

< 논문 >

미세 입자로 충전된 캐비티에서의 열 기포 형성

정광훈* · 이헌주** · 장영수** · 이윤표** · 김호영†
(2006년 9월 7일 접수, 2007년 1월 10일 심사완료)

Formation of Thermal Bubble from Particle-Filled Microcavity

Kwang-Hun Jeong, Heon-Ju Lee, Young-Soo Chang, Yoon-Pyo Lee and Ho-Young Kim

Key Words : Thermal Bubble(열기포), Micro-porous Cavity(다공성 미세 캐비티), Superheat(과열도), Nucleate Boiling(핵비등)

Abstract

Thermal bubble formation is a fundamental process in nucleate boiling heat transfer and many microelectromechanical thermal systems. One of the established facts is that heterogeneous nucleation is originated from vapors trapped inside cavities. Based on this, we performed an experimental study on the formation of thermal bubbles from microcavity fabricated by microfabrication technology on a copper plate. The cavity was filled with aluminum particles to enhance thermal bubble formation. We observed the thermal bubble behaviors, such as bubble incipience, diameter, frequency and coalescence during nucleate boiling. The experimental data showed that the superheat required to trigger the bubble formation was significantly reduced when the cavity was filled with microparticles. We found that the initial increase of superheat led to the increase of both the departure diameter and frequency while the further increase of superheat caused multiple bubbles to coalesce resulting in the decrease of departure frequency.

기호설명

Bo : Bond 수 ($= \frac{g(\rho_l - \rho_v)d^2}{\sigma}$)

C_1, C_2, C_3 : 상수값

c_l : 정적 비열(J/kg K)

d : 표면 이탈 시의 열기포 지름(μm)

f : 열기포 발생 주파수(Hz)

g : 중력가속도(m/s^2)

h_{lv} : 증발 엔탈피(kJ/kg)

Ja : Jakob 수 ($= \frac{\rho_l c_l (T_l - T_{sat})}{\rho_v h_{lv}}$)

P_l : 챔버 내의 압력(N/m^2)

Pr : Prandtl 수 ($= \frac{\nu}{\alpha}$)

P_v : 열기포 내부의 압력(N/m^2)

r_e : 열기포 반지름(μm)

r_{min} : 미세 캐비티의 반지름(μm)

T_l : 유체의 온도($^{\circ}\text{C}$)

T_{sat} : 포화온도($^{\circ}\text{C}$)

α_l : 열확산계수(m^2/s)

μ : 점성계수(Ns/m^2)

ν_v : 포화증기 비체적과 포화액 비체적간의 차(m^3/kg)

ρ_l : 포화액 밀도(kg/m^3)

ρ_v : 포화증기 밀도(kg/m^3)

σ : 표면장력(N/m)

ν : 동점성계수(m^2/s)

* 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 회원, 한국과학기술연구원 열유동제어연구센터

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부,
정밀기계설계공동연구소

E-mail : hyk@snu.ac.kr

TEL : (02)880-9286 FAX : (02)880-9287

1. 서론

액체의 비등 시 발생하는 열기포에 대한 연구는

오래 전부터 이루어져 왔으며 최근에 들어서도 고 집적화된 전자장비의 냉각, 액체의 상변화를 이용한 마이크로 구동기 등과 관련된 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 특히, 마이크로 구동기는 21세기 공학 기술 중 가장 관심을 모으고 있는 분야의 하나인 마이크로-나노 기술과 연관되어 상당히 주목을 받고 있다.

열기포에 대한 이전 연구들의 대부분은 열전달 향상이라는 점에 초점이 맞추어져 있어 과열도가 수십 $^{\circ}\text{C}$ 이상이다. 뿐만 아니라 열기포 발생 표면에는 단일 비등핵(nucleation site)이 형성되어 있는 것이 아니라 매우 많은 비등핵(natural nucleation site)이 형성되어 있다. 결국 높은 과열도와 다수의 비등핵으로 인해 무수한 열기포들이 동시에 발생하므로 이러한 연구 결과들은 단일 열기포의 거동에 대한 연구로 보기 힘들다. 최근에 진행되는 마이크로 라인 히터를 이용한 연구⁽¹⁾에서는 단일 열기포가 발생한다는 점에서 이전 연구들과 차별성을 가진다. 하지만 열기포 발생 표면부에 미세캐비티가 존재하지 않으므로 열기포를 발생시키기 위해서는 50°C 이상의 과열도가 요구된다.⁽²⁾ 결국 이 경우 역시 미세 캐비티에서 발생하는 일반적인 열기포의 거동을 다룬다고 말하기 어렵다.

본 연구에서는 보다 일반적으로 발생하는 열기포의 거동을 살펴보기 위해, 미세캐비티가 존재하는 단일 활성비등핵을 생성시켜 실험을 실시하였다. 이러한 단일 열기포 거동에 대한 연구는 비등과 관련된 다양한 분야의 기초 지식이 되리라 기대한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 크게 실험환경 제어부와 데이터 취득부로 나눌 수 있다. 실험환경 제어부는 열기포 발생을 위한 히터, 챔버 내 압력 조절을 위한 진공펌프와 수냉식 열교환기로 구성되어 있으며 데이터 취득부는 챔버 내 압력 측정을 위한 압력센서와 챔버 내의 온도, 열기포 발생 표면부의 온도, 유체의 온도를 측정하기 위한 열전대들로 구성되어 있다. 또한 열기포 발생을 시각적으로 관측하기 위해 초당 1000 프레임의 속도로 이미지를 저장할 수 있는 고속카메라를 설치하였다. 열기포의 거동을 살펴보는데 있어서 어려운 점 중의 하나는 국부적 온도차로 인해 주변 유체에 밀도차가 생기게 되어 이미지 왜곡 현상이 일어나게 된다는 것이다. 이때문에 열기포의 크기 측

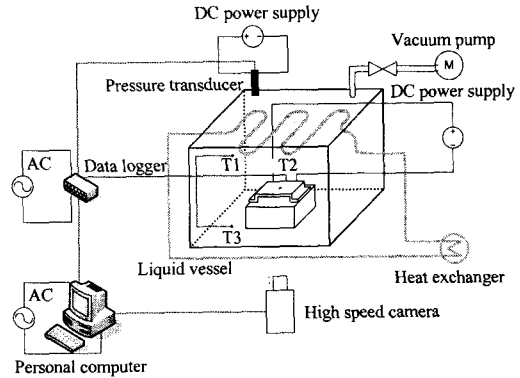


Fig. 1 Experimental setup of bubble generation

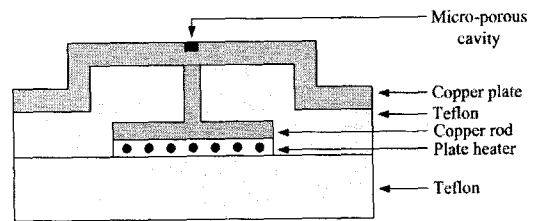


Fig. 2 Detailed view of bubble generation part

등 실험결과를 정량적으로 분석하는데 있어 정확성이 떨어지게 된다. 본 연구에서는 Fig. 2에서 보는 바와같이 히터에서 발생한 열이 구리봉을 통해 전달될 수 있게 하여 미세 캐비티 주변부만을 가열할 수 있게 함으로써 이미지 왜곡 현상을 줄이고 이를 통해 보다 정확한 실험 결과 분석이 가능하도록 하였다.

2.2 미세 캐비티 형성과정

본 연구와 이전 연구들과의 가장 큰 차이점은 비등핵 형성 방법이다. 이전 연구자들은 히터 표면에 자연적으로 형성된 비등핵을 관측의 대상으로 하거나 열전도성이 뛰어난 물질을 히터 표면에 코팅시켜 인위적으로 비등핵을 형성시켰다. 하지만 이런 경우의 대부분은 열전달 측면에 초점이 맞추어져 있어 다수의 열기포가 발생하므로 단일 열기포의 거동을 관측하고 예측하는 데에는 무리가 있다. 그래서 최근 연구자들은 단일 비등핵을 형성하기 위해 Deep-RIE 공정을 이용하여 수~수십 μm 직경의 홀(hole)을 만들고 이렇게 만들어진 홀에서 발생하는 열기포의 거동에 대하여 연구하고 있다.⁽³⁾ 하지만 이러한 경우 제작상의 번거로움과 비용문제뿐만 아니라 실험 유체에 따라 홀의 크기를 재선정해야 되는 등 어려움이 있다. 본 연구에서는 negative PR을 이용하여 원통형 홀을 형성시키고 여기에 산화알루미늄 가루(alumina powder)를 채워넣어 단일 비

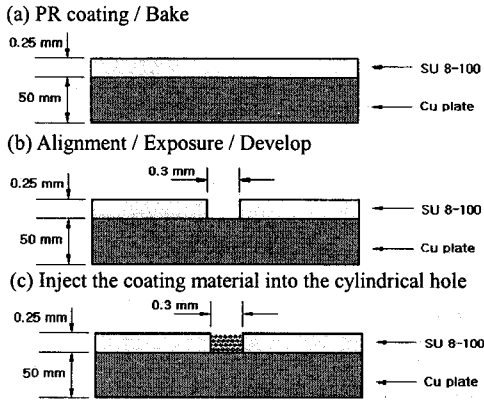


Fig. 3 Fabrication process flow of micro porous cavity

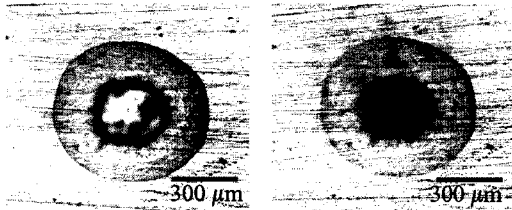


Fig. 4 Image of micro-porous cavity(left : before, right : after)

등핵을 형성시킴으로써 기존 연구에서 발생할 수 있는 어려움을 개선하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 실시한 단일 비등핵 형성 방법을 도식적으로 나타낸 것이다. 먼저, 구리판(copper plate)에 negative PR인 SU-8을 균일한 두께로 코팅한다. 그런 다음, 캐비티가 그려진 마스크(mask)를 구리판에 올리고 자외선 (ultraviolet rays)을 조사시킨 후 현상액에 담궈 두면 Fig. 3의 (b)에서와 같은 원통형 홀이 만들어 진다. 이렇게 만들어진 원통형 홀에 코팅 물질을 채워넣는다. 본 연구에서는 산화알루미늄 가루, 에폭시(epoxy), 이소프로필알콜(isopropyl alcohol)을 혼합하여 코팅 물질을 만들었으며 각 물질 간의 혼합비는 산화알루미늄 가루 : 에폭시 : 이소프로필알콜 = 2 g : 1 g : 10 g이다. 최종적으로 만들어진 형상은 Fig. 3의 (c)와 같다. Fig. 4에서 원통형 홀이 코팅 물질로 완전히 채워졌음을 알 수 있다.

2.3 실험방법

실험에 사용된 유체는 FC-72로 대기압에서의 비등점은 56℃로 알려져 있다. 실험유체의 작동환경은 0.38 atm(비등점: 30.3℃)을 임의의 기준으로 선정하였다. 이러한 기준압력뿐만 아니라 0.32 atm(비등점: 26.1℃), 0.47 atm(비등점: 35.9℃) 그리고

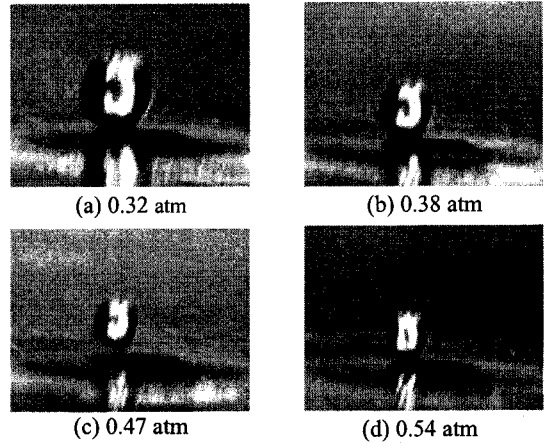


Fig. 5 Images of bubble incipience

Table 1 Experimental conditions and results

Condition		Result	
Pressure (atm)	Boiling point (°C)	Superheat (°C)	Departure diameter (μm)
0.32	26.1	2.6	300
0.38	30.3	1.3	215
0.47	35.9	0	180
0.54	39.6	-1.3	160

0.54 atm(비등점: 39.6℃)을 실험환경으로 고려하였다. 과열도는 히터에 전력을 공급하는 전원공급기로 제어하였다.

미세캐비티가 열기포 발생에 주는 영향을 살펴보기 위해서는 미세캐비티내에 미세기포가 포획되어야 하므로 일정 수준의 용존가스는 있어야한다. 따라서 본 연구에서는 모든 실험을 시작하기에 앞서 용존가스를 일정수준으로 낮추기 위해, 40℃의 가열판에서 1시간 동안 400 RPM의 속도로 회전어 주었다. 모든 실험 결과들은 고속 카메라로 1000 frames/s 속도로 녹화했으며 녹화 영상을 이미지 분석 프로그램을 이용하여 열기포의 거동을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 초기 기포 발생시의 과열온도

본 연구에서 과열도는 챔버 내의 압력을 측정하고 이를 포화온도로 환산한 후, 히터의 온도와 포화온도의 차이로 정의하였다. 각 압력조건에서 최초 열기포가 발생할 때의 이미지를 Fig. 5에 나타내었으며, 정량적인 결과는 Table 1에 있는 바와 같다. 이들에게서 보는 바와 같이 챔버 내의 압력이 증가함에 따라 최초 열기포를 발생시키는데 필요

한 과열도와 열기포의 크기는 감소하는 경향을 보였다. 단, 챔버 내의 압력이 0.54 atm인 경우에는 비등점보다 1.3℃ 작은 경우에 최초의 열기포가 발생하였다. 비등점 이하에서 열기포가 발생하는 것은 Honda⁽⁴⁾와 You⁽⁵⁾의 실험에서도 확인되었다. Honda의 경우는 비등점 10℃(FC-72, 1atm)아래에서 열기포가 발생하였고 You의 경우는 비등점 15℃(FC-72, 150 kPa)아래에서 열기포가 발생하였다. 비등점이하에서 열기포가 발생하는 것은 미세 캐비티에 포획된 미세기포의 영향때문이라고 생각된다. 표면장력은 미세캐비티에 포획된 기포의 이탈을 방해하고 부력은 미세기포를 표면으로부터 이탈시키도록 한다. 온도가 상승하면 표면장력은 감소하고 미세기포 내의 기체는 팽창하므로 부력은 증가하게 된다. 결국 온도 상승으로 부력이 표면장력보다 커지면 미세기포가 상승하게 된다. 또한 이때의 유체온도가 비등점 부근이라면 미세기포는 과중효과(seeding phenomenon)⁽⁶⁾를 일으켜 지속적인 열기포 발생을 가능하게 할 것이다.

압력이 증가함에 따라 최초 열기포를 발생시키는데 필요한 과열도와 발생 열기포의 크기 감소 경향은 다음과 같이 식 (1) Young-Laplace 방정식과 식 (2) Clapeyron 방정식을 통해 확인할 수 있다. 즉, 이들 두식을 이용하면 식 (3)과 같이 열기포를 발생시키는데 필요한 최소의 과열도를 구할 수 있다. 여기서 식 (2)는 상변화가 일어나는 액체-증기 포화상태라는 가정하에서 도출된 식이므로 식 (3)에 의한 결과와 본 실험의 결과를 직접적으로 비교하는 것은 다소 무리가 있으며 다만 그 경향성만을 살펴보고자 한다.

$$P_v = P_t + \frac{2\sigma}{r_e} \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dT} = \frac{h_{lv}}{T v_v} \quad (2)$$

$$T_i - T_{sat}(P_i) = \frac{2\sigma T_{sat} v_v}{h_{lv} r_{min}} \quad (3)$$

각 압력조건에서의 FC-72 물성치를 식 (3)에 대입하면 Fig. 6과 같은 그래프를 얻을 수 있다. 여기에서 볼 수 있는 바와 같이 일정 캐비티의 크기에서, 압력이 증가함에 따라 열기포를 발생시키는데 필요한 과열도는 감소하는 경향을 보이는데 이는 본 연구의 결과와 일치하는 바이다. 본 연구에서, 미세캐비티의 크기는 대략 0.1~1 μm 정도인 것으로 추정⁽⁵⁾된다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 미세캐비티의 크기가 커지면 보다 낮은 과열도에서 열기포를 발생시킬 수 있다. 하지만 Hsu의 이론⁽⁷⁾

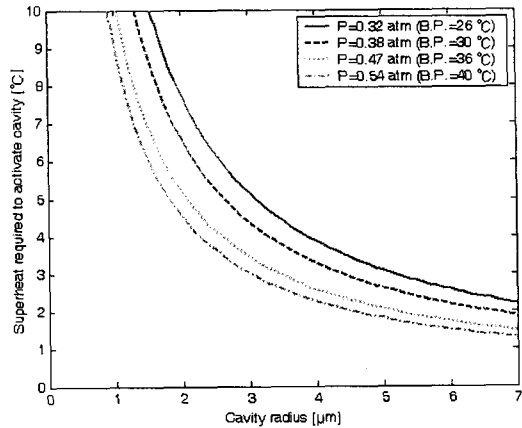


Fig. 6 Superheat required to activate cavity for boiling

에 따르면 캐비티의 크기가 일정 이상이 되면 열기포가 생성되지 않으며 FC-72는 그 크기가 대략 4 μm이다.

미세입자가 없는 경우에는 과열도를 최대 10℃까지 올려 보았으나 그 어떤 압력에서도 열기포가 발생하지 않았다. 이는 실험유체가 실린더 홀을 완전히 적셔버렸기 때문이라고 생각된다. 본 연구의 경우처럼 Klausner는 실험유체가 캐비티를 완전히 적셔버려서 20℃의 과열도에서도 열기포가 발생하지 않았다고 보고하였다.⁽³⁾ 결국 본 연구에서는 미세입자를 실린더 홀에 채워넣음으로써 열기포를 발생시키는데 필요한 과열도를 3℃ 이하로 낮출 수 있다는 사실만 확인할 수 있었으며 미세입자의 유무에 따른 직접적인 비교연구는 수행하지 못하였다.

3.2 발생하는 열기포의 최대 크기

이전 연구들 중 열기포의 이탈 크기에 대한 몇 가지 것들은 아래와 같다.

$$Bo^{1/2} = 0.04 Ja \quad (4)$$

$$Bo^{1/2} = \left[\frac{3\pi^2 \rho_l \alpha_l^2 g^{1/2} (\rho_l - \rho_v)^{1/2}}{\sigma^{3/2}} \right]^{1/3} Ja^{4/3} \quad (5)$$

$$Bo^{1/2} = 0.25(1+10^5 K_1)^{1/2} \quad (6)$$

$$Bo^{1/2} = 0.19(1.8+10^5 K_1)^{2/3} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)에서, K_1 은 아래와 같다.

$$K_1 = \left(\frac{Ja}{Pr} \right) \left[\frac{g\rho(\rho_l - \rho_v)}{\mu^2} \right]^{-1} \left[\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{-3/2} \quad (8)$$

1967년 Cole⁽⁸⁾은 식 (4)에서 보는 바와 같이 Bond 수는 Jakob 수의 제곱에 비례한다고 하였고 이보다 2년 전에는 Ruckenstein⁽⁹⁾과 Zuber⁽¹⁰⁾가 Bond 수와 Jakob 수 간에는 식 (5)와 같은 관계가 성립한다고 발표하였다. 그로부터 약 15년 후, Kutateladze 등⁽¹¹⁾

의 실험에서는 Bond 수와 Jakob 수 간의 관계가 식 (6)과 같이 나타났으며 1986년 Jensen 등⁽¹²⁾은 Kutateladze의 결과를 수정하여 식 (7)을 발표하였다. Bond 수의 정의로부터 열기포의 지름은 Bond 수의 제곱근에 비례함을 알 수 있고 마찬가지로 Jakob 수의 정의로부터 Jakob 수는 과열도에 비례함을 알 수 있다. 결국 이전 연구자들의 연구에서처럼 Bond 수와 Jakob 수의 관계를 실험적으로 도출함으로써 과열도에 따른 열기포의 크기를 예측할 수 있는 것이다. 식 (4)~(8)을 통해 예측되는 열기포의 크기는 각 결과들 간에 차이를 보인다. 이러한 차이를 보이는 이유는 크게 두 가지 정도로 생각해볼 수 있다. 첫 번째는 각 실험간의 실험 유체가 다르다는 것이다. 실제로 Cole은 물을 비롯하여 아세톤, 메탄올, 펜탄 등 십 수 종류의 액체에 대하여 실험한 것을 바탕으로 결과를 도출하였으나 대개의 경우에는 물을 비롯한 수 개의 실험 유체를 통해 얻은

데이터를 이용하여 Bond 수와 Jakob 수의 관계를 도출하였다. 두 번째는 관심 과열도 영역이 다르다는 것이다. Cole은 핵비등 영역과 막비등 영역에서의 Bond 수와 Jakob 수를 실험적으로 관계 지웠고 Kutateladze와 Jensen은 막비등영역에서의 실험 결과를 중심으로하여 Bond 수와 Jakob 수간의 관계를 도출하였다. 이러한 견지에서, 본 연구의 경우에도 본 연구에 적합한 Bond 수와 Jakob 수의 관계를 찾아 이를 통해 열기포의 크기를 예측할 수 있는 식을 도출하는 것이 타당하리라 생각된다. 기존 열기포 크기 예측 식 중에서 본 연구 결과와 가장 일치하는 것은 Cole이 제안한 식이다. 이 식을 토대로하여 Bond 수와 Jakob 수간의 관계를 나타내는 식을 아래와 같이 생각해 볼 수 있다.

$$(Bo)^{C_1} = C_2 Ja \tag{9}$$

여기서 C_1, C_2 는 상수로 Cole의 경우에는 각각 0.5, 0.04가 된다. Cole이 제안한 형식을 본 연구의 결과에 맞게 상수값을 계산하면 각 상수는 0.492, 0.033으로 Cole의 실험상수와 유사한 값을 가짐을 알 수 있다. 하지만 이러한 관계식은 Jakob 수가 낮을 경우 즉, 과열도가 낮은 경우에는 잘 맞지 않는다. Cole이 제안한 관계식이 핵비등 영역에서의 열기포 거동을 고려하였다고는 하나 본 연구의 경우에서처럼 과열도가 7°C 이하인 실험결과를 중심으로 관계식을 도출한 것이 아니기 때문에 이러한 차이가 있는 것으로 생각된다. 즉, 과열도가 3°C 이하로 낮은 경우에도 다공성 미세 캐비티에 존재하는 가스에 의하여 열기포가 발생할 수 있는데 기존의 경우에는 이를 고려하지 못했다는 것이다. 그래서 식 (9)를 아래와 같이 수정하였다.

$$(Bo - C_3)^{C_1} = C_2 Ja \tag{10}$$

여기서 C_1, C_2, C_3 는 상수로 위 식을 토대로 하

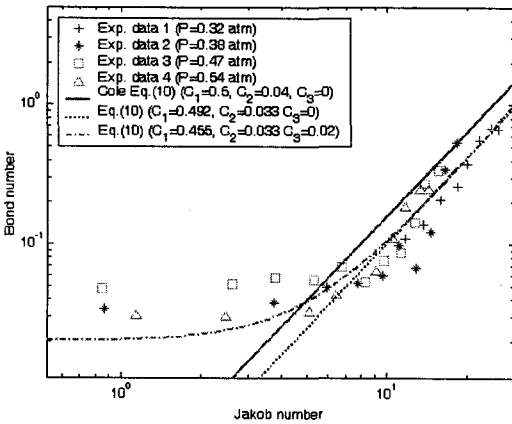
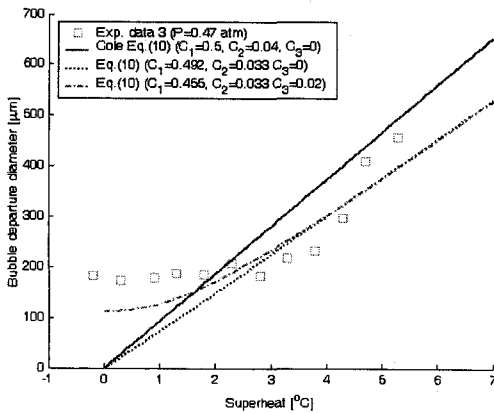
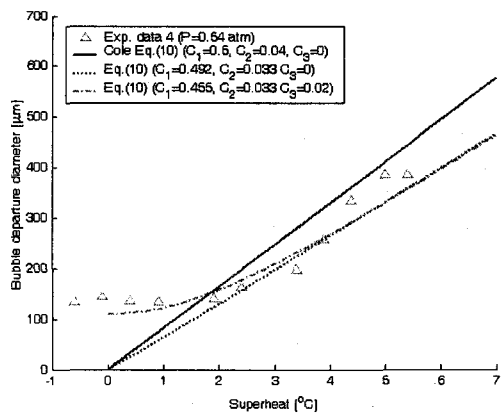


Fig. 7 Bond number vs. Jakob number



(a) P=0.47 atm



(b) P=0.54 atm

Fig. 8 Variation of departure diameter with the superheat

여 본 연구의 결과에 맞는 상수 값을 계산하면 각 상수는 0.455, 0.033, 0.02이 된다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 전체 실험 결과는 식 (9)보다는 식 (10)으로 표현하는 것이 타당함을 알 수 있다. Jakob 수가 10 이하일 때는 식 (9)에 의한 값을 기준으로 한 두 식 간의 상대적 차이는 크지만 Jakob 수가 10 이상이 되면 두 식 간의 상대적 차이는 작아짐을 알 수 있다. 실제로 Jakob 수가 60인 경우 식 (9)를 기준으로 한 두 식 간의 상대적 차이는 10%정도이다. 결국 Jakob 수가 10 이상 60 이하인 경우 즉, 과열도가 4°C 이상 25°C 미만인 경우는 식 (9)와 식 (10)은 거의 같은 결과를 나타낸다. 이상의 결과들을 토대로, Fig. 8과 같이 열기포의 크기와 과열도의 관계를 도식적으로 나타낼 수 있다.

3.3 열기포의 발생주파수

본 연구에서 열기포의 발생주파수는 단위시간당 표면을 이탈하는 열기포의 수로 정의하였으며 과열도의 증가로 두개의 열기포가 합쳐져 표면을 이탈할 때는 하나의 열기포로 간주하였다. 선행 연구자들에 의하면 열기포 발생 주파수의 n승과 발생하는 열기포 크기의 곱(f^*d)은 일정값을 가지며 지수는 열기포의 성장 조건에 따라 달라진다고 하였다. Ivey⁽¹³⁾의 제안에 따르면 열기포의 관성과 열전달 중에서 열기포의 관성이 성장에 지배적으로 영향을 주는 경우(inertia controlled growth)에는 n=2가 되며 열전달이 지배적인 경우(heat transfer controlled growth)에는 n=1/2이 된다. 이와 유사하게 McFadden 등⁽¹⁴⁾과 Frederking 등⁽¹⁵⁾의 실험에서는 n=1/2, Cole⁽⁸⁾의 실험에서는 n=1로 나타났다. 앞에서 살펴본 바와 같이 열기포의 크기는 과열도에 비례하므로 결국 열기포의 발생주파수는 과열도에 반비례하여야 한다. 하지만 본 연구에서는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 과열도가 증가하면 열기포의 발생 주파수도 증가하는 경향을 보였다. 여기서 f^* 는 무차원 주파수로 차원해석을 통해 아래와 같이 정의하였다.

$$f^* = \frac{f(\rho_l^2 \sigma)^{1/4}}{[g(\rho_l - \rho_v)]^{3/4}} \quad (11)$$

이전 연구와 본 연구의 이러한 차이의 원인을 다음과 같이 추측할 수 있다. 선행 연구자들의 제안 즉, 발생 주파수와 발생하는 열기포 크기의 곱이 일정값을 가진다는 제안의 밑바탕에는 열기포의 상승 속도는 과열도에 무관하다는 조건이 전제되며 이들의 실험은 이 조건을 만족시킬 것으로 생각된다. 왜냐하면 이들이 실험에 사용한 열기포

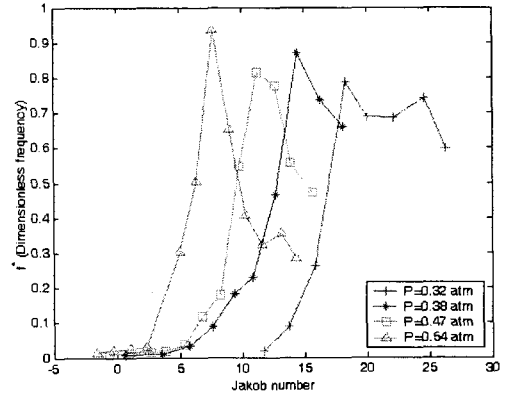


Fig. 9 Dimensionless frequency vs. Jakob number

발생 표면부는 매우 많은 비등핵이 존재하기 때문에 과열도가 증가하더라도 발생하는 열기포의 크기는 크게 변화하지 않을 것이기 때문이다. 이들의 실험에서, 추가 공급되는 에너지는 열기포 발생 표면부의 온도를 상승시키고 이 온도 상승으로 인해 크게 3가지 결과가 나타날 수 있다. 즉, 추가 공급된 에너지만큼 에너지 방출이 이루어져야 하는데, 그 첫 번째는 열기포의 크기를 증가시켜 에너지 방출을 증가시키는 경우, 두 번째는 열기포의 생성주파수를 증가시켜 에너지 방출을 증가시키는 경우, 세 번째는 또 다른 비등핵을 활성화시켜 에너지 방출을 증가시키는 경우가 있을 수 있다. 발생하는 열기포의 크기가 과열도에 비례한다고는 하나 일정 크기 이상의 과열도부터는 열기포의 크기 증가 경향성이 둔해질 것이라고 추측된다. 결국 선행 연구의 경우에서처럼 과열도가 커서 열기포의 크기 증가 경향성이 둔화된 경우에는, 추가 공급된 에너지가 열기포의 크기를 증가시키기보다는 새로운 비등핵을 활성화시키거나 열기포 발생주파수를 증가시키는 것이 용이할 것이다. 결국, 선행연구들처럼 과열도가 큰 경우에는 과열도가 증가하더라도 발생하는 열기포의 크기는 크게 변화하지 않기 때문에 열기포의 상승속도는 거의 일정하게되어 앞서 언급한 전제조건을 만족시킨다.

그렇지만, 본 연구의 경우에는 선행 연구들처럼 다수의 비등핵이 존재하지 않는다. 설령 다공성 캐비티 내에 다수의 비등핵이 존재한다고 하더라도 이들은 파중효과때문에 단일 활성화비등핵 거동을 보일 것이다. 결국, 본 연구의 경우에는 또 다른 비등핵을 활성화시켜 에너지를 방출시키기보다는 발생하는 열기포의 크기를 증가시키든지, 열기포 발생 주파수를 증가시켜 방출 에너지량을 증가시키는 것이 용이할

것이다. 물론, 본 연구의 경우에는 열기포의 크기 증가와 열기포 발생 주파수 증가가 동시에 일어난 경우이다. 다시 말해, 본 연구에서처럼 단일 비등핵이 존재하는 경우에는, 과열도가 증가하면 발생하는 열기포의 크기가 증가할 뿐만 아니라 열기포의 발생 주파수도 증가한다는 것이다. 이러한 경향성은 1990년 이후 많이 실시되고 있는 마이크로 라인 히터 실험 결과와 일치한다. 이 경우 역시, 단일 비등핵만 존재하는 경우로, 에너지 방출은 열기포의 크기 증가와 발생 주파수 증가를 통해서 주로 이루어지므로 과열도가 증가하면 열기포의 크기도 증가하고 열기포의 발생 주파수도 증가하는 결과를 보인다.

3.4 생성된 기포들의 병합

Fig. 9에서 보는 바와 같이 과열도가 증가함에 따라 열기포 발생 주파수는 증가하다가 감소하는 경향을 보이는데, 이는 열기포의 병합(coalescence)때문이라고 추측된다. 즉, 과열도가 증가하여 열기포의 상승속도보다 열기포의 성장속도가 커지면, 먼저 발생한 열기포가 열기포 발생 영역을 완전히 벗어나기 전에 다음 열기포가 발생하여 이전 열기포와 합쳐지기 때문에 열기포 발생주파수는 감소하게 된다. 이러한 현상을 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 각 그림은 임의의 열기포가 발생할 때를 기준시간으로 하여 2 ms 간격으로 10 ms 동안 다공성 미세 캐비티 주변부의 상황을 촬영한 것이다. Fig. 10에서는 각 열기포가 순차적으로 발생하는 것을 볼 수 있다. 하지만 Fig. 11에서는 다공성 미세 캐비티에서 발생한 열기포가 6~8 ms 정도 후, 이어서 발생한 다른 열기포와 합쳐지는 과정을 겪게 되어 완전히 하나의 열기포가 된다. 이때, 후속 열기포가 이전 열기포와 충돌되어 합쳐지는 형태가 되므로 후속 열기포에 의해 합쳐진 열기포는 상하로 진동하게 된다.

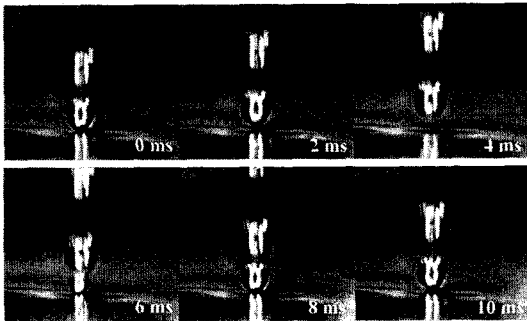


Fig. 10 Series pictures of bubble departure (P=0.32 atm, ΔT=3.5°C)

열기포의 병합이 최초로 일어나는 지점은 열기포 발생주파수가 증가하다가 감소할 때이며, Fig. 9에서 보는 바와 같이 온도뿐만 아니라 압력에 따라 다르다. 따라서 온도와 압력 조건에 따라 열기포의 병합 여부를 판단할 수 있으며 본 연구에서의 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 여기서 P*는 무차원 압력으로 차원해석을 통해 아래와 같이 정의하였다.

$$P^* = \frac{P}{h_v \rho_l} \tag{12}$$

Fig. 12에서 보는 바와 같이 압력이 증가할수록 보다 낮은 과열도에서 열기포의 병합이 이루어진다는 것을 알 수 있다. 온도와 압력 조건이 이 그림의 실선 위인지 아래인지에 따라 열기포 병합 여부를 판별할 수 있으며 본 연구에서의 열기포 병합 여부 판단 기준은 대략 $P^* \times Ja^{0.7} = 1.65 \times 10^{-3}$ 인 것으로 나타났다. 즉, 온도와 압력 조건이 $P^* \times Ja^{0.7} < 1.65 \times 10^{-3}$ 에 해당할 경우에는 열기포 병합이 이루어지지 않지만, $P^* \times Ja^{0.7} > 1.65 \times 10^{-3}$ 에 해당될 경우에는 열기포 병합이 이루어질 것이라 추측할 수 있다.

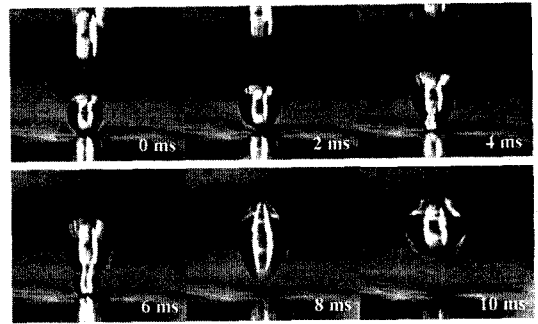


Fig. 11 Series pictures of bubble coalescence (P=0.32 atm, ΔT=4.0°C)

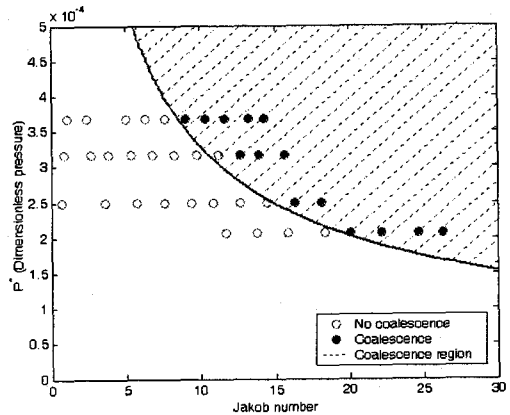


Fig. 12 Bubble coalescence map

4. 결론

본 연구에서는 negative PR인 SU-8과 산화알루미늄 파우더를 이용하여 단일 활성비동핵을 형성하고 열기포를 발생시켜, 과열도와 챔버 내 압력에 따른 열기포의 거동을 고속 카메라를 이용한 이미지 분석을 통하여 살펴보았다. 이상의 연구를 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있다.

첫째, 미세 캐비티에서 최초 열기포를 발생시키는 데 필요한 과열도는 3°C 이하이다.

둘째, 챔버 내의 압력이 증가할수록 최초 열기포가 발생할 때의 과열도와 발생하는 열기포의 지름은 작아진다.

셋째, 과열도 3~4°C 이전까지는 발생하는 열기포의 크기는 크게 변화하지 않으나 열기포 발생 주파수는 증가한다.

넷째, 과열도 3~4°C 이후부터는 발생하는 열기포의 크기는 선형적으로 증가하고 열기포 발생 주파수는 감소한다.

다섯째, 열기포 발생 주파수가 90~110 Hz 정도까지는 증가하다가 그 이후에는 열기포 간의 병합 현상으로 열기포 발생 주파수는 감소한다.

여섯째, 열기포 병합 여부 판단 기준은 대략 $P^* \times Ja^{0.7} = 1.65 \times 10^{-3}$ 인 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 기초기술연구회 정책 연구 사업인 "유비쿼터스 마이크로 동력원 개발"과 KIST 기관 고유 사업의 일환으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Lin, L. and Pisano, A. P., 1994, "Thermal Bubble Powered Microactuators," *Microsystem Technology*, Vol. 1, pp. 51~58.
- (2) Jung, J. Y., Lee, J. Y., Park, H. C. and Kwak, H. Y., 2003, "Bubble Nucleation on Micro Line Heaters Unsteady or Finite Pulse of Voltage Input," *Int. J. Heat and Mass Transf.*, Vol. 46, pp. 3897~3907.
- (3) Qi, Y. and Klausner, J. F., 2005, "Heterogeneous Nucleation with Artificial Cavities," *Proceedings of 2005 ASME Summer Heat Transfer Conference*.
- (4) Honda, H. and Wei, J. J., 2004, "Enhanced Boiling Heat Transfer from Electronic Components by Use of Surface Microstructures," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 28, pp. 159~169.
- (5) Rainey, K. N., You, S. M. and Lee, S., 2003, "Effect of Pressure, Subcooling and Dissolved Gas on Pool Boiling Heat Transfer from Microporous, Square, Pin-finned Surfaces in FC-72," *Int. J. Heat and Mass Transf.*, Vol. 46, pp. 23~35.
- (6) Calka, A. and Judd, R. L., 1985, "Some Aspects of the Interaction Among Nucleation Sites During Saturated Nucleate Boiling," *Int. J. Heat and Mass Transf.*, Vol. 28, No. 12, pp. 2331~2342.
- (7) Hsu, Y. Y., 1962, "On the Size Range of Active Nucleation Cavities on a Heating Surface," *J. Heat Transfer*, Vol. 84, pp. 207~213.
- (8) Cole, R., 1967, "Bubble Frequencies and Departure Volumes at Subatmospheric Pressures," *AIChE J.*, Vol. 13, No. 4, pp. 779~783.
- (9) Ruckenstein, E., 1963, "Physical Model for Nucleate Boiling Heat Transfer from a Horizontal Surface," *Bul. Institutului Politeh.*, Vol. 33, No. 3, pp. 79~88.
- (10) Zuber, N., 1964, "Recent Trends in Boiling Heat Transfer Research. Part I: Nucleate Pool Boiling," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 17, pp. 663~672.
- (11) Kutateladze, S. S. and Gogonin, I. I., 1979, "Growth Rate and Detachment Diameter of a Vapor Bubble in Free Convection Boiling of a Saturated Liquids," *High Temperature*, Vol. 17, pp. 667~671.
- (12) Jensen, M. K. and Memmel, G. J., 1986, "Evaluation of Bubble Departure Diameter Correlations," *Proceedings of 8th International Heat Transfer Conference*, Vol. 4, pp. 1907~1912.
- (13) Ivey, H. J., 1967, "Relationships Between Bubble Frequency, Departure Diameter and Rise Velocity in Nucleate Boiling," *Int. J. Heat and Mass Transf.*, Vol. 10, pp. 1023~1040.
- (14) McFadden, P. W. and Grassmann, P., 1962, "The Relation Between Bubble Frequency and Diameter During Pool Boiling," *Int. J. Heat and Mass Transf.*, Vol. 5, pp. 169~173.
- (15) Frederking, T. H. K. and Daniels, D. J., 1966, "The Relation Between Bubble Diameter and Frequency of Removal from a Sphere During Film Boiling," *J. Heat Transfer*, Vol. 88, pp. 87~93.