

불균일 전기장이 벽면기포의 거동에 미치는 영향

조혜진, 강인석, 김무환*

포항공과대학교 화학공학과 및 첨단유체공학 연구센터
 포항공과대학교 기계공학과 및 첨단유체공학 연구센터*

The Effects of a nonuniform electric field on the behaviors of a bubble attached to a wall

Hye Jung Cho, In Seok Kang, Moo Hwan Kim*

Dept. of Chem. Eng. and Advanced Fluid Eng. Res. Center,
 POSTECH

Dept. of Mech. Eng. and Advanced Fluid Eng. Res. Center* POSTECH

서론

최근들어 비등열전달 촉진 방안의 하나로서 전기장을 가하는 이른바 전기수력학적(Electrohydrodynamic) 연구가 환경오염을 줄이기 위한 열교환기내 대체냉매의 개발이라는 관점에서 크게 주목 받고있다. 지금까지의 연구에 의하면, 가해진 전기장에 의해 비등시 가열면을 떠나는 기포의 크기가 작아지고 이탈주기 또한 짧아져 전체비등열전달 효과가 증대되는 것이 실험으로 관찰되었다. 그러나, 대부분의 연구들이 실험에 의존하고 있어 전기장에 의한 비등열전달 촉진기구의 근본적 이해가 요구되는 실제 응용에는 많은 어려움이 따랐다. 이에 본 연구는 비등시 발생하는 기포의 거동에 미치는 불균일 전기장의 영향을 수치적 방법을 통해 이해함으로써 비등열전달 촉진기구를 보다 명확하게 이해하고자 한다.

문제설정 및 수치해석방법

불균일 전기장하의 기포변형을 해석하고자 높이가 h 이고 반경이 w 인 실린더형의 전도성 tip에 부착된 등가반경 a 를 갖는 기포를 고려하였다(그림 1). 부착된 기포는 접촉각 θ_c 와 접촉반경 r_c 를 갖으며, 기포안 기체의 전기전도도와 유전율이 주위 비등유체의 것보다 무시할 만큼 작다고 가정하였다. 가해진 전기장의 불균일정도에 따른 영향을 알아보기로 하자 tip을 지지하는 하단부를 전도성(type I)과 절연성(type II)의 두가지 경우로 나누어 고려하였다. 그림에서 보듯이 x 는 tip주위 실린더형 좌표계의 회전축을 o 는 반경방향 좌표를 나타내며, 기포주위의 구형좌표는 r 과 θ 로 나타내었다. 주어진 계에 대한 지배방정식은 자유전하가 존재하지 않는 유체에 해당되는 전기포텐셜에 대한 라플라스(Laplace)식

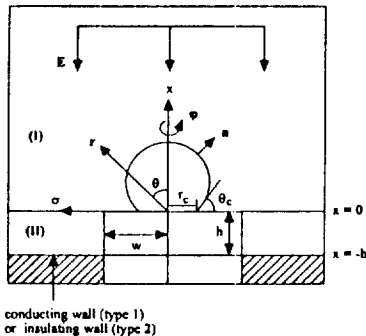


그림 1. 불균일 전기장하에서 벽면에 부착된 기포

$$\nabla^2 \phi = 0$$

으로 기포주위의 영역 I과 tip주위의 영역 II에 대해 각각 적용되며, 다음과 같은 경계조건하에서 해를 갖게 된다.

$$\begin{aligned} \phi &\rightarrow x+H \quad \text{as } r \rightarrow \infty, \\ \mathbf{n} \cdot \nabla \phi &= 0 \quad \text{on the bubble surface,} \\ \phi &= 0 \quad \text{for } x=0, R_c \leq \sigma \leq W, \\ \phi &= 0 \quad \text{for } \sigma=W, -H \leq x \leq 0, \\ \phi &\rightarrow x+H \quad \text{at } -H \leq x \leq 0, \sigma \rightarrow \infty, \\ \phi &= 0 \quad (\text{type 1}) \quad \text{or } \mathbf{e}_x \cdot \nabla \phi = 0 \quad (\text{type 2}) \\ &\quad \text{for } x=-H, W \leq \sigma \leq \infty, \end{aligned}$$

여기서 H, W 와 R_c 는 특성길이 a 로 무차원화된 수들로 다음과 같이 정의된다.

$$H = \frac{h}{a}, \quad W = \frac{w}{a}, \quad R_c = \frac{r_c}{a}$$

또한, 전기장하의 기포의 모양은 영역 I과 영역 II에 대한 전기포텐셜의 라플라스 식과 다음과 같은 수직응력 조건을 동시에 만족시키는 해를 구함으로써 결정되어 진다.

$$-N_b + N_g x - \frac{N_e}{2} E_t^2 = (\nabla \cdot \mathbf{n})$$

여기서, 무차원수인 N_b, N_g 와 N_e 는 다음과 같이 정의된다.

$$N_b = \frac{\Delta p_0 a}{\gamma}, \quad N_g = \frac{\Delta \rho g a^2}{\gamma}, \quad N_e = \frac{\epsilon E_{\infty}^2 a}{\gamma}$$

본 연구에서는 위와 같은 자유계면문제를 풀고자 영역 I에는 경계면일치직교좌표계(Boundary fitted orthogonal coordinate system)를 영역 II에는 직각좌표계(rectangular coordinate system)를 구성하였다. 복합좌표계상에서의 지배방정식의 유한차분해는 ADI방법을 이용함으로써 구하였다.

수치결과 및 해석

그림 2는 전도성 하단부(type 1)의 경우 tip높이에 따른 전기장의 분포와 기포의 변형을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이, 등전위선(equipotential line)은 기포와 tip 주위로 갈수록 곡선화되고 간격이 좁아져 기포와 tip주위의 전기장이 상대적으로 강하게 되는 불균일한 분포를 나타낸다. 이러한 불균일성은 tip의 높이가 높아질수록 강해져 기포의 변형에도 중요한 영향을 미치게 된다. 전기장하의 기포는 가해진 전기장의 방향으로 신장하면서 변형되는데, tip의 높이가 높아질수록 변형정도는 더욱 커져 그림 2(b)와 같은 slender waist 형태를 갖게 된다. 한편, 절연성 하단부(type 2)를 갖는 경우는 그림 3에서 보는 것과 같이 tip표면으로 전기장이 집중되어 type 1의 경우보다 기포주위에 훨씬 더 강하고 불균일한 전기장이 분포하는 것을 알 수 있다. 이로인해 기포는 더욱 크게 변형하게 되는데, 이러한 전기장의 집중효과는 tip의 높이가 낮을수록 더욱 효과적으로 나타나게 된다.

일정한 접촉면을 갖는 기포의 경우 가해진 전기장은 벽면과 기포간의 접촉각을 변화시키게 되는데 그림 4에서 보는바와 같이 전기장의 세기가 커질수록 접촉각

은 증가함을 알 수 있다. Type 1의 경우 tip높이가 5이상에서 접촉각이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있는데, 전기장이 tip주위로 집중되는 type 2의 경우는 tip높이 2에서도 같은 경향을 찾아볼 수 있다. 이로부터 가해준 전기장의 불균일성과 그 세기가 기포의 변형에 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

한편, 가해준 전기장은 벽면을 떠나는 기포의 이탈부피에도 영향을 미치게 된다. 그림 5에서 보듯이 type 1의 경우 tip높이가 5이상일 때 기포의 이탈부피가 임의의 전기장 세기를 지나서 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 기포에 주어지는 전기적 힘이 임계점을 지나면서 기포변형으로 증대되는 표면장력보다 커지는 것을 의미한다.

결론

전기장 하에서 기포는 가해준 전기장방향으로 신장하며 변형되는 것을 알 수 있었다. 기포주위에 분포하는 전기장의 불균일성이 tip높이가 높아질수록 커져 기포의 변형에 큰 영향을 미치게 됨을 알 수 있었다. 또한, 전기장에 의해 기포와 tip간의 접촉각이 증대되는데, type 1의 경우 tip높이 5이상에서 접촉각의 급격한 변화를 나타내는 반면, 전기장이 tip으로 집중되는 type 2의 경우는 낮은 tip높이에서도 같은 경향을 찾을 수 있었다. 한편, 기포의 이탈부피는 기포에 주어지는 전기적 힘이 기포변형에 의한 표면장력을 능가하는 임계의 전기장세기를 지나면서 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있었다.

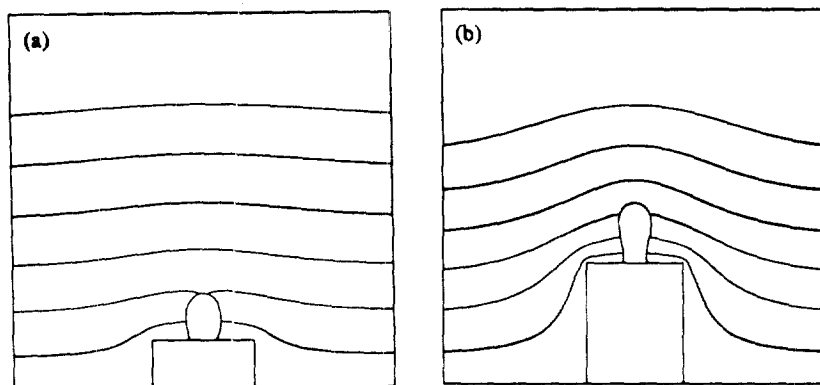


그림 2. Type 1에 대한 등전위면의 분포와 기포의 변형에 대한 수치결과
($W=3.7$, $R_c=0.5$) (a) $H=2$, $N_e=1.0$ (b) $H=5$, $N_e=0.59$

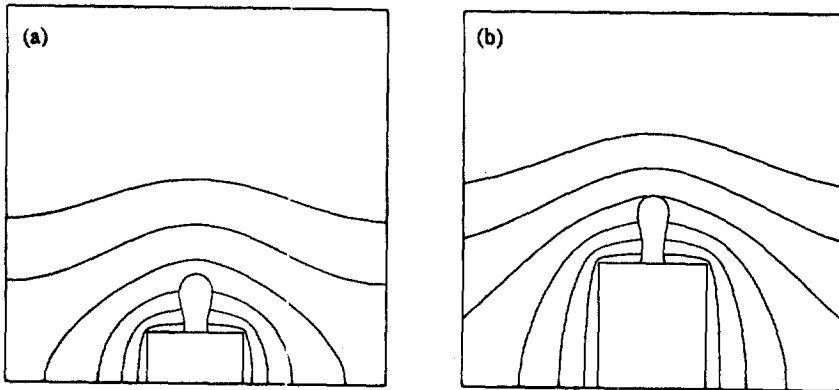


그림 3. Type 2 에 대한 등전위면의 분포와 기포의 변형에 대한 수치결과 ($W=3.7, R_c=0.5$) (a) $H=2, N_e=0.39$ (b) $H=5, N_e=0.32$

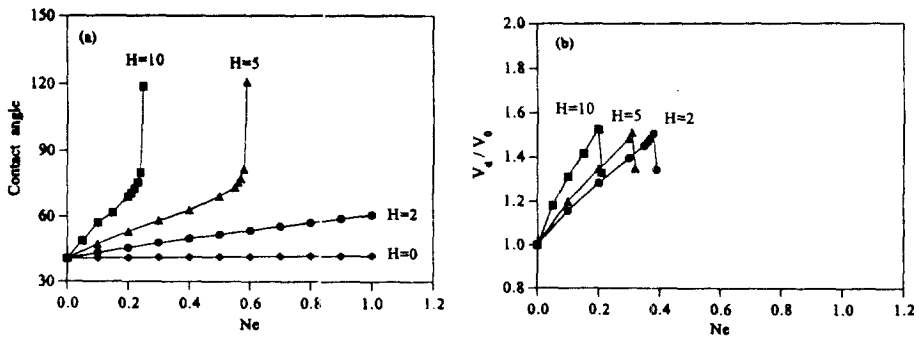


그림 4. 전기장세기에 따른 접촉각의 변화에 대한 수치결과 (a) Type 1 (b) Type 2

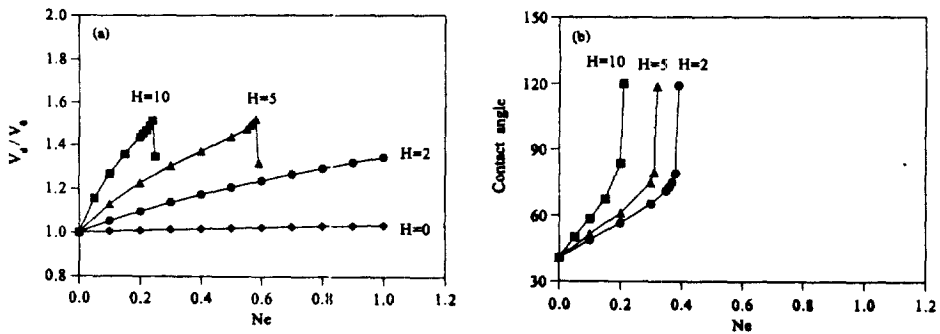


그림 5. 전기장세기에 따른 기포이탈부피의 변화에 대한 수치결과 (a) Type 1 (b) Type 2