

〈논 문〉

전기장을 이용한 핵비등 열전달 촉진에 관한 실험적 연구

권영철* · 김무환** · 강인석***

(1996년 9월 16일 접수)

**Experimental Study on Nucleate Boiling
Heat Transfer Enhancement Using an Electric Field**

Young Chel Kweon, Moo Hwan Kim and In Seok Kang

Key Words : Electrohydrodynamics(전기수력학), Electric Field(전기장), Nucleate Boiling(핵비등), Heat Transfer Enhancement(열전달 촉진), Bubble Dynamics(기포 동특성)

Abstract

To understand EHD nucleate boiling heat transfer enhancement, EHD effects on R-113 nucleate boiling heat transfer in a non-uniform electric field were investigated. The pool boiling heat transfer and the dynamic behavior of bubbles in d.c./a.c. electric fields under a saturated or subcooled boiling were studied by using a plate-wire electrode and a high speed camera. From the pool boiling heat transfer study, the shift of the pool boiling curve, the increase of the heat transfer and the delay of ONB and CHF points to higher heat fluxes were observed. From the dynamic behavior of bubbles, it was observed that bubbles departed away from the whole surface of the heated wire in radial direction due to EHD effects by a nonuniform electric field. With increasing applied voltages, the bubble size decreased and the active nucleation site and the departure number of bubbles showed the different trend. The present study indicates that the EHD nucleate boiling heat transfer is closely connection with the dynamic behavior of bubbles and the secondary flow induced near the heated surface. Therefore, the basic studies on the bubble behavior such as bubble frequency, bubble diameter, bubble velocity and flow characteristics are necessary for complete understanding of the enhancement mechanism of the boiling heat transfer using an electric field.

기호설명

d_w	: 백금선의 직경[m]	h_o	: 전기장이 인가되지 않았을 때의 비등 열전 달계수[W/m ² K]
$\langle D \rangle$: 기포 평균직경[m]	h_e	: 전기장이 인가되었을 때의 비등 열전달계 수 [W/m ² K]
E	: 전기장 세기[V/m]	I	: 전류[A]
E_o	: 균일 전기장 세기($=\Delta\phi/L$)	L	: 전극 간격[m]
F_e	: 전기 체적력[N/m ³]	L_w	: 백금선의 길이[m]
$F(D)$: 기포 직경의 확률밀도함수	$\langle N_o \rangle$: 0 kV에서의 기포 평균이탈수[EA]
<hr/>		$\langle N \rangle$: 전기장하의 기포의 평균이탈수[EA]
<hr/>		Q	: 전기적 가열량[W]

*회원, 한국전력공사 전력연구원 기계공학연구소

**회원, 포항공과대학교 기계공학과

***포항공과대학교 화학공학과

- q'' : 백금선의 열유속 [W/m^2]
 $\langle S_o \rangle$: 0 kV에서의 활성 핵생성 지점의 평균밀도 [EA/m]
 $\langle S \rangle$: 전기장하의 활성 핵생성 지점의 평균밀도 [EA/m]

그리스문자

- ϵ : 유전율 [F/m]
 ρ_c : 전하밀도 [C/m^3]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
 σ_D : 기포 평균직경의 표준편차
 τ_c : 전하이완시간 ($\tau_c = \epsilon/\sigma$)
 ϕ : 인가전압 [V]
 ϕ_w : 백금선 양단의 전압 [V]

I. 서 론

최근 들어 지구에너지 보존과 환경오염방지에 대한 관심이 높아지면서 대체냉매의 개발과 열전달기기의 열전달 능력을 극대화시키기 위하여 여러 방법을 이용한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 그 중의 하나가 전기장을 이용한 열 및 불질전달의 능동적 촉진방법으로 이러한 분야를 이른바 전기수력학(electrohydrodynamics, EHD)이라 한다. 그러나 전기장을 이용한 핵비등 열전달 촉진 방법은 매우 높은 열전달률을 능동적으로 얻을 수 있다는 장점에도 불구하고 전기장에 의한 재 현상의 복잡성과 불명확성으로 산업적 실용화 측면에서는 아직도 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 이를 해결하기 위해 현재 EHD 기술을 이용한 열전달 촉진기구 규명에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

EHD 비등 현상은 기포와 유전유체의 계면에 나타나는 전기적인 현상때문에 일반적으로 알려져 있는 비등 열전달 기구와 크게 다르다. 특히, 핵비등 열전달 경우 열전달률을 좌우하는 기포들의 생성·성장·이탈과정이 전기장의 영향으로 크게 변하게 되는데, 이러한 기포들의 동적 거동은 유전유체(CFC, HCFC계)의 유전율, 전기전도도와 같은 물성치와 계면조건 등에 좌우된다. 특히, 강한 전계구배를 가지는 전기장하에서 이들의 전기적 효과(EHD effect)는 더욱 뚜렷하게 나타나므로 기포들의 이탈과정은 매우 복잡해지게 된다. 따라서 지금 까지의 많은 연구에도 불구하고 전기장에 의한 핵

비등 열전달 촉진기구의 정성적, 정량적 이해가 쉽지 않은 실정이다.

전기장을 이용한 핵비등 열전달에 관한 다음의 여러 실험적인 연구들은 전기장에 의해 핵비등 열전달이 상당히 증가될 수 있음을 보여주고 있다. Pouter와 Allen⁽¹⁾은 12개의 tube shell과 선전극으로 구성된 소형 열교환기가 60개의 tube로 구성된 열교환기와 성능이 같음을 보였다. Cooper⁽²⁾는 smooth와 low-fin tube에서의 R-114의 풀비등 촉진과 오일효과를 연구하여 10%의 오일첨가가 순수 R-114에 의해 얻어지는 열전달 촉진효과보다 약 50% 정도 낫음을 보여주었다. Ohadi 등⁽³⁾은 R-123과 R-11에 2%와 5%의 오일을 첨가시켜 R-123의 열전달 촉진 효과가 R-11보다 약 3 배정도 우수하며, 또한 오일첨가에 의한 열전달 촉진 효과의 감소가 Cooper에 의해 얻어진 결과와 유사함을 보여주었다. Ogata와 Yabe⁽⁴⁾는 전기장에 의한 핵비등 열전달 촉진을 규명하고자 균일 전기장을 받는 기포에 관한 기본실험과 해석을 수행하여 기포의 거동은 전기장의 분포와 열전달면의 과열도에 영향을 받는다고 제안하였다. Singh 등⁽⁵⁾은 in-tube의 R-113 비등 열전달 촉진을 연구하여 주어진 전기장하에서 질량유속과 열유속이 증가할수록 열전달 촉진 효과는 감소함을 보여주었다. 또한 열전달을 촉진하기 위해 사용되는 전극의 형상(enhanced tube)이 최적화 될수록 더 높은 열전달 촉진효과를 얻을 수 있다고 제안하였다. Cooper⁽⁶⁾는 핵비등 열전달에 영향을 주는 불균일 전기장의 중요성을 언급하였으며, 비등 열전달 촉진을 극대화시키기 위해서 열전달면에서 전기장의 세기와 구배가 최대가 되도록 전극계를 구상하여야 한다고 제시하였다. 국내에서도 곽 등⁽⁷⁾은 single/five tube를 이용하여 냉매(CFC)와 대체냉매(HCFC)의 핵비등 열전달 촉진을 그리고 오 등⁽⁸⁾은 전기장하에서의 열교환기 형상에 따른 비등 열전달촉진에 관한 연구 결과들을 보고하였다. 한편, 권 등^(9~11)은 직류 및 교류전기장에 의한 열전달 촉진 현상을 규명하고자 열전달면에 부착되어 있는 단일기포의 변형과 이탈과정을 균일 및 불균일 전기장하에서 수행하여 기포의 변형과 이탈이 전기장의 세기 및 불균일성에 크게 좌우됨을 밝혔고, 또한 균일전기장에 의한 기포와 액적(drop)의 전기적 변형특성을 전기적인 수직응력(normal stress)을 이용하여 이론적으로 고찰하였다. 조 등⁽¹²⁾은 정상상태하에서 열전달면

에 부착되어 있는 단일기포의 변형과정을 경계면 일치좌표계를 이용하여 단일기포의 전기적 변형을 수치적으로 해석하였다. 수치해석 결과 얻어진 기포의 변형은 권 등⁽¹¹⁾의 실험결과와 잘 일치하였다.

전기장하에서 핵비등 열전달이 촉진되는 것은 앞에서 설명한 전기적 효과들이 가열면에서 이탈하는 기포들의 동적 거동에 영향을 주기 때문이라고 판단되므로 EHD 핵비등 열전달 촉진 기구의 발생 및 현상에 대한 이해의 폭을 넓히기 위하여 보다 신뢰성 있는 기초연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 평판-선전극을 이용한 단순 EHD 비등장치를 구성하여 전기장이 인가된 경우와 인가되지 않은 경우의 비등특성 및 가열면에서 이탈하는 기포들의 동적 거동을 조사하였다.

2. 이론적 배경

전기장에 의해 등은 유전유체에 유도되는 전기체 적력은 일반적으로 다음과 같은 식으로 표현된다.⁽¹³⁾

$$\bar{F}_e = \rho_c \bar{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon + \frac{1}{2} \nabla \left[E^2 \rho \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial p} \right)_r \right] \quad (1)$$

여기에서 ρ_c , ϵ , ρ , \bar{E} 는 유전유체 속의 전하밀도(charge density), 유전율(permittivity), 밀도(fluid density) 그리고 전기장의 세기(electric field strength) 등을 나타낸다. 각 항은 electrophoretic, dielectrophoretic, electrostriction력으로, 각 항들의 의미는 Kweon 등⁽¹⁴⁾에 의해 설명되어 있다. 전기장이 온도구배를 가지는 유동장에 인가되면 여러 전기적인 재 현상들이 관찰되는데, 이는 유전유체에 나타나는 전기체적력, 온도구배에 의한 물성치의 변화 그리고 유동, 온도 및 전기장들 사이의 상호작용에 의한 전기적 효과 때문이다. 대부분 EHD 시스템에서는 electrophoretic(EP)과 dielectrophoretic(DEP)력이 동시에 나타나며, 이 힘들은 단상대류(single-phase convection)와 이상 유동(two-phase flow)의 두 경우로 나누어 설명이 가능하다.

먼저, 유체 가열이 국부적으로 이루어지는 단상 대류 열전달의 경우, 유전유체내의 온도구배로 전기전도도와 유전율의 분포가 불균일하게 형성된다. 이 경우에 불균일한 전기전도도에 의한 전하밀도는 다음의 식으로 표현된다.

$$\rho_c = \frac{1}{\sigma} [\epsilon \nabla \sigma - \sigma \nabla \epsilon] \nabla \phi \quad (2)$$

이 식은 전하가 전기전도도(σ), 유전율(ϵ) 그리고 인가전압(ϕ)의 구배에 의해 생성될 수 있음을 의미한다. 한편, 유동장내의 온도구배에 의한 전기전도도의 변화율($5\%/^\circ\text{C}$)은 유전율의 변화율($0.1\%/^\circ\text{C}$)보다 매우 크다⁽¹⁵⁾는 연구결과로부터 우리는 EP력과 DEP력의 상대적인 크기를 서로 비교할 수 있다. 직류전기장이 인가되는 경우 전기전도도의 구배로 인한 전하축적으로 EP력이 지배적이다. 그리고 교류전기장이 인가되는 경우에는 전하이온시간이라는 특성시간으로부터 EP와 DEP력의 크기를 비교할 수 있다. 여기서 전하이온시간이란 유전유체가 전기장의 효과를 받아 전기적으로 포화상태(saturation state)가 되는데 필요한 시간으로 유전율과 전기전도도의 비($\tau_c = \epsilon / \sigma$)로 나타난다. 이 특성시간은 유전유체에 전기장이 주어질 때에식 (1)의 어떤 항이 지배적인 항이 되는지를 결정하는 중요한 기준이 된다. 교류전기장의 교류주기(1/a.c. frequency)가 CFC나 HCFC계 냉매의 전하이온시간보다 매우 작다면 냉매 속에 전하가 축적될 충분한 시간을 갖지 못하므로 EP력은 무시될 수 있고, 그 결과 DEP력이 중요한 전기적인 힘이된다.

비등이나 응축과 같은 이상유동 열전달인 경우, 증기/액체의 유전율 차이에 의한 DEP력이 중요하다. 본 연구에 사용된 R-113과 같은 CFC 계통의 냉매를 사용하는 핵비등 열전달의 경우, 가열면에서 이탈하는 기포들의 특성시간은 냉매의 전하이온시간보다 매우 짧기 때문에 기포들의 계면에 전하축적이 용이하지 않으므로 EP력은 무시될 수 있으며, 그 결과 기포들의 동적 거동은 DEP력에 의해 크게 영향을 받게 될 것이다.

3. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 비등장치와 평판-선전극을 보여준다. 가열면으로부터 이탈하는 기포의 동적 거동은 전극의 배열에 따라 분포되는 전기장의 세기에 직접적인 영향을 받기 때문에 본 EHD 핵비등 연구에서는 기포에 강한 전기력을 유도하기 위하여 작은 직경의 백금선을 사용하였다. 비등장치는 낮은 전류(2 mA)의 DC와 AC 고전압(30

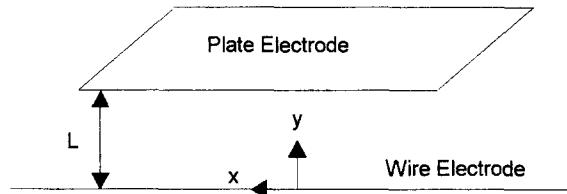
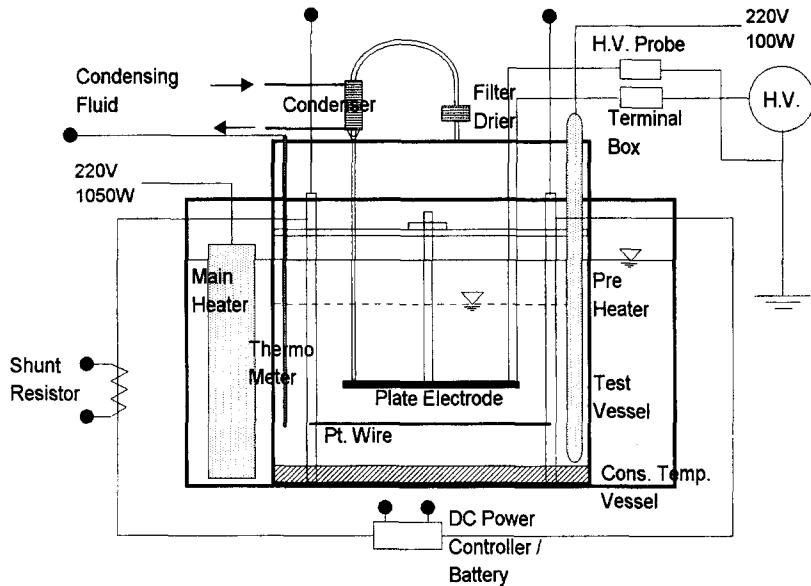


Fig. 1 Experimental boiling apparatus and plate-wire electrode used the present study

kV) 발생장치, 전극계, 주 실험부, 응축부, 가변 DC 전원공급기, 션트저항기로 구성되어 있다. AC 전압의 주파수는 60Hz이다. 전극계는 구리 평판전극과 백금선으로 구성되어 있으며 이들은 주 실험부내에 수평하게 설치되어 있다. 평판전극의 크기는 길이 110 mm, 폭 85 mm이며 모서리는 전기장의 왜곡현상을 줄이기 위하여 라운딩되었다. 백금선의 직경은 0.1 mm와 0.4 mm, 길이는 140 mm로 절연피복이 간긴 직경 10 mm의 구리 봉에 온 납으로 용접되었다. DC 및 AC 고전압은 구리 평판전극에 인가하였으며, 전기저항 히터로 사용된 백금선은 접지되었다. 전극계는 작동유체로 먼저 세정하고 건조시킨 후 주 실험부에 장착하였다. 주 실험부는 가시화를 용이하게 하기 위해 두께 10 mm의 강화유리로 제작하였다. 작동유체는 R-113으로 전기전도도와 유전율은 각각 10^{-12} S/m 과 10^{-11} F/m 이다. 실험시 전기장에 의한 전극과 열전달면으로부터 생성되는 불순물에 의한 영향을 제

거하기 위해 매 실험마다 작동유체를 교환하였으며, 또한 냉매 속에 스며 있는 비응축가스를 최대한 제거하기 위해 실험 전에 100 W 용량의 보조 가열기를 이용하여 포화온도하에서 약 2시간동안 예열한 후 디개싱하였다. 실험중 냉매의 수위를 가능한 일정하게 유지하기 위하여 직경 6 mm, 길이 1300 mm의 응축코일을 사용하여 증발된 냉매를 응축하여 주 실험부로 순환시켰다. 한편, 본 실험의 범위내(16 kV 이하)에서 작동유체를 흐르는 전류는 16 kV의 인가전압이 가해진 경우 최대 $40\mu\text{A}$ 이하로 이때 최대 전력소비량은 약 0.64 W 정도로 평가되었다.

백금선의 표면온도는 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 의 정확도를 가진 항온조를 사용하여 확득한 온도-저항곡선으로부터 구하였으며, 냉매의 온도는 25 mm 간격으로 백금선의 높이에 설치한 0.5 mm 직경의 두개의 열전대(K-type)를 사용하여 측정하였다. 실험전, 냉매의 블크온도(bulk temperature)를 등조건으로 유

지시키기 위해 열전대의 온도차이를 실험구간내 (50°C 내)에서 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 내로 제한하였다. 백금선을 가열하기 위해 12V, 100A 배터리를 사용하였다. 본 실험은 대기압하의 포화비등과 국소비등 상태 하에서 수행하였다. 백금선에 $7.3\text{-}265 \text{ kW/m}^2$ 의 열유속을 가한 후에, 0-16 kV의 DC 및 AC 고전압을 인가하면서 반복 실험을 수행하여 실험의 반복성과 재현성을 확인하였다. 인가된 각 전압에서 DC와 AC 고전압의 변동값이 설정값(setting voltage)의 $\pm 1\%$ 이내를 만족함을 확인한 후 백금선의 전압과 전류를 측정하였다. 백금선으로부터 측정된 전압과 전류로부터 백금선의 열유속이 계산되므로 가변 DC 전원공급기를 이용하여 백금선에 흐르는 전류를 정확히 조절하였다. 전압과 전류측정을 위해 본 실험에 사용된 멀티미터의 정확도는 $\pm 0.05\%$ 이다. 실험에 사용된 전압과 전류는 주어진 DC와 AC 인가전압하에서 획득된 6-10번의 실험값 평균치로 이 값들은 최대 $\pm 4\%$ 이내의 편차범위를 가졌다. 이러한 데이터를 기준으로 실험값의 불확실성(uncertainty)을 확인하기 위해 root-sum-square uncertainty 방법⁽¹⁶⁾을 이용하였다. 전압과 전류의 불확실성은 $\pm 1\%$ 이내, 백금선 열유속의 불확실성은 $\pm 4\%$ 이내 그리고 열전달계수의 불확실성은 포화상태의 경우 $\pm 9\%$ 이내, 과냉상태의 경우 $\pm 6\%$ 이내로 평가되었다.

4. 실험결과

4.1 불균일 전기장의 효과

본 실험에 사용된 평판과 백금선으로 이루어진 단순 전극계의 불균일 전기장의 효과를 살펴보기 위하여 영상이론(theory of image)을 사용하여 등전압(equipotential)과 field line을 구하였다.⁽¹⁷⁾ Fig. 2는 백금선의 y 방향 전기장 세기, 등전압 그리고 field line의 분포를 보여주는 그림으로 전기장의 세기와 구배는 백금선 외 표면에서 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 여기에서, E_0 는 균일 전기장의 세기로 전극에 인가된 고전압을 두 전극 사이의 간격으로 나눈 값($=\Delta\phi/L$)이며, $\Delta\phi$ 는 두 전극 사이에 인가된 전압의 차를, L 은 평판전극과 백금선 사이의 간격을 나타낸다. 식 (1)에서 알 수 있는 것처럼, DEP력은 전기장 세기 제곱에 비례하므로 이 힘은 기포를 전기장의 세기가 강한 영역에서 약한 영역으로 움직이게 하는 역할을 한다.

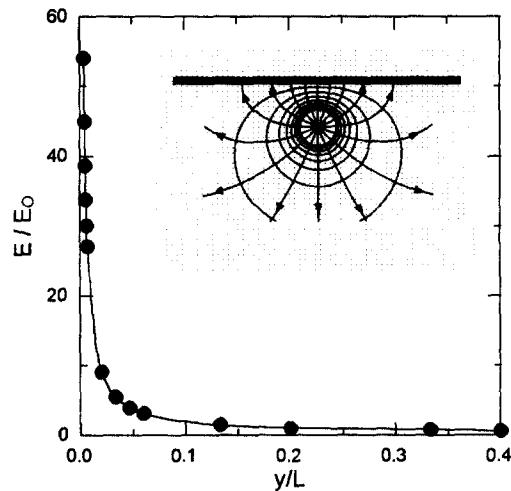


Fig. 2 Electric field strengths (solid circles), distribution of equipotential (solid lines) and field lines (arrows) of the plate-wire electrode

그리고 이 힘은 전극배열의 불균일성에 크게 좌우되므로 기포에 수력학적 힘(hydrodynamic force)과 전기적인 힘(electric force)이 최대로 작용할 수 있도록 전극배열을 고려하는 것이 무엇보다 중요하다고 판단된다. 등전압은 백금선의 방사방향으로 감소하며 field line은 백금선 표면에 수직으로 작용하므로 기포의 이탈은 백금선 표면에서 방사방향으로 이루어짐을 그림으로부터 알 수 있다(Fig. 9 참조). 이 기포의 이탈거동은 전기장의 세기가 강해질수록 그리고 백금선 근처에서 더욱 뚜렷하게 나타난다.

4.2 전기장에 의한 비등 열전달

백금선의 열유속을 결정하기 위해서는 백금선 양단의 전압차($\Delta\phi_w$)와 전류(I)를 측정하여야 한다. 백금선을 전기적으로 가열하는 경우, 열유속은 백금선 단면에서 거의 균일하다. 백금선에 가해지는 전기적 가열량(Q)은

$$Q = \Delta\phi_w \cdot I \quad (3)$$

으로 주어지며, 이 때 백금선의 열유속(q'')은 다음의 식으로 계산되어 진다.

$$q'' = \frac{Q}{\pi d_w L_w} \quad (4)$$

여기에서 d_w 는 백금선의 직경을, L_w 은 백금선의 길이를 나타낸다. 포화 및 과냉비등하의 풀비등곡

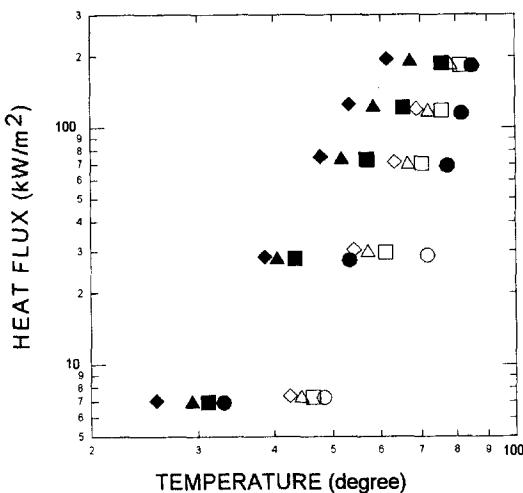


Fig. 3 Pool boiling curves in a DC electric field
(Saturated Boiling Case : ○ 0kV, □ 5kV, △ 10kV, ◇ 15kV)
Subcooled Boiling Case : ● 0kV, ■ 5kV, ▲ 10kV, ◆ 15kV)

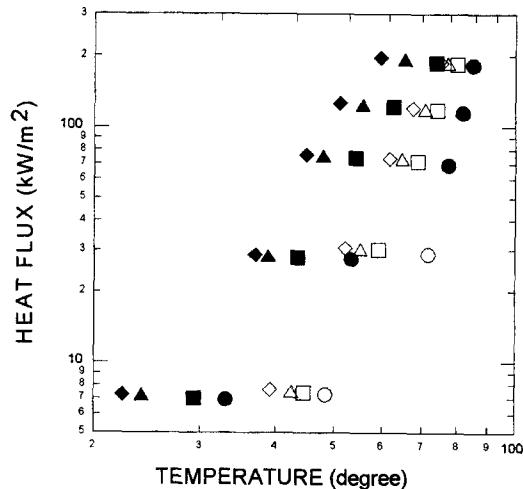


Fig. 4 Pool boiling curves in an AC electric field
(Saturated Boiling Case : ○ 0kV, □ 5kV, △ 10kV, ◇ 15kV)
Subcooled Boiling Case : ● 0kV, ■ 5kV, ▲ 10kV, ◆ 15kV)

선에 대한 전기장의 효과를 조사하기 위해, DC와 AC 전기장을 인가한 경우와 인가하지 않은 경우의 풀비등 곡선들과 서로 비교하였다. Fig. 3과 4는 포화 및 과냉비등하의 DC와 AC전기장에 의한 풀비등 곡선을 보여준다. 인가전압이 증가함에 따라 EHD 비등곡선은 전기장이 인가되지 않았을 때에

획득된 비등곡선보다 낮은 표면온도쪽으로 이동한다. 이 표면온도감소는 전기장에 의한 백금선 근처에서의 기포들의 활발한 동적 거동 및 이차유동과 난류유동 등의 전기수력학적 현상에 의해 열전달이 크게 증대된다는 것을 유동가시화(fig. 10) 결과로 부터 알 수 있다. 주어진 열유속 하에서 인가되는 전압이 높아질수록 백금선의 표면온도는 감소하므로 가열면이 전기장이 인가되지 않았을 때와 같은 표면온도를 갖기 위해서는 더 높은 열유속이 요구된다. 이는 백금선의 열전달능력에 대한 열적여유도(thermal margin)를 크게 하는 효과를 제공한다. 이들 그림은 또한 비등곡선에 대한 파냉효과도 보여준다. 국소비등의 경우, 가열면과 냉매의 온도차는 포화비등보다 크기 때문에 전기장에 의한 표면온도의 감소는 국소비등의 경우가 포화비등에 비해 더 효과적이므로 파냉도가 높을수록 EHD 비등곡선의 이동정도(degree of shift)가 더 뚜렷하게 나타나게 된다.

백금선의 비등 열전달계수는 백금선의 열유속과 벽면과열도로 다음과 같이 정의된다.

$$h = \frac{q''}{T_w - T_{sat}} \quad (5)$$

여기에서 q'' , T_w 그리고 T_{sat} 는 각각 백금선의 단위면적당 열유속, 백금선과 냉매의 온도를 나타낸다. 이 때 전기장에 의한 비등 열전달계수 증가비는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{h_e}{h_o} = \frac{q_e''}{q_o''} \cdot \frac{(T_w - T_l)_o}{(T_w - T_l)_e} \quad (6)$$

여기에서 h_e 와 h_o 는 전기장이 인가되었을 때와 인가되지 않았을 때의 비등 열전달계수다.

Fig. 5와 6은 포화 및 국소비등하의 DC와 AC 전기장에 의한 핵비등 열전달계수 증가비를 나타내는 그림으로, 주어진 열유속(69, 115, 183 kW/m²) 하에서 인가전압을 증가시킬수록 열전달 촉진 효과가 뚜렷이 향상됨을 볼 수 있다. 예를 들어, 백금선의 열유속이 69 kW/m²인 경우, 15 kV의 DC 전기장 하에서 포화와 국소비등하의 열전달계수비 증가는 전기장을 인가하지 않았을 경우보다 약 200-300%, AC 전기장의 경우는 약 250-300% 우수한 열전달 성능을 가지는 것으로 나타났다.

4.3 핵비등 시작점과 임계열유속

Fig. 7은 DC 및 AC 인가전압이 증가할 때 포화 및 국소비등하의 핵비등 시작점(ONB, onset of

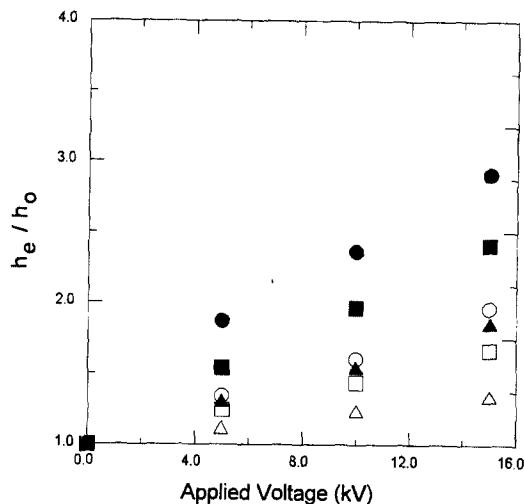


Fig. 5 Boiling heat transfer enhancements in a DC electric field
 (Saturated Boiling Case : ○ 69 kW/m², □ 115 kW/m², △ 183 kW/m²,
 Subcooled Boiling Case : ● 69 kW/m², ■ 115 kW/m², ▲ 183 kW/m²)

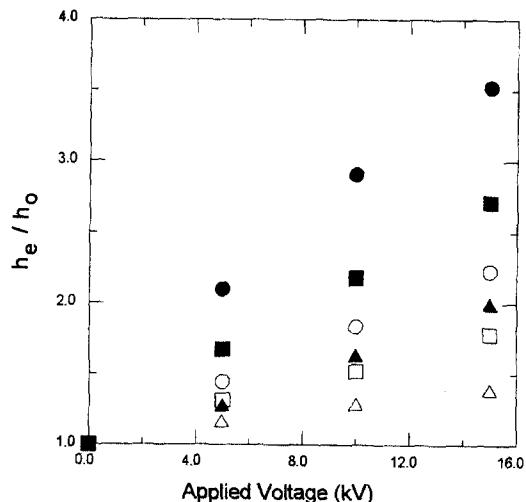


Fig. 6 Boiling heat transfer enhancements in an AC electric field
 (Saturated Boiling Case : ○ 69 kW/m², □ 115 kW/m², △ 183 kW/m²,
 Subcooled Boiling Case : ● 69 kW/m², ■ 115 kW/m², ▲ 183 kW/m²)

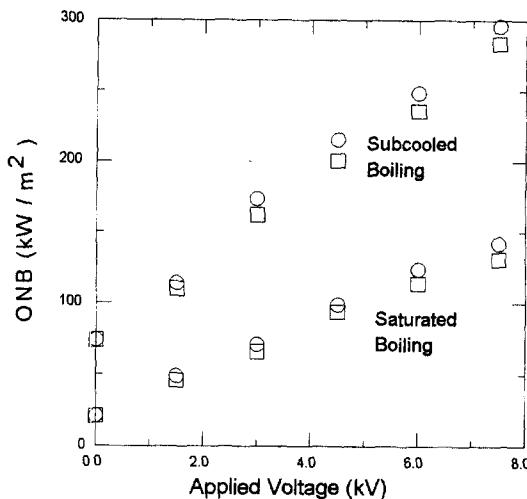


Fig. 7 Onset of nucleate boiling in an electric field
 (○ : AC Applied Voltage, □ : DC Applied Voltage)

nucleate boiling)이 증가함을 보여주고 있다. 핵비등 시작점은 기포들이 백금선 표면에서 발생하기 시작할 때 획득된 열유속으로 핵비등 시작점을 확인하기 위해 주어진 인가전압에서 열유속을 서서히 증가시켰다. 열유속이 점차 증가함에 따라 DC와 AC 전기장하에서 서로 다른 두 종류의 이차유동(secondary flow)이 백금선 주위 유동장영역에

서 관찰되기 시작하였다. DC 전기장을 인가한 경우, 백금선의 과열도에 의해 형성된 열경계층이 백금선의 양쪽구간에서 바깥구간으로 움직이는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 앞의 이론적 배경에서 언급한 것처럼, 냉매의 전기전도도는 온도의 함수로 단상대류유동의 경우 온도구배에 의한 전기전도도의 불균일한 분포로 인해 열경계층 내부에 전하가 재배치하게 되며 아울러 평판-선전극의 기하학적인 형상으로 인해 백금선 부근에 형성된 발산 전기장(divergent electric field)이 백금선의 접선방향으로 전기적인 힘을 유발시키므로 열경계층내의 전하들은 이 힘의 방향을 따라 움직이기 때문이다. 이 전하들의 움직임에 의해 백금선 주위에 튜브형상의 수평 평행유동(horizontal parallel flow)이 형성되는 것이다. AC 전기장을 인가한 경우는 DC 전기장과는 달리 전하의 재배치가 이루어지기 어렵기 때문에 DC 전기장과 같은 수평유동은 관찰되지 않고 백금선의 위쪽으로 이탈하는 파형 유동(wave-like flow)을 관찰할 수 있었다. 이는 AC 주파수와 관계하는 계의 특성시간이 전하이완시간보다 매우 짧기 때문으로 판단된다. DC 및 AC 전기장에 의해 형성된 이를 이차유동의 이동속도는 인가전압을 증가시킬수록 점차 빨라지며 또한 이차유동의

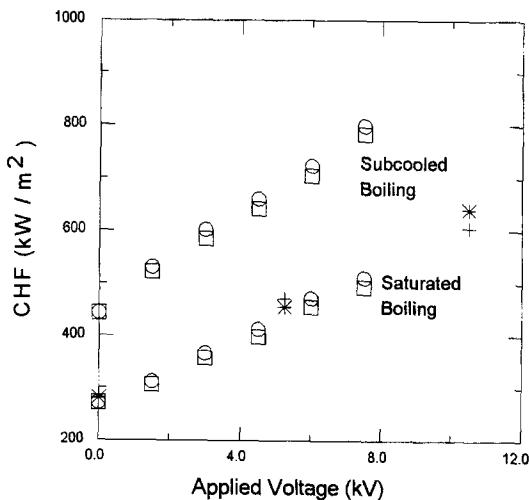


Fig. 8 Critical heat fluxes in an electric field
 (○ : AC Applied Voltage, □ : DC Applied Voltage, + : Choi(1962), * : Lovenguth(1968))

폭도 점차 넓어진다. 그러나 더 높은 전압을 인가하면 (8kV 이상) 국부적으로 형성된 이차유동은 점차 사라지고 강한 난류유동이 전 유동장을 지배함을 관찰할 수 있었다. 이를 결과로부터 핵비등시작점 이하의 영역에서는 전기장에 의해 유도된 이차유동과 난류유동에 의해 대류열전달이 촉진되며, 그 결과 핵비등 시작점은 더 높은 열유속 점으로 이동하게 됨을 알 수 있었다.

가열면의 온도 상승은 시스템의 운전과 안전성에 큰 문제점을 유발하므로, 핵비등의 임계열 유속은 시스템의 정상적인 운전을 위해 조절(control)이 가능하여야 한다. 즉, 비등장치의 효율적인 운전을 위해서는 임계열유속(CHF, critical heat flux)의 발생을 자연시키기 방안이 필요하다. 매우 높은 열유속을 가진 비등표면에 강한 불균일 전기장을 적용한다면 가열면의 과열도를 낮출 수 있다. 풀비등 구선에서 이미 살펴본 바와 같이, 가열면에 높은 전압을 인가하면 가열면의 표면온도가 전기장을 가하지 않은 경우보다 낮아지기 때문에 비등표면은 줄어든 과열도에 상응하는 만큼의 열유속 증가에 대한 열적여유도를 가질 수 있다. Fig. 8은 포화 및 국소비등하에서 DC와 AC 전기장에 의한 임계열유속의 변화를 보여준다. 임계열유속은 증기막이 부분적으로 백금선에 나타날 때 획득된 열유속으로 서서히 증가시켰다. 인가전압이 높을수록 임계열유속점이 더 큰 값을 가진다. 이것은 전기장의 효과

로 임계열유속이 더 높은 열유속점으로 이동하기 때문이다. 본 실험결과는 Choi⁽¹⁸⁾와 Lovenguth⁽¹⁹⁾에 의해 실린더형 전극에서 수행된 R-113의 포화비등의 결과와 비슷한 경향을 보여주고 있다. 인가전압이 높아지게 되면 기포의 생성은 활발해지고 이탈주파수는 크게 증가하게 된다. 즉, 백금선에서 생성되는 많은 기포들이 강한 전기적인 힘에 의해 백금선 주위로 활발히 이탈함에 따라 유동장의 교란정도가 우수해져 핵비등 열전달이 촉진되는 효과를 제공하게 되며, 그 결과 임계열유속이 더 높은 열유속 점으로 이동하게 됨을 알 수 있다.

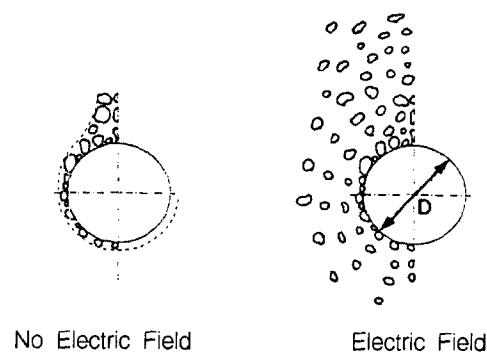
4.4 유동가시화

Fig. 10은 포화비등하의 풀비등 가시화 결과로 155 kW/m²의 열유속 하에서 인가전압(0 kV-16 kV)을 증가시켜 가면서 수행하였다. 핵비등 열전달 촉진 현상의 정성적인 해석을 위하여 화대렌즈와 후측광기법을 사용하여 전기장에 의한 기포의 거동을 가시화하였다. 전기장을 인가하지 않았을 때, 기포들의 이탈과정은 주로 백금선의 윗 표면에서 이루어지지만 전기장하에서 기포들은 백금선의 전 표면에서 수직 방향으로 매우 활발히 이탈하였다. Fig. 9는 전기장이 인가되지 않은 경우와 전기장이 인가된 경우의 백금선표면에서 이탈하는 기포들의 거동을 개념적으로 보여주고 있다. 이로부터 백금선에서 생성 및 이탈하는 기포들의 동적거동은 전기장에 의해 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 전기력에 의해 백금선표면에서 기포들이 이탈하는 최대거리는 본 연구에 사용된 백금선 직경의 6-7배 정도로, 이 이상의 거리에서는 기포의 이탈을 가속시키는 전기적인 힘이 이탈하는 기포의 체적력보다 약해지므로 다시 윗 방향으로 이동한다. 전기장의 분포가 불균일하고 전기장의 세기가 강해 질수록 이탈하는 기포의 크기는 감소하며 이탈속도는 더욱 가속된다. 그 결과 가열된 백금선 주위에서는 비등유체의 흐름이 변하며 동시에 핵비등 열전달 기구도 변하게 될 것으로 판단된다.

Fig. 10으로부터 관찰할 수 있는 것처럼 백금선 주위에 DC 및 AC 전기장을 인가함에 따라 백금선으로부터 이탈하는 기포의 수는 증가하는 경향을 보여준다. 이 기포생성률의 증가(6.4 kV 이하)는 다음과 같이 설명할 수 있다. 우선, 가열면의 열경계층내의 온도분포가 선형적이라 가정하자. 온도구배를 가진 열경계층내의 가열면에서의 기포생성조

건은 평형기포곡선이 열경계층의 온도분포곡선과 교차되는 영역으로, 열경계층이 형성된 가열면에 불균일 전기장을 인가하면 열경계층이 불안정해져 열경계층 두께가 확장된다. 이 확장된 열경계층내의 온도분포곡선은 전기장이 인가되지 않은 경우보다 평형기포곡선의 더 넓은 영역과 교차하게 되므로 가열면에서 기포의 활성화가 가능한 공동의 범위가 확장되어 기포생성이 촉진되는 것이다.

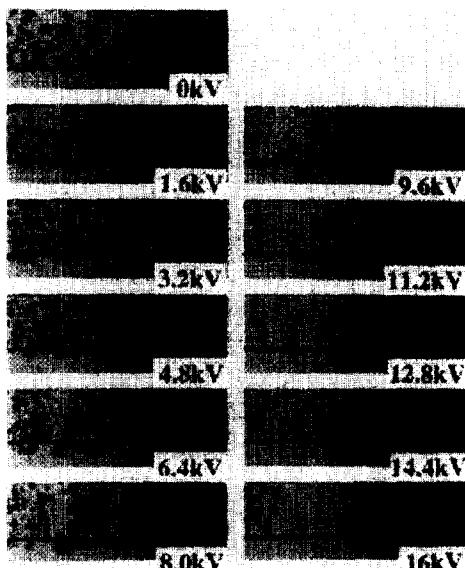
그러나 인가전압을 더 높임에 따라 활성핵지점과 기포이탈수는 줄어들기 시작한다. 약 11 kV에 이르면 기포의 생성이 크게 감소하면서 전 유동장이 교란되기 시작하였다. 더 높은 인가전압(16 kV 이상)에서는 핵비등과정이 완전히 사라지고 강한 단상난류 유동장이 형성되었다. 이 과정은 가열면의



No Electric Field

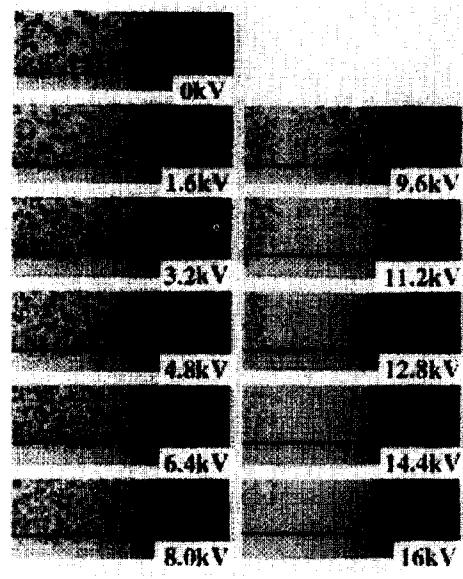
Electric Field

Fig. 9 Bubble departure behavior



(a) DC Electric field

과열도에 의해 설명될 수 있다. 풀비등곡선에서 알 수 있는 것처럼, 전기장에 의한 열전달 표면온도의 감소로 과열도가 낮아져 기포생성이 둔화된다. 위에서 설명한 것과 마찬가지로, 열경계층내의 벽면 온도가 낮아지게 되면 온도분포곡선과 평형곡선이 교차하는 영역이 줄어들게 된다. 따라서 기포의 활성화가 가능한 공동의 범위는 감소하게 되며, 그 결과 기포생성이 억제되는 것이다. 가열면에서 이탈하는 기포의 수는 감소하지만 Fig. 5와 6에서 볼 수 있는 것처럼 열전달계수가 증가하는 이유는 강한 불균일 전기장에 의해 백금선 주위에 유도된 난류유동 때문이다. 핵비등 영역에서는 유전유체와 기포의 유전율 차이에 의한 전기적인 힘이 유동장을 지배하지만, Fig. 10의 가시화 결과에 나타난 것처럼 높은 인가전압에 의해 핵비등 열전달 과정이 단상대류 열전달 과정으로 천이함에 따라 이 영역에서는 유전유체의 전기전도도가 매우 중요한 변수가 됨을 알 수 있다. 전기전도도는 온도뿐만 아니라 전기장의 함수⁽²⁰⁾이므로 전기장이 강해질수록 유동장내의 전하밀도는 높아진다. 따라서 전기장의 효과와 밀접한 관계가 있는 전하이완시간이 짧아지게 되므로 강한 불균일 전기장이 인가되면 EHD 효과는 더욱 뚜렷하게 나타나게 될 것이다. 한편, 높은 전기장하의 단상대류 난류영역에서 백금선의 열유속을 충분히 크게 증가시키면 백금선 표면에서



(b) AC Electric field

Fig. 10 Flow visualization of EHD nucleate boiling

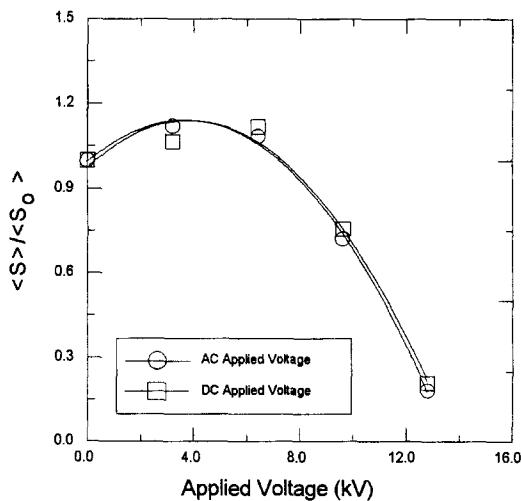


Fig. 11 Average active nucleation site densities of bubbles

기포의 생성이 다시 관찰되는데, 이는 백금선의 과열도가 회복되어 기포의 생성조건을 만족시키기 때문이다.

일반적으로 핵비등 열전달의 특징은 가열면에 포함되어 있는 여러 크기의 공동에서의 기포생성 및 이탈과정으로 기포의 크기, 이탈주기, 발생 수에 의해 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이 핵비등 과정에 강한 불균일 전기장을 적용하면 가열면 근방에서의 기포의 활발한 동적 거동으로 기포의 크기, 이탈주기, 발생 수가 전기장을 인가하지 않은 경우에 비하여 크게 달라지게 되며 또한 강한 난류유동의 형성으로 EHD 열전달 기구가 크게 변하게 될 것이라는 것을 본 연구결과로부터 알 수 있었다. 따라서 본 연구에 이어 계속적으로 기포의 동적 거동에 대한 연구를 수행 중에 있으며, 이를 통해 가열면의 열전달 성능을 예측할 수 있을 것이다.

4.5 전기장에 의한 기포의 동적 거동

앞의 가시화 결과로부터, EHD 핵비등 열전달 측정은 가열면에서 이탈하는 기포들의 동적 거동과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 EHD 핵비등 열전달 측정현상을 이해하기 위해서는 기포의 동적 거동을 이해하여야 한다. 여기서는 가열면의 활성 핵생성 지점의 밀도, 기포 이탈수와 기포 직경 그리고 정규분포 등에 대해서 설명하기 위해 포화비등 상태하의 155 kW/m^2 열유속 조건하에서

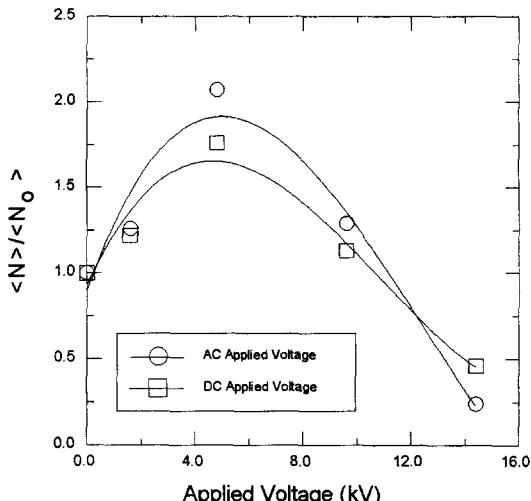


Fig. 12 Average departure number densities of bubbles

2,500 fps의 고속촬영기를 사용하여 기포의 거동을 촬영하였다. 기포의 동적거동을 조사하기 위해 약 40장의 필름 영상자료를 해석하였으며, 기포직경에 대한 불화설정은 $\pm 11\%$ 이내였다.

Fig. 11은 인가전압에 대한 기포의 활성 핵생성 지점의 밀도비($\langle S \rangle / \langle S_o \rangle$)를 보여준다. 여기에서 $\langle S_o \rangle$ 는 0 kV에서의 활성 핵생성 지점의 평균밀도이다. 전기장에 의한 활성 핵생성 지점의 변화를 조사하기 위하여, 핵생성 지점은 기포가 백금선에 붙어 있을 때에 활성적인 것으로 고려하였다. 기포는 백금선의 어떤 부분에서 거의 계속적으로 발생하는 반면 또 다른 어떤 부분에서 간헐적으로 발생됨을 관찰할 수 있었다. 실험결과는 인가전압에 따라 두 영역을 보여주고 있다. 낮은 인가전압에서는 활성 핵생성 지점이 다소 증가하는데, 이는 앞에서 설명된 것처럼 전기장이 가열면에 포함되어 있는 여러 크기의 공동을 활성화하기 때문이다. 그리고 인가전압이 증가할수록 기포생성은 억제되는데 이는 앞에서 설명된 열전달 표면온도의 감소로 이해 할 수 있다. Fig. 12는 인가전압에 대한 기포 이탈수의 비($\langle N \rangle / \langle N_o \rangle$)를 보여준다. 여기에서 $\langle N_o \rangle$ 는 0 kV에서의 기포의 평균이탈수이다. 기포 평균이탈수의 결과는 활성 핵생성 지점의 밀도비의 결과와 유사한 경향을 가지며 강한 전기장 하에서 열전달과정이 핵비등에서 단상 대류로 천이 됨을 보여 준다. Fig. 13은 백금선에서 이탈한 기포들을 크기별로 분류하여 각 직경 구간별 개수들을 히스토그

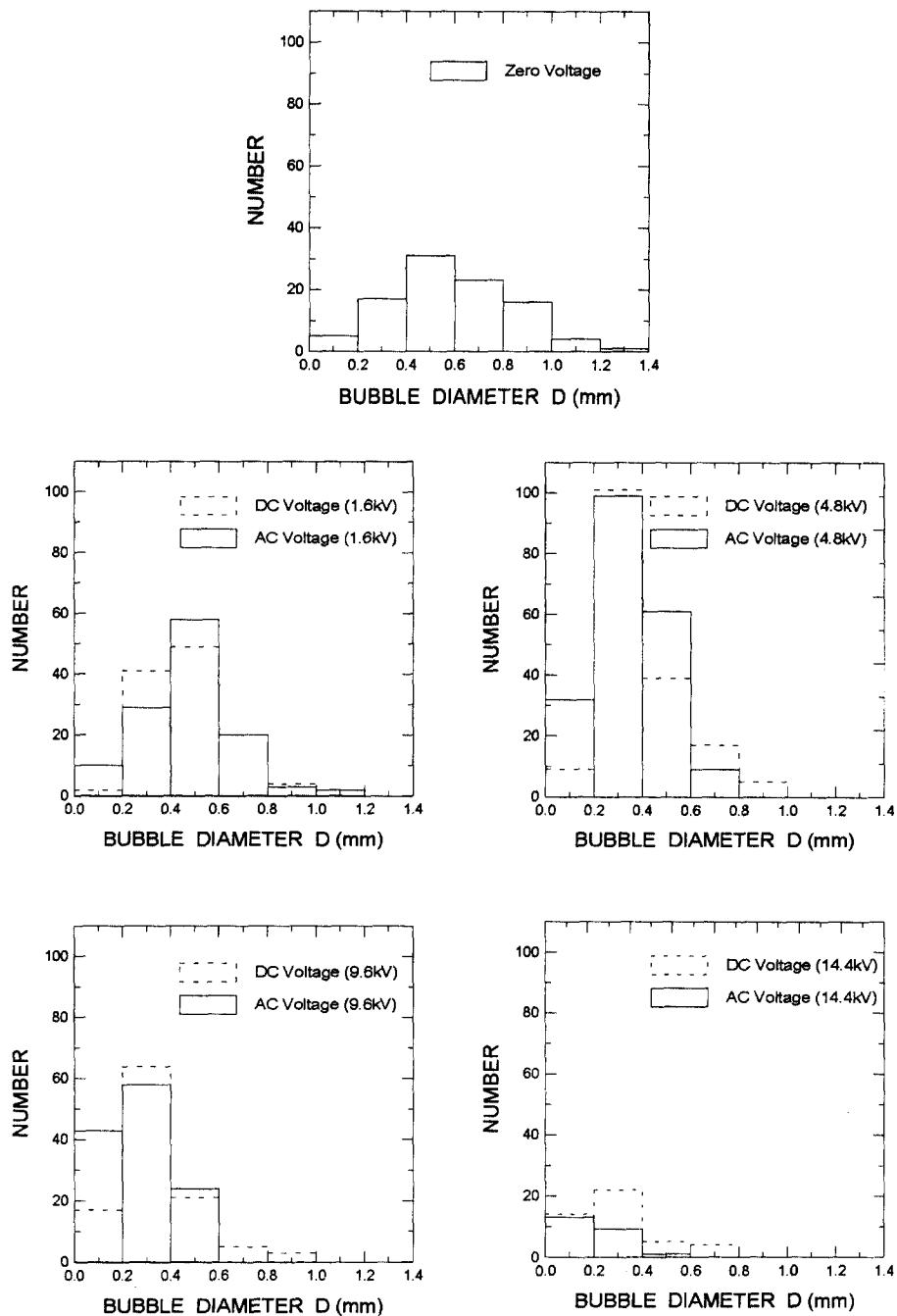


Fig. 13 Relation bubble number with bubble diameter in DC/AC electric fields

램으로 나타낸 것이다. 0 kV일 때, 백금선에서 이 탈하는 기포들은 넓은 범위에 걸쳐 고르게 발생하고 있다. 그러나 전기장이 인가됨에 따라 이탈하는 기포들의 크기는 전기장이 인가되지 않을 때보다

줄어들고 좌우 비대칭적인 경향을 보여준다. 즉, 이들 결과로부터 인가전압의 크기와 종류에 따라 기포의 이탈기구가 크게 달라진다는 것을 알 수 있다.

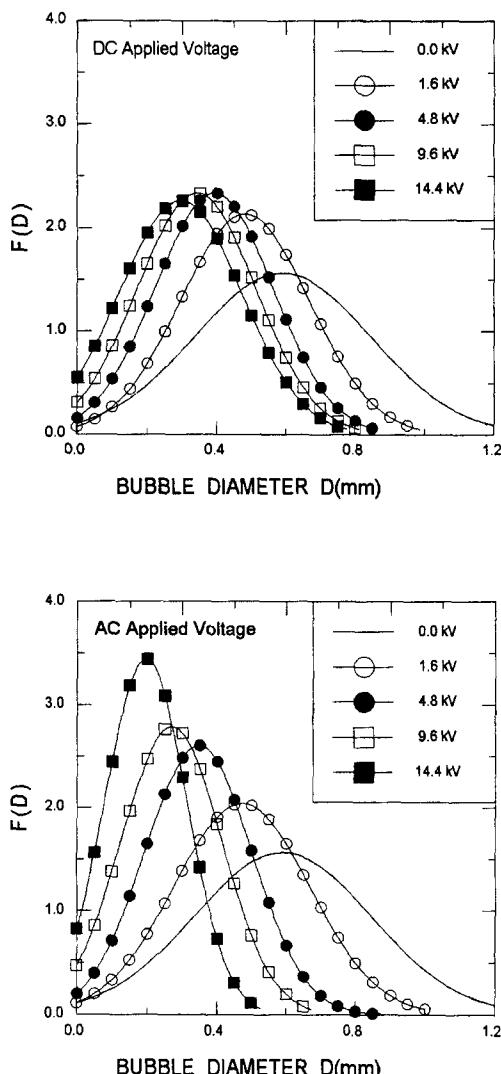


Fig. 14 Normal distribution of bubble diameter in DC/AC electric fields

가열면을 이탈하는 기포들은 다양한 크기의 분포를 가지므로 기포 직경은 정규분포로 나타낼 수 있다.

$$F(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_D} \exp\left[-\frac{(D-\langle D \rangle)^2}{2\sigma_D^2}\right] \quad (7)$$

위 식은 인가전압에 의한 기포 직경의 확률밀도함수를 나타낸다. 여기에서 $\langle D \rangle$ 는 기포 평균직경, σ_D 는 기포 평균직경의 표준편차(standard deviation)로 다음과 같이 정의된다.

$$\langle D \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N D_i N_i}{\sum_{i=1}^N N_i} \quad (8)$$

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N D_i^2 N_i}{\sum_{i=1}^N N_i} - \langle D \rangle^2} \quad (9)$$

Fig. 14는 DC와 AC 전기장에 의한 기포 직경의 정규분포를 보여준다. 이들 분포는 인가된 전압에 따라 다르게 나타난다. AC 전기장에 의한 정규분포의 정점은 DC 전기장에 의한 정점보다 좌측으로 치우쳐 있다. 그리고 AC 전기장에 의한 표준편차는 DC 전기장에 의한 표준편차보다 적은 값을 가지는데, 이것은 주어진 전기장하에서 이탈하는 여러 기포들의 변동범위가 DC 전기장보다 AC 전기장하에서 더 조밀하다는 것을 의미한다. 따라서 정규분포의 정점은 DC 전기장보다 AC 전기장에서 더 큰 값을 나타낸다.

5. 결 론

본 연구는 전기장에 의한 핵비등 열전달 촉진 현상을 규명하기 위해 수행되었으며, 이를 위해 핵비등 열전달과 기포의 동적 거동에 미치는 전기적인 효과들을 조사하였다. 실험을 통해 다음과 같은 결론들을 얻었다.

1) 핵비등 열전달을 촉진시키는 전기적인 효과는 유동장내 활발한 기포들의 동적 거동에 의한 비등 효과와 혼합 및 난류효과를 촉진시키는 대류효과에 의한 것으로 관찰되었다. 이들 효과로 인해 풀비등 곡선, 핵비등시작점과 임계열유속 그리고 열전달계수가 전기장이 인가되지 않은 경우에 비해 뚜렷이 증가하는 경향을 나타내었다.

2) 강한 불균일 전기장에 의해 기포들이 백금선 전 표면에서 방사방향으로 빠르게 이탈하였다. 그리고 기포 이탈 직경 및 정규분포 해석을 통해, 인가전압의 세기와 종류에 따라 기포들의 크기 및 이탈기구 그리고 유동장이 크게 달라짐을 확인하였다.

3) 본 연구결과는 EHD 핵비등 열전달 촉진이 기포의 동적 거동과 밀접한 관계가 있음을 보여준다. 따라서 가열면에서 이탈하는 기포들의 동적 거동에 관한 연구를 진행 중이다.

후기

본 연구는 포항공과대학교 첨단유체공학센터와 전력연구원의 후원으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Poulter, R. and Allen, P. H. G., 1986, "Electrohydrodynamically Augmented Heat and Mass Transfer in the Shell/Tube Heat Exchanger," *8th Int. Heat Transfer Conf.*, San Francisco, Vol. 6, pp. 2963~2968.
- (2) Cooper, P., 1990, "EHD Enhancement of Nucleate Boiling," *Transactions of the ASME*, Vol. 112, pp. 458~464.
- (3) Ohadi, M. M., Papar, R. A., Ng, T. L., Faani, M. A. and Radermacher, R., 1992, "EHD Enhancement of Shell-Side Boiling Heat Transfer Coefficients of R-123/Oil Mixture," *ASHRAE Transactions Symposia*, BA-92-5-1, pp. 427~434.
- (4) Ogata, J. and Yabe, A., 1993, "Augmentation of Boiling Heat Transfer By Utilizing the EHD Effect-EHD Behavior of Boiling Bubbles and Heat Transfer Characteristics," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 783~791.
- (5) Singh, A., Ohadi, M. M., Dessiatoun, S. and Chu, W., 1994, "In-Tube Boiling Heat Transfer Enhancement of R-123 Using the EHD Technique," *ASHRAE Transactions Symposia*, OR-94-10-3.
- (6) Cooper, P., 1992, "Practical Design Aspects of EHD Heat Transfer Enhancement in evaporators," *ASHRAE Transactions Symposia*, BA-92-5-3, pp. 445~454.
- (7) 곽태희, 김주형, 정동수, 김종보, 차태우, 한창섭, 1994, "Chiller용 냉매 CFC-11과 대체냉매 HCFC-123의 전기장을 사용한 핵비등 열전달 촉진에 관한 연구," 공기조화냉동공학논문집 제 6 권 제4호, pp. 365~379.
- (8) 오시녀, 곽호영, 1996, "전기장하에서의 비등 열전달 촉진에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 논문집(B) 제20권 제7호, pp. 2298~2314.
- (9) 권영철, 김무환, 조혜정, 장인석, 김석준, 1995, "직류전기장에 의한 기포의 변형과 이탈에 관한 연구," 대한기계학회논문집 제19권 제6호, pp. 1518~1528.
- (10) 권영철, 김무환, 조혜정, 장인석, 김석준, 1996, "균일전기장에 의한 기포와 액적의 변형에 관한 연구," 대한기계학회논문집(B) 제20권 제6호, pp. 2023~2035.
- (11) Kweon, Y. C., Kim, M. H., Cho, H. J. and Kang, I. S., 1997, "Study on the Deformation and Departure of a Bubble Attached to a Wall in D.C./A.C. Electric Fields," *Int. J. Multiphase Flow*.
- (12) Cho, H. J., Kang, I. S., Kweon, Y. C. and Kim, M. H., 1996, "Study on the Behavior of a Bubble Attached to the Wall in a Uniform Electric Field," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 22, pp. 909~922.
- (13) Statton, J. A., 1941, *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill Co., New York.
- (14) 권영철, 김무환, 조혜정, 1992, "EHD에 의한 열전달 촉진 기술 개발," 과학기술처 보고서 (UCN 421-1666C).
- (15) Turnbull, R. J., 1968, "Electroconvective Instability with a Stabilizing Temperature Gradient. (I. Theory)," *Physics Fluids*, Vol. 11, pp. 2588~2516.
- (16) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (17) Kraua, J. D., 1993, *Electromagnetics*, McGraw-Hill Co., New York.
- (18) Choi, H. Y., 1962, "Electrohydrodynamics Boiling Heat Transfer," Ph. D. Thesis, Dep. Mech. Eng., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- (19) Lovenguth, R. F., 1968, "Boiling Heat Transfer in the Presence of Electric Fields," Ph. D. Thesis, Dep. Chem. Eng., Network College of Eng., Newark, New Jersey.
- (20) Adamec, V. and Calderwood, J. H., 1977, "Electric-Field-Enhanced Conductivity in Dielectrics," *J. Phys. D : Appl. Phys.*, Vol. 10, pp. L79~L81.