

전기수력학적 유도 마이크로 펌프에 대한 전산유체역학 해석

이병서[†] · 이준식^{*}

A Computational Fluid Dynamics Analysis on an Electrohydrodynamics Induction Micropump

Byoung Seo Lee and Joon Sik Lee

Key Words : EHD induction micropump(EHD 유도형 마이크로 펌프), CFD(전산유체역학), induction type(유도형)

Abstract

A numerical program based on computational fluid dynamics has been developed to simulate characteristics of an EHD induction micropump. The ambiguity of boundary conditions was removed by adopting an equation formulated for electric potential as the dependent variable. The calculations show that the dependency of frequency agrees well with the experiments and the previous analysis. The instability, caused by backflows, is getting stronger as the channel depth increases, which is consistent with experiments. The present study reveals that it is due to the limit in the penetration depth which the electric field can affect. Despite the disadvantage of large channel depth, there is a certain optimal depth for the maximum flow rate.

	기호설명	ω :	라디안 각속도(rad/s)
		τ, τ :	전단 응력
a :	영향계수	ε :	유전율
d :	채널 깊이	ϕ, Φ :	전기 퍼텐셜
E, \mathbf{E} :	전기장	Γ :	유효확산계수
F :	면에서의 유량	ρ :	밀도
\mathbf{J} :	전류 밀도		
k :	과동 수	위첨자	
p :	압력	0 :	이전시간 단계
q :	전하(C/m ³)	non :	비직교요소
S :	무차원 수		
\mathbf{S} :	생성항	아래첨자	
S_C :	생성항의 상수부	i :	면, 이웃 세포
S_P :	생성항의 비례부	0 :	평균
T :	온도	1 :	기울기
t :	시간	P :	중심 세포
u, \mathbf{u} :	속도		
V :	체적		
V_e :	전압		
x, y :	공간좌표		
σ :	전기전도율		

1. 서론

최근 MEMS 등 미세 가공 기술의 발전으로 인해 미세유체역학(microfluidics)이 새롭게 조명받고 있다. 초기의 연구단계를 거쳐 버블젯 프린터에서의 상업적 성공이 이제는 미세

[†] 회원, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소
E-mail : elvis1@snu.ac.kr
TEL : (02)880-7123 FAX : (02)887-2486

^{*} 회원, 서울대학교 기계항공공학부

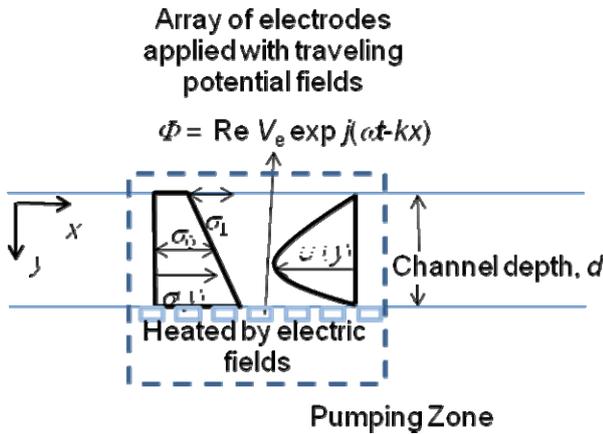


Fig. 1 EHD micropump in Fuhr *et al.*'s experiments.

화학 분석 시스템(micro TAS: Total Chemical Analysis System) 등 생체의학적 응용분야로 확산되려는 시점에 와 있다. 이러한 생체의학적 미세유체역학적 시스템에서 마이크로 펌프는 주요 구성 요소 중 하나이다. 마이크로 펌프는 크게 기계적 방식(mechanical micropump)과 비기계적 방식(non-mechanical micropump)로 구별된다. 기계적인 경우에도 마이크로 펌프의 특성상 박막의 진동을 이용하는 용적식(displacement type)이 선호된다. 비기계적 방식의 경우 움직이는 부분을 사용하지 않기 때문에 진동이나 소음을 줄일 수 있어 휴대용 기기의 응용 면에서 많은 관심을 불러 일으킨다[1]. 이러한 비기계식의 작동원리 역시 다양하여 전기수력학(EHD: Electrohydrodynamics) 현상이나 electrokinetic 현상 등을 이용한다. 또한, 이렇게 유체의 전기적 성질을 이용하는 방법은 박막의 진동을 통해 챔버(chamber)의 용적을 변화시키는 기계적 마이크로 펌프에 비해 보다 적은 유량을 흘려 보낼 수 있다[2].

EHD 펌프는 다시 유도형(induction type)과 주입형(injection type)의 두가지로 나뉜다. 주입형의 경우 전극을 통하여 이온이 주입되며 각기 다른 극을 가진 전극 사이에서 작용하는 이들에 미치는 전기력에 의해 유동이 발생하게 된다[3]. 따라서 가해지는 전압은 직류이다. 이에 반해 유도형의 경우, 전극에 걸린 전기장에 의해 전하가 유도되며 주기적으로 이동하는 전기장에 의해 이 전하들이 움직이면서 유동이 발생한다.

본 연구에서는 유도형 마이크로 펌프를 전산유체역학으로 해석한다. 경계조건이 명확한

전기 포텐셜만을 이용하여 지배방정식을 유도하여, 이를 Fuhr *et al.*[4]이 EHD 펌핑의 원리를 이용 마이크로 사이즈로 소형화 제작했던 실험에 대해 해석을 수행하도록 한다.

2. EHD 펌핑

EHD 유도 원리를 이용한 펌프에서 전하가 유도되기 위하여 전기전도율(electric conductivity) 혹은 유전율(permittivity)의 구배가 요구된다. 유전율의 구배는 얻기가 어렵고 전기전도율의 구배가 주로 이용된다. 이는 보통 이종 유체간의 계면이나 입자 첨가에 의한 계면 또는 동일 유체내에서 공간적인 변화를 줌으로써 구현한다. Melcher *et al.* [5]은 동일 유체 내에서 온도차를 주어 온도에 따른 전기전도율의 차이를 이용해 이러한 펌프 제작에 성공하였다. 1990년대 Fuhr *et al.*는 온도 차를 인위적으로 가하지 않고도 작동되는 마이크로 펌프를 제작하였다. 그들의 펌프가 Melcher *et al.*의 경우와 다른 점은 인위적인 온도 구배 없이 가해진 전기장에 의해 한 쪽이 가열되어 온도차가 자연히 생기는 점과 전극(electrode)의 위치가 채널 아래쪽으로 된 것이다. 그 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다. 그와 같은 채널 내에서 하부에 심어진 전극에 의하여 이동하는 전기적 퍼텐셜 파동(traveling potential wave)은 유도된 전하에 작용하는 전기적 힘을 작용하여 유체가 흘러가게 된다. 폭이 넓은 순환형 채널에서 펌핑 부분(pumpin zone)은 30 μm 은 폭의 전극이 30 μm 의 간격으로 배치되며, 그 개수는 13 개이다. 그리고 전기전도율($\sigma(y)$)의 분포는 역시 선형적으로 가정한다.

그리하여 유도되는 전하는 다음과 같이 기술될 수 있다. 전하 보존에 의하여

$$\frac{dq}{dt} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (1)$$

여기서, 통상 유속이 작은 경우이므로 유도에 의한 플럭스만 고려되어

$$\frac{dq}{dt} + \nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = 0 \quad (2)$$

로 표현된다.

또한 각기

$$q = \epsilon \nabla \cdot \mathbf{E} \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla\Phi \quad (4)$$

성립하므로 결국 전기 퍼텐셜에 관한 식으로 정리될 수 있다.

$$\nabla(\sigma\nabla\Phi) + \varepsilon(\partial/\partial t)\nabla(\nabla\Phi) = 0 \quad (5)$$

전기 퍼텐셜에 관한 경계조건은 상단의 전기 퍼텐셜 파동에 대하여 다음과 같다.

$$\Phi(x, d, t) = \text{Re}[V_e \exp j(\omega t - kx)] \quad (6)$$

연속체에서 전단응력은 다음과 같이 기술된다 [6].

$$\tau_{xy} = \varepsilon E_x E_y \quad (7)$$

한편, Melcher *et al.* 은 이에 대해 몇몇 항을 단순화한 상태에서 분석적 해를 구하였다.

3. 해석 방법

3.1 지배방정식

EHD 펌핑의 유속이 매우 느리다는 가정하에 유체 유동에 한하여 지배방정식은 다음의 연속 방정식과 Navier-Stoke 방정식으로 나타내어질 수 있다.

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}) = 0 \quad (8)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu\nabla\mathbf{u}) + \mathbf{S}_u \quad (9)$$

이 방정식은 느린 유속으로 제한되는 층류와 비압축성 유동에 일반적인 방정식이다.

전산유체역학의 적용을 위해 흔히 압력방정식에 Eq. (7)에 의거한 운동량 소스 항이 추가되어 다음과 같은 식이 사용된다.

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \nabla \cdot (\mu\nabla\mathbf{u}) \quad (10)$$

또한, 에너지에 관한 한 온도를 종속 변수로 하는 에너지 방정식을 풀 수도 있지만 본 해석에서는 단순히 온도와 그에 따른 점성(viscosity) 이나 전기전도율의 분포를 선형으로 가정하는 것으로 대신한다.

따라서, Eq. (8)와 Eq. (10)의 식이 유체유동에 관해 풀리며 이에 사용된 전단응력에 대한 운동량 소스를 알기 위해 독립적으로 Eq. (5)가 풀린다.

3.2 이산화

지배방정식은 다음과 같은 이산화 과정을 거친

다. 유한체적법(FVM)에 의거 이산화를 위하여 지배방정식의 일반형 Eq. (10)를 체적에 관해 적분하면,

$$\int \frac{\partial(\rho\mathbf{u})}{\partial t} + \int dV [\nabla \cdot (\rho\mathbf{u}\mathbf{u} - \mu\nabla\mathbf{u})] = \int \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} dV \quad (11)$$

이며[7], 그 결과로 아래와 같은 수치해법을 적용할 수 있는 이산화된 형태의 Eq. (12)를 얻을 수 있다.

$$a_p^0(u_p - u_p^0) - \left(\sum_i F_i\right)u_p + \sum_i \left[F_i u_p + a_i(u_p - u_i) - S_i^{\text{non}}\right] = S_C - S_P u_p \quad (12)$$

여기서 F_i 는 인접 면 i 를 통해 세포 P 밖으로 유출되는 유량이며 a_i 는 최종적인 인접 세포의 영향 계수이다. 결국 다음과 같은 간단한 형태의 이산화식으로 정리된다. 전기 퍼텐셜에 관한 이산화는 일종의 확산방정식으로 Eq. (5)을 풀 수 있다.

4. 결과

본 연구는 Fig. 1에서 도시된 바와 같은 Fuhr *et al.*에 의해 실험이 수행된 펌프를 다룬다. 여기서 y 좌표의 경우 채널의 상부 벽을 원점으로 잡았다. 펌핑 구간을 포함하여 총 채널의 길이는 4 mm 이고 높이가 100 μm 인 2차원 채널로 보고 해석을 수행하였다. 퍼텐셜 파동은 전압의 피크 값이 50 V 이고 파동 수(k) $3 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ 에 진동수(ω) 10 kHz ~ 20 MHz 범위에서 계산하였다. 또한 전하의 유도를 위해 하부 전극에 가한 전기장에 의해 상하 채널 벽에 온도차이가 생기는 데 이로 인한 전기전도율의 분포는 선형으로 상하의 차가 평균 치의 4 퍼센트 정도로 가정하였다($\sigma_1 = 0.04\sigma_0$).

4.1 진동 수 변화에 따른 특성

Fuhr *et al.*은 용액의 KCl 농도를 조절함에 의해서 전기전도율을 조절하였다. 이에 따라 평균 전기전도율(σ_0)이 각 0.88 mS/m, 3.66 mS/m, 9.30 mS/m 인 세가지 경우에 따라 진동 수 변화에 따른 유속의 변화를 측정하였다. 이에 앞서 Melcher *et al.*은 실험과 간단한 해석을 통해 $S = \omega\varepsilon/\sigma_0$ 가 대략 1 정도의 값을 가질 때 최고 유속을 가짐을 보여주었다. 이에 의하면 최적 주파수는 대략 σ_0/ε 이어야 하지만 Fuhr *et al.*의 실험은 이와는 약간 차이가 났다. Fig. 2에 나타난 본 해석 결과는 Melcher *et al.*이 제시한 바와 같이 $S=1$ 인 부근에서 최대 유속을 가지며, S 에 관한 특성은 전

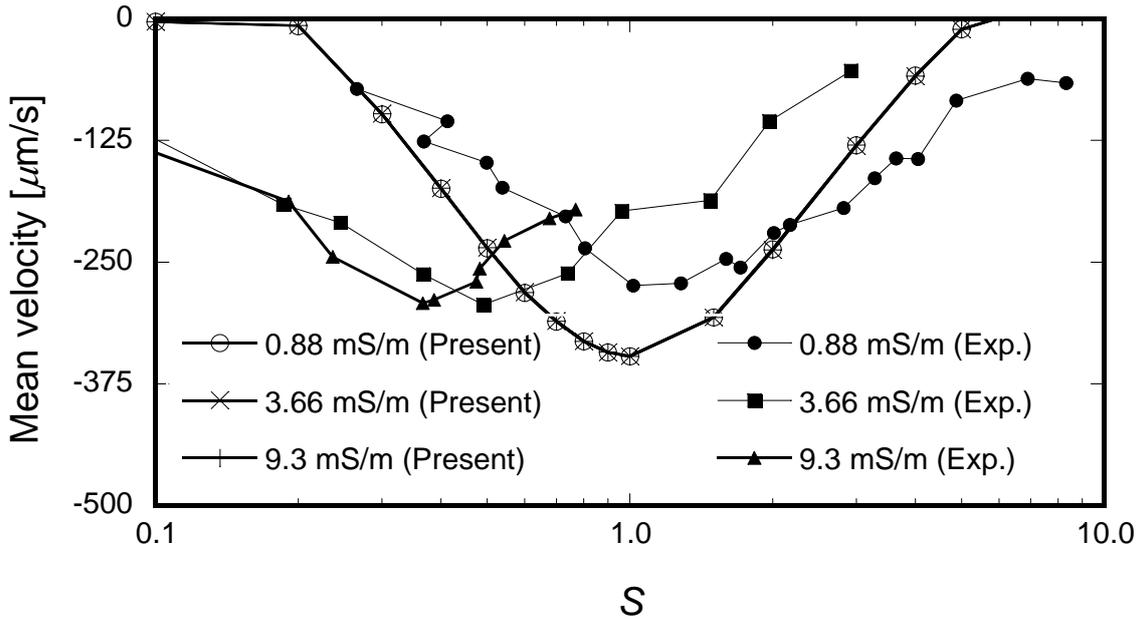


Fig. 2 Flow velocity as a function of S .

기전도율이 다른 세가지 경우 모두에 공통된 경향을 보였다. 이에 반해 실험치는 가장 낮은 전기전도율의 경우 본 계산결과와 일치하지만, 전기전도율이 올라가면서 최적의 S 값이 조금씩 1로부터 감소하고 있음을 보여준다. 그러나, 이를 제외한 다른 경향에서 실험과 본 계산 결과가 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

4.2 채널 폭 변화에 따른 특성

Fuhr *et al.* 실험에서 새롭게 제시된 결과는 채널의 깊이(d)를 늘이면 유동이 불안정해 진다는 것이었다. 본 절에서는 채널의 깊이를 조절하여 가면서 이런 불안정성의 원인을 규명하도록 한다. 이를 위해 이번에는 채널의 깊이를 20~200 μm 범위에서 바꿔가며 계산을 수행하였다. Fig. 3 은 깊이를 변화시켰을 때 각 깊이의 채널의 펌핑부 형성되는 속도 프로파일이다. 깊이가 가장 작은 $d=20 \mu\text{m}$ 경우, 속도 프로파일상의 역류(backflow)가 거의 보이지 않는다. 하지만 깊이 값의 증가에 따

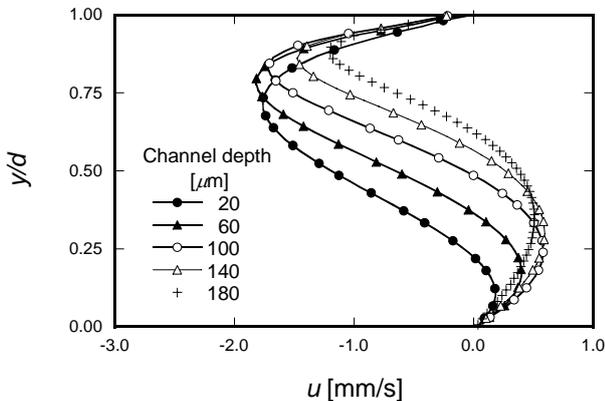


Fig. 3 Velocity profiles for various channel depths.

라 속도 값이 양의 값을 갖는 영역이 채널의 상부 ($y=0$)로부터 증가하는 것을 보여준다. 즉 박리점이 상부로부터 점차 전극이 박혀있는 하부 쪽으로 이동하면서 유동의 불안정성을 증가시킨다. Fig. 4 은 깊이가 다른 두 채널 내의 전기적 퍼텐셜 에너지의 xy 평면상의 분포이다. 실제로 이와 같은 파동이 x 방향으로 움직이게 된다. Eq. (6)의 경계조건대로 $y = d$ 인 곳에서는 사인파가 주어지며 이로부터 깊이방향(- y 방향)으로 사인파의 진폭(amplitude)이 줄어드는데 채널 폭이 작은 $d=20 \mu\text{m}$ 인 경우는 비교적 선형적 감소를 보이는데 반해 큰 $d=140 \mu\text{m}$ 인 경우 어느 정도 깊이 이후에는 퍼텐셜의 감소가 정체된 구간이 나타난다. 이제 이 부분을 자세히 살피기 위해, 사인파의 골짜기에서의 깊이 방향(y 방향)으로의 분포를 Fig. 5 에 도시하였다. 이 그림에서 채널길이가 길어지더라도 퍼텐

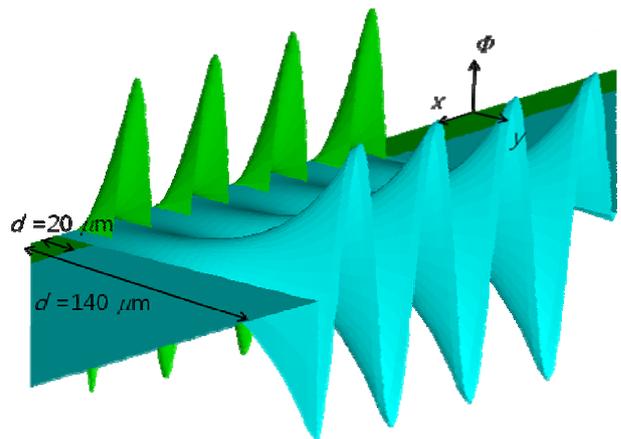


Fig. 4 The distributions of electric potential fields in xy plane for two channel depths.

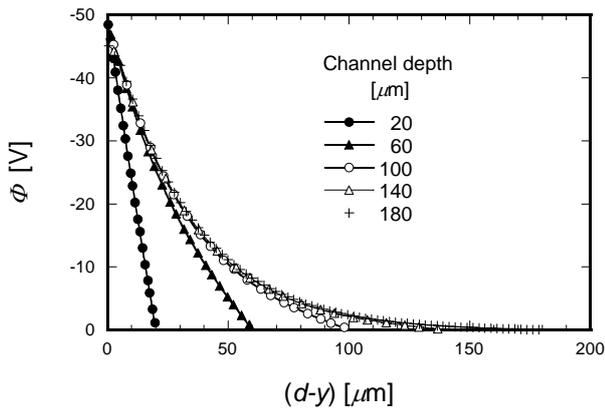


Fig. 5 The distributions of electric potential fields in the depth direction.

설에너지가 선형적으로 떨어지는 영역의 깊이는 크게 바뀌지 않는데 이 깊이가 50 μm 이내이다. 결국, 채널의 깊이가 증가하더라도 전기자의 영향이 유효하게 되는 깊이 값은 50 μm 정도로 제한되었기 때문에 깊이 증가에 따른 불안정성이 야기되는 것으로 보인다. 속도 분포에 직접적 영향을 주는 전단응력의 분포를 Fig. 6 에서 보면 더욱 분명해 진다. 퍼텐셜에너지의 변화가 없는 부근에서는 전단응력 값도 0 이 되는 것이다.

다음으로 채널 깊이 변화에 따른 펌프의 성능을 평가하기 위해 Fig. 7 에서 유속과 유량의 변화를 고찰한다. 유속의 경우는 역시 위에서의 고찰과 같이 깊이가 작을수록 큰 유속을 갖는다는 것을 알 수 있다. 하지만, 채널의 깊이가 작으면 유동면적이 줄어들기 때문에 유량의 경우는 대략 80 μm 정도에서 최적의 값을 가짐을 알 수 있다.

5. 결론

전산유체역학을 EHD 유도 현상에 적용한 프로그램을 개발하여 Fuhr *et al.* 행한 실험에 대한

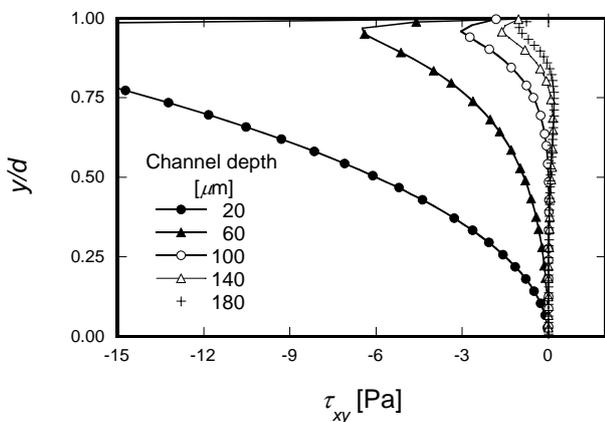


Fig. 6 The distributions of shear stress fields in the depth direction.

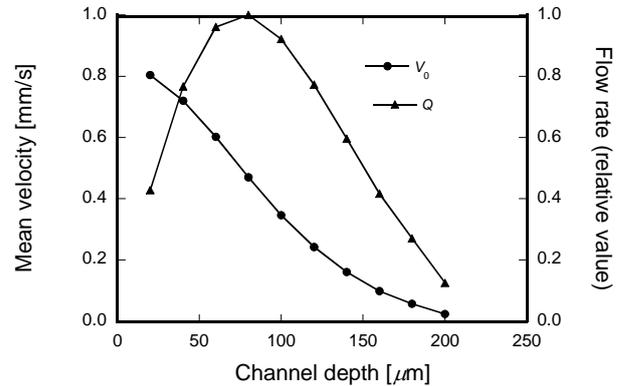


Fig. 7 The variations of velocity and flow rate depending on the channel depth.

해석을 수행하였다.

진동 수의 변화에 관한 특성의 경우에 최적 주파수에 관하여 Melcher *et al.* 이 제시했던 무차원 진동수에서 최대 속도를 보여주었으며 이 무차원 값일 때, 여러 전기전도율에 대해서 동일한 경향을 보였다. 최적주파수를 중심으로 증가하거나 감소함에 따라 유속이 감소함은 모든 경우 잘 일치한다. 하지만 Fuhr *et al.* 의 실험의 경우 가장 낮은 전기전도율에 대해서만 비슷한 최적주파수를 보여 줄 뿐 높은 전기전도율의 경우 Melcher *et al.* 의 이론보다 더 낮은 주파수대에서 최고 속도가 형성되었다.

또한 본 해석을 통하여 채널 깊이의 증가에 따른 불안정성의 원인이 퍼텐셜에너지의 침투 깊이의 한계로 인한 것임을 보였다. 따라서 유동의 최고속도는 깊이와 함께 감소하나 유량에 관해서는 어떤 최적의 깊이가 존재하였다.

참고문헌

- (1) Seo, W.-S., Yang, S.-Y., Lee, B.-R., Ahn, K.-K. and Ham, Y.-B., 2007, "Design, Fabrication and Experimental Investigation of a Planar Pump Using Electro-Conjugate Fluid," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21 No. 8, pp. 1320 ~ 1327.
- (2) Nguyen, N.-T. and Wereley, S. T., 2006, *Fundamentals and applications of microfluidics*, 2nd edn., Artech House.
- (3) Richter, A. and Sandmaier, H, 1990, "An Electrohydrodynamic Micropump," *IEEE Proceedings of An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots*, pp. 99-104.

- (4) Fuhr, G., Hagedorn, R., Müller, T., Benecke, W. and Wagner B., 1992, "Microfabricated Electrohydrodynamic (EHD) Pumps for Liquids of Higher conductivity", *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 1, No. 3, pp. 141-146.
- (5) Melcher, J. R. and Firebaugh, M. S., 1967, "Traveling-Wave Bulk Electroconvection Induced across a Temperature Gradient", *Phys. Fluids*, Vol. 10, No. 6, pp. 1178- 1185.
- (6) Stratton, J. A., 1941, *Electromagnetic theory*, McGraw-Hill.
- (7) Kim, C.-J., 1998, *Roadguide to Computational Fluid Dynamics: from Basic to Three Dimensional Nonorthogonal Coordinates*, Munundang (in Korean).