

< 기술논문 >

냉매 이성분 혼합물의 포화 풀핵비등 특성에 관한 연구

김정배* · 이한춘** · 김무환†
 (2004년 12월 27일 접수, 2005년 3월 24일 심사완료)

Study on the characteristics During Saturated Pool Nucleate Boiling of Refrigerant Binary Mixtures

Jeongbae Kim, Han Choon Lee and Moo Hwan Kim

Key Words: Binary Mixture(이성분 혼합물), Saturated Pool Nucleate Boiling(포화 풀핵비등), Single Bubble Growth(단일기포성장), Microscale Heater Array(미세히터)

Abstract

Saturated nucleate pool boiling experiments for binary mixtures, which are consisted of refrigerant R11 and R113, were performed with constant wall temperature condition. Results for binary mixtures were also compared with pure fluids. A microscale heater array and Wheatstone bridge circuits were used to maintain the constant temperature of the heating surface and to obtain heat flow rate measurements with high temporal and spatial resolutions. Bubble growth images were captured using a high speed CCD camera synchronized with the heat flow rate measurements. The departure time for binary mixtures was longer than that for pure fluids, and binary mixtures had a higher onset of nucleate boiling (ONB) temperature than pure fluids. In the asymptotic growth region, the bubble growth rate was proportional to a value between $t^{1/6}$ and $t^{1/4}$. The bubble growth behavior was analyzed to permit comparisons with binary mixtures and pure fluids at the same scale using dimensionless parameters. There was no discernable difference in the bubble growth behavior between binary mixtures and pure fluids for a given ONB temperature. And the departure radius and time were well predicted within a $\pm 30\%$ error. The minimum heat transfer coefficient of binary mixtures occurred near the maximum $|y-x|$ value, and the average required heat flux during bubble growth did not depend on the mass fraction of R11 as more volatile component in binary mixtures. Finally, the results showed that for binary mixtures, a higher ONB temperature had the greatest effect on reducing the heat transfer coefficient.

기호설명

A : 기포 형상 변수 [mm]
 A_h : 기포 부착 히터면적 [m²]
 B : 기포 형상 변수 [mm]

C : 기포 형상 변수 [mm]
 C_{pl} : 액체 비열 [J/kgK]
 D : 기포 형상 변수 [mm]
 D : 액체 질량확산도 [m²/s]
 E : 기포 형상 변수 [mm]
 h : 이성분 혼합물 열전달계수 [W/m²K]
 h₁ : 비휘발성 순수성분의 열전달계수 [W/m²K]
 h₂ : 휘발성 순수성분의 열전달계수 [W/m²K]
 h_{fg} : 증발 잠열 [J/kg]
 k_l : 액체 열전도율 [W/mK]

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : mhkim@postech.ac.kr

TEL : (054)279-2165 FAX : (054)279-3199

* 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부

** 엘지전자 DA연구소 (구로) 열교환기그룹

| | |
|------------------------|--|
| Ja | : Jakob 수 ($Ja = \frac{\rho_l C_{p_l} \Delta T_{sup}}{\rho_v h_{fg}}$) [-] |
| \dot{m} | : 증발 질량 유량 [kg/sec] |
| ΔP | : 압력차 ($P_v - P_{sys}$) [Pa] |
| P | : 압력 [Pa] |
| P_c | : 임계 압력 [Pa] |
| P_v | : 기포 증기압력 [Pa] |
| P_{sys} | : 주위 압력(시스템 압력) [Pa] |
| \dot{q} | : 열전달율 [W] |
| $\dot{q}_{average}$ | : 기포 성장에 필요한 평균 유속 [W/m ²] |
| q_{latent} | : 잠열 열전달량 [J] |
| $\dot{q}_{conduction}$ | : 전도 열전달율 [W] |
| r | : 기포 반경 방향 [mm] |
| R | : 기포 반경 [mm] |
| R_c | : 특성 기포 반경 크기 [mm] |
| R_d | : 기포 이탈 반경 [mm] |
| R_{eq} | : 등가 기포 반경 [mm] |
| R^+ | : 무차원 기포 반경 [-] |
| t | : 시간 [sec] |
| t_c | : 특성 시간 크기 [sec] |
| t_d | : 기포 이탈 시간 [sec] |
| t_w | : 기포 대기 기간 [sec] |
| t^+ | : 무차원 시간 [-] |
| T | : 액체 온도 [K] |
| T_c | : 특성 온도 크기 [K] |
| T_{sat} | : 포화 온도 [K] |
| T_{wall} | : 가열벽면의 온도 [K] |
| ΔT_{sup} | : 벽면 과열도 ($T_{wall} - T_{sat}$) [K] |
| v_c | : 특성 속도 크기 [m/sec] |
| V | : 기포의 체적 [m ³] |
| V_L | : 기포 하부의 체적 [m ³] |
| V_U | : 기포 상부의 체적 [m ³] |
| x | : 액체중 휘발성 높은 성분 질량분율[-] |
| y | : 증기중 휘발성 높은 성분 질량분율[-] |

| | |
|----------|---|
| ρ_l | : 액체 밀도 [kg/m ³] |
| ρ_v | : 기체 밀도 [kg/m ³] |
| σ | : 액체 표면장력 [N/m] |
| θ | : 접촉각 (Contact angle) [m ² /s] |

1. 서 론

일반적으로 혼합물의 열전달율이 이상적인 순수물질의 열전달율에 비해서 낮기 때문에 이성분 혼합물의 비등 특성은 순수물질의 비등 특성과 다를 것으로 예상된다.

대부분의 이전의 연구들은 이성분 혼합물의 열전달율의 감소를 액체 농도경계층의 존재를 원인으로 설명하였다. 그러나, 핵비등이 시작되는 온도 (ONB)가 혼합물의 열전달율을 감소시킬 수 있는 중요한 변수들 중의 하나이다. 본 연구에서는 냉매 이성분 혼합물을 이용하여 포화 풀백비등에서 단일기포의 성장 실험 결과를 이용하여 열전달율의 감소에 대한 연구를 수행하였다. ONB 온도 근처에서의 혼합물 단일기포의 성장의 결과로부터 열전달계수를 평가하였고, 이를 순수물질의 열전달계수와 비교하였다.

Scriven⁽¹⁾은 이성분 혼합물의 기포의 성장방정식을 연속, 운동량, 에너지 및 질량 확산의 기본적인 관계식들을 이용하여 시간의 함수로서 제안하였다. Van Stralen⁽²⁾은 이론적인 벽면 과열도와 실제 과열도와와의 차이를 고려하여 Scriven의 기포 성장방정식을 수정하였다. 그러나 제안한 방정식은 Scriven의 기포 성장방정식과 거의 흡사하고, 분모에 ν -치의 저항계수를 포함하는 형태로 변화시킬 수 있다.

많은 연구자들이 ν -치와 유사한 저항계수를 이용하여 혼합물의 열전달계수에 대한 상관식들을 이론 해석을 바탕으로 제안하였다. Stephan & Korner⁽³⁾는 주어진 열유속에서 벽면 과열도에 대한 경험 상관식을 만들었다. 이를 이용하여 이성분 혼합물에 있어서 증기 기포를 생성시키기 위해서 필요한 에너지가 물질전달의 원천인 ν -치의 함수임을 제시하였고, 벽면 과열도의 함수인 열전달 상관식을 얻었다. 또한, Calus & Leonidopoulos⁽⁴⁾는 Scriven의 결과를 이용하여 식 (1)과 같은 벽면 과열도에 기초하여 이성분 혼합물에 대한 열전달 상관식을 제안하였다.

그리스문자

| | |
|----------|-------------------------------|
| α | : 액체 열확산도 [m ² /s] |
|----------|-------------------------------|

$$h = \frac{h_i}{1 + 1.53(0.88 + 0.12P)|y - x|}, \quad h_i = \frac{1}{\frac{x}{h_1} + \frac{1-x}{h_2}} \quad (1)$$

Calus & Rice⁽⁵⁾는 아래의 식 (2)와 같이 이성분 혼합물의 열전달계수의 감소와 기포 성장률의 감소를 관계를 정량적으로 고려하였다.

$$h = \frac{h_i}{\left[1 + |y - x| \left(\frac{\alpha}{D}\right)^{0.5}\right]^{0.7}} \quad (2)$$

Celata et al⁽⁶⁾는 이성분 혼합물의 플비등에 대한 열전달 상관식들을 그들의 논문에서 재검토하여 각각의 차이를 나타내었다. Unal⁽⁷⁾은 식 (3)과 같이 이성분 혼합물의 열전달계수를 환산 압력과 저항계수를 고려하여 상관식을 제안하였다.

$$h = \frac{h_i}{[1 + (b_2 + b_3)(1 + b_4)][1 + b_5]} \quad (3)$$

$$b_2 = (1-x) \ln \frac{1.01-x}{1.01-y} + x \ln \frac{x}{y} + |y-x|^{1.5}, \quad \frac{x}{y} = 1 \text{ for } x=y=0$$

$$b_3 = 0, \quad b_4 = 152 \left(\frac{P}{P_c}\right)^{3.9}, \quad b_5 = 0.92|y-x|^{0.001} \left(\frac{P}{P_c}\right)^{0.66}$$

식 (1), (2) 및 (3)과 같이 주어진 이전의 상관식들은 기포주기, 기포성장, 핵생성밀도, 그리고 ONB 온도가 모두 일정하다는 가정에서 제안되어 있다. 이러한 변수들 모두 열전달율과 열전달계수에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서 수행한 실험에서, 열전달계수는 가열벽면을 일정한 온도로 제어하면서 하나의 기포생성 지점에서 단일기포의 성장 한 주기에 대해서 평가하였다. 각각 ONB 온도 근처에서 순수물질의 열전달 특성과 이성분 혼합물의 열전달 특성을 비교하였다.

단일기포 성장에 대한 이전의 연구들 중 대부분은 기포 아래의 가열벽면을 일정한 열유속으로 제어하면서 핵비등 실험을 수행하였는데, 포화상태에 대한 Staniszewski,⁽⁸⁾ Han & Griffith⁽⁹⁾ 그리고 Cole & Shulman⁽¹⁰⁾의 결과는 동일한 열유속 조건에서 수행된 일련의 결과에서 조차 기포 반경에 대한 규칙적인 반복성을 보여주지 못하였는데, 국소 가열량이 기포의 성장 기간 중 특히 생성

시간 근처에서 가열 조건을 일정하게 유지하기 위해서는 마이크로 초 이내로 제어되어야 하기 때문이다. 이러한 요구 조건이 이전의 연구 결과들의 불규칙한 거동과 연관성이 있다고 판단된다.

최근에 높은 시공간 분해능을 가지는 미세히터를 개발한 Rule et al⁽¹¹⁾과 Rule & Kim⁽¹²⁾의 아이디어를 바탕으로 하여 제작된 미세히터를 이용한 Kim et al⁽¹³⁾이 포화상태의 순수물질에 있어서 단일기포의 성장에 대한 논문을 발표하였다. 이러한 히터를 이용하여 가열벽면의 온도를 일정하게 제어할 수 있었고, 단일기포에 대한 순간적인 열전달율의 변화를 측정할 수 있었다. 본 연구에서도 동일한 미세히터를 가열벽면 온도를 제어하는데 그리고 열전달계수를 평가하는데 이용하였는데, 기포가 성장하는 동안 측정되는 열전달율은 기포의 거동을 분석하는데 중요하기 때문에 정확한 측정이 요구된다. 또한, 본 연구에서 검토한 이성분 혼합물은 냉매 R11과 냉매 R113의 혼합물이었고, 실험의 내용은 Table 1에 나타내었다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 적용한 미세히터에 대한 상세한 내용은 Lee et al⁽¹⁴⁾에 서술되어 있다. 가열벽면을 일정 온도로 유지하면서 열전달량을 측정하기 위하여 Kim et al⁽¹³⁾과 동일한 미세히터를 이용하였는데, 미세히터는 양면을 투명하게 가공한 유리 웨이퍼 위에 VLSI 기술을 이용하여 제작되었다. 먼저 열증착 방법을 이용하여 Ti/Pt층(히터)을 만들고, 파워라인으로 사용될 Ti/Au층을 도포하였다. 미세히터는 2.7×2.7 mm² 내에 0.27×0.27 mm² 크기의 히터 96개가 배열되어 있다. 본 실험에서 사용되어진 미세히터는 Rule et al⁽¹¹⁾의 아이디어를 바탕으로 하여 삼성종합기술원(SAIT)에서 제작되었다. 미세히터는 높은 시간 분해능으로 가열표면의 온도를 일정하게 제어하기 위하여 휘트스톤 브리지회로를 이용하였다. 회로에서 가장 긴 시간지연은 10⁻⁷ sec의 시간 분해능을 가지는 OP 증폭기에서 발생한다.

각 히터의 발열양은 약 7.35 kHz의 속도로 136 msec 동안 각 히터 당 16,000개의 데이터를 12 bit 해상도로 계측 및 저장할 수 있는 데이터 수

집장치를 이용하여 측정되었다. 계측 시작 신호는 고속 CCD 카메라에도 동시에 전달되어 영상 데이터가 히터의 발열양 데이터와 동기화되어 저장된다.

미세히터 배열 내의 96개 히터의 온도는 열선 풍속계에 적용되는 휘트스톤 브리지회로 96개에 의해 개별적으로 조정된다. 실험에 앞서 20 ~ 80 °C 영역에 대해 1 °C의 범위로 하여 히터의 표면 온도에 대한 히터의 저항치를 결정하는 실험을 수행하였다. 이렇게 교정된 미세히터를 이용하여, 본 연구에서 검토하게 될 냉매 이성분 혼합물들의 ONB 온도는 가열벽면의 온도를 조절하면서, 규칙적인 기포의 사이클이 관찰되는 최소 가열벽면의 온도로 측정하였다.

Fig. 1에는 실험장치에 대한 개략도를 보여 주고 있다. 미세히터는 주실험부의 한가운데에 설치하였다. 주실험부의 측면과 밑면에서 기포 이미지를 촬영할 수 있도록 설계하였으며, 밑면 촬영 시에는 알루미늄이 증착된 광학용 거울을 사용하였다. 그리고 챔버 내부 액체의 온도를 조절하기 위하여 챔버 바깥면에 10개의 1.55 W/cm² 용량의 박막 히터를 부착하였다. 고속 CCD 카메라의 촬영시에 필요한 조명을 위해 250 W 용량의 할로겐 램프를 이용하였다. 기포의 이미지는 초당 1000 또는 4000 frame의 속도를 가지는 CCD 카메라를 이용하여 촬영하였다.

박막 히터에 의해 풀의 온도가 포화온도로 일정하게 유지되고, 설정된 온도를 유지하기 위해 미세히터에 계속 전원을 인가하여 가열벽면 위에서 기포의 생성(Inception), 성장(Growth) 그리고 이탈(Departure)의 규칙적이고 주기적인 거동이 정상상태에 도달하는 것을 확인한 후에 계측을 시작하였다. [Kim et al.⁽¹³⁾ 참조] 자세한 실험 기법은 Rule & Kim⁽¹²⁾과 Bae et al.⁽¹⁵⁾ 및 Bae et al.⁽¹⁶⁾의 논문에 기술되어 있다.

2.2 불확실성

기포 크기 측정의 기준은 기준자를 사용하는 데, 기포가 있는 위치에 놓고 촬영한 결과 순수 R11과 혼합물 1에서는 100 μm에 해당되는 픽셀 수가 30개로 측정되었다. 따라서 1 픽셀이 3.333 μm가 되었다. 다른 실험 조건들은 100 μm에 해당되는 픽셀 수가 11개로 측정되었고, 1 픽셀은 9.091 μm이었다. 촬영된 사진에서 기포 크기

를 측정할 때 ±1 픽셀의 오차가 발생하므로 기포 지름 측정에 있어서 최대 오차는 순수 R11과 혼합물 1의 경우는 ± 1.8 %이었고, 나머지의 조건들은 ± 3.4 %이었다.

가열 벽면인 미세히터는 OMEGA사의 열전대 보정기를 이용하여 보정되어 0.53 °C의 오차를 가지고 있는 열전대를 사용하여 보정하였다. 히터의 온도를 조절하기 위하여 전자회로 내에 0 ~ 512의 디지털 수에 따라 0 ~ 20 kΩ의 변위를 가지는 디지털 가변저항을 사용하였다. 본 연구에서는 히터온도의 변화폭을 60 °C가 되도록 보정하였다. 디지털 조정숫자 1에 대한 온도변화 폭은 0.12 °C가 된다. 이에 따라 디지털 조정 숫자에 대한 미세히터 벽면 온도의 불확실성은 0.06 °C가 된다. 따라서 벽면 온도의 불확실성은 보정에 사용된 열전대의 불확실성과 디지털 조정에 의한 불확실성을 합한 0.59 °C가 된다.

2.3 실험 조건

본 연구에서 수행된 이성분 혼합물에 대한 포화상태 핵비등 실험은 R11과 R113의 6가지 혼합물을 이용하여 수행하였다. 혼합물에 있어서 R11의 질량분율이 100%, 81.5%, 53.6%, 28.0%, 13.9% 그리고 0%이었다. 각 실험 조건들은 기준 조건으로 100%와 0%를, 가운데 조건으로 53.6%를, 최대와 가운데 사이에 81.5%를, 최소와 가운데 사이에 R11과 R113의 이성분 혼합물의 최소 β -저점으로 평가된 질량분율인 28.0%와 13.9%를 선정하였다. y는 증기에 있어서 좀더 휘발성이 강한 성분(R11)의 질량분율이고 x는 액체에 있어서 좀더 휘발성이 강한 성분(R11)의 질량분율이다.

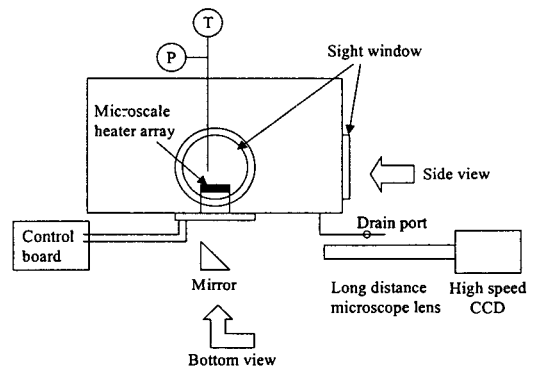


Fig. 1 Schematics of the experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions and results

| | Mass(mole) fraction of R11 [%] | P _{sys} [atm] | T _{sat} [°C] | T _{wall} [°C] | ΔT _{sup} [°C] | Ja | t _d [sec] | R _d [mm] | t _w [sec] | q ["] _{average} [W/cm ²] | h [W/cm ² K] |
|-----------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|-------------------------|------------------------|-------------------------|---|----------------------------|
| R11 | 100(100) | 1 | 23.71 | 35.0 | 11.29 | 13.83 | 0.0032 | 0.318 | 0.0232 | 53.4 | 4.73 |
| Mixture 1 | 81.5(85.7) | 1 | 25.79 | 40.9 | 15.11 | 18.70 | 0.0057 | 0.411 | 0.0124 | 63.0 | 4.17 |
| Mixture 2 | 53.6(61.2) | 1 | 29.91 | 43.1 | 13.19 | 19.55 | 0.0044 | 0.341 | 0.0163 | 52.6 | 3.99 |
| Mixture 3 | 28.0(34.5) | 1 | 35.63 | 51.0 | 15.37 | 16.54 | 0.0040 | 0.315 | 0.0164 | 47.0 | 3.06 |
| Mixture 4 | 13.9(18.1) | 1 | 40.43 | 54.9 | 14.47 | 18.66 | 0.0051 | 0.371 | 0.0160 | 55.3 | 3.82 |
| R113 | 0(0) | 1 | 47.58 | 61.0 | 13.42 | 17.77 | 0.0038 | 0.352 | 0.0033 | 54.5 | 4.06 |
| R11 | 100 | 1 | 23.71 | 37.1 | 13.39 | 16.40 | | | | | |
| | | | | 38.9 | 15.19 | 18.61 | | | | | |

3. 차원 해석

본 연구에서 측정된 기포의 등가반경을 다른 작동유체와 가열조건에서 수행된 기존 연구의 결과들과 동일한 크기의 길이와 시간으로 비교하기 위하여 차원 해석을 수행하였다.

가열벽면에서 성장하는 기포의 성장특성이 기포내부 기체와 주위 액체 사이의 압력차(ΔP)에 의해 특성화될 수 있다고 가정하면, 특성 속도 크기는 다음과 같이 결정될 수 있다. 여기서 2/3는 Mikic et al⁽¹⁷⁾의 무차원 매개변수와의 비교를 위해 삽입한 것이다.

$$v_c = \frac{R_c}{t_c} = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{3 \rho_l}} \quad (4)$$

특성 시간 크기는 기포 경계에 존재하는 주위 액체의 온도 구배로 인한 열전달율(열전도)과 기포의 체적 변화에 해당하는 잠열에 의한 열전달량과의 비로서 아래와 같이 결정될 수 있다.

$$\frac{q_{latent}}{q_{conduction}} = \frac{\rho_v h_{fg} \frac{4}{3} \pi R^3}{k_l 4 \pi R^2 \frac{\partial T}{\partial r}} = \frac{1}{3} \frac{\rho_v h_{fg} R_c^3}{k_l R_c^2 \frac{T_c}{R_c}} \frac{R^{+3}}{R_c^2 \frac{\partial T^+}{\partial r^+}} = t_c \frac{R^+}{\partial T^+} \quad (5)$$

$$t_c = \frac{1}{3} \frac{\rho_v h_{fg} R_c^2}{k_l T_c} = \frac{1}{3} \frac{\rho_v h_{fg} R_c^2}{k_l \Delta T_{sup}} = \frac{1}{3} \frac{1}{Ja \alpha} R_c^2 \quad (6)$$

여기서 Ja수는 포화상태 풀에서의 특성 온도 크기인 벽면 과열도를 이용하여 정의하였다. 따라서 식 (4)와 (6)으로부터, 특성 반경과 시간 크기는 아래와 같이 표현된다.

$$R_c = \sqrt{\frac{27}{2}} Ja \alpha \sqrt{\frac{\rho_l}{\Delta P}}, t_c = \frac{9}{2} Ja \alpha \frac{\rho_l}{\Delta P} \quad (7)$$

무차원의 기포 반경과 시간은 다음과 같다.

$$R^+ = \frac{R}{R_c}, t^+ = \frac{t}{t_c} \quad (8)$$

열적 성장영역에서는 크기 매개변수로서 이탈시 기포 반경을 이용하였다. 이탈시점 근처에서는 반경방향의 가속도에 의한 운동량과 운동에너지에 의한 운동량을 무시할 수 있으므로 압력차는 이탈 반경과 관계되어질 수 있다.

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R_d} \quad (9)$$

따라서, 열적 성장영역에서의 특성 반경과 시간 크기는 식 (9)를 식 (7)에 대입하여 정리하면 식 (10)과 같이 표현된다.

$$R_c = \frac{\sqrt{27}}{2} Ja \alpha \sqrt{\frac{\rho_l R_d}{\sigma}}, t_c = \frac{9}{4} Ja \alpha \frac{\rho_l R_d}{\sigma} \quad (10)$$

4. 실험결과 및 고찰

4.1 이성분 혼합물의 기포 성장 실험결과

기포의 등가반경은 단일 기포의 성장 거동을

측면에서 촬영한 Fig. 2와 같은 기포 사진으로부터 구해졌다. 이를 위해 Fig. 3과 같이 수직으로 는 축대칭의, 수평으로는 비대칭 구조의 기포 형 상으로 가정하였다. Fig. 3에 표시된 것과 같이 기포의 상부에 한점, 기포의 최대 길이 위치 에 두점 그리고 가열벽면과의 접촉면에 두점의 위치 를 일정한 픽셀 크기로 촬영한 사진에서 픽셀의 숫자 그리고 이미지상의 좌표값으로 기록하였다. 기록된 좌표들로부터 Fig. 3의 A, B, C, D의 크기 가 계산된다. A, B, C, D의 크기를 이용하여 기 포 형상 가정으로부터 상반구와 하반구의 체적은 다음과 같이 계산할 수 있으며, 이로부터 기포의 전체 체적을 구하고 등가의 반경을 계산하였다.

가정된 형상의 등가 기포반경에 대한 최대 불 확실성은 3.8 %이었다.

$$V_U = \frac{2}{3}\pi B^2 A \tag{11}$$

$$V_L = \pi B^2 \left(D - \frac{D^3}{3E^2} \right) E = \sqrt{\frac{D^2}{1 - \frac{(C/2)^2}{B^2}}} \tag{12}$$

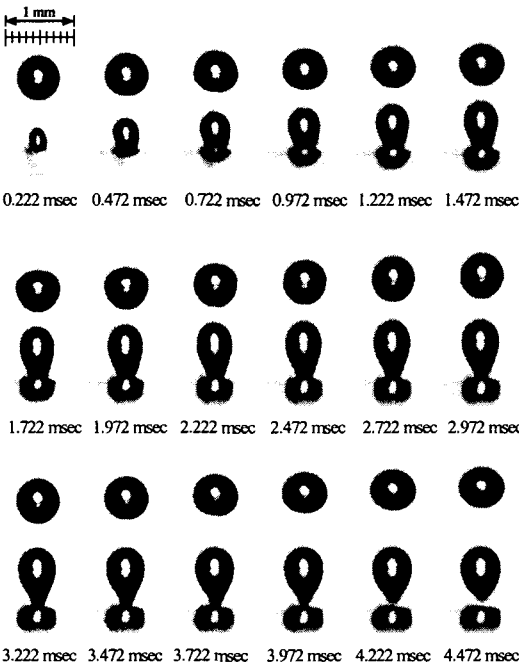


Fig. 2 Side view of a bubble for the case with 28% of R11 (Twall=51.0°C)

$$V = V_U + V_L = \frac{4}{3}\pi R_{eq}^3 \tag{13}$$

$$R_{eq} = \left(\frac{1}{2}B^2 A + \frac{3}{4}B^2 \left(D - \frac{D^3}{3E^2} \right) \right)^{\frac{1}{3}} \tag{14}$$

Fig. 2는 28.0 %의 R11 질량분율을 가진 혼합 물 2의 경우에 CCD 카메라로 촬영된 기포의 연 속된 이미지들이다. Fig. 2의 이미지들은 Kim et al⁽¹³⁾의 순수 R113의 이미지들과 거의 동일한 형 상을 가지고 있음을 알 수 있다.

기포가 성장하는 동안 순수물질과 이성분 혼합 물질의 ONB 근처에서 측정된 기포 등가반경을 Fig. 4와 같이 나타내었다. 기포의 성장률은 열적 성장영역에서 시간의 1/4승에서 1/6승에 비례하는 것으로 나타났다. 28.0 %의 R11 질량분율의 경우 에 가장 작은 성장률을 가진 것으로 나타났으나, 성장률은 혼합물질과 순수물질에 크게 영향을 받 지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 식 (7)을 이용하여 무차원화된 이성분 혼합물의 기포 거동을 보여주고 있다.

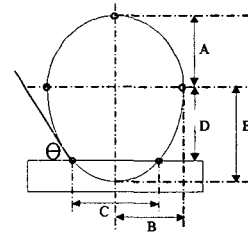


Fig. 3 Bubble geometry to calculate bubble volume

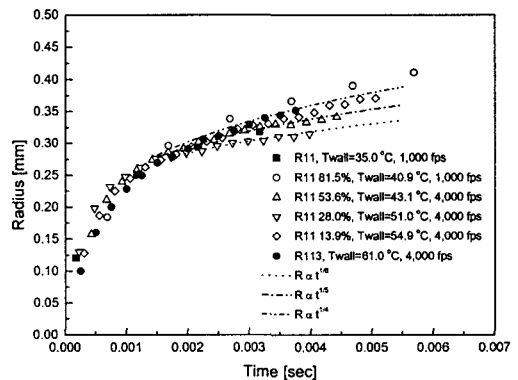


Fig. 4 Bubble growth behavior of mixtures for each near ONB temperatures including pure fluids

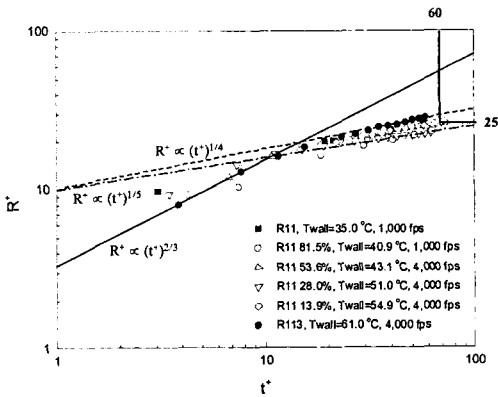


Fig. 5 Dimensionless behavior of bubble growth

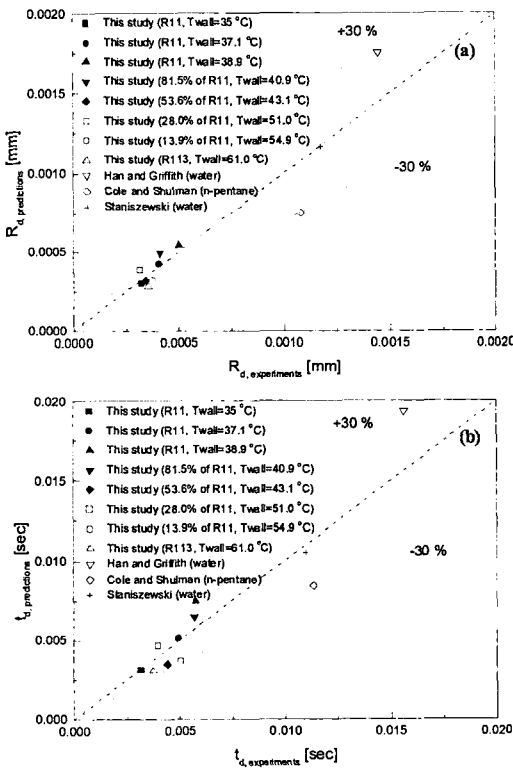


Fig. 6 Comparison of the departure radius and time: (a) departure radius and (b) departure time

앞서의 결과와 같이 순수물질의 기포 거동과 매우 유사함을 알 수 있다. 초기 성장영역에서의 기포의 성장 특성은 Kim et al.⁽¹³⁾에서 제시한 바대로 불확실성이 큰 첫 번째 반경을 제외하고는

시간의 2/3승에 비례하는 것으로 나타나고, 열적 성장영역에서는 무차원 기포반경은 무차원 시간의 1/5승에 비례하는 특성을 보여주고 있다. 또한 Lee et al.⁽¹⁴⁾에서 언급한 바대로 무차원 이탈시간과 반경이 약 60과 25이었다. 무차원 값으로부터 식 (10)을 이용하여 이탈 반경과 시간에 대하여 정리하면 아래의 식 (15)과 같은 상관식으로 표현된다.

Fig. 6에 실험결과와 위의 상관식으로부터 계산된 이탈 반경과 시간을 비교하였다. 30%의 오차 내에서 이탈 반경과 시간을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

$$R_d = \left[\frac{25}{2} \sqrt{27} Ja \alpha \sqrt{\frac{\rho_l}{\sigma}} \right]^2$$

$$t_d = 135 Ja \alpha \frac{\rho_l R_d}{\sigma} \quad (15)$$

4.2 이성분 혼합물의 기포 성장 실험결과

이성분 혼합물에 대한 기포 성장률을 거의 동일한 벽면 과열도를 가지는 순수물질의 기포 성장률과 Fig. 7에 비교하여 나타내었다. ONB 점에서의 혼합물에 대한 벽면 과열도는 거의 15K이었고, Table 1과 같이 R11의 벽면 온도가 38.9°C인 경우에 벽면 과열도가 거의 15K이었다. 이성분 혼합물의 기포 반경이 이전의 연구자들 [Stephan & Korner,⁽³⁾ Calus & Leonidopoulos⁽⁴⁾과 Unal⁽⁷⁾]의 실험결과와 동일하게 순수물질 R11의 반경보다 작았는데, 이는 직접적으로 열전달율과 열전달계수의 감소와 관계가 있다.

이전의 연구들에서, 순수물질보다 이성분 혼합물의 비등 열전달계수의 감소가 좀 더 휘발성이 강한 물질의 낮은 질량분율에서 가장 크게 나타난다고 발표되었다. Table 1에서 보듯이 본 연구에서 실험된 이성분 혼합물의 ONB에서의 벽면 과열도는 순수물질의 과열도보다 대개 높았다. Fig. 8(a)에서와 같이, 열전달계수에 대한 벽면 과열도 증가 효과를 검토하였다. 채워진 기호는 실험결과를 나타내고, 빈 기호는 이전의 연구들의 상관식들로부터 계산된 것이다. 본 연구에서 얻어진 열전달계수들은 기포 성장에 필요한 평균 열유속과 벽면 과열도를 이용하여 아래의 식 (16)을 이용하여 구하였다.

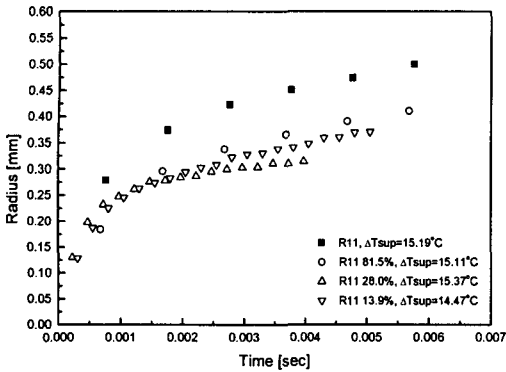


Fig. 7 Comparison of bubble growth in mixtures and pure fluids with almost the same wall superheat

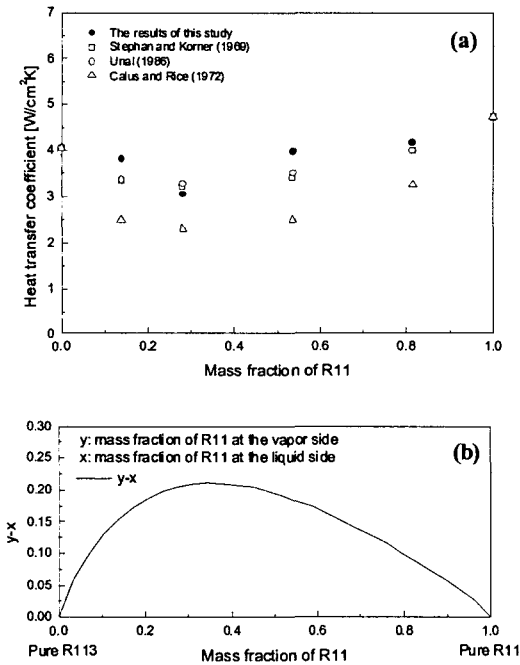


Fig. 8 Heat transfer coefficient of mixtures: (a) heat transfer coefficient; (b) variation of $y-x$ as a function of the R11 mass fraction

$$h = \frac{q_{average}^*}{\Delta T_{sup}} \quad (16)$$

여기서 평균 열유속은 아래의 식 (17)로서 측정된 순간 열전달율을 생성부터 이탈까지 적분을 통해 계산된 것이다.

$$q_{average}^* = \frac{\int_{t=0}^{t=t_d} \dot{q} dt}{A_h t_d} \quad (17)$$

여기서 면적(A)은 기포가 부착된 미세히터의 표면 면적이다.

Fig. 8 (a)에서와 같이 열전달계수의 최소값은 이전의 연구들의 결과들과 같이 Fig. 8(b)에서 보듯이 $y-x$ 가 최대인 지점에서 나타난다. 식 (1)~(3)에서와 같은 모든 이전의 상관식들은 저항계수, ν -지,를 가지고 있다. 이러한 저항계수는 순수물질의 기포 성장방정식으로부터 기포 경계에서의 질량 확산을 이용하여 혼합물에 대한 성장방정식을 유도한 Scriven⁽¹⁾과 van Stralen⁽²⁾의 이론적인 해석에서도 나타난다. 그들의 해석에 근거하여 이전의 연구들은 저항계수, ν -지,를 이용하여 이성분 혼합물의 열전달계수에 대한 많은 상관식들을 제안하였다. 그러나 이러한 상관식들은 일정한 기포주기, 기포성장율, 핵생성밀도와 ONB 온도를 가정하였는데, 모든 이러한 인자들은 근본적으로 열전달율과 열전달계수의 특성에 영향을 미친다.

본 연구에서는 열전달계수를 가열벽면의 온도를 일정하게 제어하면서 하나의 핵생성위치에서만 주기의 단일기포 성장에 대해서 평가하였다. 이성분 혼합물의 벽면과열도가 Table 1에서와 같이 ONB 조건에서 순수물질보다 높았지만, 이성분 혼합물의 기포 반경은 상대적으로 순수물질에 비해 동등한 수준이었다. (Fig. 4 참조) 순수물질과 이성분 혼합물의 평균 열유속은 작은 차이가 존재하였다. 따라서, 이성분 혼합물의 ONB 점에서의 벽면 과열도의 증가가 열전달계수 감소의 주된 이유인 것으로 판단된다.

5. 결론

냉매 R11과 R113으로 구성된 이성분 혼합물에 대한 핵비등 실험을 가열벽면의 온도를 일정하게 제어하면서 수행하였다. 이를 위해 휘트스톤 브리지회로를 이용하는 높은 시공간적 해상도를 가지는 미세히터를 가열벽면의 일정온도 제어와 순간 열전달율의 측정을 위해 이용하였다. 고속의 CCD 카메라를 이용하여 기포거동을 분석하기 위

하여 초당 1000과 4000 frame의 속도로 열전달율의 측정과 동기화하여 기포 형상을 촬영하였다.

기포의 기하학적 결과들은 촬영된 기포의 이미지들로부터 평가하였는데, 동일한 체적의 구의 등가반경은 기포 형상 가정에 대한 작은 오차를 나타내었다. 이성분 혼합물의 기포의 성장률은 순수물질과 차이가 거의 없는 초기 성장영역에서는 시간의 2/3승에, 열적 성장영역에서는 시간의 1/6에서 1/4승에 비례하는 성장률을 나타내었다. 이성분 혼합물은 거의 동일한 ONB 조건에서는 기포의 이탈반경과 시간이 순수물질보다 적었다. 그리고 대개 순수물질보다 더 큰 벽면 과열도를 가지는 것으로 나타났다.

이성분 혼합물의 기포성장 특성을 동일한 크기로서 순수물질과 비교, 검토하기 위하여 무차원 변수들을 이용하였다. 기포의 성장 특성은 거의 동일한 것으로 나타났다. 또한 무차원 이탈시간과 반경이 대개 약 60과 25 정도이었다.

이성분 혼합물의 최소 열전달계수 특성은 이전의 연구결과들과 같이 최대의 ΔT -치값 근처에서 나타났다. 거의 ONB 조건에서 평균 열유속은 R11의 질량분율에 관계가 없었으며, 이성분 혼합물의 열전달계수의 감소는 순수물질에 비해 더 큰 벽면과열도의 영향이며, 이러한 영향은 기포의 성장률에 있어서의 감소와 상응하였다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실사업의 연구비로 수행되었으며 또한 본 연구에 적용된 미세히터의 제작에 많은 도움을 주신 삼성종합기술원(SAIT)과 이성분 혼합물에 대한 기초적인 결과를 제공해주신 한국원자력연구소의 배성원박사님께도 본 지면을 통하여 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Scriven, L. E., 1959, "On the Dynamics of Phase Growth," *Chemical Engineering Science*, Vol. 10, pp. 1~13.
- (2) Van Stralen, S. J. D., 1967, "The Mechanism of Nucleate Boiling in Pure Liquids and in Binary Mixtures - Part II," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 10, pp. 1021~1046.
- (3) Stephan, K. and Korner, M., 1969, "Berechnung des Wärmeübergangs Verdampfender Binärer Flüssigkeitsgemische," *Chemie Ingenieur Technik*, Vol. 41, pp. 409~417.
- (4) Calus, W. F. and Leonidopoulos, D. J., 1974, "Pool Boiling-Binary Liquid Mixtures," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 17, pp. 249~256.
- (5) Calus, W. F. and Rice, P., 1972, "Pool Boiling-Binary Mixtures," *Chemical Engineering Science*, Vol. 27, pp. 1687~1697.
- (6) Celata, G. P., Cumo, M. and Setaro, T., 1994, "A Review of Pool and Forced Convective Boiling of Binary Mixtures," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 9, No. 4, pp. 367~381.
- (7) Unal, H. C., 1986, "Prediction of Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Coefficients for Binary Mixtures," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, No. 4, pp. 637~640.
- (8) Staniszewski, B. E., 1959, "Nucleate Boiling Bubble Growth and Departure," *M. I. T. DSR Project No. 7-7673, Technical Report No. 16*.
- (9) Han, C. H. and Griffith, P., 1965, "The Mechanism of Heat Transfer in Nucleate Pool Boiling-Part I Bubble Initiation, Growth and Departure," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 8, pp. 887~904.
- (10) Cole, R. and Shulman, H. L., 1966, "Bubble Growth Rates at High Jakob Numbers," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 9, pp. 1377~1390.
- (11) 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*.
- (12) Rule, T. D. and Kim, J., 1999, "Heat Transfer Behavior on Small Horizontal Heaters During Pool Boiling," *J. of Heat Transfer*, Vol. 121, No. 2, pp. 386~393.
- (13) Kim, J., Lee, H. C., Oh, B. D. and Kim, M. H., 2005, "Study on the Single Bubble Growth During Nucleate Boiling at Saturated Pool," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 29, No. 2, pp. 169~179.
- (14) Lee, H. C., Oh, B. D., Bae, S. W. and Kim, M. H., 2003, "Single Bubble Growth in Saturated Pool Boiling on a Constant Wall Temperature

- Surface," *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol. 29, No. 12, pp. 1857~1874.
- (15) 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.
- (16) Bae, S. W., Lee, H. C. and Kim, M. H., 2000, "Wall Heat Flux Behavior of Nucleate Pool Boiling Under a Constant Temperature Condition in a Binary Mixture System," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 24, No. 9, pp. 1239~1246.
- (17) Mikic, B. B., Rohsenow, W. M. and Griffith, P., 1970, "On Bubble Growth Rates," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 13, pp. 657~666.