

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.1.61

3 차원 유체역학 집속에 대한 채널 형상 및 유동 조건의 매개변수 연구[§]

한 경 섭* · 김 동 성*[†]

* 중앙대학교 기계공학부

Effects of Geometric and Flow Conditions on 3-dimensional Hydrodynamic Focusing

Kyungsup Han* and Dong Sung Kim*[†]

* School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

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

Key Words : 3-Dimensional Hydrodynamic Focusing(3 차원 유체역학 집속), CFD(전산유체역학), Parametric Study (매개변수 연구), Locally Increased Aspect Ratio(국소적 종횡비 증가), Microfluidic Device(미세유체역학 장치)

초록: 최근 본 연구그룹은 국소적인 종횡비 증가를 기반으로 수평 분리벽 없이 검체의 3 차원 집속을 구현하는 3 차원 유체역학 집속 미세유체 장치(3D-HFMD)를 제안한 바 있다. 본 논문에서는, 다양한 형상 및 유동 조건에 따른 3D-HFMD 의 3 차원 유체역학 집속 거동 영향에 대한 연구를 수행하였다. 이에 3 차원 전산유체역학 (CFD) 시뮬레이션을 통해, 형상 및 유동 조건 변화에 대한 기존의 미세유체 장치와 본 연구 그룹이 제안한 3D-HFMD 의 3 차원 유체역학 집속의 매개변수 연구를 수행하였다. 수행된 CFD 시뮬레이션 결과를 바탕으로 3 차원 집속을 위한 채널 형상 디자인 및 유동 조건을 제안하였다.

Abstract: In our previous work, 3-dimensional hydrodynamic focusing microfluidic device (3D-HFMD) has been developed with the help of locally increased aspect ratio of thickness to width without any horizontal separation wall. In this study, we have investigated 3-dimensional hydrodynamic focusing behaviors inside the 3D-HFMD according to the various geometric and flow conditions. The parametric study has been extensively carried out for the effects of geometric and flow conditions on 3-dimensional hydrodynamic focusing with both 3D-HFMD and previous microfluidic device design based on three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) simulations. The CFD simulations suggested the proper design window of channel geometry and flow conditions.

- 기호설명 -

- AR : 채널의 높이와 너비의 종횡 비
- c : 입자 농도
- D : 확산계수
- H : 채널의 높이
- L_e : 입구 길이
- p : 압력
- Q_c : 코어 유동 유량
- Q_s : 외피 유동 유량
- Re : 레이놀드 (Reynolds) 수

- t : 시간
- V : 유동 속도 벡터
- ρ : 유체의 밀도
- μ : 유체의 동적 점도
- ϕ : 코어 유량과 외피 유량의 유량 비

1. 서 론

Micro total analysis systems(μ TAS) 혹은 lab-on-a-chip 과 같은 미세유체역학 시스템(microfluidic systems)에서 세포 측정의 정확도를 높이고, 화학 물질의 운반 및 화학반응의 역학을 이해하기 위해서, 미세유체역학 장치 내부에서의 샘플 유동의 집속(focusing)은 중요한 연구 주제 중 하나이다.^(1~4) 미세유체역학 장치를 이루는 마이크로 채널 내부의 유체 유동은

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

[†] Corresponding Author, smkds@cau.ac.kr

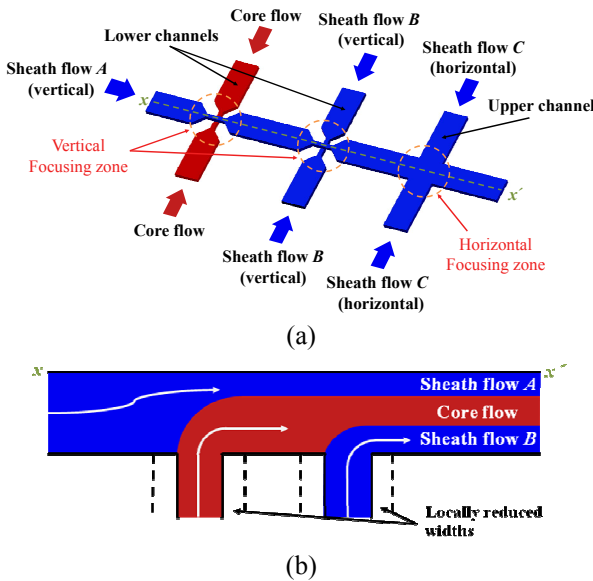


Fig. 1 Schematic diagram of 3D hydrodynamic focusing microfluidic device (3D-HFMD): (a) overall view and (b) vertical view ($x-x'$)⁽⁷⁾

작은 특성 길이(characteristic length)로 인해, 일반적으로 작은 레이놀드 수(Reynolds number; Re)를 가지며, 이로 인해 매우 안정적인 층류 유동(laminar flow)이 유지된다. 이러한 마이크로 채널 내부 안정적인 층류 유동 특성은 물리적인 채널 외벽 없이도 외피 유동(sheath flow)을 이용함으로써, 샘플 코어 유동(sample core flow)의 안정적인 유체역학 집속(hydrodynamic focusing) 가능하게 한다.

이에, 수평 방향으로 도입되는 외피 유동을 이용하여 2 차원 유체역학 집속을 얻는 연구⁽¹⁻⁴⁾들이 수행되었으나, 최근 집속을 통한 미세유체역학 장치의 효율을 향상시키기 위해 수평 방향 뿐 아니라 수직 방향으로도 집속을 유도하는 3 차원 유체역학 집속 장치들이 연구 개발되었다.⁽⁵⁻⁷⁾ Mao 등⁽⁵⁾은 곡선형 마이크로 채널 내부의 재순환 유동(recirculating flows)을 통해 단일 층(single layer)으로 3 차원 유체역학 집속을 구현하였지만, 샘플 유체의 선택 및 유동 조건 확립이 어려운 단점을 가진다. 이에 반해 Chang 등⁽⁶⁾은 두 층의 분리된 마이크로 채널을 교차시켜 분리 벽 없이도 간단하게 3 차원 유체역학 집속을 유도한 바 있다. 하지만, 이 유체역학 집속 장치⁽⁶⁾는 수직 방향의 집속을 구현하기 위해 채널의 종횡 비(aspect ratio, AR)를 1.0 이상으로 유지해야 하므로, 일반적인 마이크로 채널의 너비(예를 들어, $300\ \mu\text{m}$)를 고려할 경우, 구현해야 하는 높이가 너무 높기 때문에 공정상 한계가 있으며, 높이의 한계로 채널 너비를 줄일 경우 압력 손실이 커진다는 단점을 가지고 있다.

Fig. 1 은 최근 본 연구 그룹에서 개발한 3 차원 유체역학 집속 장치(3-dimensional hydrodynamic focusing microfluidic device; 3D-HFMD)를 도식적으로 보여준다.⁽⁷⁾ 3D-HFMD 는 두 층으로 이루어져 있으며, 위, 아래 층의 마이크로 채널들의 교차 지점인 수직 집속 지점에 국소적인 AR 증가를 통해 다양한 AR 의 마이크로 채널에서 3 차원 유체역학 집속이 가능하게 한다.⁽⁷⁻⁹⁾ 특히, 3D-HFMD 는 수직 집속 지점에서만 높은 AR 를 가지므로, 채널 높이가 공정이 용이한 정도로 유지될 뿐 아니라 성공적으로 3 차원 유체역학 집속을 구현할 수 있으며, 압력 손실이 커지지 않는다는 장점을 가지고 있다.

이에 본 연구에서는, 제안된 3D-HFMD 채널의 형상 (AR) 및 적용될 유동 조건(Re 및 유량 비)을 변화시키며 매개변수 연구를 수행하여, 3D-HFMD 를 이용한 성공적인 3D 유체역학 집속을 위한 적합 공정 조건을 확립하였다.

2. 디자인 및 수치해석

2.1 3D-HFMD 디자인

본 연구 그룹에서 수행된 기존 연구 결과⁽⁷⁾에 기반하여 Fig. 1 의 3D-HFMD 의 각 층 채널의 너비는 $300\ \mu\text{m}$ 로 한정하였으며, 채널의 높이는 다양한 AR 영향을 알아보기 위해 $50, 100, 200\ \mu\text{m}$ 의 세 가지 높이(H)를 적용하였다. 국소적으로 높은 AR 를 얻기 위해 수직 집속 지점에서는 채널의 너비가 $50\ \mu\text{m}$ 로 줄어들게 되어 있다 (너비 $50\ \mu\text{m}$ 기준, $AR \sim 1, 2, 4$). Fig. 1(a)에 표시된 것처럼 3D-HFMD 로는 하나의 샘플 코어 유동과 $A \sim C$ 의 세 외피 유동들이 각각의 입구로 주입된다. Fig. 1(b)에서 보이듯이, 국소적으로 높아진 AR 에 의해 A, B 의 두 외피 유동이 코어 유동을 수직 방향으로 효과적으로 집속시키게 되며, 수직방향으로 집속된 코어 유동은 C 의 외피 유동에 의해 다시 수평방향으로 집속되어, 결과적으로 3 차원 집속이 이루어지게 된다.

2.2 수치해석

3D-HFMD 내부에서 일어나는 3 차원 집속 거동을 검증하기 위해, 유한 체적법(Finite Volume Method)을 기반으로 하는 상용 전산 유체역학(computational fluid dynamics) 모사 프로그램인 CFD-ACE+ (CFD Research Corporation, AL, USA)를 이용하여 집속 거동 수치모사를 수행하였다. 수치 모사를 수행함에 있어, 본 연구 그룹에서 제안한 3D-HFMD 와 Chang 등⁽⁶⁾에 의해 제안된 기존 집속 장치에 대해 모두 수치 모사를 수행하여 두 장치의 집속 성능을 비교하였다.

수치 모사에서는 비압축성, 뉴턴 유체를 가정하였으며, 정상 상태의 유동을 가정하였다. 지배 방정식으로 유체 유동에 대해서는 연속 방정식(식 (1))과 Navier-Stokes 방정식(식 (2))을 적용하였으며, 3D-HFMD 내부에 흐르는 입자(solute)에 대해서는 입자 대류-확산 방정식(species convection-diffusion equation, 식 (3))을 적용하였다.

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (2)$$

$$\frac{dc}{dt} = D \nabla^2 c \quad (3)$$

이 때, \mathbf{V} 는 유동 속도 벡터이며, ρ 와 μ 는 유체의 밀도와 동적 점도(dynamic viscosity)이며, t 는 시간, p 는 압력, c 는 입자의 농도를 의미한다.

작동 유체로는 물을 사용하였으며, 밀도, 점도 로는 각각 997 kg/m^3 , $8.55 \times 10^{-4} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 가 적용되었다. 3D-HFMD 내의 집속 거동을 파악하기 위해 선택한 입자의 확산 계수는 $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 이 적용되었다. 경계 조건으로는 두 입구에 일정 속도를 인가하였으며, 출구에는 고정 압력을 인가하였다. 입자에 대해서는 입구에서 일정 농도로 유입되게 하였으며, 출구에서는 유출이 자유롭게 하였다. 또한 모든 벽면에는 점착 조건(no-slip condition)을 적용하였다.

3D-HFMD 를 이용한 3 차원 집속에 대한 채널의 형상 및 유동 조건의 영향을 평가하기 위해, 우선 언급한 바와 같이 채널의 너비는 $300 \mu\text{m}$ 로 고정하며, 채널의 높이, H 를 $50, 100, 200 \mu\text{m}$ 로 적용하여 너비 기준 $AR \approx 0.167, 0.33, 0.67$ 에 대한 집속 영향을 고려하였다.

또한, 유동 조건의 영향을 고려하기 위해, 다음과 같이 코어 유동 유량(Q_c)과 외피 유동 유량(Q_s)의 비율인 유량 비, ϕ 를 새로 정의하였다.

$$\phi = \frac{Q_c}{Q_s} \quad (4)$$

$\phi = 1$ 을 기준으로 Q_c 를 변화시켜 $Re \approx 1.0, 10, 15$ 에서의 영향을 고려하였으며, $Re \approx 1.0$ 을 기준으로 Q_c 와 Q_s 를 변화시켜 $\phi = 1, 0.25, 0.14, 0.1$ 에서의 집속 영향을 평가하였다.

3. 수치 해석 결과 및 고찰

3.1 두 집속 장치의 집속 성능 비교

Fig. 2 는 $H = 50 \mu\text{m}$, $Re \approx 1.0$, $\phi = 1$ 에서 기존 집속 장치⁽⁶⁾와 3D-HFMD 의 3 차원 집속에 대한 수치해석 결과이다. 기존 장치(Fig. 2(a))의 경우

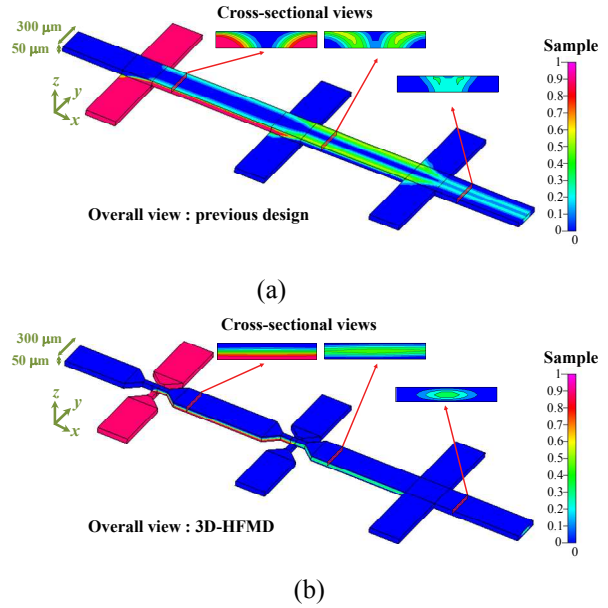


Fig. 2 Representative numerical simulation results of 3-dimensional hydrodynamic focusing behaviors for the case of $AR \approx 0.167$, $Re \approx 1.0$ and $\phi = 1$: (a) previous device and (b) 3D-HFMD

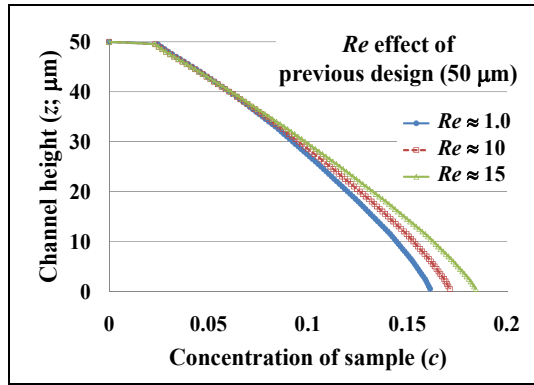
수평 방향의 집속은 잘 이루어지지만, 수직 집속 구간 의 낮은 AR 로 인해 수직 방향의 집속을 유도할 수 없음을 알 수 있으며, 3D-HFMD(Fig. 2(b))의 경우 국소적으로 증가된 AR (~ 1)로 인해 압력의 큰 손실 없이 수평 뿐 아니라 수직 방향의 집속도 효과적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

보다 정량적으로 두 집속 장치의 수직 방향 집속 성능을 평가하기 위해, 채널 단면에서 샘플 입자의 농도 분포를 측정하였다. 측정 위치는 두 번째 수직 집속 구간을 지난 $200 \mu\text{m}$ 하류 위치로, 마이크로 채널의 중앙 위치에서 채널 높이 방향으로 측정되었다. 이 때, $200 \mu\text{m}$ 지점은 다음 식 (5)와 같이 층류 유동의 입구 길이(L_e)에 기초하여 결정되었다.⁽¹⁰⁾

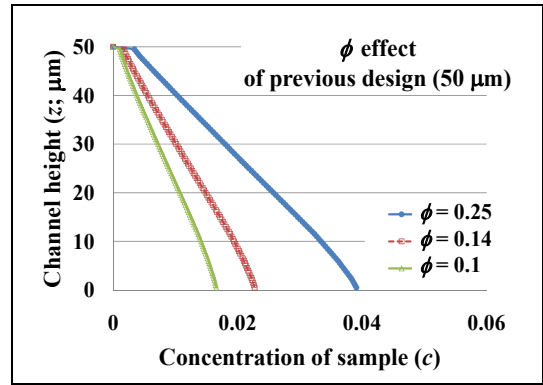
$$\frac{L_e}{H} = 0.06 Re \quad (5)$$

위 식에 기초할 경우, 본 연구에서 적용된 Re 및 H 의 최고 값은 각각 15 와 $200 \mu\text{m}$ 이므로, L_e 의 최대 값은 $180 \mu\text{m}$ 에 해당한다. 결과적으로 $200 \mu\text{m}$ 지점은, 모든 경우에 대해 유동의 완전 발달 구간에 해당한다.

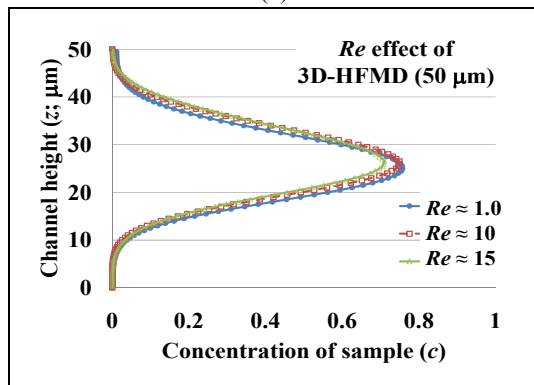
Figs. 3 과 4 는 각각 Fig. 2 의 두 가지 집속 장치에 대해 ($H = 50 \mu\text{m}$) 다양한 Re 및 ϕ 의 변화에 대한 샘플 입자 농도의 분포를 보여준다. Fig. 3(a)와 Fig. 4(a)로부터 Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 기존 집속 장치의 경우 수직 집속 구간의 낮은 AR 로 인해 본 연구에서 적용한 모든 Re 와 ϕ 에 대해 수직 방향 집속을 얻을 수 없음을 알 수 있었다.



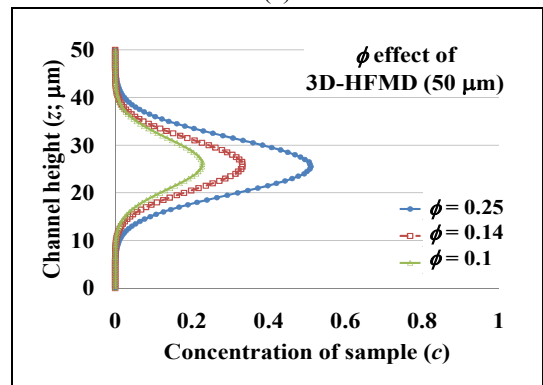
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 3 Distributions of sample solute along the vertical direction at 200 μm -downstream position after the second vertical focusing region for various Re when $AR \approx 0.167$ and $\phi = 1$: (a) previous device and (b) 3D-HFMD

Fig. 4 Distributions of sample solute along the vertical direction at 200 μm -downstream position after the second vertical focusing region for various ϕ when $AR \approx 0.167$ and $Re \approx 1.0$: (a) previous device and (b) 3D-HFMD

이에 반해 3D-HFMD 의 경우, 수직 집속 구간의 국부적 AR 증가를 통해 Fig. 3(b)와 Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이 다양한 Re 와 ϕ 에 대해 수직 방향 집속을 얻을 수 있음을 알 수 있다. Fig. 3(b)에 따르면, 모든 Re 와 ϕ 에 대해 거의 완벽하게 대칭을 이루는 수직 방향 집속이 이루어진 것을 알 수 있었다.

3.2 Re 변화에 따른 3D-HFMD 의 수직 방향 집속 거동 영향

기존 집속 장치⁽⁶⁾의 경우 수직 집속 구간의 낮은 AR 로 인해 수직 방향 집속을 얻을 수 없음을 알 수 있었다. 이에 본 연구 그룹에서 제안한 3D-HFMD⁽⁷⁾의 Re 변화에 대한 보다 구체적인 수직 집속 거동 영향을 알아보기 위해, 마이크로 채널의 높이를 50 μm 에서 100, 200 μm 으로 변화시켜 다양한 Re 에 대해 수치 모사를 수행하였다.

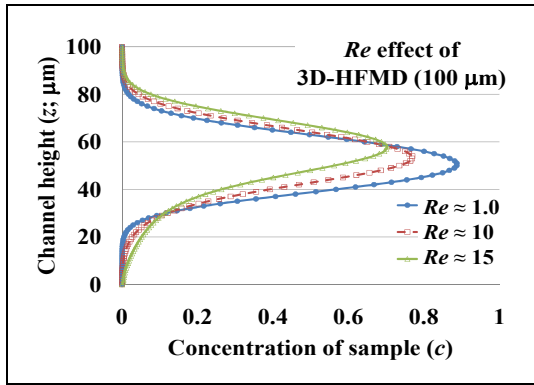
Fig. 5 는 $H = 100, 200 \mu\text{m}$ 에 대한 3D-HFMD 의 수직 방향 집속 거동을 보여준다. 결과에서 알 수 있듯이 낮은 $Re(Re \approx 1.0 \sim 10)$ 에서는 증가된 AR 및 높은 점성력의 영향으로 인해, 안정적으로 대칭을 이루는

수직 방향 집속을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 하지만 Re 가 10 보다 커지면서, 관성력의 영향이 증가하면서, 수직 집속 구간의 아래 채널에서 위 채널로 도입되는 유체의 유동 순환으로 인해 수직 방향 집속이 제대로 이루어지지 않고 있음을 알 수 있었다.

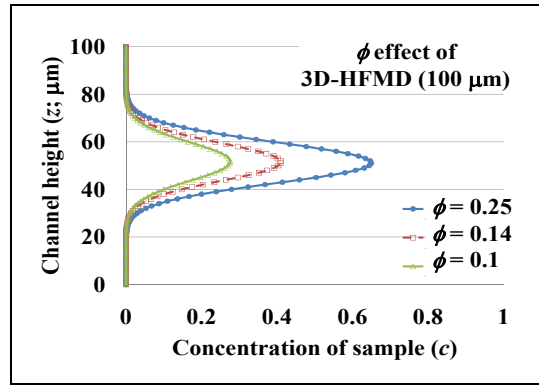
3.3 ϕ 변화에 따른 3D-HFMD 의 수직 방향 집속 거동 영향

Figs. 3(b)와 5 로부터 3D-HFMD 를 이용하여 $Re \approx 1.0$ 에서는 다양한 AR 에 대해 안정적인 수직 집속을 얻을 수 있음을 확인하였다. 이에, 고정된 코어 유동 유량에 대해 외피 유동 유량을 증가시키며 3D-HFMD 의 수직 방향 집속 거동을 파악하기 위해, ϕ 를 변화시키며 수치 모사를 수행하였다.

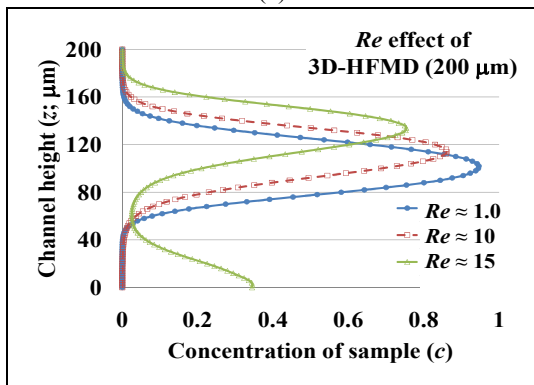
Figs. 4(b)와 6 은 $H = 50, 100, 200 \mu\text{m}$ 에 대해 $Re \approx 1.0$ 조건에서 ϕ 변화에 대한 3D-HFMD 의 수직 방향 집속 거동을 보여준다. 결과에서 알 수 있듯이 낮은 Re 로 인한 안정적인 층류 유동에 의해 대칭을 이루는 성공적인 수직 집속이 이루어지고 있음을 알 수 있다.



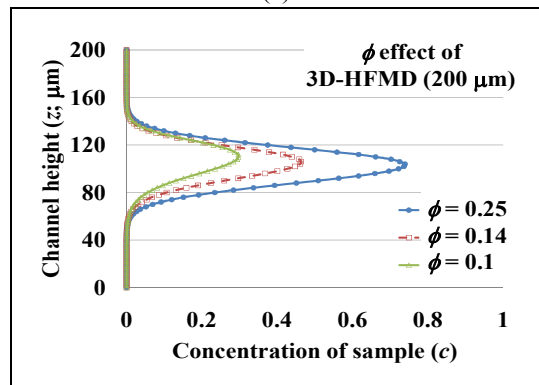
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 5 Distributions of sample solute along the vertical direction at 200 μm -downstream position after the second vertical focusing region for various Re when $\phi = 1$: (a) $AR \approx 0.33$ and (b) $AR \approx 0.67$

Fig. 6 Distributions of sample solute along the vertical direction at 200 μm -downstream position after the second vertical focusing region for various ϕ when $Re \approx 1.0$: (a) $AR \approx 0.33$ and (b) $AR \approx 0.67$

또한, 해석 결과에서 ϕ 가 커질수록 (외피 유동의 유량이 증가할수록) 코어 유동의 집속이 보다 미세하게 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 이 때, ϕ 가 커질수록 입자의 농도가 줄어드는 것처럼 보이는 이유는 본 연구에서 적용된 격자의 한계 때문으로 파악되며, 이는 채널 중심부의 보다 조밀한 격자 적용으로 해결이 가능할 것이다. 하지만, 이러한 결과는 3D-HFMD의 수직방향 집속 여부를 판단하는데 문제가 없을 것으로 생각된다. 다만, ϕ 가 커질수록 코어 유동의 집속이 미세하게 이루어지면, 농도 구배가 커져 확산이 빠르게 일어나면서 집속 성능을 저하시킬 수 있으므로, 집속의 정도에는 한계가 있을 것이다.

3.4 AR 변화에 따른 3D-HFMD의 수직 방향 집속 거동 영향

Figs. 3(b), 4(b), 5, 6 으로부터 다양한 Re 및 ϕ 에 대해 AR 의 영향을 파악할 수 있다. 모든 경우에 대해서, 채널의 AR 이 커지면서 (채널의 높이가 높아지면서) 보다 깨끗한 수직 방향 집속을 얻을

수 있었다. 이는 채널의 AR 가 커질수록 보다 안정적인 수직 방향 라미네이션(lamination)을 얻을 수 있기 때문으로 파악된다.^(6,8,9)

4. 결론

본 연구에서는, 국소적 AR 증가를 통해 안정적인 3 차원 유체역학 집속을 유도하는 본 연구 그룹의 3D-HFMD⁽⁷⁾에 대해 채널 형상 및 유동 조건을 변화시켜 매개변수 연구를 수행함으로써, 3 차원 집속 거동에 대한 영향을 평가하였다. 수치해석 결과로부터, 국소적 AR 증가를 통해 기존 집속 장치에 비해 큰 압력 손실 없이 안정적으로 유동 집속을 얻을 수 있음을 파악하였다. 낮은 Re ($Re \approx 1.0 \sim 10$)에서는 국소적으로 증가된 AR 및 높은 점성력의 영향으로 인해, 안정적으로 대칭을 이루는 수직 방향 집속을 얻을 수 있음을 알 수 있었지만, Re 가 증가할수록 관성력의 증가로 인해 수직 방향 집속이 어려워짐을 알 수 있었다. $Re \approx 1.0$ 에서 수행된 수치해석 결과로부터, 외피 유동의 유량을

코어 유동의 유량에 대해 10 배 증가($\phi = 0.1$)시키더라도 안정적으로 수직 방향 집속을 얻을 수 있었으며, 채널의 높이를 증가시킬수록 AR 의 증가로 인해 보다 안정적인 코어 유동의 집속을 유도할 수 있었다. 이러한 결과를 통해, 본 연구 그룹에서 제안한 3D-HFMD가 다양한 채널 형상 및 유동 조건에 대해 안정적인 3 차원 유체역학 집속을 구현하는 미세유체역학 시스템에 폭넓게 적용이 가능할 것으로 판단할 수 있다.

후 기

이 논문은 2008 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. R01-2008-000-20525-0)이며, 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과입니다.

참고문헌

- (1) Dittrich, P. S. and Schuille, P., 2003, "An Integrated Microfluidic System for Reaction, High Sensitivity Detection and Sorting of Fluorescent Cells and Particles," *Anal. Chem.*, Vol. 75, pp. 5767~5774.
- (2) de Mello, A. J. and Edel, J. B., 2007, "Hydrodynamic Focusing in Microstructures: Improved Detection Efficiencies in Subfemtoliter Probe Volumes," *J. Appl. Phys.*, Vol. 101, pp. 084903.
- (3) Takayama, S., Ostuni, E., LeDuc, P., Naruse, K., Ingber, D. E. and Whitesides, G. M., 2001, "Laminar Flows: Subcellular Positioning of Small Molecules," Vol. 411, pp. 1016.
- (4) Knight, J. B., Vishwanath, A., Brody, J. P. and Austin, R. H., 1998, "Hydrodynamic Focusing on a Silicon Chip: Mixing Nanoliters in Microseconds," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 80, pp. 3863~3866.
- (5) Mao, X., Waldeisen, J. R. and Huang, T. J., 2007, "Microfluidic Drifting - Implementing Three-Dimensional Hydrodynamic Focusing with a Single-Layer Planar Microfluidic Device," *Lab Chip*, Vol. 7, pp. 1260~1262.
- (6) Chang, C.-C., Huang, Z.-X. and Yang, R.-J., 2007, "Three-Dimensional Hydrodynamic Focusing in Two-Layer Polydimethylsiloxane (PDMS) Microchannels," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 17, pp. 1479~1486.
- (7) Kim, D. S., Kim, D. S., Yang, W. and Han, K., 2009, "An Efficient 3-Dimensional Hydrodynamic Focusing Microfluidic Device by means of Locally Increased Aspect Ratio," *Microelectron. Eng.*, Vol. 86, pp. 1343~1346.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Munson, B. R., Young, D. F. and Okiishi, T. H., 1998, *Fundamentals of Fluid Mechanics* (New York: Wiley).