

T자형 마이크로 채널 내부 전기삼투 유동의 불안정성 가시화

한수동* · 이상준†

Visualization of Electro-osmotic Flow Instability in a T-shape Microchannel

Su Dong Han and Sang Joon Lee

Abstract. Electro-osmotic flow (EOF) instability in a microchannel has been experimentally investigated using a micro-PIV system. The micro-PIV system consisting of a two-head Nd:Yag laser and cooled CCD camera was used to measure instantaneous velocity fields and vorticity contours of the EOF instability in a T-shape glass microchannel. The electrokinetic flow instability occurs in the presence of electric conductivity gradients. Charge accumulation at the interface of conductivity gradients leads to electric body forces, driving the coupled flow and electric field into an unstable dynamics. The threshold electric field above which the flow becomes unstable and rapid mixing occurs is about 1000V/cm. As the electric field increases, the flow pattern becomes unstable and vortical motion is enhanced. This kind of instability is a key factor limiting the robust performance of complex electrokinetic bio-analytical devices, but can also be used for rapid mixing and effective flow control for micro-scale bio-chips.

Key Words: Electro-osmotic Flow(EOF, 전기삼투 유동), Micro-PIV(마이크로-PIV), Instability(불안정성), Conductivity Gradient(전기전도 구배), Vorticity(와도)

기호설명

E: 전기장 [V/m]
 σ : 전기전도도 [A^2s^3/m^3kg]
 ρ_e : 전하 밀도 [C/m³]
 ϵ_0 : 진공상태의 유전율 [C/Vm]
 ϵ : 유전율 [C/Vm]
Q: 전하 [C]
F: 패러데이 상수 [C/mol]
z: 이온의 가수
c: 몰농도 [mol]
D: 확산계수 [m²/s]

1. 서 론

전기삼투(electro-osmosis)는 전하를 띠고 있는 고체면과 접촉하고 있는 전해질 용액에 전위차를 가하면 전기적 힘에 의하여 용액이 흐르게 되며 이러한 흐름을 전기삼투 유동이라 한다.^(1,2) 만약 고체면이 전하를 띠지 않고 있다면 양이온과 음이온에 작용하는 전기적 힘이 서로 상쇄되어 흐름이 발생하지 않는다. 따라서, 전기삼투는 계면이 전하를 띠고 있을 때에만 나타나는 현상이다. 이러한 전기삼투 현상은 토양 속에서 오염 물질을 제거하거나,⁽³⁾ 고체면의 표면 전위 또는 제타-전위와 같은 계면(interface)의 물성을 측정하는데 쓰인다.⁽⁴⁾

T자형 마이크로 채널의 양쪽 입구부에 몰농도가 서로 다른 수용액을 넣고 채널 끝단에 설치된 전극에 고전압을 걸어주게 되면 두 용액의 계면에서 와(vortex)가 생성된다.⁽⁵⁻⁷⁾ 이러한 계면에서의 불안정성은 안정적인 샘플의 전달을 요하는 바이오 분석 시스템에서는 단점으로 작용할 수 있다. 반면에 미세채널에서 교

†책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
E-mail: sjlee@postech.ac.kr

*포항공과대학교 기계공학과 대학원

반(mixing)의 활성화나 유동의 제어에 활용할 수 있다.^(8,9)

2. 전기삼투 유동의 불안정성 원리

Fig. 1과 2는 전기삼투 유동의 불안정성의 생성 원리를 나타낸 그림이다. 그림에서 σ (A^2s^3/m^3kg)와 ρ_c (C/m^3)는 전기전도도와 전하밀도이며, E (V/m)는 전기장의 세기를 나타낸다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 농도구배가 존재하는 수용액에 전기장이 가해지게 되면 농도가 높은 구역에서는 전기장의 세기가 센 반면 농도가 낮은 구역에서는 전기장의 세기가 약해지게 된다. 농도가 높은 구역에서는 전기저항이 크고 이에 따라 전압의 강하가 크게 일어나 전기장의 세기가 커지게 되며 농도가 낮은 구역에서는 반대로 전기장의 세기가 약해지게 된다.

Fig. 1(a), (b)에서와 같이 점선으로 경계지어진 영역에 다음의 Gauss법칙⁽¹⁰⁾을 적용하면,

$$\oint \underline{E} \cdot d\underline{s} = \frac{Q}{\epsilon} \quad (1)$$

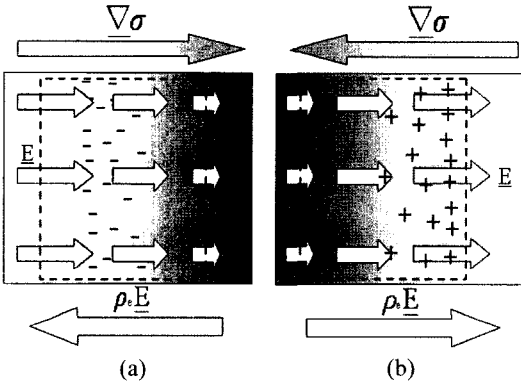


Fig. 1. Polarization due to conductivity gradient.

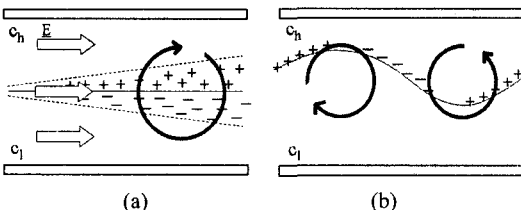


Fig. 2. Schematics of charge production mechanism and onset of instability.

여기서 s 는 점선으로 경계지어진 영역을 나타낸다. Fig. 1(a)의 경우 식 (1)의 좌변이 음의 값을 가지고 점선의 영역 안에 음전하의 자유전하들이 생성된다. 반면에 Fig. 1(b)의 경우 양전하의 자유전하들이 생성되게 된다. 따라서 음전하는 양전극(anode)으로 향하는 쿨롱(Coulomb)의 힘을 받게 되고, 양전하는 음전극(cathode)으로 향하는 쿨롱의 힘을 받게 된다.⁽¹¹⁾

이러한 원리를 저농도와 고농도의 두 개의 층을 가진 영역에 적용하면 Fig. 2와 같이 불안정성의 생성 원리를 명확하게 이해할 수 있다. Fig. 2(a)에서와 같이 초기에는 농도구배의 방향과 전기장의 방향이 수직을 이루기 때문에 불안정성에 기인한 와(vortex)가 생성되지 않는다. 그러나, 계면에서 Na^+ 와 Cl^- 이온의 확산속도의 차이로 인해 하류로 흘러감에 따라 혼합 층이 점차 두꺼워지게 된다. 또한 저농도 영역에서의 제타-전위(ζ -potential)값이 고농도 영역의 제타-전위값보다 크기 때문에 저농도 영역에서의 유속이 고농도 영역보다 빠르게 나타난다.

따라서 저농도 영역에서는 고농도 영역에 비해 상대적으로 빠른 유속으로 인해 계면에서 감속현상이 발생하며, 고농도 영역에서는 저농도 영역에 비해 상대적으로 느린 유속으로 인해 계면에서 가속현상이 발생하게 된다. 이에 따라 계면에 변형이 발생하게 되며, 일단 계면이 변형되어지면 계면의 마루 앞부분에는 양전하들이 생성되고 뒷부분에는 음전하들이 생성되게 된다. 이러한 주기적인 자유전하들의 분포와 이온들의 확산, 그리고 계면의 변형 등에 기인하여 Fig. 2에서와 같이 주기적인 와구조(vortex structure)가 발생된다. 이러한 경향은 전기장의 세기가 셀수록, 계면에서의 몰농도 차가 클수록 더욱 뚜렷해진다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 글래스 마이크로 채널

본 실험에서는 PDMS 재질에 비해 전기적으로 표면특성이 안정적인 유리로 만든 글래스 마이크로 채널을 사용하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이, 우선 CAD프로그램으로 칩을 설계한 후 포토 마스크를 제작하였다. 채널을 제작하려는 슬라이드 (75 mm × 35 mm × 1 mm)를 물과 에탄올을 이용하여 초음파 세척한 후 건조시키고 양성의 포토레지스트(positive-type photoresist)인 DTFR-1000을 3000 rpm에서 10초간

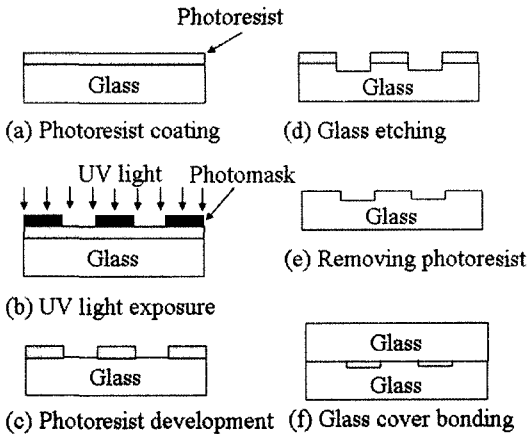


Fig. 3. Fabricating procedure of glass micro-channel.

스핀 코팅(spin coating)하여 도포한 후 100°C에서 90초간 프리베이킹(pre-baking)하였다(Fig. 3 (a)).

이어서, 포토레지스트가 코팅된 글래스 위에 채널이 설계된 포토마스크를 놓고 365nm의 자외선(UV)으로 90초간 노광하고 현상액에 담가 1분간 현상한 후 120°C에서 90초간 포스트베이킹(post-baking)하였다(Fig. 3 (b), (c)). 그리고 슬라이드 글래스를 에칭 용액(BOE buffer)에 담가 에칭(etching)한 후, 아세톤으로 글래스 위의 포토레지스트를 녹여낸 후 물로 세척하고 건조하였다(Fig. 3 (d), (e)). 마지막 절차로서 덮개로 사용할 슬라이드 글래스에 저장부(reservoir)용 구멍을 뚫고 물로 세척/건조한 후 두 글래스를 밀착시켜 610°C에서 5시간 정도 가열하고 서서히 냉각시켜 접합시켰다(Fig. 3 (f)). 그리고 칩에 주사기 노즐 부분을 잘라 에폭시로 부착시켜 저장부를 설치하였다.

이러한 과정을 거쳐 완성된 글래스 마이크로 채널의 사진을 Fig. 4에 나타내었다. 본 실험에서는 T자형 채널을 사용하였으며 채널의 폭은 200 μm, 길이 2 cm, 높이 50 μm이며 채널 양끝단에 백금선 전극을 설치하였다.

PDMS 마이크로 채널의 경우 글래스 채널에 비해 제작이 용이하고 대량생산이 가능하다는 장점이 있다. 그러나, 접합을 위해 산화시킴에 따라 처음에는 채널 표면이 친수성(hydrophilic)을 띠지만, 시간 경과에 따라 점차 소수성(hydrophobic)의 성질을 띠며 전기적으로 불안정해지기 때문에 전기삼투나 전기영동(electrophoresis)과 관련된 실험에서는 채널 표면의

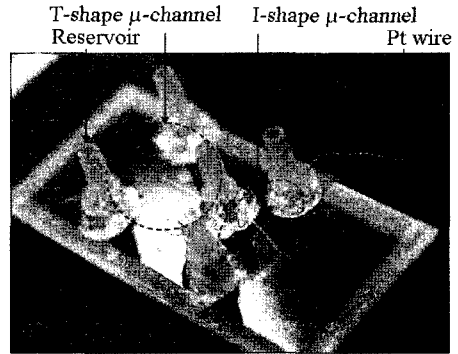


Fig. 4. Photograph of the glass μ-channel used in this study.

안정성을 유도하는 화학물질을 첨가하는 등 부가적인 절차가 필요하다.^(12,13)

3.2 마이크로 PIV 시스템

Fig. 5는 본 실험에서 사용한 마이크로 PIV시스템⁽¹⁴⁾의 개략도를 나타낸 그림이다. 입자영상을 얻기 위해 인버트 방식(inverted type)의 현미경과 20배의 대물렌즈를 사용하였으며, 고대역 필터(570 nm high-pass filter)를 사용하여 레이저 빔에 의한 난반사 영상을 제거하고 입자의 형광 영상만을 cooled CCD가 메라로 취득하였다. 형광입자로는 직경 1 μm의 중성 입자를 사용하였는데, 이들은 대략 542 nm 파장대에서 여기(excitation)하고 600 nm이상의 파장대에서 최대 형광을 방출(emission)하는 특성을 가지고 있다.

본 연구에 사용된 two-head Nd:YAG laser는 펄스 반복율(repetition rate)이 20Hz이고 펄스당 최대 출

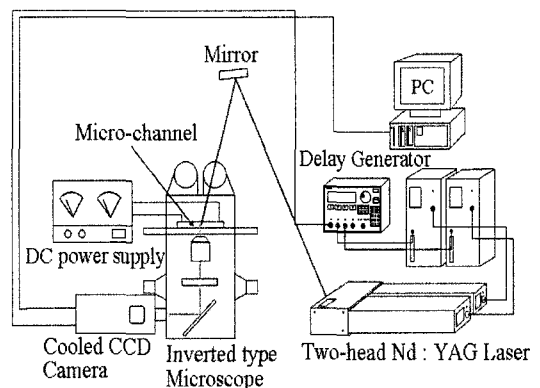


Fig. 5. Schematic diagram of experimental setup.

력 에너지는 25mJ 이상이다. 또한 미세입자로부터 형광된 빛의 강도는 산란광에 비해 매우 작기 때문에 SNR(signal to noise ratio)이 크고 감도가 우수한 cooled CCD카메라를 영상취득 장치로 사용하였다. 이 카메라의 해상도는 1280×1024 pixels이며 한 픽셀의 크기는 $6.7\ \mu\text{m} \times 6.7\ \mu\text{m}$ 이다. 그리고 동기장치를 이용하여 레이저와 카메라를 동기시켰으며 레이저 펄스 사이의 시간간격을 적절히 조절함으로써 연속적인 입자영상의 취득이 가능하도록 하였다.

3.3 실험조건 및 데이터 처리

본 실험에서는 추적입자로 직경 $1\ \mu\text{m}$ 의 중성 입자를 사용하였으며, NaCl 수용액과 입자원액을 10:1의 비율로 희석하여 전기장의 변화에 따른 두 용액의 계면에서의 유동구조 변화를 관찰하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이, NaCl 수용액의 몰농도는 1 mM과 10 mM을 사용하였으며 백금 전극을 통해 마이크로 채널 양단에 걸리는 전압을 300~2500V 범위에서 6단계로 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

측정영역(field of view)의 크기는 $660.47\ \mu\text{m} \times 528.38\ \mu\text{m}$ 이며 채널 바닥면으로부터 $25\ \mu\text{m}$ 높이의 채널 중앙부에서 속도장을 측정하였다. 측정된 속도장의 공간분해능은 $64 \times 32\ \text{pixels}$ 이며 상호상관 PIV 방식에 50% 중첩(overlapping)시켜 순간속도장을 추출하였다.

형광염료를 이용한 가시화 실험을 수행하게 되면 입자의 뭉침이나 벽면에서의 부착과 같은 현상이 발생하지 않아 실험이 간단해질 수 있지만, 주어진 유동구조를 정량적으로 파악할 수 없다는 단점을 가지고

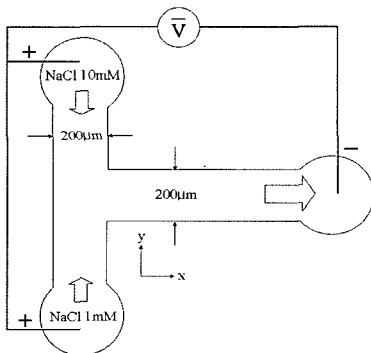
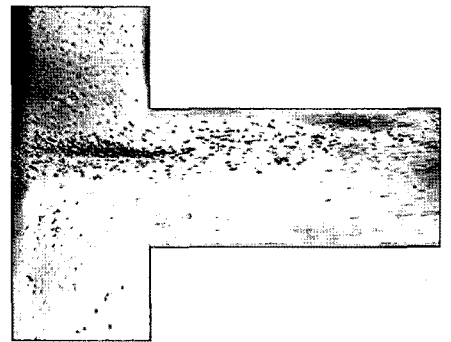


Fig. 6. Schematic diagram of the T-shape microchannel tested in this study.

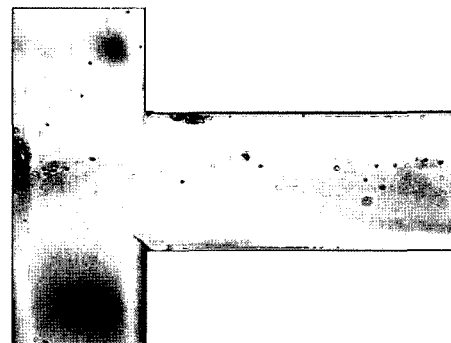
있다. 따라서 본 실험에서처럼 형광입자를 사용하여 PIV 속도장 측정을 하게 되면 입자의 움직임을 정량적으로 파악할 수 있어 유동구조를 보다 세밀하게 연구할 수 있다.

4. 결과 및 토의

채널 하단부에 1 mM의 NaCl 수용액을, 상단부에 10 mM의 NaCl 수용액을 넣고 채널 양단에 전압을 걸어준 후 입자의 거동을 살펴보았다. Fig. 7은 전기장의 세기를 $E=350\text{V/cm}$ 와 1250V/cm 로 조절한 경우의 입자 움직임을 가시화한 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 낮은 몰농도 영역에서 보다 빠른 유속이 관찰되었으며, 이로 인해 계면의 위치가 10 mM 쪽으로 약간 치우쳐 나타났다. 이것은 몰농도가 낮은 영역에서는 채널 벽면에 전기적 이중층이 보다 두껍게 형성되고 이로 인해 속도구배가 형성되는 전단층 영역이 몰농도가 높은 경우에 비해 넓고 제타-전위 값



(a) $E=350\text{V/cm}$

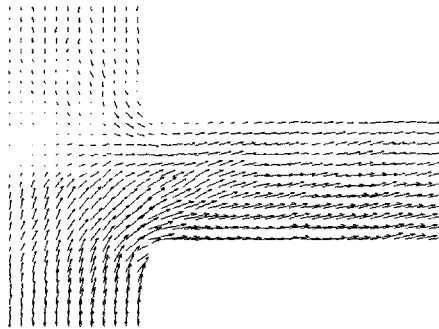


(b) $E=1250\text{V/cm}$

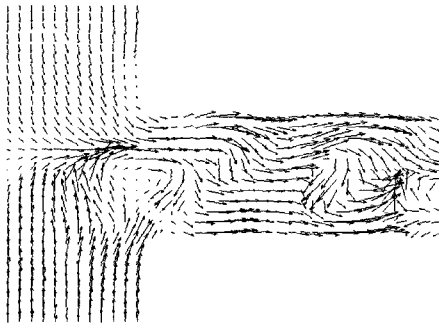
Fig. 7. Flow visualization of particle streaks.

이 큰 음의 값을 가지기 때문으로 생각되어진다. 유리표면은 NaCl과 같은 수용액과 접하게 되면 음전하를 띠게 되고 이로 인해 음의 제타-전위를 갖게 된다. 이때 NaCl수용액의 몰농도가 낮을수록 제타-전위 값은 보다 큰 음의 값을 가지게 된다.

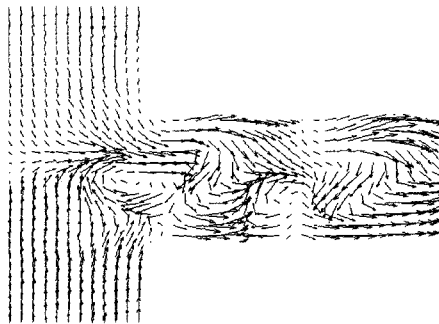
두 개의 입구 저장부에는 +극의 전원을 연결하고 출구 저장부에는 -극을 연결하여 전압을 300V에서부터 단계적으로 올리면서 실험을 수행하였는데, Fig. 7과 8에서 보는 바와 같이 약 $E=1000\text{V/cm}$ 미만에서는



(a) $E=350\text{V/cm}$



(b) $E=1000\text{V/cm}$



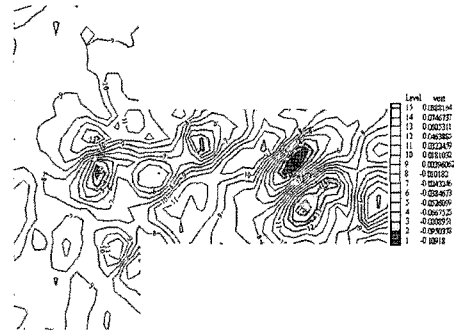
(c) $E=1250\text{V/cm}$

Fig. 8. Instantaneous velocity vector fields at different electric fields.

비교적 안정된 유동구조를 가지는 층류의 유동특성을 보이며 계면의 불안정성이 관찰되지 않았다. 그러나 전기장의 세기를 $E=1000\text{V/cm}$ 이상으로 증가시키면 Fig. 1과 2에서 설명한 원리에 의해 계면에 교란이 발생하고 국부적인 전기장 변화가 생기며 주기적인 전하분포와 함께 와구조가 형성되어진다. Fig. 7(b)와 Fig. 8 (b), (c)를 보면 이러한 경향을 뚜렷하게 볼 수 있다.

여기서 한가지 특이한 사항은 와 구조의 형성이 몰농도가 낮은 쪽에서 시작하여 항상 시계방향으로 회전하며 고농도 영역으로 약간 치우치는 경향을 보인다. 이는 다음과 같다.

전기삼투 유동의 불안정성은 주유동 방향에 수직한 방향으로의 이온들의 확산과 국부적인 전기장 변화에 의한 자유 전하들의 증가에 기인한다. 확산과 대류에 의해 몰농도가 다른 두 층의 수용액이 혼합된 영역은 하류로 나아갈수록 보다 두껍게 형성되어진다. 우선 고농도 영역인 채널의 윗부분을 보면 하류로 흘러갈



(a) $E=1000\text{V/cm}$



(b) $E=1250\text{V/cm}$

Fig. 9. Instantaneous vorticity contours at initial mixing layer.

수록 농도가 떨어지게 된다($\partial c/\partial x < 0$). 반면에, 저농도 영역인 채널의 아래부분은 하류로 흘러갈수록 농도가 짙어지게 된다($\partial c/\partial x > 0$). 와류 구조를 보다 자세히 살펴보면 와동의 전면부에서는 유동이 가속되어지고 후면부에서는 감속되는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 전기장의 세기가 $E=1000\text{V/cm}$ 와 1250V/cm 인 조건하에서 측정된 와도(vorticity) 분포를 나타낸 결과이다. 두 그림에서 볼 수 있듯이 회전방향이 다른 와들이 주기적으로 형성되고 있으며, 전기장의 세기가 클수록 contour들 사이 간격이 좁아지며 생성되는 와의 수도 많아지고 와도의 세기 또한 커짐을 확인할 수 있다.

미세채널 내부에서 레이놀즈 수가 매우 낮은 유동인데도 불구하고 이러한 전기적 불안정성이 발생할 수 있다는 관점에서 이러한 유동 현상은 미세유체장치 내부 유동의 혼합증대 등에 효과적으로 활용할 수 있을 것이다.

5. 결 론

T자형의 글래스 마이크로 채널을 제작하고 입구부에 서로 다른 몰농도의 수용액을 넣고 전기장의 세기를 변화시키면서 계면에서의 전기삼투 유동의 불안정성을 PIV로 계속하였다. 농도 구배와 전기장의 상호작용으로 인한 자유전하의 발생에 기인하여 불안정성이 생성되며, 전기장의 세기가 약 1000V/cm 이상으로 가해짐에 따라 계면에 교란이 발생하고 와구조가 형성되기 시작하였다. 그리고 전기장의 세기가 증가됨에 따라 시계방향으로 회전하는 와의 세기가 더욱 커졌으며 와도 분포 또한 더욱 조밀해졌다. 이와 같은 전기삼투 유동의 불안정성은 미세유체장치에서 혼합을 증대시키기 위해 활용할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 포항공대 BK21사업과 산학협력중심대학 기술개발과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Li, D. Q., 2004, *Electrokinetics in Microfluidics*, Academic, Oxford.
- 2) Probstein, R. F., 1994, *Physicochemical Hydrodynamics*, Wiley, New York.
- 3) Paillat, T., Moreau, E., Grimaud, P. O. and Touchard, G., 2000, "Electrokinetic phenomena in porous media applied to soil decontamination", *IEEE Tran. Dielec. Elec. Insulation*, Vol. 7, pp. 693-704.
- 4) Hunter, R. J., 1981, *Zeta Potential in Colloid Science: Principles and Applications*, Academic Press, New York.
- 5) Lin, H., Storey, B. D., Oddy, M. H., Chen, C. H. and Santiago, J. G., 2004, "Instability of electrokinetic microchannel flows with conductivity gradients", *Phys. Fluids*, Vol. 16, pp. 1922-1935.
- 6) Storey, B. D., Tilley, B. S., Lin, H. and Santiago, J. G., 2005, "Electrokinetic instabilities in thin microchannels", *Phys. Fluids*, Vol. 17, Art. No. 018103 JAN.
- 7) Baygents, J. C. and Baldessari, F., 1998, "Electrohydrodynamic instability in a thin fluid layer with an electrical conductivity gradient", *Phys. Fluids*, Vol. 10, pp. 301-311.
- 8) Shin, S. M., Kang, I. S. and Cho, Y. K., 2005, "Mixing enhancement by using electrokinetic instability under time-periodic electric field", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 15, pp. 455-462.
- 9) Oddy, M. H., Santiago, J. G. and Mikkelsen, J. C., 2001, "Electrokinetic instability micromixing", *Anal. Chem.*, Vol. 73, pp. 5822-5832.
- 10) David, K. C., 1992, *Field and Wave Electromagnetics*, Addison-wesley.
- 11) Posner, J. D. and Santiago, J. G., 2005, "Nonlinear dynamics of electrokinetic instabilities", *Proc. ASME Int. Mech. Eng. Congress, IMECE 2005-79845*.
- 12) 김양민, 이상준, 2003, "마이크로 채널 내부 전기삼투 유동에 대한 PIV 유동 해석", *한국가시화정보학회지*, Vol. 1, pp. 47-51.
- 13) 한수동, 이상준, 2005, "마이크로 채널 내부 전기삼투 유동의 Zeta-potential 계측", *대한기계학회논문집 (B)*, 심사중.
- 14) 이상준, 2003, "마이크로 채널 내부 유동해석을 위한 Micro-PIV 측정기술", *기계저널*, Vol. 43(2), pp. 32-37.