67°C 가 된다.

측정된 열유속 값에 대한 불확실성은 주로 자연대류에 의한 열전달에서 기인한다. 이는 전도에 의한 열손실량을 측정하는 과정에서 히터 표면에 발생하는 자연대류의 영향을 무시하였기 때문이다. 자연대류에 의한 열전달양에 대한 McAdams 의 상관식을 이용하여 계산할 경우(이 경우는 레일리수가 10⁵ 보다 큰 경우임), 자연대류 열전달 양은 최대 0.88 W/cm² 이다. 측정된 벽면 열유속값이 최소 8 W/cm² 이므로 열유속값에 대한 최대 불확실성은 11%가 된다.

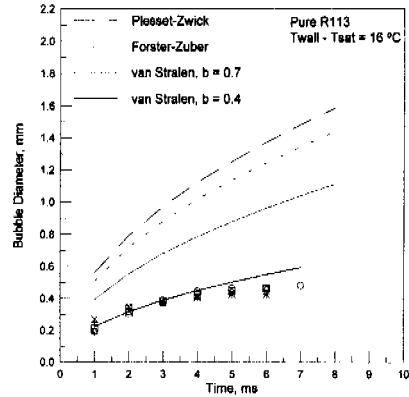


Fig. 8 Bubble growth of R113 compared to van Stralen's model

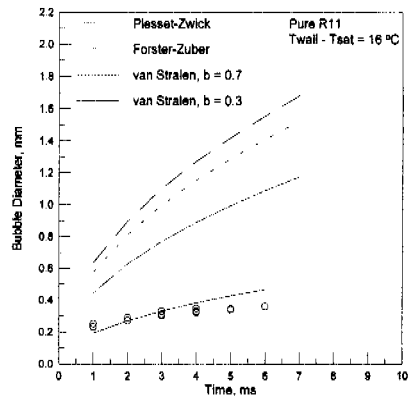


Fig. 9 Bubble growth of R11 compared to van Stralen's model

3. 실험 결과

3.1 기포 성장

Fig. 8 은 순수 R113 에서의 기포성장을 보여주고 있다. 기포성장 거동이 기존에 제안된 모델들과 차이를 보이고 있다. van Stralen 의 모델은 전도에 의해 열을 공급받은 기포 주위의 미세막(micro layer)으로부터의 열전달이 전체 열전달에 미치는 영향이 매우 크다고 보고 있다. 그러나 다른 연구자들의 모델은 일정하게 과열된 기포 주변의 액체와 기포의 벽면 전체로부터 열을 받아들인다는 가정을 하고 있다. van Stralen 의 모델에서는 기포 높이에 대한 미세막의 높이의 비를 나타내는 실험적 변수인 b 를 실험을 통하여 0.7 로 가정하였다. 본 연구의 기포성장 결과를 van Stralen 의 모델과 비교해 보면, 변수 b 의 값이 0.4 일 때 잘 맞는 것으로 나타났다.

Fig. 9 는 순수 R11 에서의 기포성장 양상을 보여

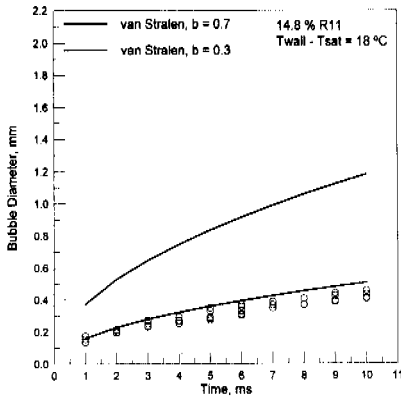


Fig. 10 Bubble growth of 14.8% R11 compared to van Stralen's mixture model

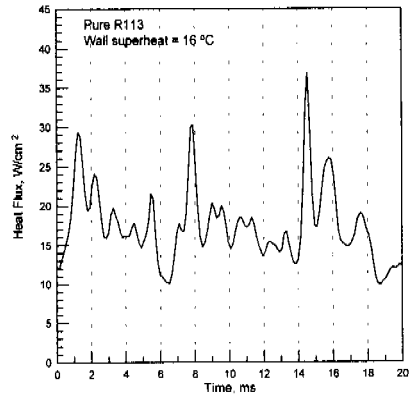


Fig. 13 Surface heat flux of R113 nucleate boiling

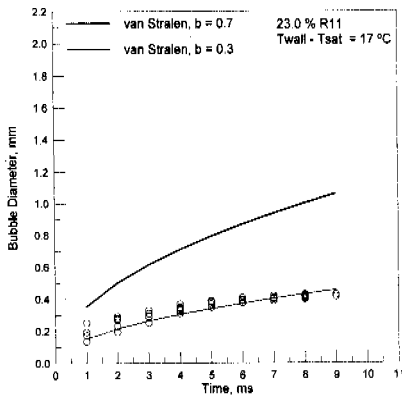


Fig. 11 Bubble growth of 23.0% R11 compared to van Stralen's mixture model

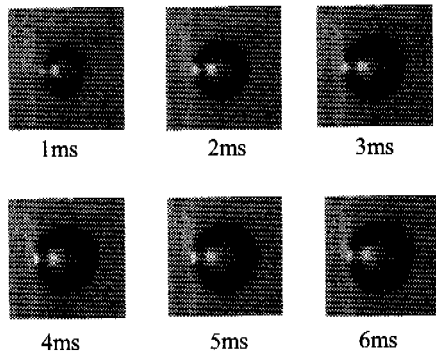


Fig. 14 Bubble images; times are triggered to figure 13

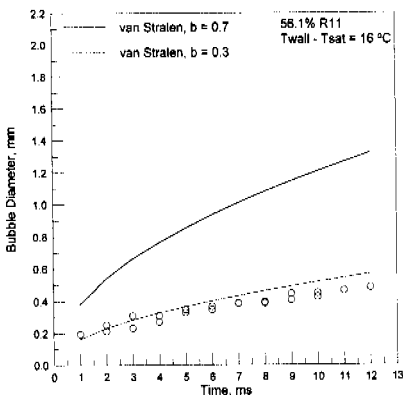


Fig. 12 Bubble growth of 56.1% R11 compared to van Stralen's mixture model

주고 있다. 이 경우는 R113 에서의 결과보다 더 느린 성장을 나타내고 있으며, 이때의 b 값은 0.3 일 경우 더 잘 맞는 것으로 나타났다.

Fig. 10, Fig. 11 과 Fig. 12 는 R11 이 각각 14.8%, 23.0%, 56.1%가 혼합된 경우의 기포성장을 보여주

고 있다. 혼합물의 경우, van Stralen 의 변수 b 가 0.3 일 경우 잘 맞는 것으로 나타났다.

본 실험에서 b 값이 van Stralen 의 값과 차이가 나는 이유는 본 실험은 일정 벽면 온도 조건에서 수행되어 벽면의 온도가 일정 온도를 항상 유지하는 반면에 van Stralen 의 실험은 일정 벽면 열유속 조건에서 수행되어 지속적인 열공급으로 인하여 벽면의 온도가 증가하게 되어 기포주위로 미세막이 더 높이 올라갈수 있었기 때문으로 분석된다.

위와 같은 실험 결과들을 분석해보면 일정 벽면 온도 조건하에서의 기포성장은 일정 열유속하에서의 기포성장에 관한 모델들과 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 기존의 일정 벽면 열유속 조건하에서의 연구 결과들을 일정 벽면 온도 조건의 상황에 그대로 적용하는 데는 무리가 있음을 알 수 있다.

3.2 벽면에서의 열유속(surface heat flux)

순수 R113 비등시 벽면에서의 열유속 거동이 Fig. 13 에 나타나있다. 이 경우에 기본적으로 공급되는 열유속이 약 10 W/cm^2 이다. 이는 대류와 전

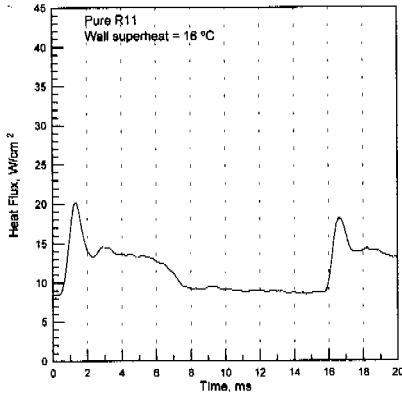


Fig. 15 Surface heat flux of R11 nucleate boiling

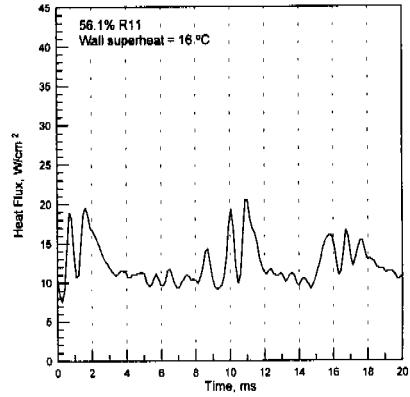


Fig. 18 Surface heat flux of 56.1% of R11 nucleate boiling

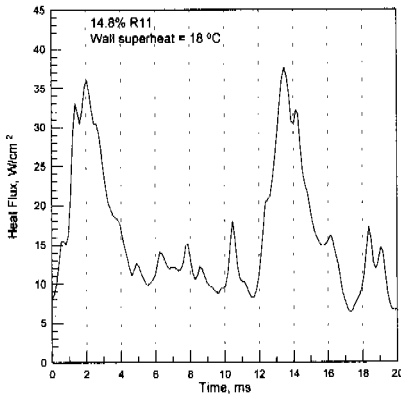


Fig. 16 Surface heat flux of 14.8% of R11 nucleate boiling

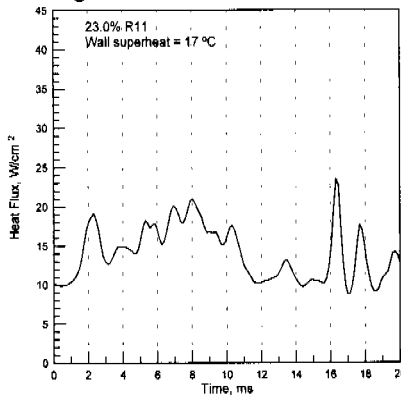


Fig. 17 Surface heat flux of 23.0% of R11 nucleate boiling

도를 통해 액체로 공급되는 열유속으로써 기포가 생성되지 않는 상황에서도 늘 공급되는 양이다. 기포는 0-1ms 사이에 생성되고, 6-7ms 사이에 이탈하였다. 기포가 생성되는 초기 1ms 동안 20 W/cm²의 열이 공급되는데, 이 열량이 모두 기포 생성에 기여한다면 기포의 크기가 약 0.3mm 가 되어야 한다. 그러나 앞의 기포성장 결과를 보면 이보다

약간 작은 값을 나타내고 있다. 실제로 많은 연구자들은 기포내부의 온도가 포화온도보다 약간은 높은 것으로 주장하고 있다. 그러므로 공급되는 열이 모두 기포 성장을 위한 증발에 사용되지 않는 것으로 판단된다. 일단 기포가 생성된 후에는 공급되는 열유속이 상승과 감소를 반복하며 전체적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 순수 R113의 경우 기포가 이탈한 후 그 다음 기포가 생성되기까지 시간(waiting period)은 매우 짧은 것으로 관찰되었다. 기포가 이탈한 이후 공급되는 열유속은 기저 수준(base level)으로 바로 감소하지 않고 서서히 감소한다. 이는 이탈하는 기포가 벽면의 열경계층(thermal boundary)을 깨뜨리므로, 일정 온도를 유지하면서 이를 다시 복구하기 위하여 열공급을 계속적으로 필요로 하기 때문이다. Fig. 14는 R113에서의 기포성장 과정을 시간별로 촬영한 사진이다. 표시된 시간은 Fig. 13에 표시된 시간과 일치한다.

Fig. 15는 순수 R11에서의 기포생성시 열유속의 거동을 보여주고 있다. R11의 경우 기저 열유속이 8 W/cm²이다. 최고 열유속은 20 W/cm²이거나 그보다 약간 낮은 수준을 나타내었다. R113의 경우와 비교하여 볼 때 R11에서는 열유속양의 오르내림이 크지 않았다.

Fig. 16, Fig. 17과 Fig. 18은 R113에 R11을 각각 14.8%, 23.0%, 그리고 56.1%씩 혼합되어 있는 경우 벽면에서의 열유속의 거동을 보여준다. R11이 14.8% 혼합되어 있는 경우 순수물질의 경우와 비교할 때, 최고 열유속까지 서서히 증가함을 나타내고 있다. 열유속 데이터로 보았을 때 5ms에서 기포가 이탈한 것처럼 보이지만, 사진 관찰 결과 10ms까지 기포는 벽면에 붙어있으며 기포가 약간씩 더 자라는 것으로 관찰되었다. R11이 23.0% 혼합된 경우는 그래프에서 볼 수 있듯이 최고값까지 상승한 후에 감소하는 경향을 보이지 않고 있으며

최고 열유속값도 $20\text{W}/\text{cm}^2$ 로 낮아졌다. 혼합물의 비등시에 혼합물내에서 비등점이 낮은 R11 이 더 많이 기포측으로 증발된 후에 순간적으로 기포 계면의 액체측에 농도구배(concentration gradient)가 형성되면서 증발을 방해하는 현상이 생기게 된다. 이에 따라 증발되는 속도가 늦어지게 되고, 다시 R11 의 농도가 회복되면 증발이 일어나는 현상이 반복된다. 따라서 기포생성 초기의 최고 열유속은 낮아지고 기포가 이탈할 때까지 공급되는 열유속이 오르내림(fluctuation)을 반복하고 있는 것으로 분석된다.

4. 결론

초고속 CCD 카메라를 이용하여 순수 R113, R11 과 R113/R11 혼합물에서 기포성장 에 대한 데이터를 얻었으며, van Stralen 의 모델과 비교하였다. van Stralen 의 모델은 일정 벽면온도에서의 기포 성장에 대하여 본 실험결과보다 크게 예측하는 것으로 나타났다. 측정된 기포 직경은 van Stralen 모델의 1/2 정도로 나타났다. 기포성장부터 이탈까지의 시간은 매우 짧았으며, 이에 대한 이미지 촬영은 초당 1000 프레임을 촬영할 수 있는 초고속 CCD 카메라를 이용하였다. 기포성장 거동은 순수 R11 과 R113 의 경우는 크게 차이가 없었으며, 혼합물의 경우 기포성장 속도가 둔화되는 경향을 보였다.

벽면 열유속 거동에 대한 결과는 R11 과 R113 사이에는 차이가 있었고, 혼합물의 경우 R11 의 농도가 많아짐에 따라 점차로 순수 R11 의 열유속 거동과 비슷해지는 경향을 보였다. 혼합물과 순수 물질 사이의 가장 큰 차이는 순수물질의 경우 기포성장 초기에 최고 열유속양까지 급격한 증가가 있다는 것이다. 반면에 혼합물의 경우는 초기에 최고 열유속양까지 상대적으로 완만하게 증가하였다. 따라서 혼합물의 핵비등시에 기포주위에 형성되는 농도구배가 기포성장 초기에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

순수 물질의 핵비등시에 기포가 일정 부피를 가진 후에는 공급되는 열유속이 급격히 감소하는 반면에 혼합물에서는 기포가 이탈할 때까지 상대적으로 많은 열이 공급되었다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단(KRF)의 재정적 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Forster, H. K., and Zuber, N., 1954, "Growth of a Vapor Bubble in a Superheated Liquid," *Journal of Applied Physics*, Vol. 25, pp. 474-478.
- (2) Hsu, Y. Y., and Graham, R., 1961, "An Analytical and Experimental Study of the Thermal Boundary Layer and Ebulient Cycle in Nucleate Boiling," NASA Rept. TN-D-594.
- (3) Snyder, N. W., and Edwards, D. K., 1956, "Summary of Conference on Bubble Dynamics and Boiling Heat Transfer," JPL memo 20-137, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.
- (4) Han, C. Y., and Griffith, P., 1965, "The Mechanism of Heat Transfer in Nucleate Pool Boiling-Part I," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 8, pp. 887-904.
- (5) van Stralen S. J. D., 1967, "The Mechanism of Nucleate Boiling in Pure Liquids and in Binary Mixtures-part IV," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 10, pp. 1485-1498.
- (6) Calus, W. F. and Rice, P., 1972, "Pool Boiling-Binary Liquid Mixtures," *Chemical Engineering Science*, Vol. 27, pp. 1687-1697.
- (7) 권영철, 김무환, 조혜정, 강인석, 김석준, 1995, "직류전기장에 의한 기포의 변형과 이탈에 관한 연구," 대한기계학회논문집(B), 제 19 권, 제 6 호, pp. 1518-1528.
- (8) 권영철, 김무환, 조혜정, 강인석, 김석준, 1996, "균일전기장에 의한 기포와 액적의 변형에 관한 연구," 대한기계학회논문집(B), 제 20 권, 제 6 호, pp. 2023-2035.
- (9) 권영철, 김무환, 강인석, 1997, "전기장을 이용한 핵비등 열전달 촉진에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집(B), 제 21 권, 제 12 호, pp. 1563-1575.
- (10) Rule, T. D., Kim, J., and Kalkur, T. S., 1998, "Design, Construction and Qualification of a Microscale Heater Array for Use in Boiling Heat Transfer," NASA/CR-1998-207407.
- (11) Bae, S. W., Kim, J. and Kim, M. H., 1999, "Improved technique to measure time and space resolved heat transfer under single bubbles during saturated pool boiling of FC-72," *Experimental Heat Transfer*, Vol.12, No.3, pp. 265-279.