

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.10.783

다양한 형상의 마이크로 채널 내 밀도 차를 가진 다상 층류 유동의 특성에 대한 매개변수 연구

백승호* · 김동성** · 최영기†

(2009년 7월 31일 접수, 2009년 9월 22일 수정, 2009년 9월 22일 심사완료)

Parametric Study on the Characteristics of Multiphase Laminar Flow with Density Difference in Various Microchannels

Seung Ho Paek, Dong Sung Kim and Young Ki Choi

Key Words : Microfluidics(미세유체역학), Multiphase Laminar Flow(다상 층류 유동), Parametric Study(매개 변수 연구)

Abstract

In this paper, we have performed a parametric study on the characteristics of multiphase laminar flow with density difference in various microchannels. The interface between multiphase fluids is rotated by the gravitational forces induced by density difference. The numerical simulations were carried out via commercial CFD package to study the characteristics of multiphase laminar flow. The results of the numerical simulations in this study were verified by comparing with the previously reported experimental results in the literature. We have also proposed a new dimensionless relationship between dimensionless rotation angle of interface and dimensionless parameters are proposed for square microchannels with various aspect ratios. The dimensionless relationship could be widely applied to the reliable design of various microfluidic devices dealing with multiphase laminar flow.

기호설명

l : 하류방향 길이 (m)
 w : 마이크로 채널의 너비 (m)
 H : 마이크로 채널의 높이 (m)
 D : 확산계수(m^2s^{-1})
 t_m : 전체 혼합 소요 시간(s)
 d : 혼합 특성 길이(m)
 Fr : Froude 수
 Fr^* : modified Froude 수
 Re : Reynolds 수
 u : 입구 속도 (ms^{-1})

V : 대류 속도 (ms^{-1})
 G : 중력가속도 (ms^{-1})
 ρ_h : 무거운 유체의 밀도 (kgm^{-3})
 $\Delta \rho$: 밀도 차이 (kgm^{-3})
 μ_m : 평균 점성 계수 ($kgm^{-1}s^{-1}$)
 θ : 경계 면의 회전 각도 ($^\circ$)
 θ^* : 경계 면의 회전 정도
 ξ : 경계 면의 재배열 특성길이(m)
 t_r : 체류 시간(s)

1. 서론

최근 작은 양의 유체의 유동을 이용하는 미세 유체 시스템(microfluidic system)은 마이크로 토탈 분석 시스템(micro total analysis systems), 랩-온-어-칩(Lab-on-a-chip) 및 임상 진단(clinical diagnostics)등의 다양한 분야에서 연구되고 있다.^(1~3) 그 중에서

[이 논문은 2009년도 신뢰성부문 춘계학술대회(2009. 5. 21., BEXCO) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부
 E-mail : ykchoi@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5281 FAX : (02)823-5082

* 중앙대학교 대학원 기계공학부

** 중앙대학교 기계공학부

도 특성이 다른 둘 이상의 유체의 유동을 다루는 다상 층류 유동(multiphase laminar flow)은 대상 유체의 농도를 측정하는 “T-sensor”,⁽⁴⁾ 마이크로 채널 내부에서 미세 전극(microelectrode) 등을 제작하는 미세 가공(microfabrication),⁽⁵⁻⁹⁾ 그리고 전해질 막이 없는 마이크로 연료전지⁽¹⁰⁾ 등 광범위한 미세 유체 시스템에서 활용되고 있다.⁽¹¹⁾

일반적으로 미세 유체 시스템에서 체적적인 중력은 길이의 세 제곱 승에 비례하기 때문에 특성 길이가 마이크로 단위인 미세 유체 시스템에서는 다른 유동 변수들에 비해 미미한 영향으로 무시되어 왔다. 하지만, 최근 Yoon 등⁽¹²⁾은 경계면의 재배열 현상에 영향을 미치는 유체역학 매개변수를 파악하고자 마이크로 채널에서의 다상 유체 유동 실험을 수행하여 두 유체간의 밀도 차에 의한 중력의 영향을 확인하였다. 또한 우리는 다상 층류 유동에서 두 유체의 밀도 차로 인한 중력의 영향으로 발생하는 경계면의 회전을 이용하여 마이크로 채널 내부에서 각각의 전기 접점을 가진 이중 전극을 가공한 바 있다.

기존 연구⁽¹²⁾에서는 Y-형 마이크로 채널의 두 입구에 밀도가 다른 투명한 두 유체인 물과 에탄올에 pH 지시약인 페놀프탈레인(phenolphthalein, C₂₀H₁₄O₄)과 수산화나트륨(sodium hydroxide, NaOH)을 각각 함께 주입하여 두 유체가 만나는 경계면을 특정한 색(보라색)을 띄게 하여 이를 사진을 찍어 시각적으로 측정하였다. 이를 통해 유동에 영향을 미치는 변수들과의 무차원 관계식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\xi / W = 0.75(l / H)^{0.5} (Fr^*)^{0.05} (Re / Fr^2)^{0.65} \quad (1)$$

$$\text{where } Re = \frac{\rho V H}{\mu} \text{ and } Fr^* = \sqrt{\frac{\rho V^2}{Hg\Delta\rho}}$$

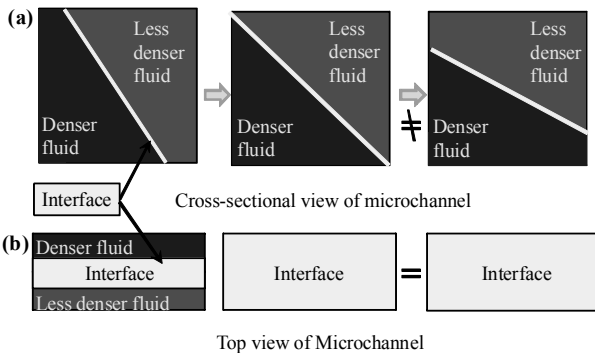


Fig. 1 Schematic diagram of multiphase laminar flow having different densities inside a microchannel: (a) cross-sectional view of microchannel and (b) top view at the same conditions

하지만, 이러한 측정 방법은 경계면의 재배열 길이(ξ)를 채널 상단에서 사진을 찍어서 측정을 하였기 때문에 경계면의 회전 정도가 일정한 범위를 벗어나게 되면, 모두 동일한 값, 즉 실험에 사용된 채널의 너비 값으로 표현되어 측정 범위가 한정되는 문제점을 가지게 된다. 다시 말해서, Fig. 1의 (a)에서 보는 것처럼 경계면의 회전은 유동이 진행됨에 따라 점차적으로 이루어지게 되는데, 두 번째 그림처럼 경계면의 회전이 일정한 범위를 넘어 세 번째 그림처럼 더 진행이 되게 되어도 (b)에서 보는 것처럼 두 경우 모두 동일하게 표현이 되게 되어 그 변화를 표현할 수 없게 된다. 그러므로 보다 정확한 경계면의 회전을 고려하기 위해서는 이를 표현할 수 있는 새로운 매개변수가 필요하다.

이를 위해 본 연구에서는 마이크로 채널 내부의 다상 유동, 특히 다양한 채널 형상을 가진 마이크로 채널 내부의 밀도가 다른 두 유체 유동의 특성에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 먼저 수치 해석을 수행하여 선행되었던 위 실험 데이터와 비교, 분석하여 수치해석 결과를 검증하였으며, 또한 실험보다 다양하고 정밀한 데이터를 얻을 수 있는 수치해석의 특성을 이용하여 새로운 변수인 경계면의 회전 각을 정의하여 유동 특성 사이의 새로운 무차원 관계식을 제시하였다.

이번 연구에서 수행된 밀도가 다른 다상 유동에서의 중력에 의한 경계면의 변화에 영향을 미치는 유체 유동 변수들에 대한 매개변수 연구(parametric study)는 마이크로 유동에서 일반적으로 무시되었던 중력의 영향에 대해 고려할 수 있게 되어 보다 정밀한 미세 유체 시스템의 디자인을 가능하게 할 수 있을 것이다.

2. 수치해석

Fig. 2는 본 연구에서 고려된 다양한 형상을 가진 Y-형 마이크로 채널 및 다상 층류 유동의 일반적인 경계면 회전 현상을 보여준다. 마이크로 채널 내부에서 밀도 차를 가진 다상 층류 유동을 모사하고자 유한 체적 법을 기반으로 하는 상용 전산 유체 역학모사 프로그램인 CFD-ACE+를 이용하여 비압축성, 뉴턴 유체를 가정하여 정상 상태 조건 하에 수행하였다.

계산 영역은 본 연구에서 제안된 다양한 형상의 단면을 가진 Y-형 마이크로 채널의 내부이며 이는 각각의 유체를 주입하기 위한 입력 채널과 두 유체가 만나서 출구로 흘러나가는 주 채널로 구성되

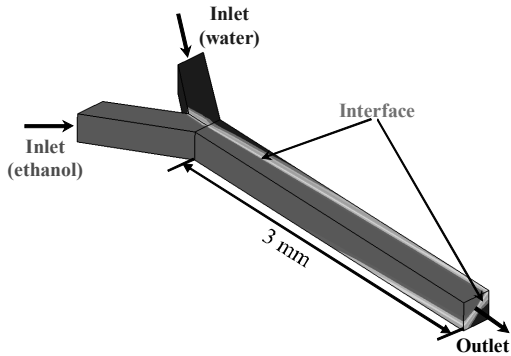


Fig. 2 Typical numerical simulation result of pressure driven laminar flow of multiphase fluids having different densities in a square microchannel using CFD-ACE+

어 있다. 주 채널의 하류방향 길이(l)는 3mm 이며, 모든 채널 단면의 너비(w)와 높이(H)는 각각 $250\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$, $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$, $500\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$, 그리고 $250\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ 인 경우에 대해 모사를 수행하였다.

서로 다른 특성을 가진 두 유체의 유동을 중력을 포함하여 계산하기 위해 CFD-ACE+ Eulerian two-fluid module 을 사용하였다. 속도에 대한 공간 차분 법으로 1 차 풍상 차분 법(first order upwind scheme)을 적용하였으며 conjugate gradient squared and preconditioning (CGS+PRE)과 algebraic multigrid(AMG) 방법이 각각 속도 장과 압력 장의 수정 방정식을 계산하기 위해 사용되었다. 경계 조건으로는 두 입구에 수직방향으로 일정속도를 주었으며, 출구에서는 고정 압력을 사용하였다. 초기 조건으로는 채널 내부에서 물과 에탄올의 부피 비가 같도록 하였다. 또한 모든 벽면에서는 점착 조건을 적용하였다.

마이크로 채널의 입구로는 밀도가 다른 두 유체가 주입된다. 이 때, 밀도가 다른 두 유체는 각각 물과 에탄올로 가정하였으며, 두 유체의 일반적인 물리적 특성 값을 이용하여 모사를 수행하였다. 이 때, 채널 내부의 유동은 마이크로 채널 단면의 높이인 H 를 특성 길이로 계산했을 때 Reynolds 수(Re)가 3~15 정도의 범위를 가지는 층류 유동이 되기 때문에 두 유체의 난류를 이용한 혼합이 일어나기 어렵기 때문에 오직 확산에 의해서만 혼합이 일어난다고 생각할 수 있다. 이와 같이 난류에 의한 혼합을 배제하면 다음과 같은 Fick 의 법칙을 얻을 수 있다.⁽¹³⁾

$$t_m \sim d^2 / D \quad (2)$$

Table 1 Conditions of fluid mechanical parameters applied in this study

Parameters	H (μm)	w (μm)	l (μm)	$\Delta\rho$ (kgm^{-3})	u (ms^{-1})
value	250, 500	250, 500	500, 1000, 1500, 2000, 2800	100, 150, 200, 300	0.005,
					(0.01)
					0.008,
					(0.016)
					0.012,
					(0.024)
					0.015,
					(0.03)

이를 통하여 혼합 소요 시간(t_m)은 혼합이 이루어진 길이(d)의 제곱에 비례하고 확산계수(D)에 반비례하게 되는 것을 알 수 있다. 본 연구의 경우 두 유체가 채널내부에 머무는 시간은 이론적으로 입력 속도와 주 채널의 길이를 고려해볼 때 0.1 초에서 0.3 초 정도가 되게 되고 일반적으로 확산계수는 $10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ 의 크기를 가지게 되므로 확산길이는 최종적으로 수 마이크로 미터 정도가 되어 결과적으로 두 유체는 경계 면을 유지하면서 유동이 진행되게 됨을 알 수 있다.

Table 1 은 경계 면의 회전에 영향을 주는 유동 변수들과 수치해석에 적용된 그 변수들 값의 변화를 정리한 것이다. 마이크로 채널 내부를 흐르는 두 유체의 밀도 차이는 밀도가 높은 유체인 물의 밀도(1000kgm^{-3})를 고정하고 밀도가 낮은 유체인 에탄올의 밀도를 조절하여 밀도 차이($\Delta\rho$)를 주었으며, 두 유체의 점성은 고정하였다. 유체의 밀도에 변화를 줄 수 있기에 유체의 온도는 모두 상온으로 고정하였으며 채널 내부에서의 유체의 속도는 입구로 주입되는 유체의 속도(u) 평균 값의 두 배이며, 두 유체가 모두 같은 속도를 가지게 하였다. 또한, 유동이 진행됨에 따라 경계 면의 회전이 점차적으로 진행 됨을 확인 하기 위해서 유동 하류 방향을 따라서 두 유체가 만나는 주 채널의 시작 점을 기준으로 $500\mu\text{m}$ 지점에서부터 $500\mu\text{m}$ 씩 거리(l)를 늘려가며 경계 면의 회전을 측정하였다. 또한 마이크로 채널의 다양한 단면의 형상을 고려하기 위해서 마이크로 채널 단면의 높이(H)와 너비(w)가 각각 $250\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$, $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$, $500\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$, $250\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ 인 경우에 대해 각각 수치해석을 수행하였다.

Fig. 3 은 본 연구에서 수행한 각각의 채널 단면에 대한 대표적인 수치해석 계산 결과들을 나타내고 있다. 마이크로 채널 내부로 주입되는 물과 에탄올은 주 채널에서 만나 경계면을 유지하며 출구

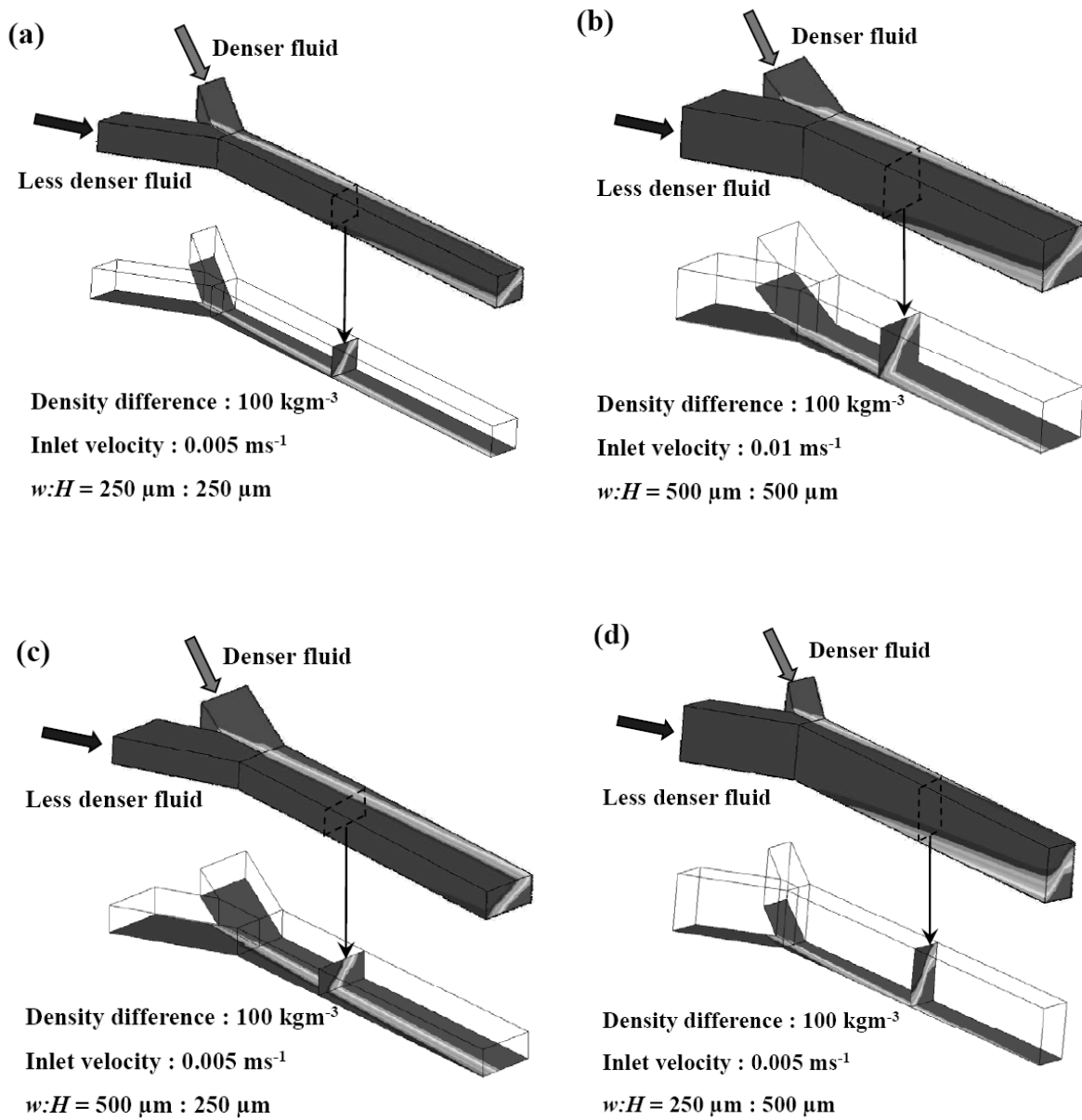
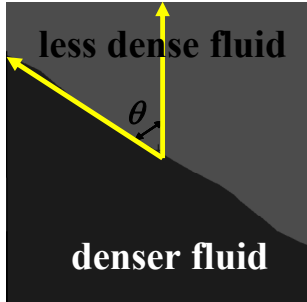


Fig. 3 Numerical simulation results of interface rotation of multiphase laminar flows in the microchannels having various cross-sections of (a) $250\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$, (b) $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$, (c) $500\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$ and (d) $250\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ at the given conditions as indicated

로 흘러나가고, 유동이 진행됨에 따라, 즉 주 채널에서 채널 출구방향으로의 길이(l)에 따라 밀도 차이에 의한 경계 면의 회전 정도가 점차적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 이러한 경계 면의 회전은 유동의 속도가 커질수록 회전 정도가 감소함을 관찰 할 수 있었으며, 이에 반해 두 유체의 밀도 차이가 커질수록 회전 정도는 증가 하는 것을 알 수 있었다.

3. 매개변수연구

먼저, 본 연구에서 수행되었던 수치해석 계산 결과를 검증하고자 선행되었던 기존의 연구 결과와 비교하였다. 본 연구에서 수행된 연구 결과를 선행되었던 실험 결과⁽¹²⁾와 동일한 조건 하에 동일한 차원해석 방식을 수행하여 다음과 같은 무차원 관계식을 얻을 수 있었다.



Microchannel cross-section

Fig. 4 Definition of rotation angle θ in this study

$$\xi / w \propto (d / H)^{0.65} (Re / Fr^{*2})^{0.67} \quad (3)$$

$$\text{where } Re = \frac{\rho V H}{\mu} \text{ and } Fr^* = \sqrt{\frac{\rho V^2}{Hg \Delta \rho}}$$

이 식을 식 (1)의 기존 실험 결과와 비교해보면 두 결과가 거의 일치함을 확인할 수 있었으며, 이를 통하여 본 연구에서 수행한 수치해석 결과를 검증 할 수 있었다.

기존 연구에서의 실험 결과는 앞서 논의하였던 대로 시각적 측정 범위의 한계를 가지고 있다. 다시 말해서, 경계면의 회전이 일정한 범위 이상 (45°) 진행이 되면 이를 표현을 할 수 없게 되기 때문에 본 연구에서는 채널의 단면을 실험보다 쉽게 관찰할 수 있는 수치해석의 장점을 이용하여 각 유동 변수들의 보다 넓은 범위에 대한 매개변수 연구를 수행하기 위해서 경계 면의 회전을 기초로 한 새로운 무차원 수인 θ^* 를 다음과 같이 정의하였다. (Fig. 4)

$$\theta^* = \theta / (\pi / 2) \quad (4)$$

식 (4)에서 새롭게 정의된 무 차원 수를 기초로 매개 변수 연구를 수행하였다. θ^* 와 다른 매개 변수 사이의 관계는 power-law 가 성립하는 것으로 가정하였으며, 각각의 결과들은 log-log 선도에 표현하여 선형회귀분석(linear regression analysis)을 통해 power 값을 도출하여 다음과 같은 관계 식을 얻었다.

$$\begin{aligned} \theta^* &\sim (w / H)^{0.2291} \Delta \rho^{0.7148} u^{-0.3937} (l / H)^{0.4435} \\ &\sim (w / H)^{0.2291} \Delta \rho^{0.7148} t_r^{-0.484} \end{aligned} \quad (5)$$

where $t_r = u / H$ (residence time)

이 식을 통해 밀도 차를 가진 다상 층류 유동에서 중력에 의한 경계 면의 회전 현상은 두 유체의 밀도 차이($\Delta \rho$)와 유동의 진행을 의미하는 유동 하류 방향 특성 길이(l)에 비례하며 유동 속도(u)에 반 비례함을 알 수 있으며, 마이크로 채널 단면의 종횡 비(aspect ratio, w/H)는 비교적 작은 영향을 가짐을 알 수 있었다. 특히, 두 유체의 밀도 차이와 유체의 체류시간(residence time, t_r)이 밀도가 다른 두 유체가 마이크로 채널 내부를 흐를 때 발생하는 경계 면의 회전 현상에서 가장 지배적인 유동 변수임을 알 수 있었다. 이 때, 두 유체가 만나서 채널을 빠져나가기 까지 걸린 시간을 의미하는 유체의 체류 시간은 유체의 속도와 채널 하류 방향의 특성 길이를 함께 고려한 것이다. 또한, 본 연구에서는 입구로 주입되는 두 유체의 속도를 동일하게 설정하였으나, 두 유체의 속도가 다를 경우에도 평균속도를 고려하면 위 관계식의 결과에 부합되는 것을 수치해석을 통해 추가적으로 확인할 수 있었다.

식 (5)를 무차원화하여 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\theta^* \sim (w / H)^{0.2291} (\Delta \rho / \rho_h)^{0.7148} (Re Fr^2)^{-0.1312} (l / H)^{0.4435} \quad (6)$$

$$\text{where } Re = \frac{\rho_h u H}{\mu}, Fr = \frac{V}{\sqrt{g H}}, \text{ and } Re Fr^2 = \frac{\rho_h u^3}{\mu g}$$

무 차원 변수로는 종횡 비인 w/H 와 두 유체간의 밀도 차를 무거운 유체의 밀도로 나눈 $\Delta \rho / \rho_h$, 그리고 유동의 속도를 표현하기 위하여 무차원 수인 Re 와 Fr 을 이용한 $Re Fr^2$ 를 이용하였다. 또한, 유동의 진행을 반영하고자 l/H 가 고려되었다.

4. 결론

본 연구에서는 마이크로 채널 내부를 흐르는 다상 층류 유동에서의 경계 면의 변화에 영향을 미치는 유동 변수들에 대한 수치해석을 수행하였으며 그 결과를 이용하여 매개 변수 연구를 수행하였다. 이를 토대로 밀도 차를 가진 다상 층류 유동에서 경계 면의 회전 현상에 영향을 미치는 지배적인 유동 변수들을 알 수 있었으며 새로운 무차원 관계식을 제시하였다. 본 연구에서 제안된 무차원 관계식을 통하여 다상 층류 유동 경계 면의 수직적인 변화를 고려할 수 있게 됨으로써 이

러한 다상 층류 유동을 이용하는 미세 유체 시스템의 보다 신뢰할 수 있는 디자인에 기초적인 기준으로써 본 연구가 의미를 가질 수 있을 것이라 예상된다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 신진교수연구지원사업 (KRF-2007-331-D00038) 및 한국과학재단의 마이크로 열 시스템 연구센터의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사한다.

참고문헌

- (1) Kenis, P.J.A., Ismagilov, R.F. and Whitesides, G.M., 2005, "Microfabrication Inside Capillaries Using Multiphase Laminar Flow Patterning," *Science*, Vol. 285, pp. 83~85.
- (2) Kenis, P.J.A., Ismagilov, R.F., Takayama, S. and Whitesides, G.M., 2000, "Fabrication Inside Microchannels Using Fluid Flow," *Acc. Chem. Res.*, Vol. 33, pp. 841~847.
- (3) Weigl, B.H. and Yager, P., 1999, "Microfluidic diffusion-Based Separation and Detection," *Science*, Vol. 283, pp. 346~347.
- (4) Kamholz, A.E., Weigl, B.H., Finlayson, B.A. and Yager, P., 1999, "Quantitative Analysis of Molecular Interaction in a Microfluidic Channel : The T-Sensor," *Anal. Chem.*, Vol. 71, pp. 5340~5347.
- (5) Ito, T., Maruyama, K., Sobue, K., Ohya, S., Niwa, O. and Suzuki, K., 2004, "Electrochemical Behavior of Parallel Opposed Dual Electrode in a Microchannel," *Electroanal.*, Vol. 16, pp. 2035~2041.
- (6) Nichols, K.P., Eijkel, J.C.T. and Gardeniers, H.J.G.E., 2008, "Nanochannels in SU-8 with Floor and Ceiling Metal Electrodes and Integrated Microchannels," *Lab Chip*, Vol. 8, pp. 173~175.
- (7) Paek S.H., Kim J.S., Hwang C.J., Choi Y.K., Kim D.S., 2008, "Microfabrication of Dual Opposite Silver Electrodes Inside a Microchannel by Means of Multiphase Laminar Flow with Density Difference," *Proceedings of the Twelfth International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (uTAS)*, Vol. 1, pp. 354-356; Paek S.H., Yang W.S., Kim J.S., Hwang C.J., Choi Y.K., Kim D.S., submitted.
- (8) Gao, Y. and Chen, L., 2008, "Versatile Control of Multiphase Laminar Flow for in-Channel Microfabrication," *Lab Chip*, Vol. 8, pp. 1695~1699.
- (9) Goluch E.D., Shaikh K.A., Ryu K., Chen J., Engel J., Liu C., 2004, "Microfluidic Method for in-Situ Deposition and Precision Patterning of Thin-Film Metals on Curved Surfaces," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 85, pp. 3629-3631.
- (10) Choban, E.R., Markoski, L.J., Wieckowski, A. and Kenis, P.J.A., 2004, "Microfluidic Fuel Cell Based on Laminar Flow," *J. Power Source*, Vol. 128, pp. 54~60.
- (11) Ismagilov R.F., Stroock A.D., Kenis P.J.A., Whitesides G.M., Stone H.A., 2000, "Experimental and Theoretical Scaling Laws for Transverse Diffusive Broadening in Two-Phase Laminar Flows in Microchannels," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76, pp. 2376-2378.
- (12) Yoon, S.K., Mitchell, M., Choban, E.R. and Kenis, P.J.A., 2005, "Gravity-Induced Reorientation of the Interface Between Two Liquids of Different Densities Flowing Laminarily Through a Microchannel," *Lab Chip*, Vol. 5, pp. 1259~1263.
- (13) Beebe, D.J., Mensing, G.A. and Walker, G.M., 2002, "Physics and Applications of Microfluidics in Biology," *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, Vol. 4, pp. 261~286.