

〈論 文〉

# 직류전기장에 의한 기포의 변형과 이탈에 관한 연구

권영철\* · 김무환\* · 조혜정\*\* · 강인석\*\* · 김석준\*\*\*

(1994년 11월 17일 접수)

## A Study on the Bubble Deformation and Departure Under DC Electric Field

Young-Chel Kweon, Moo-Hwan Kim, Hye-Jeong Cho, In-Seok Kang  
and Seock-Joon Kim

**Key Words :** Electrohydrodynamic(EHD, 전기수력), Dielectric Liquid(유전유체), DC Electric Field(직류전기장), Bubble Deformation and Departure(기포변형과 이탈), Heat Transfer Enhancement(열전달촉진), Two Phase Flow(2상 유동)

### Abstract

The deformation and departure processes of a bubble attached to the wall are studied experimentally and numerically to understand the phenomena of the nucleate boiling heat transfer enhancement under DC electric field. An air-bubble is injected in a dielectric liquid with different electric fields generated by changing three types of electrode system(Type 1, 2 and 3) in the bubble generator. Experimental variables are the electric field strength and the distance and the shape of the electrodes under DC electric field. From experimental results, it is observed that the bubble under DC electric field is elongated in the same direction as the electric field and the contact angle increases. For the parallel plate electrode which generates a uniform electric field, bubble departure volume doesn't seem to decrease within our experimental range. However, when a needle is raised a few millimeters from the lower electrode to make a nonuniform electric field around the needle, bubble departure volume decreases continuously with the increase of an applied voltage. The reduction effect of bubble departure volume is the most effective under a strong nonuniform electric field generated with Type 3. As the nonuniformity of the electric field due to the shape of a electrode increases, the terminal velocity and the acceleration of a bubble increase largely. For the comparison with visualization results, the deformation of a bubble attached to the electrode is carried out by a numerical method. Numerical results show good agreement qualitatively with experimental results.

———— 기 호 설 명 ————

$A$  : 기포의 가속도

$\Delta A$  : 기포의 가속도 증가량

$D_0$  : 니들전극의 내경

$\bar{E}$  : 전계강도

$\bar{F}_v$  : 유전체에 작용하는 체적력

$F_e$  : 기포에 작용하는 DEP력

$g$  : 중력가속도

$R_{b,cr}$  : 기포의 등가반경

$U$  : 기포의 종단속도

$\Delta U$  : 기포의 종단속도 증가량

\*정회원, 포항공과대학교 기계공학과

\*\*포항공과대학교 화학공학과

\*\*\*한국기계연구원

- $V$  : 전기장하의 기포의 이탈체적
- $V_0$  : 0 kV에서의 기포의 이탈체적
- $W$  : 전기웨버수

그리스문자

- $\sigma_l$  : 유전유체의 전기전도도
- $\theta$  : 전극과 기포가 이루는 접촉각
- $\tau_c$  : 전하이완시간
- $\tau_d$  : 기포이탈주기
- $\gamma$  : 표면장력
- $\rho_f$  : 순전하
- $\rho$  : 유전유체의 밀도
- $\epsilon_0$  : 진공(공기) 유전율
- $\epsilon_l$  : 유전유체의 유전율

1. 서 론

1987년에 체결된 몬트리올 의정서와 1992년 6월 기후변화 협약은 환경문제에 대한 세계 여러나라의 새로운 관심과 보다 구체적인 인식을 심어주었다. 이로 인해 환경오염문제를 경감시킬 수 있는 대체 냉매의 개발과 열교환기의 성능향상을 위한 기술개발이 중요한 관심분야가 되고 있다. 기존의 CFC 매체를 대체하기 위한 새로운 물질들이 여러 선진국에 의해 활발히 개발되고 있지만, 이들 대체물질의 열교환 능력은 기존의 CFC보다 낮아 대체물질을 이용하는 열교환기의 열전달능력을 향상시킬 수 있는 새로운 열전달촉진 기술개발이 절실히 요구되고 있다. 이들 열전달촉진 방법중 비등 유전유체(boiling dielectric liquid)에 전기장(electric field)을 인가하여 열전달의 효과를 증대시키는 EHD(electrohydrodynamic) 방법은 기존의 여러 방법보다 우수한 열전달촉진효과를 보여주는 것으로 알려져 있다.<sup>(1,2,3)</sup> 비등 열전달에 대한 전기장의 효과는 핵비등 열전달계수 및 임계 열유속의 증가와 막비등의 불안정성 촉진에 의한 막비등 열전달계수의 증가로 나타난다. 이는 전기장에 의해 유전유체의 전기전도도, 유전율 및 분자구조 등의 변화와 관련된 기포 및 증기막의 전기적 거동과 EHD에 의하여 생성된 이차유동에 의한 용적액체(bulk liquid)의 혼합(mixing) 효과가 비등 열전달을 촉진하기 때문이다. 그러나, 전기장을 이용한 EHD 비등 열전달촉진기구(boiling heat transfer enhancement mecha-

nism)에 대한 해석은 지금까지의 많은 노력에도 불구하고 아직도 명확히 밝혀지고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 비등시 생성되는 기포에 대한 미시적 관점의 물리적 해석을 통하여 핵비등(nucleate boiling) 영역의 EHD 열전달촉진을 해석하고자 한다.

Fig. 1은 본 연구를 위해 수행된 프레온 113에 대한 EHD 핵비등 열전달의 가시화결과로, 전극은 직류고전압이 인가된 평판전극과 접지된(grounded) 백금선전극으로 구성되었으며, 이 백금선은 12 V 직류배터리에 의해 가열원(heating source)으로 사용되었다. 백금가열면에서 비등유체로 전달되는 열전달률은 비등시 가열면에서 생성되는 기포의 이탈체적, 이탈수 그리고 이탈주파수에 의해 좌우된다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 인가전압이 증가할수록 기포의 이탈체적은 감소하게 되나 기포의 이탈수와 이탈주파수는 인가전압에 따라 크게 증가하기 때문에 가열면에서의 열전달계수는 증가하게 된다. 이

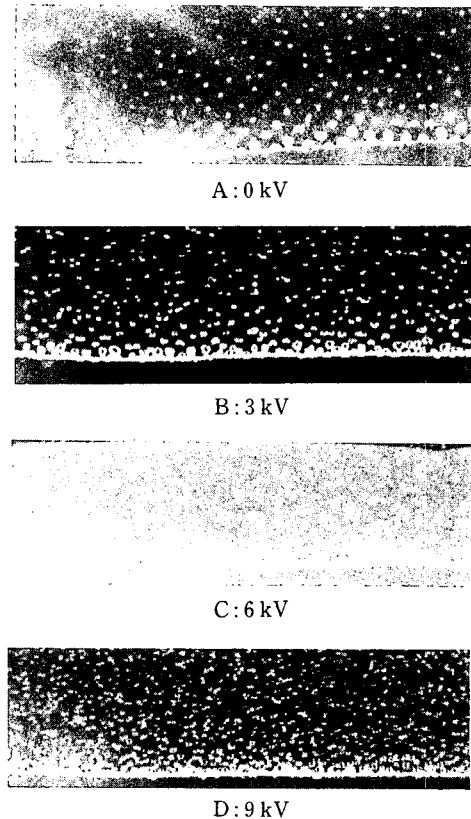


Fig. 1 Photographs of EHD boiling heat transfer in Freon-113 under DC electric field

러한 열전달계수의 증가는 비등실험에서 동일 열유속하의 백금선 온도를 측정함으로써 쉽게 증명되었다.<sup>(4)</sup>

일반적으로, 핵비등 열전달은 가열면에서 생성되는 기포의 거동에 의해 열전달률이 대류열전달 영역에 비하여 매우 높다. 한편, 이들 기포의 거동은 전기장에 의해 더욱 활발해지는데, Fig. 1의 EHD 핵비등 열전달의 가시화결과에서 관찰된 것처럼 전기장에 의한 기포의 활발한 거동으로 열전달촉진효과가 더욱 증대된다. 따라서 본 연구는 EHD 핵비등 열전달촉진의 현상규명을 위해서 열전달에 큰 영향을 미칠 것으로 기대되는 전기장하에서 기포의 변형과 이탈에 대한 연구를 수행하였다.

열전달촉진에 대한 전기장의 효과는 Senftleben과 Braun<sup>(5)</sup>에 의해 최초로 보고된 이후로 많은 연구자들이 기포(bubble)와 액적(drop)에 전기장을 가하여 열전달촉진 기구를 규명하여 왔다. Pohl<sup>(6)</sup>은 불균일 전기장에서 분극(polarization) 현상에 의해 입자가 운동하는 것을 dielectrophoresis 효과로 해석하였는데 이는 기포를 상대적으로 더 낮은 전기장영역으로 움직이게 하는 역할을 한다. Garton과 Krasucki<sup>(7)</sup>는 기포에 작용하는 전기적인 힘을 이용하여 기포의 형태를 해석적으로 구하였다. Cheng과 Chaddock<sup>(8,9)</sup>은 최대 기포체적에 관한 Fritz's 해석을 이용하여 기포이탈 체적에 관한 전기장의 효과를 조사하였으며 또한 자유에너지(free energy) 개념에서 균일 전기장내의 기포와 액적의 변형(deformation) 및 안정성(stability)을 해석하였다. 이들 대부분은 전기장내에 부유하는 기포와 액적에 대한 해석적 연구로, 가열면에 부착된 기포의 변형과 이탈에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 전기장에 의한 열전달촉진을 이해하고자 열교환기 가열면에서 일어나는 현상과 유사한 전극면에 부착된 기포의 변형과 이탈에 대한 연구가 실험적으로 수행되었다. 이와 함께, 본 연구의 실험결과들과의 정성적인 비교를 위하여 전극면에 부착되어 있는 기포의 전기적 변형에 대한 자유계면문제가 수치적인 방법으로 수행되었다.<sup>(10)</sup>

## 2. 이론적 배경

EHD 현상에 대한 운동방정식은 전기장하의 유전유체에 작용하는 물리적 힘들간의 관계로부터 얻을 수 있는데, 제가 가지고 있는 운동량보존의

법칙과 비압축성 조건으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \bar{u} &= 0 \\ \rho \frac{D\bar{u}}{Dt} &= \rho \bar{g} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \nabla P + \bar{F}_v \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $P$ 는 전기장하에서 유전유체가 받는 압력으로, 전기장이 가해지지 않았을때의 수력학적 압력과 전기장에 의한 초과압력을 말한다. 여기서  $\bar{F}_v$ 는 전기장에 의해 유전유체가 받는 단위 부피당의 힘으로 유전유체의 온도가 일정하게 유지되는 경우, 전기장에 의해 받는 체적력은 정전에너지(electrostatic energy) 개념으로부터 다음과 같이 표현된다.<sup>(11)</sup>

$$\bar{F}_v = \rho_f \bar{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon_t + \frac{1}{2} \nabla (E^2 \rho \frac{\partial \epsilon_t}{\partial \rho}) \quad (2)$$

여기서,  $\rho_f$ ,  $\epsilon_t$ ,  $\rho$ ,  $\bar{E}$ 는 유전유체속의 순전하(netcharge), 유전율(dielectric permittivity), 밀도(density) 그리고 전계강도(electric field strength)를 나타낸다. 첫째항은 유전유체속에 존재하는 전하나 전하를 띤 입자가 받는 전기영동력(electrophoretic(EP) force)으로서 가해진 전기장의 방향으로 유체나 입자의 운동을 유도한다.<sup>(12)</sup> 두 번째항은 유전유체내의 유전율이 불균일(inhomogeneous)할 때 나타나는 힘(dielectrophoretic(DEP)force)으로 전계강도 및 유전율의 구배와 관계가 있으며, 상대적으로 더 큰 유전율을 가지는 유전유체 부분을 전계강도가 더 강한 영역으로 움직이게 한다.<sup>(13)</sup> 세 번째항은 전기압축력(electrostriction force)으로 불균일한 전계강도의 분포와 밀도의 변화에 대한 유전율의 변화에 의해 나타나는 전기적인 내력으로 유전체내, 외부의 응력분포를 계산하려면 반드시 고려되어야 하지만, 유전체에 작용하는 표면력을 구할 때는 무시된다. 이 때 밀도의 변화에 대한 유전율의 변화는 Clausius-Mossotti law의 근사식으로 표현할 수 있다.<sup>(14)</sup>

유전유체의 전기전도도와 유전율은 온도의 함수이므로 단상 대류열전달의 경우, 온도구배에 의한 전기전도도의 불균일 분포로 인해 유전유체내에 자유전하의 축적이 생기게 되어 EP력이, 그리고 유전율의 불균일 분포로 DEP력이 유도된다. 이 힘들들이 가열면에 근접한 유체의 안정성(stability)에 영향을 주어 유전유체내에 국부적인 유체의 흐름을 야기시켜 대류열전달의 증가를 나타내기도 한다.<sup>(15)</sup>

비등과 같이 상분리가 일어나는 경우, 가열면에서 발생하는 증기기포의 표면에는 전기장에 의해 전하가 축적될 수 있으므로 증기기포에 작용하는 전기적인 힘은 이 전하에 의한 EP력과 유전율의 차이로 나타나는 DEP력으로 나눌 수 있다. 이 두 힘의 상대적인 크기는 전기장의 종류와 유전유체의 전기전도도와 유전율에 의존하는데 전기장에 의해 증기기포의 표면에 축적되는 전하는 유전유체의 전하완화시간( $\tau_c$ )과 관계가 있으며 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_c = \frac{\epsilon_l}{\sigma_l} \quad (3)$$

또한, 전하의 축적은 가열면에서 증기기포의 이탈 주기( $\tau_d$ )와 관계하는데 유전유체의 전하완화시간이 전극면에서 이탈하는 기포의 이탈주기보다 길면 전하가 기포에 축적될 시간적 여유가 없다. 가열면에서 이탈하는 증기기포의 이탈주기는 전하완화시간보다 매우 짧으므로 EP력은 무시될 수 있다. 따라서 유전유체와 증기기포의 두 상간의 유전율 차이로 인한 DEP력이 기포의 이탈과 변형에 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. 핵비등영역에서 가열면의 열전달은 기포이탈에 의한 증기기포와 주위 액체와의 물질교환, 혼합효과 그리고 증발과정에 의해 이루어지게 되는데, 이 DEP력에 의한 기포의 빠른

이탈은 가열면 위에 형성되는 열경계층의 불안정성 (instability)을 더욱 촉진시키고 용적액체를 더 효과적으로 교란시키므로 혼합효과가 크게 향상되어 비등열전달이 증가된다. 그러므로 EHD 비등열전달 해석에 있어 전기장에 의한 기포의 거동은 중요하다.

### 3. 실험장치와 실험방법

EHD에 의한 기포의 변형과 이탈에 관한 연구를 수행하기 위하여 기포발생장치(bubble generator, Fig. 2(a))를 제작하였다. 공기기포(air-bubble)를 발생시키기 위하여 외경이 0.71 mm, 내경이 0.1 mm인 스테인리스 스틸로 만들어진 실린더형의 니들(needle)이 이용되었다. 사용된 공기기포의 유전율은 증기기포의 유전율과 같으며, 공기내에 스며있는 수분 및 이물질 제거하기 위해 공기필터 드라이어(air filter drier)를 사용하였다. 본 실험에 사용된 전극의 형태는 Fig. 2(b)와 같은 세가지 종류로 Type 1은 두장의 구리 평판전극으로 이루어졌으며, Type 2와 Type 3은 각각 아래쪽의 구리 전극판과 테프론판에 1 mm와 3 mm 높이로 니들을 수직으로 돌출시켜 장치하였다. 그리고 두 전극사이에 전기장을 형성시키기 위하여 30 kV, 2 mA 가변 직류 고전압 공급기(variable direct high

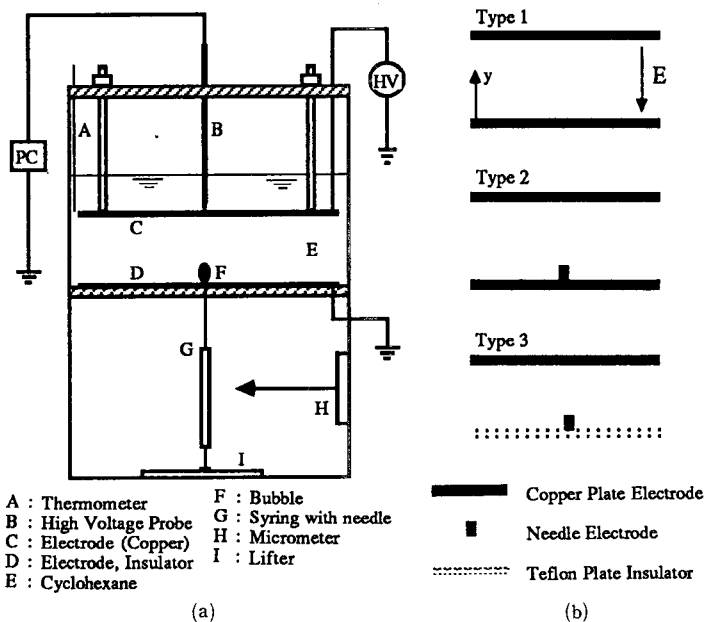


Fig. 2 Schematic diagram of the bubble generator(A) and three types of electrode system(B).

voltage supply)를 사용하였다. Type 1은 두 전극 사이에 균일 전기장을, Type 2는 니들주위에 국부적인 불균일 전기장을, Type 3은 두 전극사이에 완전히 불균일한 전기장을 형성한다. 여기서, Type 2는 Type 1에 대한 니들효과를, Type 3은 Type 2에 대한 불균일 전기장의 효과를 연구하기 위하여 선정되었다. 본 실험에서는 전계강도, 전극간의 간격, 니들전극의 높이 및 전극의 형태를 변화시켜 전기장의 불균일성(nonuniformity)이 기포의 전기적 거동에 미치는 효과를 실험하였다.

실험은 대기압, 상온하에서 세가지 종류의 전극에 대해서 수행되었으며 실험에 사용되는 구리 평판전극의 표면은 No. 1000의 사포로 먼저 표면가공한 후  $1\mu\text{m}$ 의  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 로 마무리 가공을 하였다. 또한 아세톤으로 전극, 니들, 주 실험부를 세정하였다. 그리고 본 연구에 사용된 유전유체는 단일결합(single bond) 구조의 매우 낮은 전기전도도를 가진 비극성의 사이클로hex산( $\text{C}_6\text{H}_{12}$ )으로 Table 1과 같은 물성치를 가지고 있다. 인가되는 전압이 고전압이지만 사이클로hex산의 유전손실(dielectric loss)은 매우 적다. 또한 낮은 전기전도도로 인한 전극사이의 유전유체를 통해서 흐르는 전류는 매우 미미하므로 고전압이 인가될 경우 전극면에 전하가 신속하게 축적된다. 일반적으로 유전유체는 유전율이 낮을수록 유용한데, 이는 큰 유전율을 갖는 유전유체내에 기포가 존재하게 되면 기포주위의 강한 전기장으로 인하여 시스템의 절연파괴(dielectric breakdown)를 유발할 수도 있기 때문이다.

실험에 사용된 전극의 간격은 11 mm~46 mm, 니들의 높이는 0, 1, 3 mm로 두 전극사이에 0 kV~30 kV까지 직류고전압을 인가하였다. 전극에 인가되는 입력전압을 정확히 측정하기 위하여 본 실험범위내에서 1%의 정확도를 갖고 있는 고전압 프로브(high voltage probe)를 이용하였다. 기포의 이탈체적은 0.01 mm의 정확도를 가진 리프터(lifter)의 표시부에 나타나며 본 실험에서 측정된 기포의 이탈체적에 대한 오차범위는 최대 2% 이내였다.

Table 1 Properties of  $\text{C}_6\text{H}_{12}$  at 20°C

$\rho$ (Density)	770 kg/m <sup>3</sup>
$\mu$ (Viscosity)	0.97E-3 Ns/m <sup>2</sup>
$\epsilon_r$ (Relative permittivity)	2.2
$\gamma$ (Surface tension)	4.76E-2 N/m

정성적인 해석을 위하여 확대렌즈(extension lens)와 반사스크린(reflecting screen)을 이용한 후측광기법(back and side light method)을 이용하여 전기장의 영향으로 변형하는 기포를 가시화하였다.

### 4. 결과 및 토의

#### 4.1 전계강도

Fig. 3은 세 가지 전극에 대한 전계강도를 아래 전극으로부터 윗 평판전극으로의 수직선을 따라 계산한 것으로 Type 1은 평판전극으로, Type 2는 아래쪽 전극에 니들전극과 같은 체적을 갖는 반구형의 전극이 부착된 평판전극으로, 그리고 Type 3은 아래쪽 니들전극을 구(sphere)전극으로 단순화하여 계산한 것이다. Type 2와 Type 3의 니들전극 부근( $y=0$ )에서 전계강도의 세기와 구배는 Type 1보다 크다. Fig. 4는 인가전압에 의해 두 전극들

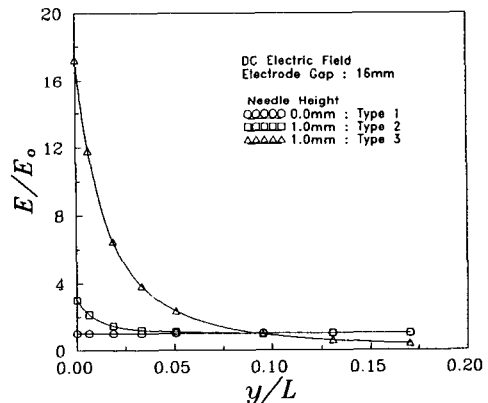


Fig. 3 Normalized electric field strengths

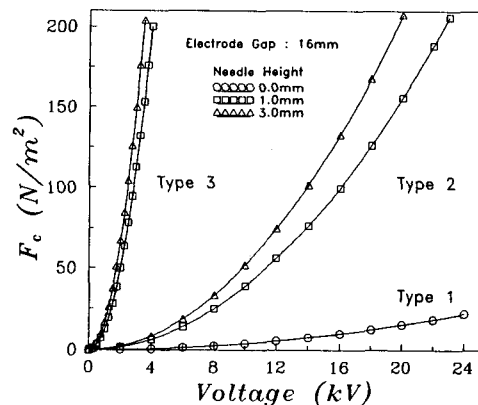


Fig. 4 Electrostatic attraction forces between two electrodes

사이에 유도되는 전기적인 흡인력을 계산한 것으로 전기적 흡인력은 전계강도의 제곱에 비례한다. Fig. 3과 Fig. 4의 결과에서 알 수 있는 것처럼 Type 2와 Type 3의 전계강도가 Type 1보다 강하기 때문에 Type 2와 Type 3에 나타나는 흡인력은 Type 1보다 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 니들전극 부근에서 불균일 전기장을 형성하는 Type 2와 Type 3의 전계강도는 균일 전기장을 형성하는 Type 1보다 매우 강하기 때문에 이 불균일한 전계

강도의 분포가 기포의 이탈과 변형에 큰 영향을 미치게 된다.

4.2 기포의 변형

Fig. 5는 Type 1, Type 2 그리고 Type 3의 전극 내에서 직류전기장에 의한 기포의 변형을 보여준다. Fig. 5(a)는 Type 1에 의한 기포변형의 결과로 완전한 타원형의 형태를 보여주며 인가전압이 증가할수록 기포의 체적이 약간 증가하였다. Fig. 5(b)

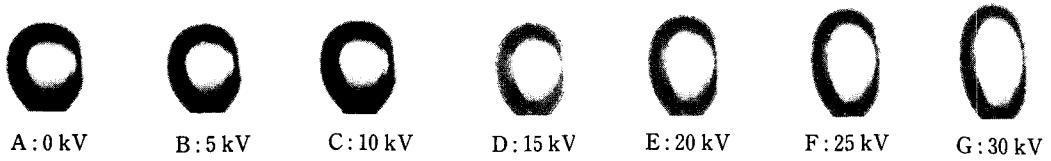


Fig. 5(a) Deformed shapes of a bubble in Type 1



Fig. 5(b) Deformed shapes of a bubble in Type 2



Fig. 5(c) Deformed shapes of a bubble in Type 3

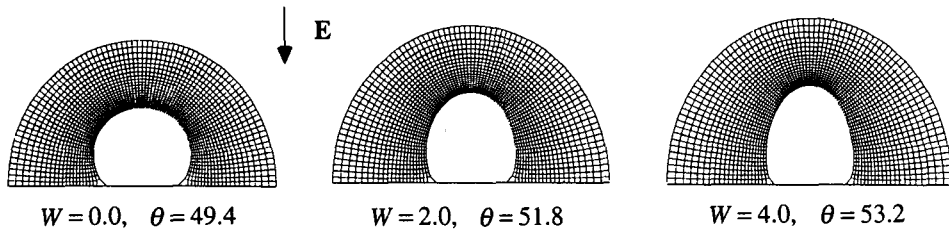


Fig. 5(d) Numerical results on the deformation of a bubble attached to the flat plate electrode

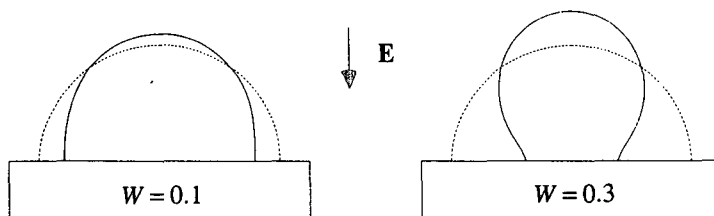


Fig. 5(e) Numerical results on the deformation of a bubble attached to the needle electrode

와 Fig. 5(c)는 각각 Type 2와 Type 3에 의한 기포 변형의 결과들로 Type 1의 결과와는 달리 기포의 아래쪽이 다소 잘록하며 인가전압이 증가할수록 기포의 체적이 감소하였다. 이는 Type 2와 Type 3의 니들전극 주위에 형성된 강한 불균일 전기장 때문으로(Fig. 3), 식(2)의 두번째 항에서 알 수 있는 것처럼 전극면에 생성된 기포는 전계강도의 제곱에 비례하는 힘을 받게 된다. 전기장에 의해 기포계면에서는 전기적인 수직응력이 작용한다. 이 때 니들전극 부근에서 기포계면에 작용하는 수직응력의 크기가 최고이며, 기포의 윗정점 부근에서 최소이다. 즉 기포의 밑 부근이 정점부근보다 강한 압축력을 받으므로 기포는 윗방향으로 늘어난 타원형으로 변형하여 전극과 기포의 접촉직경(contact diameter)은 감소하게 된다. 따라서 기포와 전극사이에 작용하는 표면장력(surface tension force)이 감소하여 기포의 이탈체적이 줄어든다.

기포변형에 대한 가시화된 결과와의 정성적인 비교를 위하여 균일 전기장과 불균일 전기장의 영향을 받고 있는 기포의 전기적 변형을 수치적인 방법으로 해석하였으며, 여기서 불균일 전기장의 영향은 니들전극위에 붙어있는 반구형의 기포에 대해서 수행하였다.<sup>(16)</sup> 전기장하의 변형특성을 나타내기 위하여 무차원수  $W = \epsilon_0 E^2 / (\gamma / R_{b,eq})$ 를 정의하였으며, 여기서,  $E$ 는 전계강도를,  $W$ 는 유전체체의 유전율과 전계강도의 제곱과의 곱으로 나타나는 단위 면적당 전기적인 힘과 표면장력에 의한 단위 면적당 힘과의 비로 표현되는 전기웨버(electric weber)수로 전기장에 의한 변형힘과 기포의 모양을 유지하려는 힘과의 비를 의미한다. Fig. 5(d)는 평판전극위에 부착되어 있는 기포가 균일 전기장의 영향을 받고 있는 경우로 Fig. 5(a)의 Type 1에 나타난 가시화결과와 유사하게  $W$ 가 증가할수록 기포가 윗방향으로 신장되며 접촉각도 다소 증가하였다. Fig. 5(e)는 니들전극위에 부착되어 있는 기포가 불균일 전기장의 영향을 받고 있는 경우로 전기장이 인가되지 않았을 때 반구의 형태를 가진 기포(파선)는  $W$ 가 증가할수록 반구의 형태에서 벗어나 기포의 아래부분이 잘록한 형태(실선)로 변하였다. 이들 수치결과(Fig. 5(d)와 5(e))들은 불균일 전기장( $W=0.3$ )이 균일 전기장( $W=4.0$ )보다 더 크게 기포의 변형에 영향을 미치고 있음을 보여준다.

Fig. 6(a), (b)는 가시화결과로부터 획득되어진 인가전압에 대한 세가지 전극의 종횡비(기포의 장/

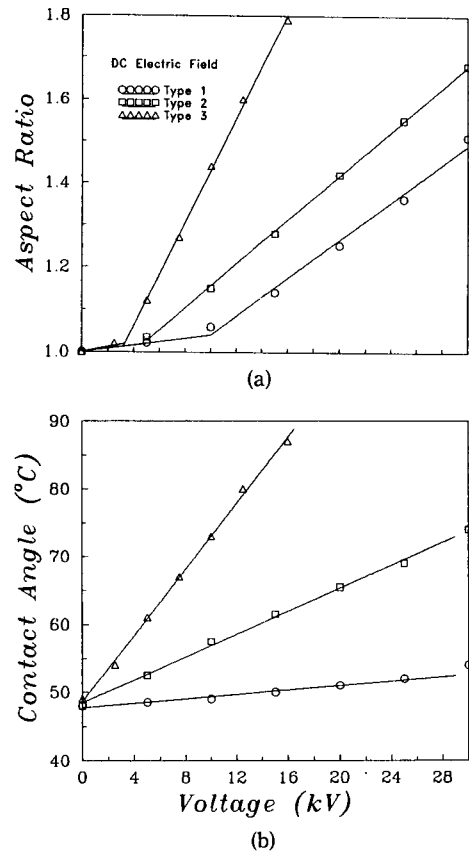


Fig. 6 Variations of the aspect ratio and the contact angle

단축비)와 접촉각을 보여주는데 인가전압이 증가할수록 종횡비와 접촉각은 거의 선형적으로 증가하였다. 특히 전기장에 의한 기포의 변형은 Type 3에서 가장 크게 나타나는데 이는 앞에서 살펴본 것처럼 전계강도의 세기와 불균일성이 기포의 변형에 큰 영향을 주기 때문이다.

### 4.3 기포의 이탈체적

기포의 이탈체적( $V$ )은 전기장에 의해 크게 영향을 받는다. 여기서는 0 kV하의 기포의 이탈체적( $V_0$ )을 기준체적(reference volume)으로 하였다. 작은 원형의 오리피스로부터 형성되는 기포반경은 다음의 Kutateladze와 Styrikovich의 실험식<sup>(17)</sup>으로 계산할 수 있다.

$$R_{0,eq} = 1.0 \left[ \frac{\gamma D_0}{2g(\rho_l - \rho_g)} \right]^{1/3} \quad (4)$$

이들의 실험식에 의해 계산된 값과 0 kV일 때 측

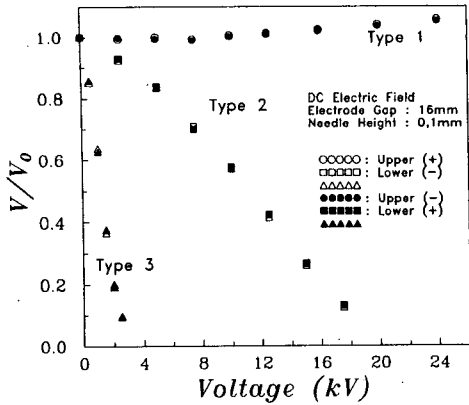


Fig. 7 Variations of the bubble departure volume on the electrode polarity

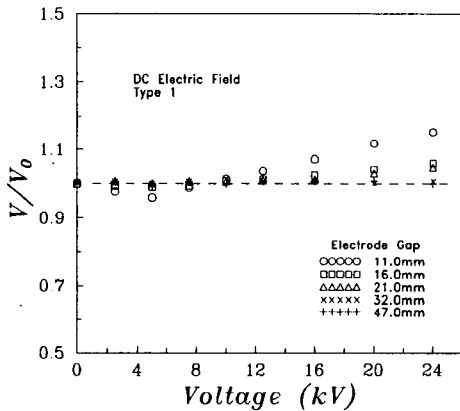


Fig. 8 Variations of the bubble departure volume in Type 1

정된 기포의 반경은 각각 0.68 mm과 0.70 mm로 잘 일치하고 있다.

Fig. 7은 전극의 극성(polarity)에 대한 기포의 이탈체적 감소효과를 보기 위하여 상, 하부의 전극을 각각 반대로 연결하여 실험한 결과이다. 이 결과를 보면 극성에 대한 세가지 전극의 기포의 이탈체적 변동량은 거의 발견할 수 없었으므로, 나머지의 모든 실험에서는 위쪽 전극에 (+)극을 연결하고 아래쪽 전극은 접지시켰다.

Fig. 8은 Type 1에 대한 기포의 이탈체적을 보여 준다. 전극간격이 좁을 때는 인가전압의 증가에 따라 기포이탈 체적이 본 실험구간 내에서 다소 증가하나, 전극의 간격이 증가할수록 기포의 이탈체적은 거의 일정하다. 이는 균일 전기장에 의해 기포에 유도되는 DEP력이 약해져서 기포의 이탈에 큰

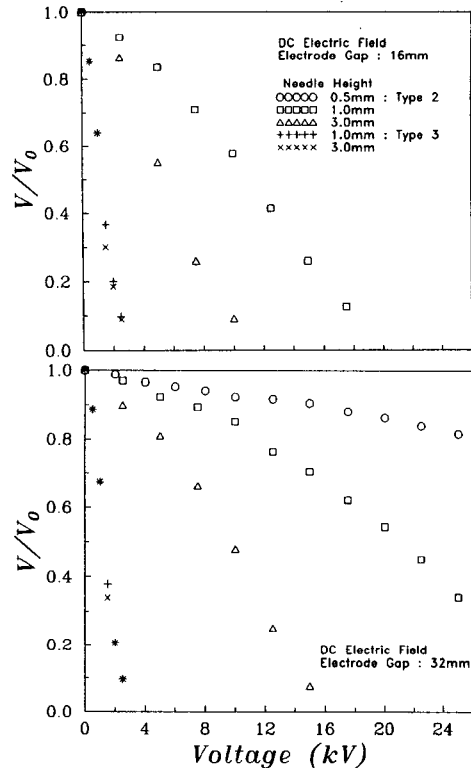


Fig. 9 Variations of the bubble departure volume in Type 2 and Type 3

영향을 주지 못하기 때문이며, 전기장에 의해 신장된 기포는 전기장이 인가되지 않았을 때보다 약간 큰 접촉각( $\theta$ )을 갖는데, 이는 기포와 전극사이의 표면장력( $\gamma \sin \theta$ )의 증가를 의미한다. 전극으로부터 이탈하는 기포는 기포에 작용하는 DEP력, 표면장력 그리고 부력에 의존한다. 따라서 균일 전기장에 의해 이탈되는 기포의 체적은 표면장력의 증가에 해당하는 만큼 기포의 체적증가를 유발하게 되는데, 이는 Fig. 5(a)의 가시화결과에서 볼 수 있다. 그리고 전극의 간격이 넓어지면 기포의 변형과 이탈에 영향을 미치는 전기적인 힘이 약해지므로 전기장에 의한 기포의 이탈체적변화는 미미하게 된다.

Fig. 9는 Type 2와 Type 3에 대한 기포의 이탈체적 감소효과를 보여준다. 이들의 높이가 0.5mm 이고, 전극의 간격이 32mm인 Type 2와 이들의 높이가 0mm이고, 전극의 간격이 32mm인 Type 1(Fig. 8)의 기포의 이탈체적 곡선을 비교함으로써 Type 2의 기포의 이탈체적 감소효과는 이들 주위



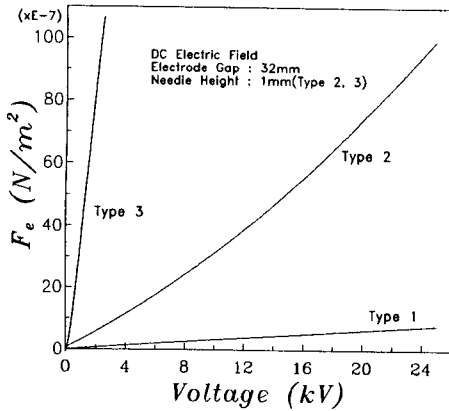


Fig. 10 Electrical forces acting on a bubble

의 국부적으로 강하고 불균일한 전계강도에 의한 것임을 알 수 있다(Fig. 3). 이들의 높이가 증가하고 전극의 간격이 좁아질수록 더 강하고 불균일한 전계강도가 이들 주위에 형성된다. 따라서 Type 3의 전극형태는 매우 낮은 인가전압으로도 아주 효과적인 기포의 이탈체적 감소효과를 얻을 수 있다. 특히 기포체적 감소비  $V/V_0$ 가 0.09정도일 때(Fig. 9) Type 2와 Type 3의 최대 전력소비량은 각각 약 1.08 W와 0.12 W 정도로 미미한 전력량으로 측정되었다.

Fig. 10은 전기장에 의해 기포에 작용하는 DEP력( $F_e$ )으로 기포이탈시 기포의 체적력과 표면장력으로 계산된다. Type 1의 DEP력은 Type 2와 Type 3보다 매우 적었다. 이는 앞의 결과로부터 알 수 있는 것처럼 Type 1의 전계강도가 약하고 균일하기 때문에 기포의 이탈추진효과를 나타내지 못하고 완만한 타원형으로 변형되었다. 그러나 Type 2와 Type 3의 DEP력은 매우 강하므로 기포의 변형과 이탈을 충분히 촉진시킬 수 있음을 알 수 있다. 즉 불균일 전기장에 의해 유도된 강한 DEP력은 기포를 전극면으로부터 이탈시키는 역할을 하므로 기포의 이탈체적은 감소하게 되며 또한 기포의 이탈속도는 크게 증가하게 된다.

4.4 기포의 종단속도와 가속도

Fig. 1의 EHD 핵비등 열전달의 가시화로부터 전기장에 의해 핵비등 열전달이 촉진되는 한 가지 이유로 전기장에 의한 기포의 동적거동의 변화를 생각할 수 있다. 전압을 인가하지 않았을 때 기포는 거의 가열면의 수직방향으로 이탈하였고, 인가전압

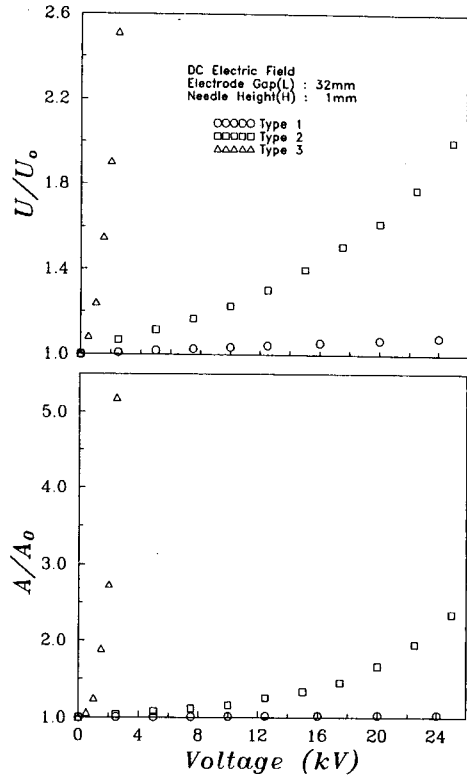


Fig. 11 Normalized terminal velocities and accelerations

이 높아질수록 이들 기포는 더욱 빠른 속도로 이탈하여 주변유체를 매우 효과적으로 교란하였다.

Fig. 11은 전기장에 의한 기포의 종단속도(terminal velocity,  $U$ )와 가속도(acceleration,  $A$ )의 변화를 보여준다. 여기서,  $U_0, A_0$ 는 각각 전기장이 인가되지 않았을 때의 기포의 종단속도와 가속도를 나타낸다. 전기장이 인가되지 않은 경우, 표면장력이 일정하다면 구형기포의 항력(drag)은 Stokes' law에 의해  $F_d=4\pi\mu UR_{b,eq}$ 으로 표현되는데, 이 때 구형기포의 종단속도는 기포에 작용하는 힘의 균형을 고려함으로써 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U = \frac{(\rho_l - \rho_g)g}{3\mu_l} R_{b,eq}^2 [\text{m/s}], Re \ll 1 \tag{5}$$

전기장이 인가되는 경우, 기포의 종단속도 증가량  $\Delta U$ 는 기포에 작용하는 전기적인 힘을 고려함으로써 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta U = \frac{F_e}{4\pi\mu_l R_{b,eq}} [\text{m/s}] \tag{6}$$

여기서,  $R_{b,eq}, F_e$ 는 각각 전기장이 인가되었을 때

전극을 이탈한 기포의 등가반경(equivalent radius)과 기포에 작용하는 DEP력을 나타낸다.

전기장이 인가되지 않았을 때 정체유체내의 구형 기포의 가속도는 다음과 같이 표현된다.<sup>(18)</sup>

$$A = \frac{(\rho_l - \rho_g)g}{\left(\frac{1}{2}\rho_l + \rho_g\right)} \quad [\text{m/s}^2] \quad (7)$$

전기장이 인가되는 경우, 기포의 가속도 증가량  $\Delta A$ 는 기포에 작용하는 전기적인 힘을 고려함으로써 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta A = \frac{3F_e}{4\pi\rho_l R_{b,eq}^3} \quad [\text{m/s}^2] \quad (8)$$

전기장이 불균일하고 강할수록 기포의 이탈체적은 감소하며, 기포에 작용하는 전기적인 힘은 증가하기 때문에(Fig. 10) 기포의 종단속도와 가속도는 크게 증가한다. 즉, 기포가 전기장의 영향으로 전극면에서 이탈할 때 기포의 종단속도와 가속도는 기포의 등가반경  $R_{b,eq}$ 와  $F_e$ 에 의존하므로 불균일 전기장에서의 기포의 종단속도와 가속도는 균일 전기장보다 매우 크다. 따라서 전기장하의 기포운동은 전기장이 인가되지 않았을 때보다 더욱 활발하다.

이들 결과로부터 EHD 비등계에 존재하는 가속된 기포들의 활발한 운동으로 용적액체의 혼합효과가 증대되며, 또한 가열면에서의 기포의 빠른 이탈은 가열면위에 형성되는 열경계층의 형성을 방해하여 열경계층의 두께를 감소시키며, 가열면보다 낮은 주위유체와의 교환을 원활하게 한다. 따라서 주위유체의 혼합과 유입에 의한 가열면의 재적심(rewetting) 면적의 증대효과로 열전달이 촉진됨을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구는 직류전기장에 의한 핵비등열전달촉진을 이해하기 위하여 직류전기장의 영향을 받는 기포의 변형과 이탈특성을 실험 및 수치적인 방법으로 조사하였다. 이를 위해 3가지 형태의 전극(Type 1, 2, 3)을 사용하였으며 전극간격, 전극형태, 니들전극높이 그리고 전계강도 등의 실험조건들로부터 기포의 변형, 기포이탈체적, 종단속도와 가속도 등을 연구하였다. 직류전기장하에서 기포는 타원형으로 변형을 하며 변형정도는 균일 전기장과

불균일 전기장에서 서로 다름이 확인되었다. 전기장하의 기포거동은 전기장의 불균일성에 의해 크게 영향을 받는데, 인가전압이 증가할수록 기포이탈체적은 감소하며, 기포의 종횡비와 접촉각, 종단속도 및 가속도는 증가하였다. 또한, 전기장에 의한 기포변형에 대한 수치해석결과는 가시화결과와 잘 일치하였다. 이들 연구결과로부터 기포의 변형과 이탈은 직류전기장에 의해 크게 영향을 받으며, 이로 인해 핵비등열전달이 증가함을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 한국기계연구원과 첨단유체공학연구센터의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Markels, M. and Durfee, R. L., 1965, "Studies of Boiling Heat Transfer with Electrical Fields, (Part I. Effect of Applied A. C. Voltage on Boiling Heat Transfer to Water in Forced Circulation)," *AICHE J.*, Vol. 11, pp. 716~723.
- (2) Copper, P., 1990, "EHD Enhancement of Nucleate Boiling," *J. Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 458~464.
- (3) Ogata, J. and Yabe, A., 1993, "Augmentation of Boiling Heat Transfer by Utilizing the EHD Effect-EHD Behaviour of Boiling Bubbles and Heat Transfer Characteristics," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 3, pp. 783~791.
- (4) 권영철, 김무환, 조혜정, 1992/1993, "EHD에 의한 비등 열전달촉진 해석방법에 관한 연구," 한국기계연구원 보고서, 포항공과대학교.
- (5) Senftleben, H. and Braun, W., 1936, "Der Einfluss Elektrischer Felder auf den Wärmestrom in Gasen," *Z. Phys.*, Vol. 102, pp. 490~500.
- (6) Pohl, H. A., 1958, "Some Effects on Nonuniform Fields on Dielectrics," *J. Appl. Phys.*, Vol. 29(8), pp. 1182~1188.
- (7) Garton, C. G. Krasucki, Z., 1964, "Bubbles in Insulating Liquids: Stability in an Electric Field," *Proc. Roy. Soc., London*, A 280, pp. 211~226.

- (8) Cheng, K. J. and Chaddock, J. B., 1984, "Deformation and Stability of Drops and Bubbles in an Electric Field," *Physics Letters*, Vol. 106A(1, 2), pp. 51~53.
- (9) Cheng, K. J. and Chaddock, J. B., 1986, "Maximum Size of Bubbles during Nucleate Boiling in an Electric Field," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 7(4), pp. 278~282.
- (10) Cho, H. J., Kang, I. S., Kweon, Y. C., Kim, M. H. and Kim, S. J., 1993, "The Effects of Electric Field on the Behaviors of a Bubble Attached to the Wall," *The 6th International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering*, Vol. II, pp. 405~410.
- (11) Stratton, J. A., 1941, *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill. Co., New York.
- (12) Poulter, R. and Allen, P. H. G., 1986, "Electrohydrodynamically Augmented Heat and Mass Transfer in the Shell/Tube Heat Exchanger," *Proceedings of the 8th International Heat Transfer Conference*, Vol. 6, pp. 2963~2968.
- (13) Jones, T. B. 1978, "Electrohydrodynamically Enhanced Heat Transfer in Liquid-A Review," *Advanced in Heat Transfer*, Vol. 14, pp. 107~148.
- (14) Hakim, S. S. and Higham, J. B., 1962, "An Experimental Determination of the Excess Pressure Produced in a Liquid Dielectric by an Electric Field," *Proc. Phys. Soc.*, Vol. 80, pp 190~198.
- (15) Ahsmann, G. and Kronig, R., 1950, "The Influence of Electric Fields on the Convective Heat Transfer in Liquid," *Appl. Sci. Res. Sect. A2*, pp. 235~244.
- (16) Cho, H. J., Kang, I. S., Kweon, Y. C. and Kim, M. H., 1995, "A Study on the Behaviors of a Bubble Attached to the Wall in an Electric Field(Steady Shape and Fluid Motion)," *The 2nd International Conference on Multiphase Flow*, Vol. 4, pp. FC1-FC7.
- (17) Kutateladze, S. S. and Styrikovich, M. A., 1958, "Hydraulics of Gas-Liquid System," *Wright Field trans. F-TS-9814/V*.
- (18) Panton, R. L., 1984, *Incompressible Flow*, John Wiley & Sons, New York.