

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.1.53

다중 와류 유동을 이용한 자기유체역학 (MHD) 마이크로 믹서<sup>§</sup>

양 원 석\* · 김 동 성\*<sup>†</sup>

\* 중앙대학교 기계공학부

Magnetohydrodynamic (MHD) Micromixer Using Multi-Vortical Flow

Wonseok Yang\* and Dong Sung Kim\*<sup>†</sup>

\* School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

(Received September 2, 2009 ; Revised December 5, 2009 ; Accepted December 7, 2009)

**Key Words :** CFD(전산유체역학), Magnetohydrodynamics(MHD; 자기유체역학), Microfluidics(미세 유체역학), Micromixer(마이크로 믹서), Vortical Flow(와류 유동)

**초록:** 본 논문에서는, 자기유체역학(MHD)을 기반으로 마이크로 채널 내부에 다중 와류 유동을 발생시키는 새로운 형태의 카오스 마이크로 믹서를 제안한다. 제안된 마이크로 믹서의 마이크로 채널 내부에는 양 측면과 바닥면에 전극들이 배치되어 있다. 배치된 전극들에 인가되는 전압 조건에 따라 다양한 형태로 로렌츠 힘이 유도되며, 이렇게 유도된 로렌츠 힘은 마이크로 채널 내부 유체의 추진 및 혼합을 야기할 수 있다. 제안된 MHD 마이크로 믹서의 혼합 양상을 평가하기 위해 3 차원 전산유체역학 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 다양한 유동 조건에 대해 MHD 마이크로 믹서의 혼합 성능을 평가하였다.

**Abstract:** In this paper, we propose a novel chaotic micromixer of which mixing mechanism is based upon magnetohydrodynamic (MHD) multi-vortical flow generation in a simple straight microchannel. In the microchannel of the micromixer has electrodes patterned on two side walls and bottom wall. Lorentz forces are variously induced by changing applied voltages at the patterned electrodes in order to pump and mix conductive fluids in the microchannel. Three-dimensional computational fluid dynamics simulations were conducted to characterize mixing behaviors inside the MHD micromixer. The mixing efficiencies were also evaluated for the various flow conditions.

- 기호설명 -

- B** : 자기장
- C** : 입자 농도
- D** : 확산계수
- E** : 전기장
- F** : Lorentz 힘
- H** : 마이크로 채널 높이
- J** : 전류 밀도
- p** : 압력
- q** : 전하 밀도
- t** : 시간
- u** : 유동 속도
- $V_{w1}, V_{w2}, V_{b1}, V_{b2}$  : 측면과 바닥면에 인가된 전위
- $\epsilon_r$  : 상대 유전율
- $\epsilon_0$  : 진공에서의 유전율

- $\phi$  : 전위
- $\mu$  : 유체의 점도
- $\rho$  : 유체의 밀도
- $\sigma$  : 표준편차
- $\sigma_{max}$  : 최대 표준편차
- $\sigma_{elec}$  : 전기 전도도

1. 서론

최근 들어 마이크로 토탈 분석 시스템(Micro Total Analysis System), 랩-온-어-칩(lab-on-a-chip), 임상 진단 (clinical diagnostics) 등의 여러 분야에서 미세유체역학 시스템(microfluidic systems)의 많은 적용 사례들이 보고되고 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 미세유체역학 시스템은 일반적으로 유체 유동의 제어, 혼합, 반응, 분리, 검출 등의 과정을 포함한다. 마이크로 채널 내부에서 빠른 의료 진단 혹은 화학 반응을 수행하기 위해서는 샘플과 시약의 효과적인 혼합이 필수적이다. 하지만,

§ 이 논문은 2009 년도 바이오공학부분 춘계학술대회 (2009. 5. 21-22, BEXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, smkds@cau.ac.kr

마이크로 채널이 가지는 작은 Reynolds 수로 인해 두 가지 유체의 난류를 이용한 기존의 효과적인 혼합 방식은 기대하기 어려우며, 확산에 의한 혼합만을 기대할 수 있다. 따라서 lab-on-a-chip 에서의 빠른 진단 및 반응 결과를 얻기 위해서는, 마이크로 채널 내부에서의 효과적인 혼합 방식 개발이 필수적이다.

자기유체역학(magnetohydrodynamics; MHD)에 기반한 유동 제어 방식은, 마이크로 채널 내부에 전도성 유체가 외부 전기장과 자기장에 놓일 경우 발생하는 Lorentz 힘에 기반하는 유체 제어 방식으로서, 높은 전위차를 요구하는 일반적인 전기삼투 유동(electro-osmotic flow)과는 달리 매우 작은 전위(~10V)로도 마이크로 채널 내부에서 유동 구동이 가능하다는 장점을 가지고 있다.<sup>(2-5)</sup> 특히 MHD 구동은 채널 내부에 moving part 가 없이도 양방향 유동 구동이 가능한 특징을 갖는다. 이러한 MHD 구동의 특징들은, 미세유체역학 시스템 내의 생체 물질들을 포함하는 유체 구동을 가능하게 하여, MHD 구동에 기반한 마이크로 채널 내부에서의 중합효소 연쇄반응(polymerase chain reaction, PCR)에 대한 연구가 수행된 바 있다.<sup>(6)</sup> 하지만 기존의 축방향 유동(axial flow)은 언급한 바와 같이 효과적인 혼합을 얻을 수 없는 한계를 가진다.

마이크로 채널 내부에서 두 유체의 효과적인 혼합을 유도하기 위해서는, 채널 축방향 유동 외에도 횡단 유동(transverse flow)을 통해 두 유체 간의 경계면을 확장시켜 확산에 의한 혼합을 증가시키는 방법이 필요하다. 특히, 이러한 횡단 유동의 적절한 유도는 와류 유동(vortical flow)을 야기함으로써, 교반(stirring)을 통한 높은 수준의 혼합을 유발할 수 있다. 이러한 교반 효과는 압력 구동 유동에 기반한 카오스 마이크로 믹서의 혼합 메커니즘으로 다양하게 적용된 바 있다.<sup>(6-8)</sup> Bau 등<sup>(9-11)</sup>은 적절한 전극의 배치를 통해 횡단 유동을 MHD 구동으로 유발함으로써, 마이크로 채널 내부에서 효과적인 혼합을 얻은 바 있다. 하지만, 기존의 MHD 마이크로 믹서의 경우 횡단 유동만을 유도하는 전극 배치를 가지고 있어, 유동의 구동을 위해 다른 구동 방식이 필요하다는 단점을 가지고 있다. 결국 기존의 MHD 구동은 축방향 혹은 횡단 방향의 2 차원 유동으로 한정되어 있었다.

최근 Kim 등<sup>(12)</sup>은 직선형 마이크로 채널의 측면과 바닥면에 간단한 전극 배치를 통해, 축방향 유동, 횡단 유동, 사인형상 유동 및 다중 와류 유동의 복잡 유동(complex flow)을 유발하는 디자인 방법론을 제시하였다. 이 중에서 다중 와류 유동의 경우, 유체의 구동과 함께 유동 내부에 와류를 통한 교반 효과를 수반하여, 마이크로 채널 내부로 주입된 두 유체의

효과적인 혼합을 기대할 수 있다. 이에 본 연구에서는 MHD 에 의해 유도되는 3 차원 복잡 유동을 기반으로 하는 MHD 마이크로 믹서를 제안하고자 한다. 이에, 상용 전산유체역학 모사 프로그램을 사용하여, 다양한 유동 조건 하에서 유도되는 마이크로 채널 내부의 혼합 양상에 대한 해석을 수행함과 동시에 혼합 성능을 정량화함으로써, 제안된 MHD 마이크로 믹서의 혼합 효과를 구체적으로 파악하고자 하였다.

## 2. MHD 마이크로 믹서 이론 및 디자인

### 2.1 자기유체역학 (Magnetohydrodynamics) 이론

자기유체역학의 이론은 연속 방정식과 Navier-Stokes 방정식을 포함하는 고전 유체역학과 Maxwell 방정식을 포함하는 전자기학으로부터 유도될 수 있다. 마이크로 채널 내부에 흐르는 전도성 유체의 유동이 외부의 전기장과 자기장에 영향을 주지 않는다고 가정하면, 자기유체역학 이론으로부터 MHD 유동에 대해 다음과 같은 지배 방정식을 얻을 수 있다.<sup>(2-4, 9-12)</sup>

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

$$\mathbf{J} = \sigma_{elec} (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 \nabla \phi) = -q \quad (3)$$

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

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

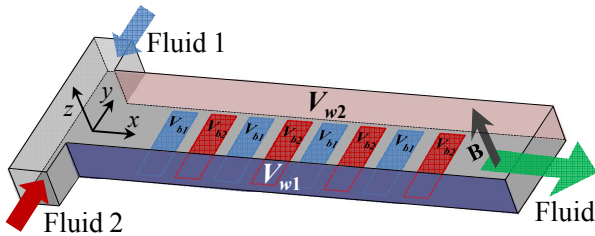
$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (6)$$

이 때,  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{J}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\sigma_{elec}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_0$ ,  $\phi$ ,  $q$ ,  $\mathbf{u}$ ,  $\rho$ ,  $t$ ,  $p$ ,  $\mu$  는 각각 Lorentz 힘, 전류 밀도, 자기장, 전기 전도도, 전기장, 상대 유전율(relative permittivity), 진공에서의 유전율, 전위(electric potential), 전하 밀도, 유동 속도, 유체의 밀도, 시간, 압력, 유체의 점도를 의미한다.

위의 식 (1)은 두 전기장과 자기장에 모두 수직인 방향으로 생성되는 Lorentz 힘을 나타낸다. 이렇게 생성된 Lorentz 힘은 유체에 체적력(body force)으로 작용하여 유동을 유발하게 된다. 또한, 식 (4)에서  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$  는 식 (1)에서 정의된 바와 같이 Lorentz 힘을 의미한다. 식 (2)는 Ohm 의 법칙을 의미하며, 전기장  $\mathbf{E}$  에서  $\sigma_{elec}$  의 전기 전도도를 가지는 전도체가  $\mathbf{B}$  의 외부 자기장에서  $\mathbf{u}$  의 속도로 움직일 때 유도되는 전류 밀도를 보여준다. 식 (3),

**Table 1** Various MHD flow types according to the voltage conditions<sup>(12)</sup>

| Flow type           | Voltage condition  |
|---------------------|--|
| Axial flow          | $V_{w1} > V_{w2}$ and $V_{b1} = V_{b2} = 0$<br>( $J_{b1} = J_{b2} = 0 \text{ A/m}^2$ )   |
| Sinusoidal flow     | $V_{w1} > V_{w2}$ , $V_{b1} > V_{b2}$ ,<br>$V_{w1} = V_{b1}$ and $V_{w2} = V_{b2}$   |
| Multi-vortical flow | $V_{w1} > V_{w2}$ , $V_{b1} > V_{b2}$ and<br>$V_{w1} < V_{b1}$ & $V_{w2} \geq V_{b2}$ or<br>$V_{w1} \leq V_{b1}$ & $V_{w2} > V_{b2}$ |



**Fig. 1** Schematic diagram of a MHD micromixer proposed in this study. The micromixer is composed of a main channel, two inlets and one outlet. The main microchannel contains two side wall electrodes and periodically arranged bottom wall electrodes

(4)는 전기장에 대한 지배방정식인 Gauss 법칙을 보여주며, 식 (5)는 비압축성 유체에 대한 연속 방정식을 의미하며, 식 (6)은 운동량 보존법칙으로 Lorentz 힘을 포함하는 Navier-Stokes 방정식을 의미한다. 따라서 식 (2)-(6)으로부터, 마이크로 채널 내부 유체가 일정한 자기장에 노출되어 있을 경우 ( $\mathbf{B} = \text{일정}$ ), 유도되는 전류 밀도의 크기 및 방향을 조절함으로써 마이크로 채널 내부 유동을 제어하는 것이 가능하게 됨을 알 수 있다.

### 2.2 MHD 마이크로 믹서의 디자인

Fig. 1 은 본 연구에서 디자인된 전극을 포함하는 T 자형 마이크로 믹서의 개념도를 보여준다. 제안된 MHD 마이크로 믹서는, T 자형의 마이크로 채널로서, 두 유체의 입구를 가지고 있으며 혼합 유체의 출구를 가지고 있다. 전극은 마이크로 채널의 양 측면(side wall)에 배치되어 있으며, 마이크로 채널의 바닥에는 일정한 간격을 두고 전극들이 주기적으로 배치되어 있다. 본 연구에서는 일정한 자기장,  $\mathbf{B}$  가 마이크로 채널 전반에 걸쳐 +z 방향으로 작용하고 있다고 가정하였다. 또한 Fig. 1 에 표시된 바와 같이, 양 측면에 배치된 전극들에는  $V_{w1}$  과  $V_{w2}$  의 DC 전위가 인가되어 있으며, 바닥

면의 전극들에는  $V_{b1}$  과  $V_{b2}$  의 DC 전위가 주기적으로 인가되고 있다. 마지막으로 인가된 전위들에 대해서는,  $V_{w1} \geq V_{w2}$  와  $V_{b1} \geq V_{b2}$  로 가정하였다. Lorentz 힘은 외부에서 주어진 전기장과 자기장에 의해 유도되기 때문에, 일정한 자기장이 작용되고 있는 Fig. 1 의 마이크로 채널에 대해, 측면과 바닥 면에 인가하게 되는 전위들( $V_{w1}$ ,  $V_{w2}$ ,  $V_{b1}$ ,  $V_{b2}$ )의 적절한 조합을 통해 다양한 방향 및 크기의 Lorentz 힘을 유도할 수 있으며, 유도된 Lorentz 힘에 의해 다양한 형태의 복잡 유동을 유발하는 것이 가능하다(식 (4)). 이에 대한 전위들의 조합을 Table 1 에 정리하였다.<sup>(12)</sup>

### 3. 수치 해석

본 연구에서는 Fig. 1 의 동일한 마이크로 믹서 모델에 Table 1 의 3 가지 유동 유발을 파악하고, 유동 내부에서의 혼합 거동을 검증하기 위해, 유한 체적 법(Finite Volume Method)을 기반으로 상용 전산유체역학 프로그램인 CFD-ACE+를 이용하여 유동 및 혼합 거동 수치모사를 수행하였다.

수치 해석에서는 비압축성, 뉴턴 유체를 가정하였으며, 정상 상태의 유동을 가정하였다. 유동의 지배 방정식으로는 MHD 의 지배방정식인 식 (2)-(6)을 적용하였으며, 마이크로 믹서 내부에 흐르는 입자(solute)에 대해서는 다음과 같은 입자 대류-확산 방정식(species convection-diffusion equation)을 적용하였다.

$$\frac{dC}{dt} = D\nabla^2 C \tag{7}$$

이 때,  $C$ ,  $D$  는 각각 입자의 농도 및 확산 계수를 의미한다.

MHD 마이크로 믹서는 Fig. 1 의 모델에 따라 각각 500  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 2.3 mm 의 너비, 높이 ( $H$ ), 길이를 가지게 디자인되었다. 유체는 두 주 입구를 통해 마이크로 채널로 유입되게 디자인되었다. 채널의 양 측면에는 전체적으로 전극이 존재하게 디자인되었고, 바닥 면에는 채널 입구에서 400  $\mu\text{m}$  위치부터 100  $\mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$  크기의 전극이 인접한 전극과 100  $\mu\text{m}$  간격으로 8 개 깔려있다. 따라서 현재 디자인에서는 측면 전극의 가장 아래쪽과 바닥 면 전극이 50  $\mu\text{m}$  간격을 두고 떨어져있다.

작동 유체로는 PBS(phosphate buffer solution)가 선택되었으며, 밀도, 점도, 전기 전도도, 상대 투과율(relative permeability), 상대 유전율(relative permittivity)로는 각각 1000  $\text{kg/m}^3$ ,  $6 \times 10^{-4} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ ,  $1.5 / \Omega \cdot \text{m}$ , 1, 72 가

적용되었다.<sup>(14)</sup> 마이크로 믹서 내의 혼합 거동을 파악하기 위해 선택한 입자의 확산 계수는  $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  이 적용되었다.

유동 경계조건으로서, 입구와 출구에는 일정 압력을 인가하여 입구와 출구 사이 압력 차를 무시할 수 있다고 가정하였으며, 각 벽면에서는 점착 조건(no-slip condition)이 적용되었다. 본 논문에서는 입구와 출구 저장소(reservoir)가 충분히 크다고 가정하여, 입구와 출구 사이의 압력 높이 차이가 무시할 만큼 작다고 가정하였다. 실제로 마이크로 채널 내부에 형성되는 Lorentz 힘은 압력 높이보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다.<sup>(2-4, 9-11)</sup> 전기 경계조건으로는 배치된 전극들에 각 유동의 전위 조건(Table 1)에 적합한 전위가 인가되었으며, 그 외 나머지 모든 벽면에 대해서는 전류의 비침투 조건(non-penetration condition)이 적용되었다. 또한 자기 경계조건으로서,  $\pm z$  방향으로 0.2 T의 일정한 자기장을 적용하였다. 입자 경계조건으로, 일정 농도의 두 가지 입자가 각각의 입구로 유입되게 하였으며, 출구에서는 유출이 자유롭게 하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 마이크로 채널 내부 MHD 복잡 유동

제안된 MHD 마이크로 믹서의 혼합 성능을 검증함에 앞서, Table 1 에서 제시된 3 가지 종류의 MHD 복잡 유동에 대한 검증을 수행하였다.

(i) 축방향 유동: Table 1 에 제시된 축방향 유동 조건의 예로서,  $V_{w1} = 40\text{V}$ ,  $V_{w2} = 0$  과  $V_{b1} = V_{b2} = 0 \text{ V}$  ( $J_{b1} = J_{b2} = 0 \text{ A/m}^2$ ) 이 경계조건으로 적용되었다. Fig. 2 는 이를 통해 얻은 일반적인 MHD 축방향 유동 결과를 보여준다.

(ii) 사인형상 유동: Table 1 에 제시된 사인형상 유동 조건의 예로서,  $V_{w1} = V_{b1} = 40 \text{ V}$ ,  $V_{w2} = V_{b2} = 0 \text{ V}$  의 경계조건이 적용되었다. Fig. 3 는 그 결과를 보여주며, 디자인된 바와 같이 마이크로 채널 내부에서 전체적인 MHD 사인형상 유동 결과를 얻을 수 있었다.

(iii) 다중 와류 유동: Table 1 에 제시된 다중 와류 유동 조건의 예로서,  $V_{w1} = 20 \text{ V}$ ,  $V_{b1} = 40 \text{ V}$ ,  $V_{w2} = V_{b2} = 0 \text{ V}$  의 경계조건이 적용되었다. 이를 통해, Fig. 4 와 같이 마이크로 채널 내부에서 전체적인 사인형상 유동에 국부적으로 여러 개의 와류를 포함하고 있는 MHD 다중 와류 유동 결과를 얻을 수 있었다.

### 4.2 MHD 마이크로 믹서의 혼합 성능 비교

본 연구에서 제안된 MHD 마이크로 믹서는, 측

면전극에 인가된 전위에 의한 축방향 유동에, 바닥면에 주기적으로 배치된 전극에 적절히 인가된 전위를 통해 유도되는 다중 와류에 의한 교반 효과에 기반을 두고 있다. MHD 마이크로 믹서의 혼합 성능을 평가하기 위해, 축방향 유동, 사인형상 유동 및 다양한 다중 와류 유동에 의한 혼합 거동을 비교하였다. 이 때, 전위 인가 조건은 4.1 절의 조건과 동일하며, 다중 와류 유동의 경우  $V_{b1}$  을 20 V 부터 80 V 까지 10 V 씩 증가시키며 혼합 성능을 관찰하였다.

Fig. 5 는 수치 모사를 통해 계산된 축방향, 사인형상 및 다양한 다중 와류 유동에 의한 마이크로 채널 내부 혼합 거동을 보여준다. Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이, 축방향 유동만으로는 마이크로 채널 내부에서 혼합을 얻을 수 없음을 알 수 있다. 사인형상 유동(Fig. 5(b))은 두 유체간의 경계면을 증가시키므로써 축방향 유동에 비해 혼합 성능을 향상시킬 수 있지만, Fig. 5(c)-(f)의 다중 와류 유동에 비해 혼합 성능이 현저히 떨어짐을 알 수 있다. 다중 와류 유동의 높은 혼합 성능은 와류 유동에 의한 교반 효과 때문이며,  $V_{b1}$  의 크기가 커질수록 와류의 크기가 커지기 때문에 혼합 성능이 크게 향상되는 것을 확인할 수 있다.

유동 조건에 따른 혼합 거동 변화를 보다 구체적으로 파악하기 위해, Fig. 6 와 같이 다양한 유동 조건 하에서 마이크로 믹서 출구에서의 단면 혼합 거동을 관찰하였다. 축방향 유동의 경우 Fig. 6(a) 와 같이 중간 경계면에서의 확산 외에 혼합을 얻을 수 없음을 알 수 있으며, Fig. 6(c)-(f)와 같이 다중 와류 유동을 통해 효과적인 혼합을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 특히, 바닥면 근처에 밀집된 전류 밀도에 의해 Lorentz 힘의 세기가 바닥면 근처에서 더 크기 때문에 (식 (1) 및 식 (4)), Fig. 6(b)-(f)에서 볼 수 있듯이 사인형상 유동 및 다중 와류 유동의 경우 바닥면 근처에서 보다 높은 혼합 성능을 보임을 알 수 있다.

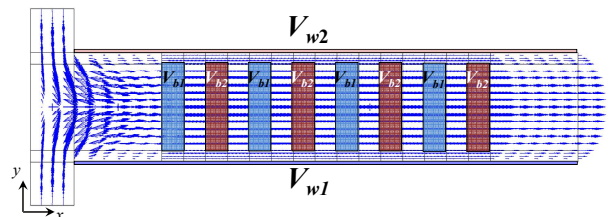
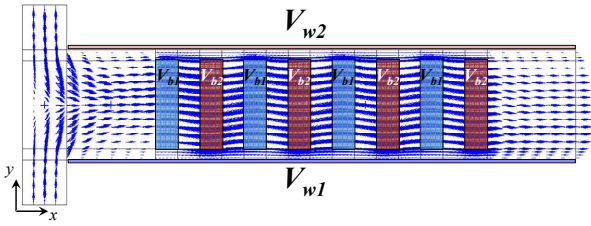
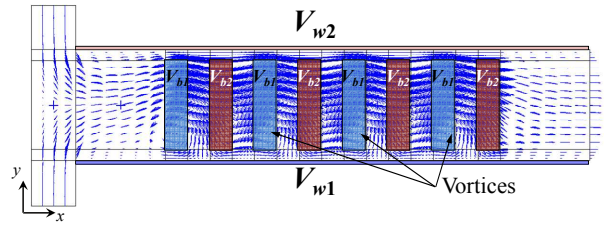


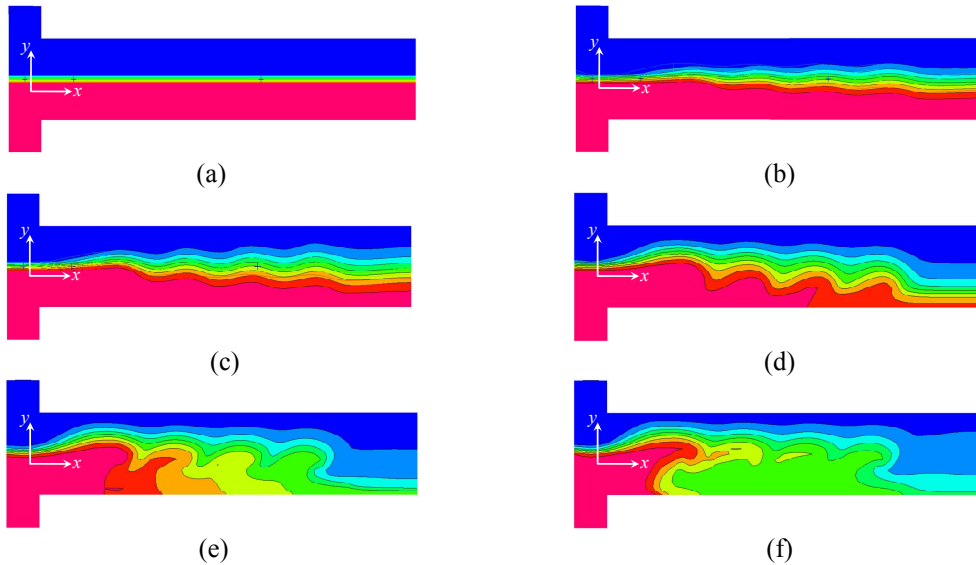
Fig. 2 CFD simulation result of MHD axial flow when  $V_{w1} = 40 \text{ V}$ ,  $V_{w2} = 0 \text{ V}$  and  $V_{b1} = V_{b2} = 0 \text{ V}$  ( $J_{b1} = J_{b2} = 0 \text{ A/m}^2$ ) under  $B = 0.2 \text{ T}$



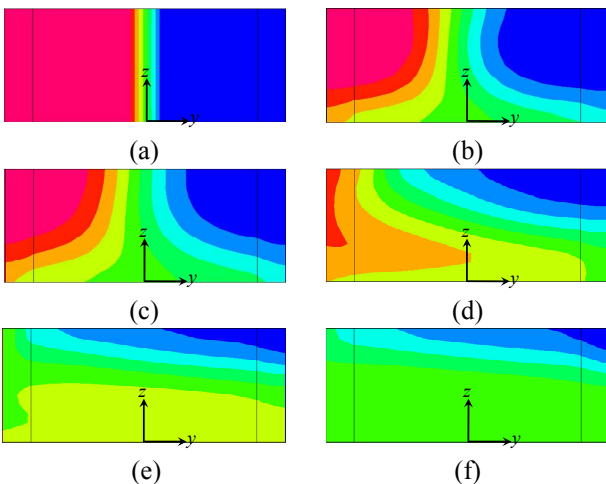
**Fig. 3** CFD simulation result of MHD sinusoidal flow when  $V_{w1} = V_{b1} = 40$  V and  $V_{w2} = V_{b2} = 0$  V under  $B = 0.2$  T



**Fig. 4** CFD simulation result of MHD multi-vortical flow when  $V_{w1} = 20$  V,  $V_{b1} = 40$  V and  $V_{w2} = V_{b2} = 0$  V under  $B = 0.2$  T



**Fig. 5** Top views of numerical simulation results of mixing behaviors in MHD micromixer at  $z = H/2 = 100$   $\mu\text{m}$  for the case of axial flow (a), sinusoidal flow (b), and multi-vortical flow when  $V_{b1} = 20$  V (c),  $V_{b1} = 40$  V (d),  $V_{b1} = 60$  V (e) and  $V_{b1} = 80$  V (f)

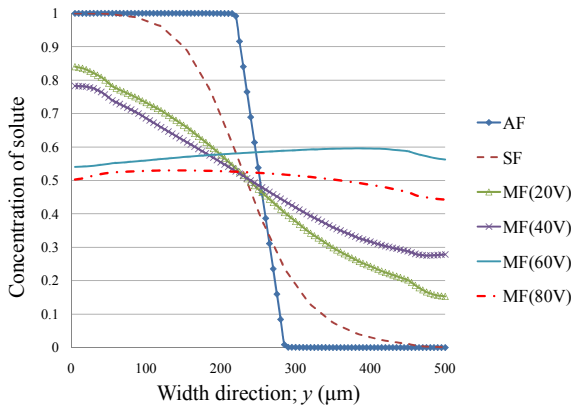


**Fig. 6** Cross-sectional views of numerical simulation results of mixing behaviors in MHD micromixer at the outlet for the case of axial flow (a), sinusoidal flow (b), and multi-vortical flow when  $V_{b1} = 20$  V (c),  $V_{b1} = 40$  V (d),  $V_{b1} = 60$  V (e) and  $V_{b1} = 80$  V (f)

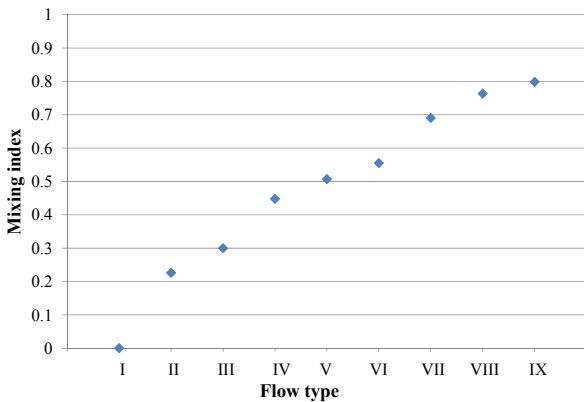
Fig. 7 은 여러 유동 조건 하에서 계산된 MHD 마이크로 믹서 출구 단면에서의 입자 분포를 정량적으로 보여준다. 혼합이 완전히 이루어진 경우 입자의 농도는 0.5 가 되며, 혼합이 전혀 이루어지지 않은 경우 입자의 농도는 1.0 과 0.0 반반으로 존재하게 된다. 축방향 유동의 경우 마이크로 채널 내부 층류 유동에 의해 경계면이 출구까지 유지되고 혼합이 제대로 이루어지지 않아, 입자의 농도가 1.0 과 0.0 으로 분리되어 분포하고 있음을 알 수 있다. 사인형상 유동의 경우 혼합이 이루어지기 시작하여 입자의 농도가 비슷한 수준으로 널리 퍼져 분포하기 시작하며, 다중 와류 유동의 경우  $V_{b1}$  의 크기가 커질수록 입자의 농도가 0.5 에 가깝게 분포하여 혼합이 효과적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

#### 4.3 MHD 마이크로 믹서의 혼합 성능 정량화

본 연구에서는 혼합 성능의 척도로서 다음과 같이 혼합 지표(mixing index)를 정의하여, 제안된



**Fig. 7** Numerical simulation results of concentration distributions of solute in MHD micromixer along  $y$ -direction at  $z = H/2$  near the outlet region according to the various flow conditions. AF, SF and MF indicate axial flow, sinusoidal flow and multi-vortical flow, respectively



**Fig. 8** Calculated mixing index of MHD micromixer at the outlet region (solute distribution data from  $z = H/3, H/2$  and  $2H/3$ ) for the case of axial flow (I), sinusoidal flow (II), and multi-vortical flow when  $V_{bl} = 20$  V (III),  $V_{bl} = 30$  V (IV),  $V_{bl} = 40$  V (V),  $V_{bl} = 50$  V (VI),  $V_{bl} = 60$  V (VII),  $V_{bl} = 70$  V (VIII), and  $V_{bl} = 80$  V (IX)

MHD 마이크로 믹서의 여러 가지 유동 조건 하에서의 혼합 성능을 정량화하였다.<sup>(13)</sup>

$$\text{Mixing index} = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \quad (8)$$

이 때,  $\sigma, \sigma_{\max}$  는 각각 채널 단면에서의 입자 농도의 표준 편차, 혼합이 이루어지기 전 마이크로 믹서에서 입자의 최대 표준 편차를 의미한다. 식에서 알 수 있듯이, 혼합이 전혀 이루어지지 않고 입자 농도가 1.0 과 0.0 로 나뉠 경우 ( $\sigma = \sigma_{\max}$ ) 혼합 지표는 0 가 되며, 혼합이 완전히 이루어져 입자 농도

가 0.5 로 분포할 경우 ( $\sigma = 0$ ) 혼합 지표는 1 이 된다.

본 연구에서는 여러 가지 유동 조건에 대해, MHD 마이크로 믹서의 입구 및 출구 단면에서,  $z = H/3, H/2, 2H/3$  에 해당하는 부분의 입자 농도 분포의 표준 편차를 계산하여, 혼합 지표를 산출하여 Fig. 8 에 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있듯이, 축방향 유동의 경우 혼합 지표가 거의 0 에 가까워 혼합이 거의 이루어지지 않음을 알 수 있으며, 사인형상 유동부터 혼합 지표가 상승하여  $V_{bl} = 60$  V 에서부터 혼합 지표 0.7 이상의 효과적인 혼합을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 실제로 인가 전위가 높아질 경우 전도성 유체의 전기 분해가 이루어질 수 있으므로, 낮은 인가 전위에서 안정적으로 효과적인 혼합이 이루어지는  $V_{bl} = 60$  V 정도가 가장 적절한 인가 전위라 생각될 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 마이크로 채널 측면과 바닥면에 배치된 전극의 적절한 인가 전위에 의해 유도되는 MHD 구동을 통해, 마이크로 채널 내부의 유체의 이송과 함께 혼합을 효과적으로 유도하는 MHD 마이크로 믹서를 제안하였으며, 수치해석을 통해 축방향, 사인형상 및 다양한 다중 와류 유동 패턴에 대한 혼합 성능을 검증하였다. 축방향 유동의 경우, 마이크로 채널 층류 유동의 특성으로 인해 혼합이 거의 이루어지지 않았음을 알 수 있었으며, 다중 와류 유동의 경우 바닥면 근처에 형성되는 다중 와류에 의한 교반 효과를 통해 다른 유동 패턴에 비해 월등히 향상된 혼합을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서 제안된 MHD 마이크로 믹서는 유체의 단순 이송뿐 아니라 필요할 경우 유체 이송과 함께 효과적인 혼합을 동시에 유도할 수 있어, 다양한 미세유체역학 시스템에 적용이 가능할 것이다.

### 후 기

본 연구는 2007 년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사한다.

### 참고문헌

(1) West, J., Becker, M., Tombrink, S. and Manz, A., 2008, "Micro Total Analysis Systems: Latest Achievements," *Anal. Chem.*, Vol. 80, pp. 4403~4419.

- (2) Jang, J. and Lee, S.S., 2000, "Theoretical and Experimental Study of MHD (Magnetohydrodynamic) Micropump," *Sensor Actuat. A*, Vol. 80, pp. 84~89.
- (3) Lemoff, A.V. and Lee, A.P., 2000, "An AC Magnetohydrodynamic Micropump," *Sensor Actuat. B*, Vol. 63, pp. 178~185.
- (4) Homsy, A., Koster, S., Eijkel, J.C.T., van den Berg, A., Lucklum, F., Verpoorte, E. and de Rooij, N.F., 2005, "A High Current Density DC Magnetohydrodynamic (MHD) Micropump," *Lab Chip*, Vol. 5, pp. 466~471.
- (5) West, J., Karamata, B., Lillis, B., Gleeson, J.P., Alderman, J., Collins, J.K., Lane, W., Mathewson, A. and Berney, H., 2002, "Application of Magneto Hydrodynamic Actuation to Continuous Flow Chemistry," *Lab Chip*, Vol. 2, pp. 224~230.
- (6) Liu, R.H., Stremler, M.A., Sharp, K.V., Olsen, M.G., Santiago, J.G., Adrian, R.J., Aref, H. and Beebe, D.J., 2000, "Passive Mixing in a Three-Dimensional Serpentine Microchannel," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 9, pp. 190~197.
- (7) Kim, D.S., Lee, S.H., Kwon, T.H. and Ahn, C.H., 2005, "A Serpentine Laminating Micromixer Combining Splitting/Recombination and Advection," *Lab Chip*, Vol. 5, pp. 739~747.
- (8) Park, J.M., Kim, D.S., Kang, T.G. and Kwon, T.H., 2008, "Improved Serpentine Laminating Micromixer with Enhanced Local Advection," *Microfluid. Nanofluid.*, Vol. 4, pp. 513~523.
- (9) Bau, H.H., Zhong, J. and Yi, M., 2001, "A Minute Magneto Hydro Dynamic (MHD) Mixer," *Sensor Actuat. B*, Vol. 79, pp. 207~215.
- (10) Qian, S. and Bau, H.H., 2005, "Magneto-hydrodynamic Stirrer for Stationary and Moving Fluids," *Sensor Actuat. B*, Vol. 106, pp. 859~870.
- (11) Xiang, Y. and Bau, H.H., 2003, "Complex Magnetohydrodynamic Low-Reynolds-Number Flows," *Phys. Rev. E*, Vol. 68, pp. 016312.
- (12) Kim, D.S. and Kwon, T.H., 2006, "Magneto-hydrodynamic (MHD) Complex Flow Generation in Microchannel," *Nanotech2006*, Boston, USA, Vol. 2, pp. 524~527.
- (13) Wang, L. and Yang, J. T., 2006, "An Overlapping Crisscross Micromixer using Chaotic Mixing Principles," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 16, pp. 2684~2691.
- (14) Lim S. and Choi B., 2009, "A Study on the MHD (magnetohydrodynamic) Micropump with Side-Walled Electrodes," *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 23, pp. 739~749.