

# 비대칭 미세전극을 이용한 동시 혼합 및 펌핑

김병재\* · 윤상열\* · 이경헌\* · 성형진†

## Simultaneous mixing and pumping using asymmetric microelectrodes

Byoung Jae Kim, Sang Youl Yoon, Kyung Heon Lee and Hyung Jin Sung

### Abstract

This paper presents numerical and experimental works for simultaneous pumping and mixing small liquid using asymmetric microelectrode arrays, based on AC electroosmotic flows. To this end, four arrangements of electrode pairs were considered with diagonal/herringbone shapes. Numerical simulations were made of three-dimensional geometries by using the linear theory. The results indicated that the helical flow motions induced by the electrode arrays play a significant role in the mixing enhancement. The pumping performance was influenced by the slip velocity at the center region of the channel compared to that near the side walls. To validate the numerical predictions, the microfluidic devices were made through MEMS. The flow rate was obtained by using micro PIV, increasing the applied frequency. The electrolyte was potassium chloride solution. The flow patterns above electrodes were visualized to see lateral flow for mixing. The experimental results showed good agreements with the numerical predictions.

**Key Words** : AC electromosis (교류전기삼투), 혼합(mixing), 펌핑(pumping)

### 1. 서론

교류전기삼투(AC electroosmosis)는 매우 낮은 구동전압으로도 미세유로 내 유체를 움직일 수 있어 최근 큰 주목을 받고 있다(Green 등 2000, Gonzalez 등 2000, Green 등 2002). 기존의 직류 전기삼투(DC electroosmosis)는 일반적으로 수 kV의 높은 전압이 필요하지만 교류전기삼투는 수 V의 전압만이 필요하다. 이 같은 낮은 구동전압은 미세유체소자 수명을 길게 하고, 유로 내에서

공기방울이 생성되는 확률을 줄이며, 유체의 물 성치에도 영향을 크게 주지 않는 장점이 있다. 무엇보다 작은 구동 에너지는 휴대용 랩온어칩 등에 적합하다.

교류전기삼투에 대한 초기 연구는 대칭적인 미세전극에 집중되어 있었다. 그러나 전극표면에서 일어나는 유체의 미끄럼속력이 전극에 걸쳐 대칭이므로 유체가 한방향으로 펌핑 되지 않았다. Adari (2000)는 처음으로 비대칭 전극에 교류를 가할 때 전극표면에서 발생하는 유체미끄럼 속도의 대칭성이 깨지면서 유체가 한 방향으로 펌핑됨을 예측하였으며, 그 후 Brown 등 (2000), Ramos 등 (2003), Olesen 등 (2006)에 의하여 실험적으로 수치적으로 연구되었다. 위 기존의 연구들에서 전극은 유로에 수직하였으며, 해석은 2차원적으로 유동이었다.

본 연구는 교류전기삼투를 이용하여 주로 펌프

---

† 한국과학기술원 기계공학과  
E-mail : hjsung@kaist.ac.kr  
\* 한국과학기술원 기계공학과

개발에 초점이 있던 기존 연구에 더 나아가 펌핑과 혼합이 동시에 일어나는 다기능 미세유체소자를 제안하는데 있다. 기존에 주로 한 기능만을 하는 소자들과 달리 한 소자가 여러 기능을 동시에 할 경우 랩온어칩 내 소자수를 줄일 수 있는 장점이 있다. 이는 랩온어칩의 오작동 확률을 감소시킬 수 있고 또는 다른 기능을 하는 소자를 설치할 수 있는 공간을 확보하는데 기여할 수 있다. 본 연구는 교류전기상투를 이용하여 혼합과 펌핑이 동시에 일어나는 아이디어를 제시하고 이를 수치해석 및 실험적으로 검증하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 교류전기상투 이론 및 지배 방정식

그림 1은 비대칭 미세전극이 유로에 수직으로 배치되었을 때 측면 모습을 보여준다. 본 연구에서는 Gonzalez 등 (2000)이 확립한 electrical double layer (EDL)에 대한 선형이론을 사용하였다.

미세유로 내 유동은  $Re$  가 매우 작기 때문에 유체 움직임은 다음의 Stokes 방정식을 따른다.

$$0 = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{U} \quad (1)$$

여기서  $p$ ,  $\mu$ ,  $\vec{U}$  는 각각 유체압력, 점성계수, 유체속도를 의미한다. 유로의 벽면에서 유체속력은 0 이지만(no-slip condition) 전극표면에서 유체의 미끄럼속도는 다음과 같이 주어진다.

$$\langle \vec{U}_{slip} \rangle = -\frac{\epsilon}{4\mu(1+\delta)} \nabla_s |V_{ext} - \phi|^2 \quad (2)$$

여기서  $\nabla_s$  는 전극표면에 따른 변화도(gradient),  $\epsilon$  는 유체 유전율,  $\delta$  는 EDL을 capacitor로 모델링할 때 diffuse layer와 stern layer의 capacitance 비율이다.  $V_{ext}$  는 전극에 가해지는 외부전압,  $\phi$  는 유체의 전압이며 다음의 Laplace방정식의 지배를 받는다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (3)$$

유체의 전압에 대한 경계조건으로 절연벽면과 전극에서 다음과 같이 주어진다.

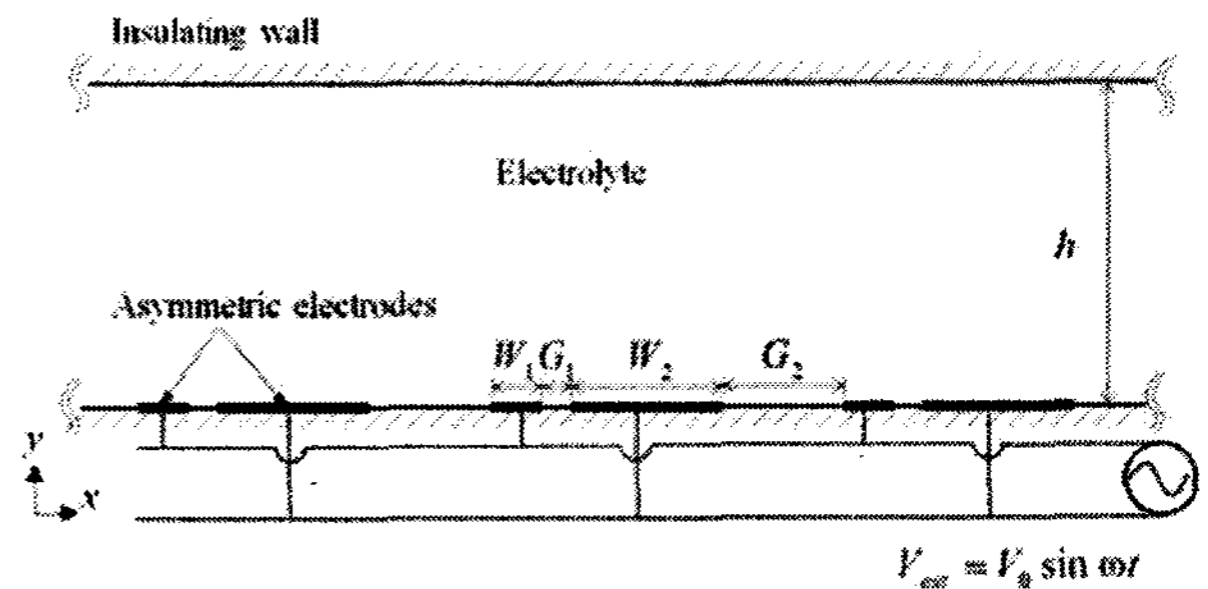


Fig. 1 Side view of the asymmetric electrodes displaced in parallel on the insulating wall.

Parameter	Value	Parameter	Value
$V_0$	3V	$U_0 = \epsilon V_0^2 / \mu G_1 (1 + \delta)$	0.28 m/s
$G_1$	5 $\mu\text{m}$	$\epsilon$	$6.94 \times 10^{-10} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$
$W_1^*$	1	$\mu$	0.000891 Pa·s
$W_2^*$	5	$\sigma$	0.01468 S/m
$G_2^*$	3	$\lambda_D$	10 nm
$H^*$	5	$\delta$	4
$\omega^* = G_1 \epsilon \omega / \sigma \lambda_D (1 + \delta)$	1.12	Pe	5160

Table 1 Detailed conditions. KCl solution ( $10^{-3}\text{M}$ )

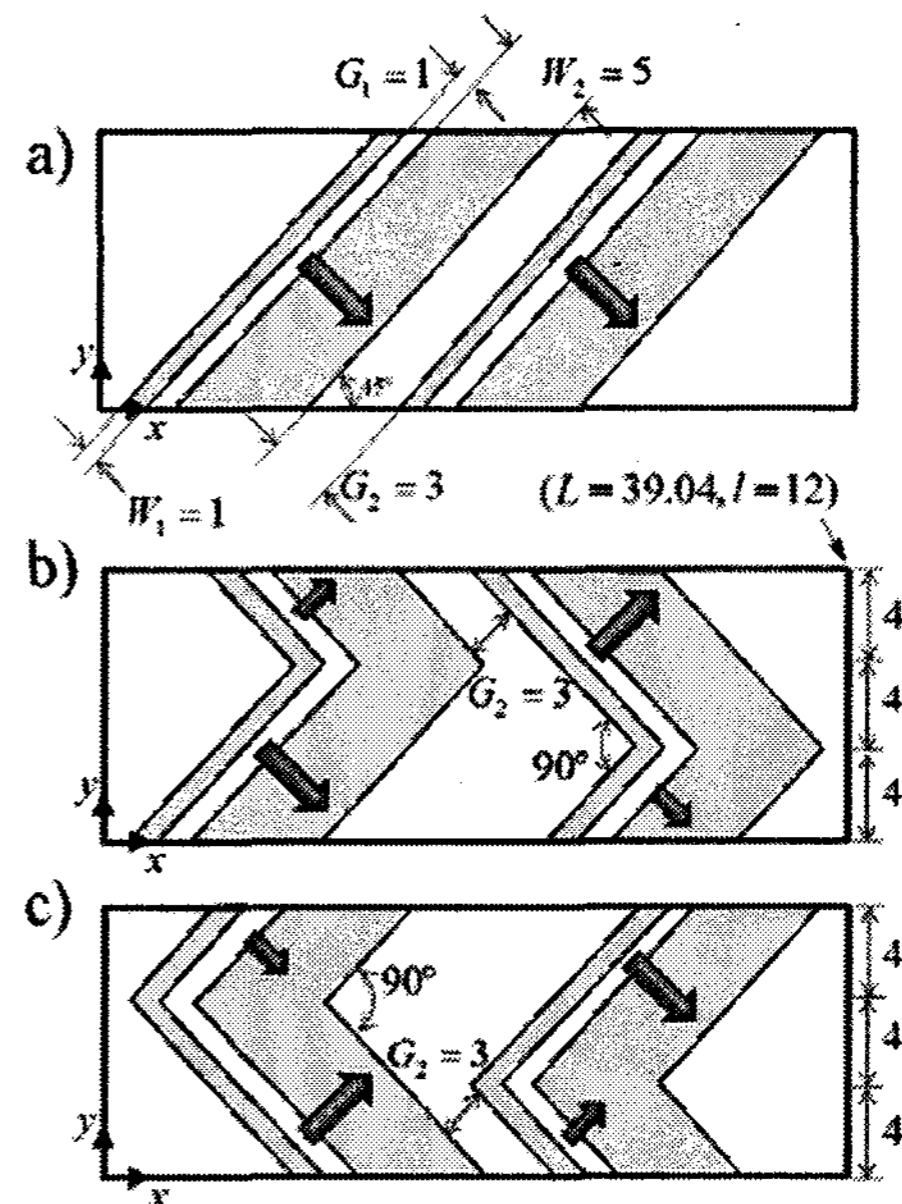


Fig. 2 Three patterns of the electrode pairs (top view). Each pattern is repeated with period of  $L$  on the bottom wall. a) diagonal shape (type A), b) diverging shape of a staggered herringbone type (type B), c) converging shape of a staggered herringbone type (type C).

$$\vec{n} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (4)$$

$$\vec{n} \cdot \nabla \phi - \frac{\epsilon \omega}{\sigma \lambda_D (1 + \delta)} i \phi = - \frac{\epsilon \omega}{\sigma \lambda_D (1 + \delta)} V_{ext} \quad (5)$$

여기서  $\vec{n}$ 는 표면에 수직인 벡터,  $\lambda_D$ 는 Debye length이며  $i$ 는 단위 복소수이다.

식(1)~(5)는 표1에 나타난 무차원수로 나타낼 수 있으며, 식(2)와 (3)은 각각 다음과 같다.

$$\langle \vec{U}_{slip}^* \rangle = - \frac{1}{4} \nabla_s^* |V_{ext}^* - \phi^*|^2 \quad (6)$$

$$\vec{n} \cdot \nabla_s^* \phi^* - \omega^* i \phi^* = - \omega^* V_{ext}^* \quad (7)$$

## 2.2 동시 펌핑 및 혼합을 위한 전극형상

Stroock 등 (2002)는 미세유로 내 유체들을 효과적인 혼합하기 위하여 유로 벽면에 staggered herringbone 모양의 홈(groove)을 만들었다. 그러나 이 방법은 수동적 혼합기로서 외부에서 유체를 펌핑하는 추가적인 장치 및 소자가 필요하다는 단점이 있다. 본 연구는 벽면의 홈을 파는 대신에 전극의 형상을 그림2과 같이 함으로써 유체를 펌핑하면서 동시에 혼합하고자 한다.

그림2a에서 전극의 형상은 대각선이며, 그림2b와 2c는 staggered herringbone 형태이다. 화살표는 유체가 좁은 전극에서 넓은 전극으로 움직이는 기존 연구를 바탕으로 예상되는 유체 흐름이다. 그림2b와 2c의 차이점은 예상되는 유동이 유로 중앙으로 모이는지 양 벽면으로 향하는지이다. 그림2에서 문자는 모두 \* 기호가 생략된 모두 무차원수이며, 이후 해석에서도 모두 생략하였다. 전극에 대한 기하학적 수치( $G_1$ ,  $G_2$ ,  $W_1$ ,  $W_2$ )는 Brown 등 (2000)이 사용한 치수를 사용하였다. Olesen 등 (2006)은 전극 배치가 유량에 미치는 영향을 2차원적으로 살펴보았는데, 위 전극 배치일 경우  $\omega=1.12$ 일 때 유량이 최대임을 보고하였다. 그림2에 나타난 type A, B, C모양의 전극배치는 각각 주기적으로 반복된다고 가정하여, 앞 절에 기술한 Stokes 방정식을 풀 때  $x=0$ ,  $x=L$  에 주기조건을 주었다.

혼합특성을 알아보기 위하여 물질전달 방정식을 사용하였다.

$$\vec{U} \cdot \nabla c = \frac{1}{Pe} \nabla^2 c \quad (8)$$

여기서  $c$ 는 농도이며, Peclet 수  $Pe=U_0 G_1/D=5610$ . (확산계수  $D=2.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ )이다. 입구( $x=0$ )

와 출구( $x=L$ )에서 농도조건은 각각 다음과 같이 주었다.

$$c(y,z) = \begin{cases} 0, & 0 \leq y < 6 \\ 1, & 6 \leq y \leq 12 \end{cases} \quad (9)$$

$$\vec{n} \cdot \nabla c = 0 \quad (10)$$

혼합정도를 정량화하기 위하여 출구( $x=L$ )에서 다음의 혼합지수를 계산하였다.

$$e(x) = 1 - \frac{\int |c - c_\infty| dA}{\int |c_0 - c_\infty| dA} \quad (11)$$

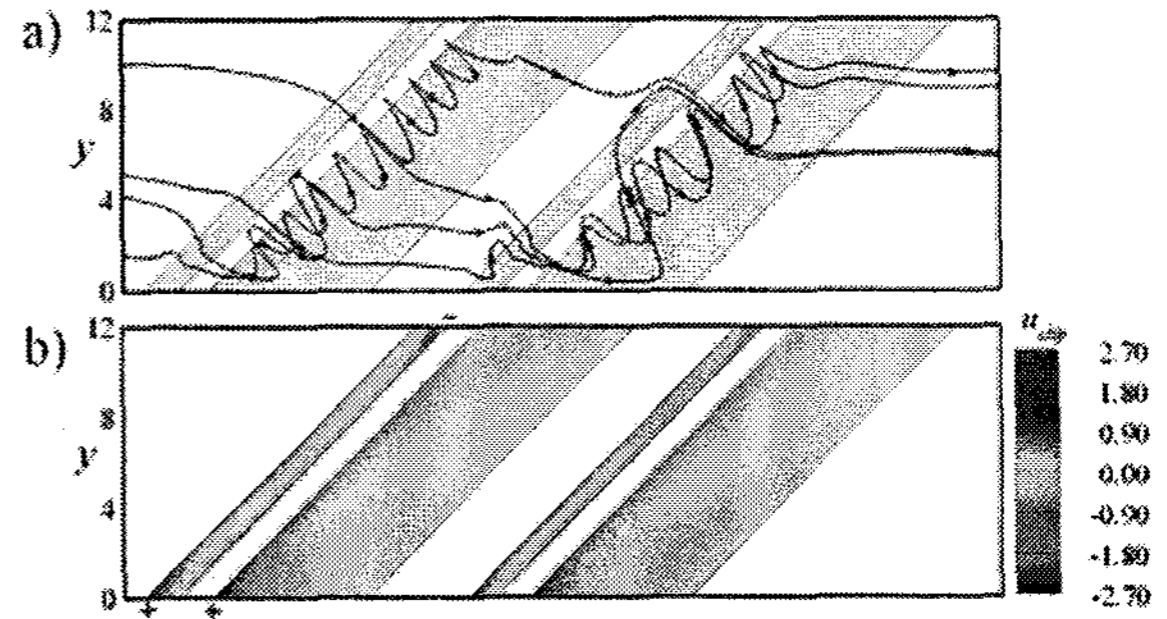


Fig. 3 Type A (top view). a) flow streamlines, b) slip velocity in the x direction. Symbols + and - indicate some nearby points where the slip velocity is high and low, respectively.

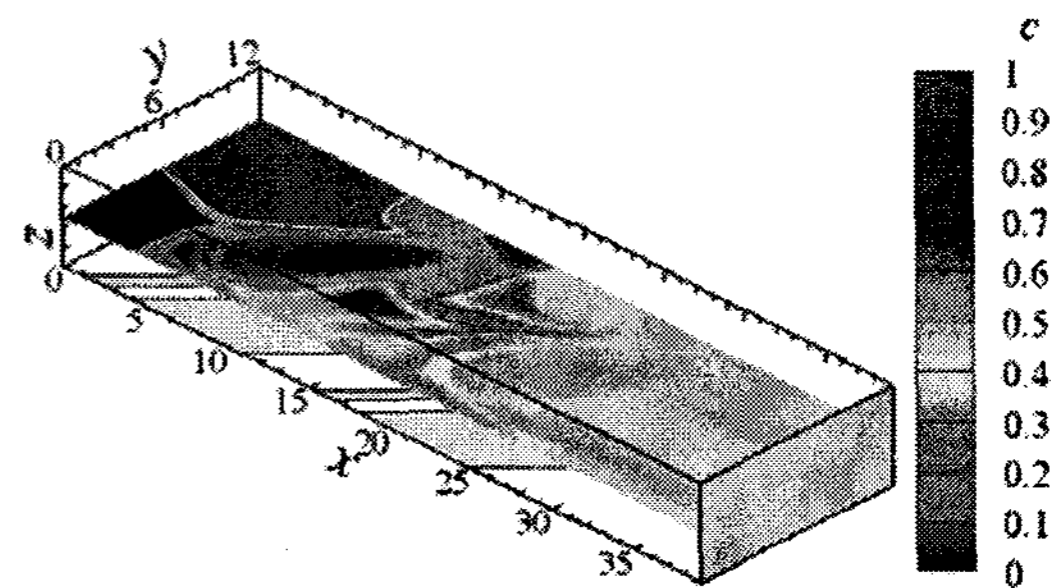


Fig. 4 Mixing pattern of type A

## 2.2 결과해석

그림3은 전극의 모양이 대각선인 type A의 결과로 대표적 유선과 전극표면에서 유체의 미끄럼 속도 분포를 보여준다. 유선은 크게 두 부류로 나눌 수 있다. 첫 번째 부류는 넓은 전극의 가장 자리를 따라 헬리컬 모양(helical motion)을 그리는 유동으로 전극쌍의 시작점 부근의 유체가 이런 움직임을 보인다. 두 번째 부류는 각 전극쌍의 시작점으로부터 떨어진 유체로 전극의 중앙지점

을 그대로 통과한다. 이 유동은 전극이 유로에 수직인 기존연구에서 발견되는 것으로 그림2에서 화살표로 예측한 것과 일치한다. 위 두 대표적인 유동 패턴은 두 번째 전극쌍에서 반복됨을 볼 수 있다. 이와 같이 방식으로 두 유동이 서로 대각선으로 움직임으로써 혼합이 증대될 것임을 예상할 수 있다.

그림4는 type A에 대한 혼합 패턴을 보여준다. 이를 통하여 그림3에서 보여진 헬리컬 모양의 유동이 유체혼합에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 넓은 전극의 가장자리를 따라 회전하는 유체로 인하여 한쪽의 유체 ( $0 \leq y \leq 6$ )가 다른 쪽

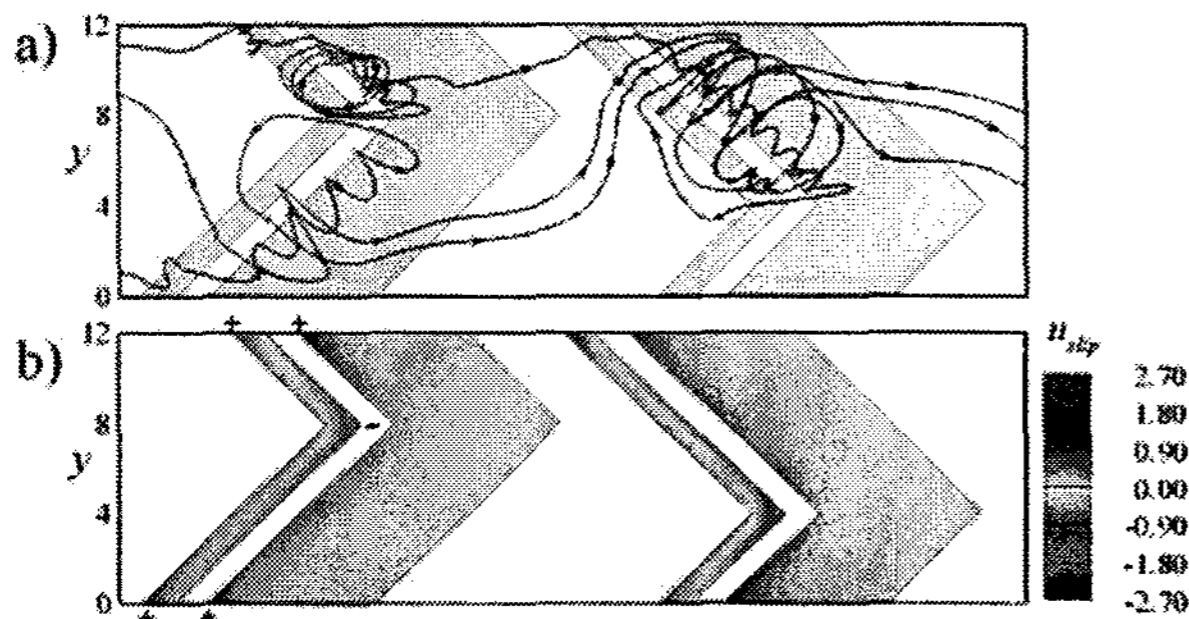


Fig. 5 Type B (top view). a) flow streamlines, b) slip velocity in the x direction.

( $6 \leq y \leq 12$ )로 움직임을 볼 수 있다. 한편, 그림5b에서 전극표면에서 유체 미끄럼속력은 좁은 전극에 걸쳐 거의 대칭이지만 넓은 전극에서는 비대칭임을 볼 수 있다. 넓은 전극에서의 미끄럼속력 비대칭으로 인하여 유체는 한쪽 방향으로 흐르게 된다. 넓은 전극에서 x방향 유체미끄럼속도가 큰 지점은 + 표시가 된 지점이다.

그림5와 6은 각각 전극의 모양이 staggered herringbone 인 type B와 C에 대한 대표적 유선형태와 전극표면에서 유체 미끄럼속력을 보여준다. 앞서 type A의 결과와 유사한 점은 넓은 전극의 가장자리를 따라서 헬리컬 모양의 유동이 발생하는 것이다. 이 두 경우 중 type B에서 헬리컬 유동이 더 활성화 되었음을 볼 수 있다. 이는 type B는 양 벽면으로 향하던 유체가 벽면을 만나서 회전하면서 복잡한 유동이 발생하지만, type C에서는 유체가 중앙으로 모이면서 벽면이 아닌 유체와 유체가 만나므로 회전하는 유동이 상대적으로 덜 활성화 되기 때문이다. 전극표면 유체미끄럼속력( $u_{slip}$ )에서 가장 큰 차이점은 type B에서는

전극과 양 벽면이 만나는 점에서 가장 크고 type C에서는 전극이 굽어지는 유로의 중간지점에서 가장 크다는 것이다.

세 종류에 대한 펌핑과 혼합의 성능을 정량적으로 비교하기 위하여 유량( $Q$ )과 혼합지수( $e$ )를 비교하여 표2에 정리하였다. 여기서 Reference는 동일한  $G_1, G_2, W_1, W_2$  값을 가지는 전극이 기존 연구에서처럼 유로에 수직으로 배치되어 있을 때를 의미한다. Reference의 경우  $L=40, l=12$  이다. 먼저 혼합성능은 type A, B, C 모두 Reference에 비하여 크게 증가하였다. 그런데 흥미로운 사실은 type A와 B는 유량이 Reference에 비하여 감소하였지만, type C는 유량이 type A와 B에 비하여 상당히 크다는 것이다. 가장 바람직한 것은 혼합과 펌핑 성능이 동시에 좋은 것인데, type C가 다른 두 경우보다 혼합성능이 약간 열세이긴 하지만 펌핑 성능이 매우 우수하다. 이 같은 결

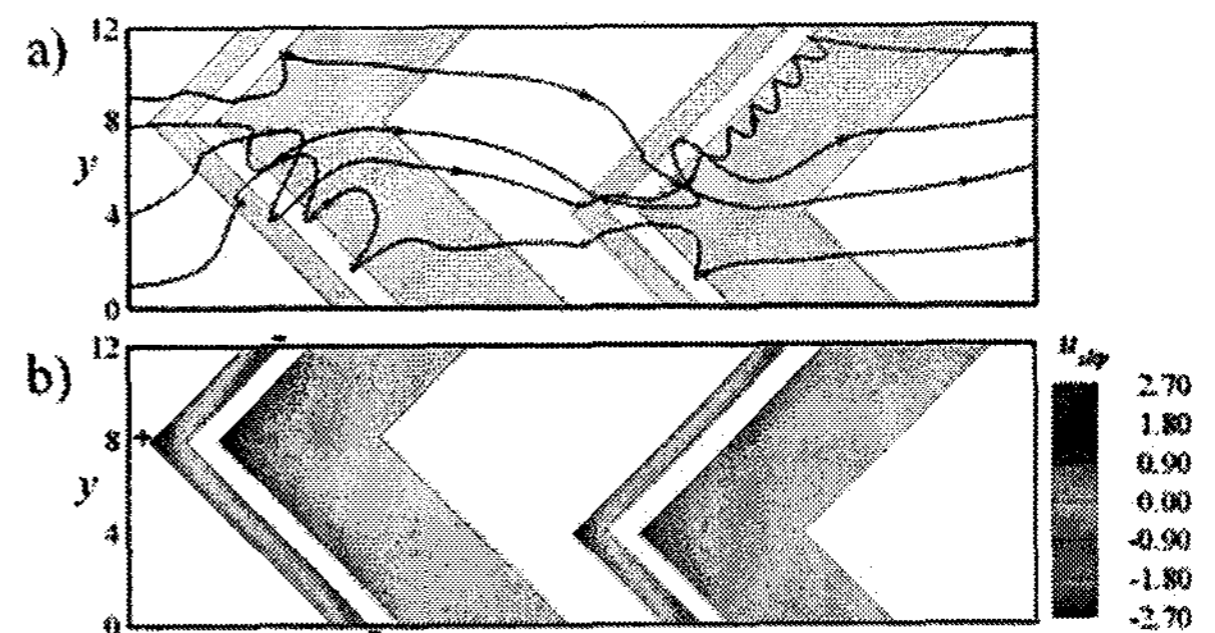


Fig. 6 Type C (top view). a) flow streamlines, b) slip velocity in the x direction.

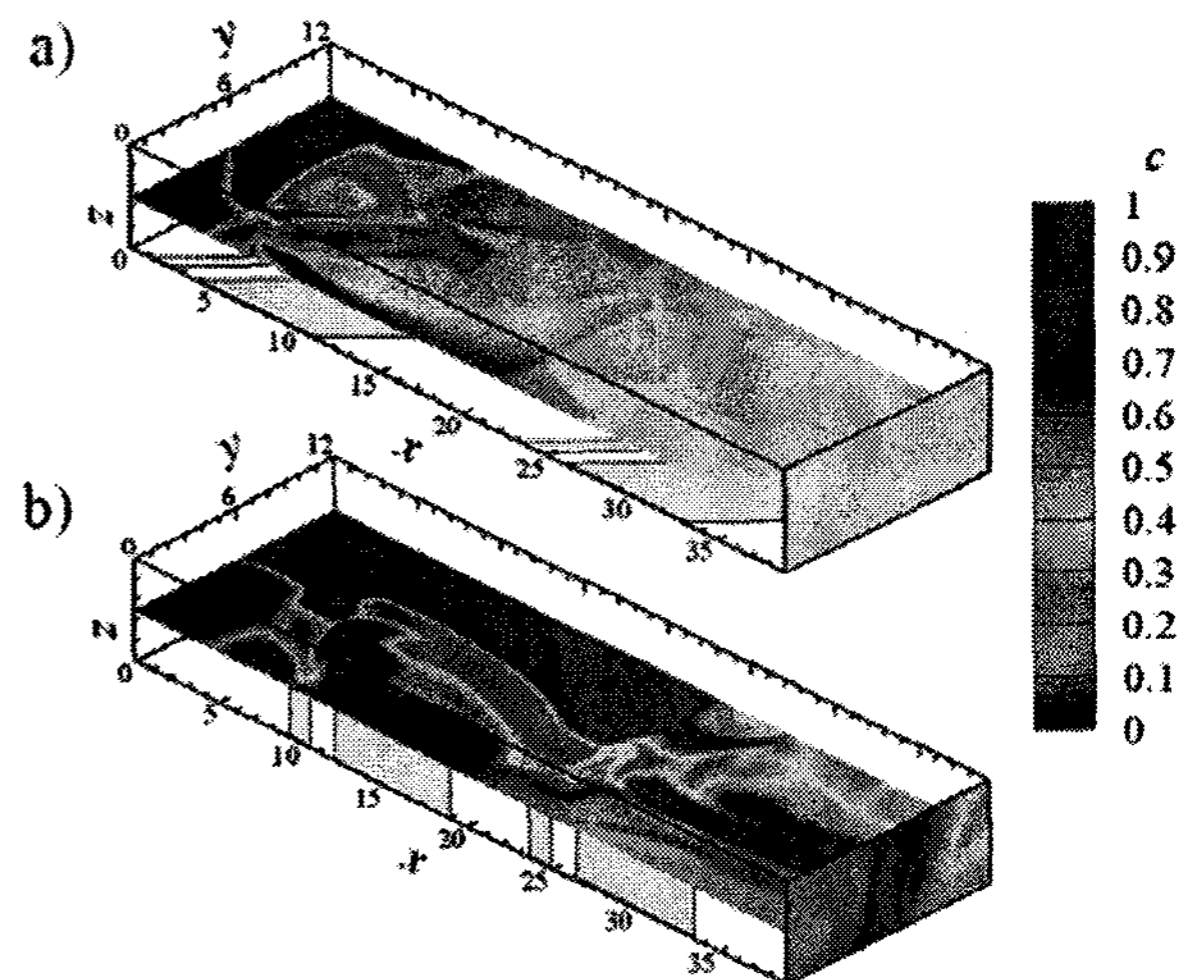


Fig. 7 Mixing patterns. a) type B, b) type C.

과는 앞서 언급한 전극표면에서  $u_{slip}$ 를 통하여 설명할 수 있다. Type B의 경우 그림5b에서 보는 바와 같이  $u_{slip}$ 이 가장 큰 부분은 양 벽면근처이다. 이 지점에서는 양 벽면에 의한 점성저항으로 인하여 유량이 그리 크지 않다. 그러나 type C에서는  $u_{slip}$ 이 가장 큰 지점이 유로 중앙부근에 위치하므로 상대적으로 저항이 작아 큰 유량을 보이게 된다. 표3은 세 경우에 대하여 전극표면을 따라  $u_{slip}$ 를 적분한 값과  $u_{slip}$ 의 최대값, 최소값을 보여준다. 보는 바와 같이 세 경우 모두 비슷한 값을 보여주는데, 이는 앞서 설명한  $u_{slip}$  본포가 유량에 영향을 미치는 것을 설명해준다.

Type	$Q$	$e$	$c_{\infty}$
Reference	0.708	0.127	0.501
A	0.461	0.948	0.411
B	0.274	0.949	0.412
C	0.733	0.769	0.594

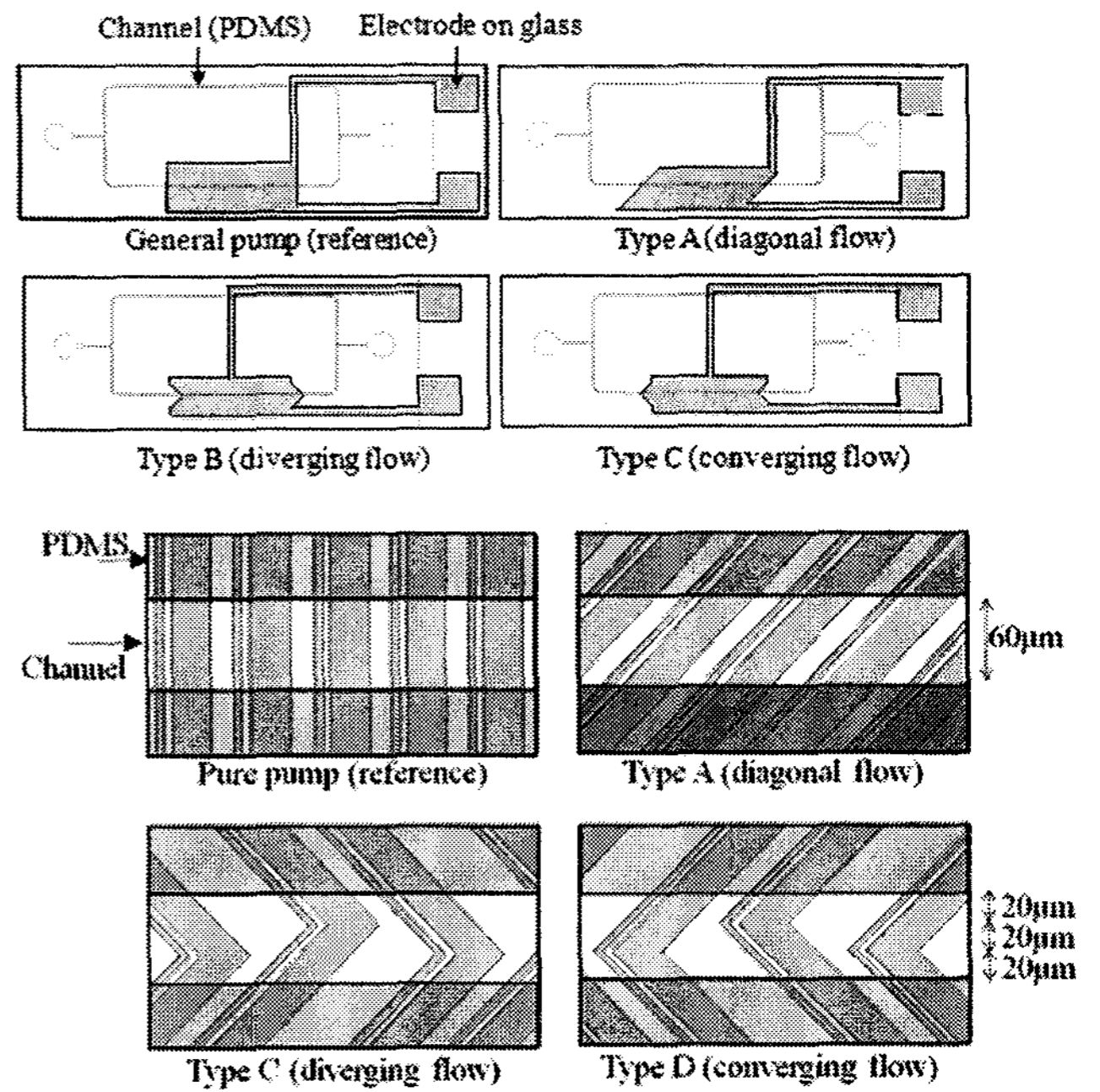
**Table 2** Pumping performance ( $Q$ : flow rate) and mixing efficiency ( $e$ ).  $c_{\infty}$  is the concentration when completely mixed.

Type	$\int u_{slip} dA$	$u_{slip, max}$	$u_{slip, min}$
A	9.174	1.81	-2.60
B	10.07	1.87	-2.64
C	9.978	1.76	-2.63

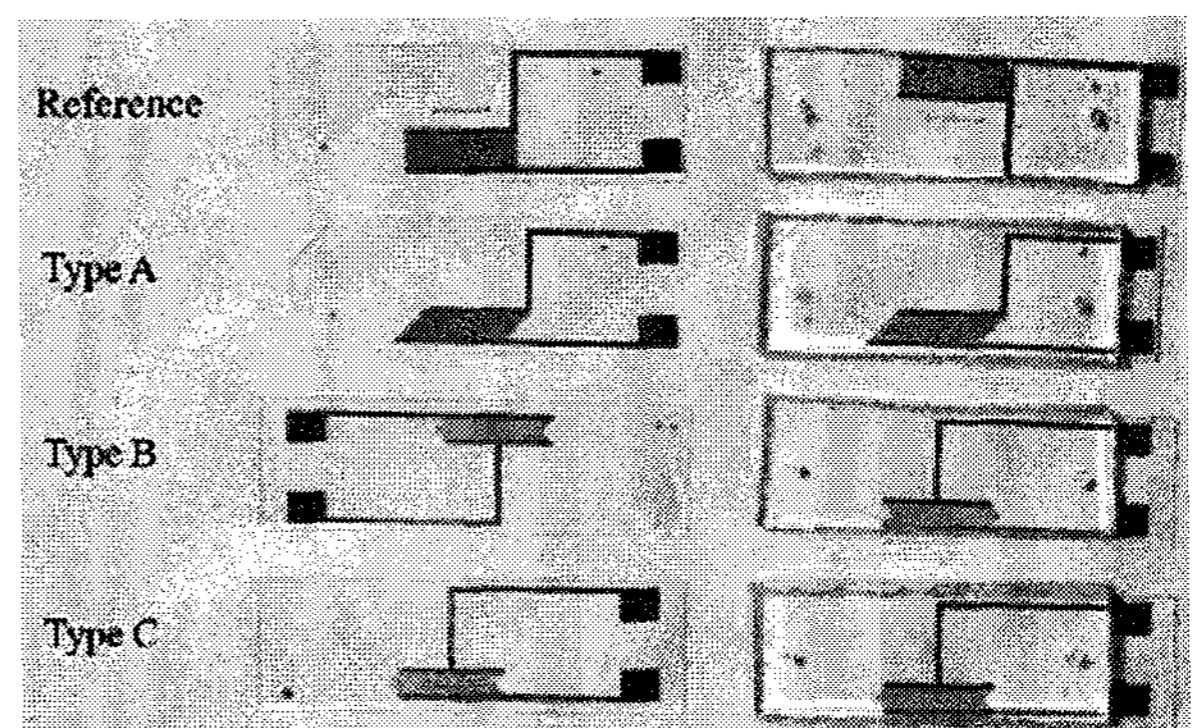
**Table 3** Integration of the x direction slip velocity

### 3. 실험결과

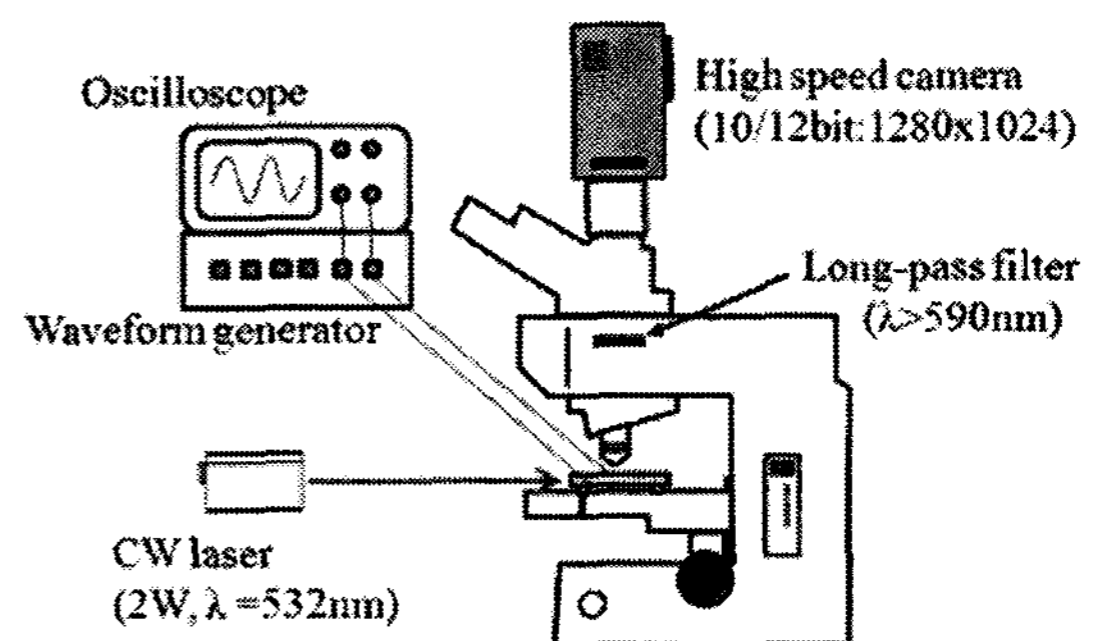
수치해석 결과를 실험적으로 증명하기 위하여 각 전극을 만들었다. 그림8은 전극의 형상을 보여주는데, 전극의 치수는 수치해석과 같으며(표 1), 유로의 너비는  $60\mu m$ 이다. 전극은 lift-off 방법을 통하여 만들었으며, 유로는 PDMS 공정을 통하여 만들었다. 유로는 loop 형상을 가지고 있는데, 유로의 기울어짐에 의한 압력차를 없애 순수한 펌핑 성능을 측정하기 위함이다. 그림 9는 만들어진 전극(Ti-Au-Ti:20-100-20nm)과 전극위에 PDMS 유로는 결합한 최종 소자를 보여준다.



**Fig. 8** Design of the electrode type and channels



**Fig. 9** Photos of the electrodes (left) and the final devices (right).



**Fig. 10** Schematic diagram of the experimental setup (micro PIV).

각 유체 소자에 대하여 유량은 유로의 중앙에서의 속력으로 측정하였다. micro PIV 기법이 사용되었으며, 실험 개략도는 그림10에 나타나 있다.

그림11은 각 유체소자에 대하여 펌핑 성능을 보여준다. 작동유체는 KCl 수용액으로 농도  $c = 2.2 \times 10^{-4} \text{ M}$  이며  $V_{pp} = 3 \text{ V}$  이다. 교류주파수에 따라 유로 중앙에서 평균속력을 측정하였다. 형광입자의 크기는  $d_p = 0.7 \mu\text{m}$ 인데, 입자는 DEP(dielectrophoresis)를 받으므로 전극이 없는 곳에서 속력을 측정하였다. 수치해석결과 같이 type C의 펌핑 성능이 가장 우수하며, type B의 성능이 낮음을 볼 수 있다. type C의 성능이 우수한 이유는 유체가 유로의 중앙으로 모이기 때문이며, 반대로 type D의 경우에는 유체가 유로의 가장 자리로 가기 때문이다. 그림12는 전극 위의 입자들의 움직임을 관찰한 것으로 이는 수치해석에서 예측한 것과 일치한다.

#### 4. 결론

교류전기삼투를 이용하여 미세유로 내 유체를 동시에 펌핑하면서 혼합하는 방법을 제시하고 이를 수치해석을 통하여 검증하였다. 이를 위해 미세유로 벽면에 대각선이거나 헤링본 모양의 비대칭 전극을 설치하였다. 그 결과 혼합은 넓은 전극 가장자리를 따라 회전하는 유동에 의하여 증대되었고, 펌핑은 전극표면에서 유체 미끄럼속도 분포에 영향을 받았다. 세 종류의 전극패턴 중 type C가 혼합과 펌핑을 모두 고려할 때 우수한 결과를 보여주었다.

#### 후 기

이 연구는 과학재단 도약연구지원사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다

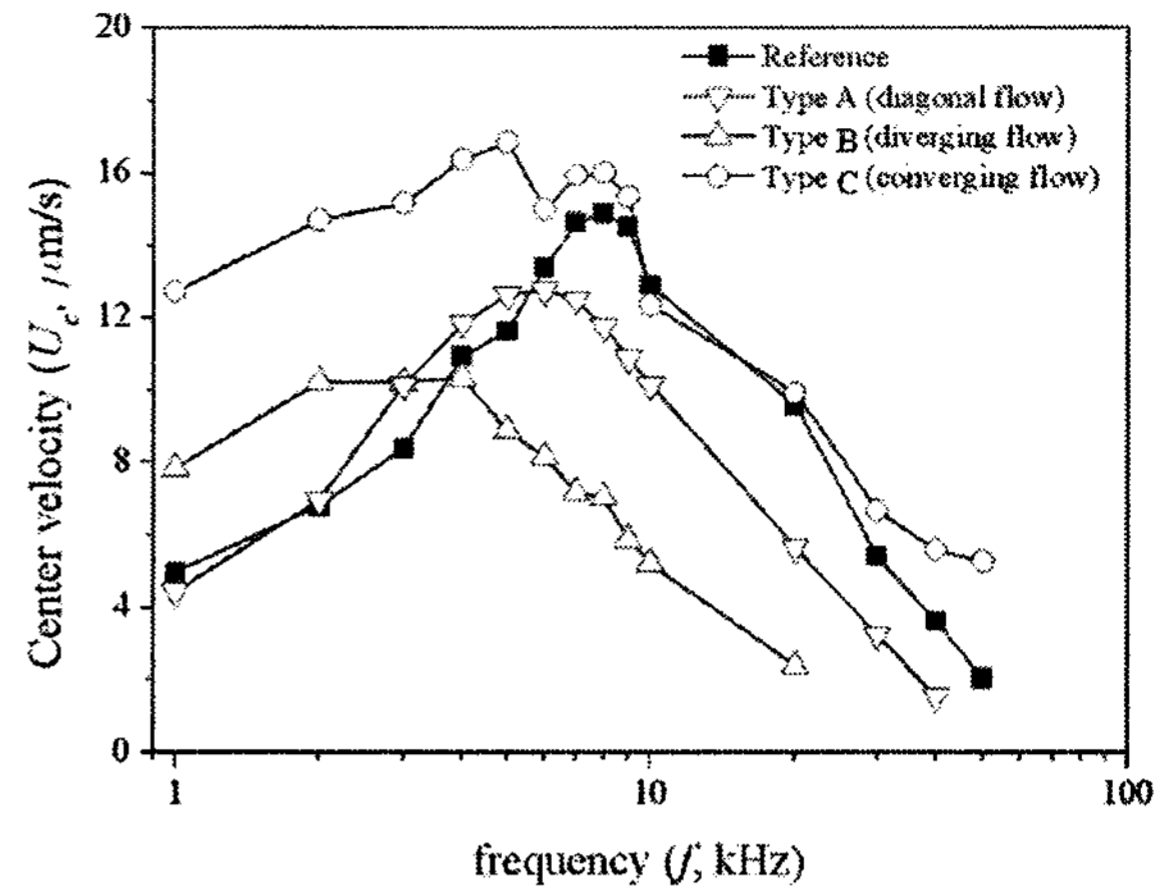


Fig. 11 Variation of the center velocity with the frequency.

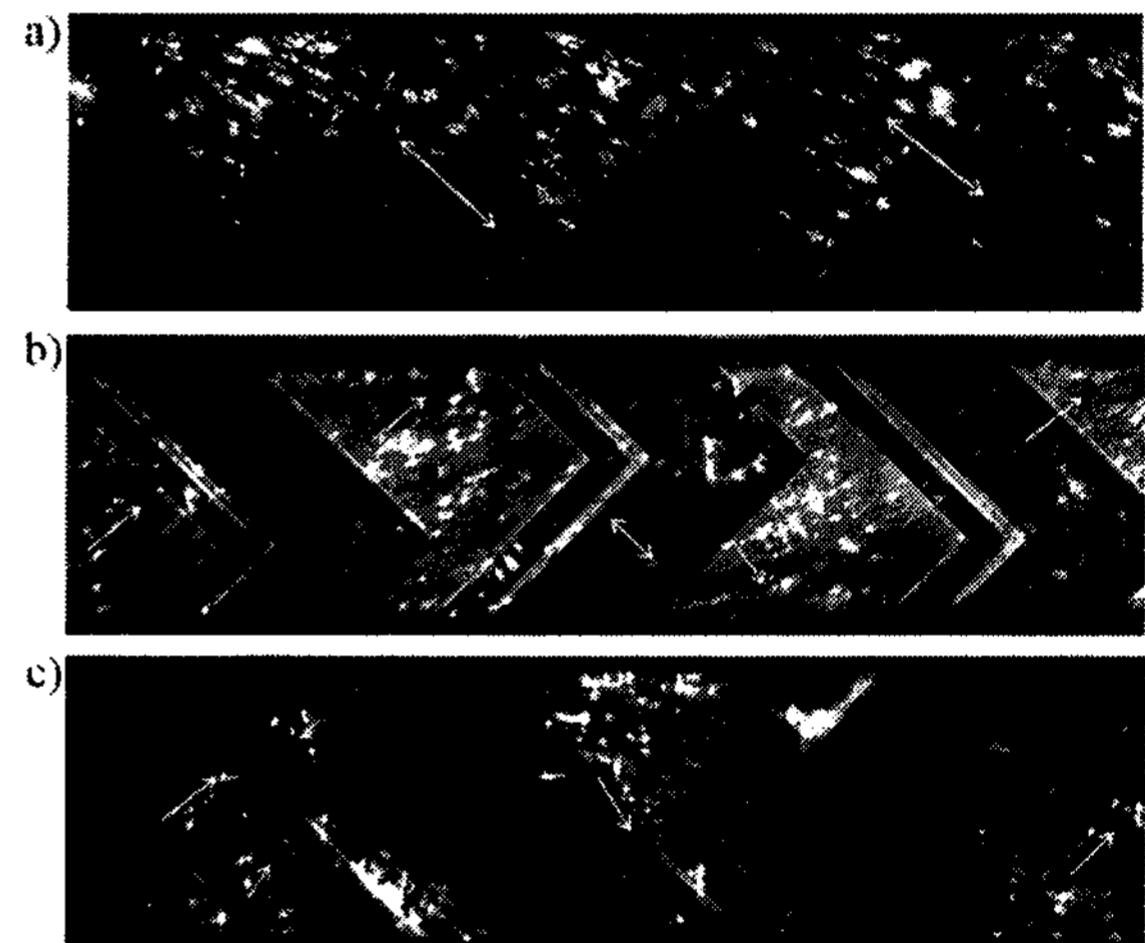


Fig. 12 Particle motions near the electrodes. a) type A, b) type C, c) type D.

#### 참 고 문 헌

- 1) Green, N. G., Ramos, A., Gonzalez, A., Morgan, H. and Castellanos A., 2000, "Fluid Flow Induced by Nonuniform AC Electric Fields in Electrolytes on Microelectrodes. I. Experimental Measurements," *Physical Review E*, Vol. 61, No. 4, pp.4011~4018.
- 2) Gonzalez, A., Ramos, A., Green, N. G., Castellanos, A. and Morgan, H., 2000, "Fluid Flow Induced by Nonuniform AC Electric Fields in Electrolytes on Microelectrodes. II. A Double Layer Analysis," *Physical Review E*, Vol. 61,

pp.4019~4028.

- 3) Green, N. G., Ramos, A., Gonzalez, A., Morgan, H. and Castellanos A., 2002, "Fluid Flow Induced by Nonuniform AC Electric Fields in Electrolytes on Microelectrodes. III. Observation of Streamlines and Numerical Simulation," *Physical Review E*, Vol. 66, pp.026305.
- 4) Ajdari, A., 2000, "Pumping Liquids Using Asymmetric Electrode Arrays," *Physical Review E*, Vol.61, No.1, pp.R45~R48.
- 5) Brown, A. B. D., Smith, C. G. and Rennie, A. R., 2000, "Pumping of Water with AC Electric Fields Applied to Asymmetric Pairs of Microelectrodes," *Physical Review E*, Vol.63, pp.016305.
- 6) Ramos, A., Gonzalez, A., Castellanos, A., Green, N. G. and Morgan, H., 2003, "Pumping of Liquids with AC Voltages Applied to Asymmetric Pairs of Microelectrodes," *Physical Review E*, Vol.67, pp.056302.
- 7) Olesen, L. H., Bruus, H. and Ajdari, A., 2006, "AC Electrokinetic Micropumps: The Effect of Geometrical Confinement, Faradaic Current Injection, and Nonlinear Surface Capacitance," *Physical Review E*, Vol.73, pp.056313.
- 8) Stroock, A. D., Dertinger, S. K. W., Ajdari, A., Mezic, I., Stone, H. A. and Whiteside G. M., 2002, "Chaotic Mixer for Microchannels," *Science*, Vol.295, No.25, pp.647~651.