

스로틀링을 이용한 T형 미소 채널에서의 혼합에 관한 수치 해석적 연구

장 지 환[†] · 이 도 형^{*}

Numerical Analysis on Mixing in T type Microchannel using Throttling

Jihwan Jang[†], Dohyung Lee^{*}

Key Words : Throttling(스로틀링), Mixing Efficiency(혼합효과), Microfluidics(미소유체역학), CFD(전산유체역학)

Abstract

Mixing in Y-channel micro mixer is analyzed through computational fluid dynamics. In the case of passive mixing, we investigate the effect of geometric parameters on the mixing efficiency, such as shape of throttling geometry and angle between two inlets. Mixing performance improves as two fluids join not just horizontally but both vertically and horizontally, and it also improves when channel follows throttling shapes. A numerical results substantiate the highly efficient mixing performance. It is highly beneficial to fabrication process since the proposed throttling geometry is simple, but allows high mixing ratio.

기호설명

Pe = 피클렛 수(Peclet number)

Re = 레이놀즈 수(Reynolds number)

1. 서 론

최근 Lab-on-a-Chip 의 개념이 마이크로 시스템에 적용됨에 따라 마이크로 채널내의 유체의 유동에 대한 수치적 연구가 생화학 분야나 바이오 테크놀로지 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 마이크로 채널 내의 구체적으로 이러한 해석 방법은 세포 내에서 비교적 분자의 크기가 큰 DNA 또는 단백질의 분류공정, 미소채널에서의 화학 반응, 효소 반응, 또는 극미량(1~10nl) 물질 부피량의 이동 등에 적용되고 있다.

이러한 마이크로 시스템에서 분석의 대부분은

시약이나 샘플 등의 효과적인 혼합을 필요로 한다. 그러므로 미세유체를 보다 많은 시스템에 응용하기 위해서는, 적당한 거리와 시간안에 두 가지 혹은 그 이상의 유체들을 완전히 혼합 시킬 수 있어야 한다. 마이크로 단위에서의 혼합과정은 난류가 형성되거나 형상자체가 복잡할 수록 혼합효과를 높일 수 있다. 그러나 마이크로 단위에서는 디자인에 있어서의 제약과 레이놀즈 수가 매우 작어 ($Re \ll 1$) 난류 및 관성효과를 고려할 수 없기 때문에 혼합 효율을 높인다는 것은 매우 어렵다⁽¹⁾. 그러므로 이에 많은 연구가 진행 중이다.

마이크로 채널 내에서 혼합을 하는 방법으로 크게 두 가지 방법, 즉 Passive Mixing 과 Active Mixing 방법이 있다. 첫 번째는 Passive Mixing 으로 유체 유동의 확산(Diffusion)과 방해물(Blockage) 그리고 채널 형상에 의한 혼합이다. Passive Mixing 은 외부 에너지원이 필요하지않아 시스템의 무게와 부피를 줄일 수 있는 장점이 있지만 마이크로 채널내의 혼합효과를 극대화 하기 위해 형상설계를 복잡하게 하는 것은 제조 공정상의 어려움을 초래하게 된다.

두 번째는 Active Mixing 으로 채널에 압력차이 외의 다른 형태의 외부 에너지를 가하여 유동을

[†] 한양대학교 대학원 기계공학과

^{*} 책임저자, 한양대학교 기계정보공학부

E-mail : dohyung@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5289 FAX : (031)406-5550

혼합시키는 방법이다. 온도 에너지나 전기 에너지 등에 의한 혼합이 여기에 속한다. Active Mixing은 간단한 형상으로 혼합 효과를 높일 수 있지만 기존의 마이크로 시스템에 외부 에너지원이 들어가게 되므로 시스템의 부피가 커지게 될 수밖에 없을 뿐 아니라 제작 공정상에도 시간과 비용이 추가적으로 들어가게 되는 단점이 있다.

Fig. 1은 혼합률(Mixing Rate)은 확산 유속(Diffusion Flux)에 의해 주로 결정됨을 보여준다⁽²⁾.

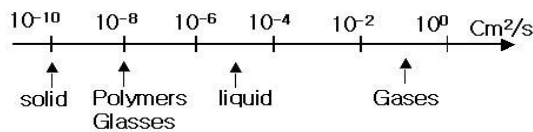


Fig. 1 Diffusion coefficient range

본 연구에서 사용되는 혼합 방법은 Passive Mixing이다. 이 방법은 마이크로 채널의 구조(geometry)에 의존하게 되므로, 본 연구에서는 마이크로 채널의 구조에 따른 흐름의 혼합 효과를 고찰하고 마이크로 유체시스템의 목적에 따라 형상을 간단하여 Passive Mixing의 단점을 최대한 줄이고 혼합효율을 최대화시키는 마이크로 채널의 구조 디자인 및 제작을 목표로 한다. 이를 해석하기 위해 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)을 이용하였다.

2. 연구 배경

마이크로 채널의 구조, 즉 형상 설계와 장애물(Blockage)인 필라 등을 이용하여 혼합을 한 이전의 Passive Mixing에 대한 연구들에 대해 알아보았다. 우선 형상 설계 연구에서 Mengerud, Josserand와 Girault은 지그재그 Y 채널을 제안하였다⁽³⁾. 이 방법은 채널관을 지그재그로 만들어 혼합하는 방법이다. 하지만 지그재그 형상이 복잡한 형상이므로 제작에 있어 단점을 보인다. Stroock와 Dertinger는 Y 채널에서 채널의 하단에 여러 개의 그루브를 놓아서 그루브 패턴의 방향 조정으로 채널내 유체의 유동방향을 조절하는 혼합에 대해 실험적으로 검증하였다⁽¹⁾. 이 연구는 혼합을 위한 새로운 채널 형상 구조를 제시했지만 이 역시 형상이 복잡하여 설계 제작하는데 있어서 큰 어려움과 혼합길이가 1cm이나 되는 등 기존의 혼합에 대한 연구에 비해 큰 이점을 보이지 못하였다. 장애물을 이용한 연구로는 Wang, Iovenitti와 Harvey이 필라의 위치와 개수에 따른 혼합 방법을 연구하였다⁽⁴⁾. 이 연구는 시뮬레이션을 통하

여 필라의 개수와 위치가 혼합에 크게 영향을 미치는 것을 보였다. 하지만 마이크로 채널 내에 필라를 놓는다는 점에서 제작에 어려움이 따를 것으로 사료된다.

본 연구에서는 기존에 나온 Passive Mixing에 대한 단점을 최대한 보완하면서 최적의 혼합 효율을 얻기위해 스로틀링에 의한 혼합 방법을 제시하고 있다. 채널내의 유동은 CFD(computation fluid dynamics)를 이용하여 수치적으로 수행하였다.

3. 수치 해석 조건

3.1 고전 유체역학 해석(Classic Fluid Dynamics)

본 연구에 사용된 유체 유동의 확산(diffusion)과 채널 구조 의한 Passive Mixing에 관한 해는 연속성과 비압축성 Navier-Stokes Equation을 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{V}) \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

여기서 μ 와 ρ 는 유체의 점성계수와 밀도이고 p 는 압력이고 \vec{V} 는 속도벡터이다.

각 유체에 대한 해는 일반적인 대류-확산 방정식을 사용하여 계산하였다. 아래 식(4)와 같이 유체의 총 농도의 합은 1로 하였다.

$$\rho \frac{DC_i}{Dt} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} C_i) = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla C_i) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n C_i = 1 \quad (4)$$

레이놀즈 수(Reynolds number)는 점성항에 대한 관성항의 비로 나타내고 페클릿 수(Peclet number)와 레이놀즈 수의 관계는 식(6)과 같이 주어진다⁽⁵⁾.

$$Re = \frac{\rho \bar{u} l}{\mu} = \frac{\bar{u} l}{\nu} \quad (5)$$

$$Pe = \frac{Re \nu}{D} \quad (6)$$

여기서 ν 는 동점성 계수이며, D 는 확산계수이다.

3.2 혼합 효율(Mixing Efficiency)

본 연구에서는 설계된 채널로부터 두 유체의 혼합된 정도를 확인하기 위해 혼합효율을 사용하였다⁽⁶⁾.

$$\left(1 - \frac{\int_0^l |c - c_\infty| dx}{\int_0^l |c_0 - c_\infty| dx} \right) \times 100 (\%) \quad (5)$$

여기서 C 는 출구에서의 농도분포를 나타내고, C_0 는 두 유체가 혼합되기 전의 초기 농도 분포를 나타내며, C_∞ 는 유체가 완전히 혼합 되었을 때의 농도 분포를 나타낸다.

4. 채널 형상 설계 및 조건

4.1 물성치 (Material Property)

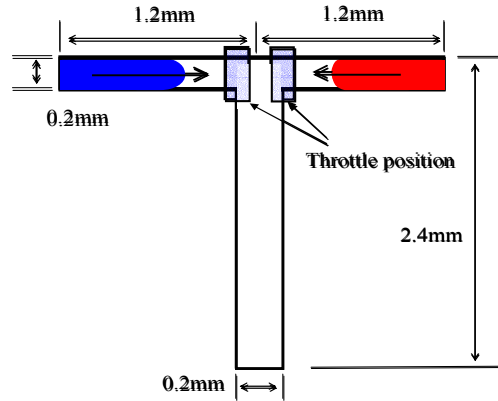
Table. 1 Properties of working fluid at 20 °C

	Viscosity (Kg μm ⁻¹ s ⁻¹)	Diffusivity (μm ² s ⁻¹)	Density (Kg μm ⁻³)
Water	9.0×10 ⁻¹⁰	1.2×10 ³	9.998×10 ⁻¹⁶
Ethanol	1.2×10 ⁻⁹	1.2×10 ³	7.89×10 ⁻¹⁶

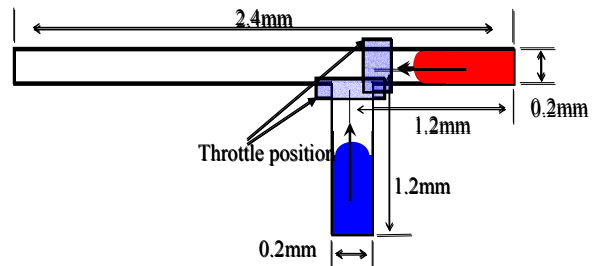
본 연구에서는 사용된 유체는 20 °C 에서의 물과 에탄올(Ethanol)을 사용하였다. 물성치는 Table. 1 에 나타나 있다. 두 유체를 각각 두 곳의 입구에 넣어주었다.

4.2 Throttle 을 이용한 채널 형상 및 조건

본 연구에서 사용된 T 형 채널의 형상과 길이는 Fig. 2 에 설명되어 있다. Fig. 2 의 (a)는 물과 에탄올, 두 유체가 180°의 각도로 합쳐지게 되는 T 채널이고 (b)는 두 유체가 90°의 각도로 합쳐지게 되는 T 채널이다. 그리고 Fig. 3 는 채널의 혼합율을 높이기 위한 Fig. 2 에 있는 Throttle position 에 위치시킬 세 가지의 스로틀링 형태를 나타낸다. Fig. 2 에 나타나 있듯이 채널출구와 입구의 폭은 200 μm 이다. Fig. 3 의 스로틀링 형상에 대한 폭은 40 μm 로 입구, 출구 폭의 1/5 의 길이이다. 그리고 혼합되는 채널부의 길이는 길이는 2.4mm 로 하였다. 페클릿 수(Peclet number)는 200 으로 일정하게 하였고 레이놀즈 수(Renolds number)는 0.24



(a)



(b)

Fig. 2 Two-dimensional T-type models

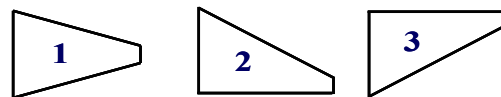


Fig. 3 Three different throttle models

이다. 레이놀즈 수가 매우 작으므로($Re \ll 1$) 층류 유동으로 수치적 해를 구하였다.

본 연구는 위의 그림(Fig. 2, Fig. 3)들을 이용하여 총 8 가지 경우의 형상에 대하여 시뮬레이션을 하였다. 두 유체가 합쳐지는 각도와 스로틀링의 형상이 혼합에 미치는 영향에 대해 연구를 하였으며 최종적으로 가장 높은 혼합효율을 나타내는 채널의 형상을 결정하였다.

5. 수치적 결과

본 연구에서는 각기 다른 형상의 혼합 효율을 확인하기 위해 모든 Case 에 대해 페클릿 수(Peclet number)를 200 으로 일정하게 하여 수치 계산을

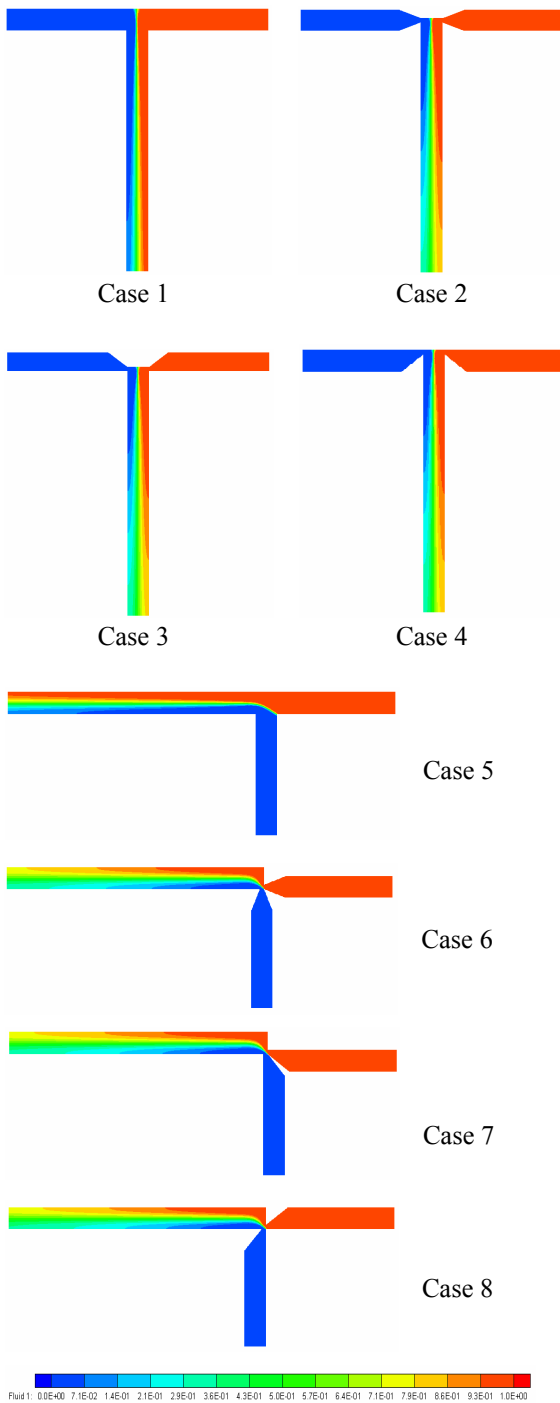


Fig. 4 Mass fraction contour

하였다. Fig. 4 는 두 유체가 합쳐지는 각도와 스로틀링의 형상에 따른 혼합 형태를 나타낸다.

총 8 가지의 채널 형상 구조가 Fig. 4 에 각 Case 들별로 나와있다. 스로틀링이 없는 Case 1 과 Case 5 의 혼합효율을 비교 해보면 Case 5 가 3% 정도 효율이 높게 나타났다. 이는 두 유체가 만나는 각도는 혼합효율에 영향을 주는 것을 나타내며 그 각도는 180 도일 때보다 90 도일 때가 효율이 높음을 보여준다. 스로틀링이 있는 채널들만을 비교하

여도 90 도의 각도일 때가 3%~5% 정도로 더 높은 효율을 나타내었다. 이는 두 유체의 합쳐지는 각도가 180 도의 각도일 때는 수평으로 만나지만 90 도의 각도일 때는 수직과 수평으로 만나므로 조금 더 높은 효율을 나타낸 것으로 사료된다.

스로틀링이 없는 채널(Case 1, 5)과 스로틀링이 있는 채널(Case 2, 3, 4, 6, 7, 8)을 비교 해보면 스로틀링이 있는 채널의 혼합효율이 25%~30% 정도의 차이로 혼합 효율이 상당히 높게 나왔다. 따라서 스로틀링이 두 유체의 혼합에 큰 영향을 주고 혼합효율을 높이는 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다. 이는 두 유체가 서로 합쳐지는 지점에서 스로틀링이 되면서 유체의 속도가 순간적으로 빨라지게 되며 이로 인하여 혼합이 이루어지게 된다.

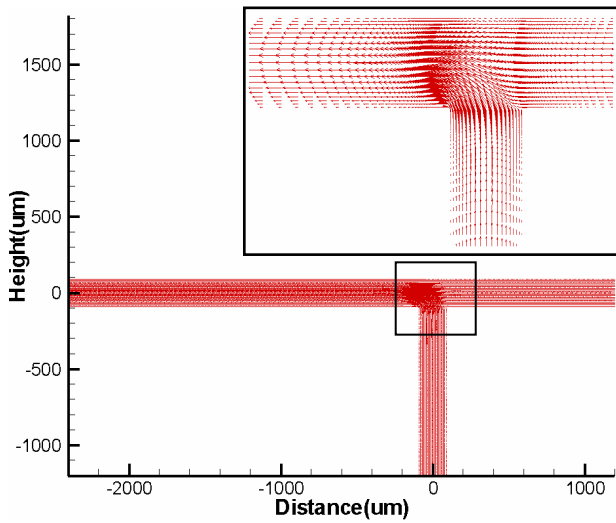
스로틀링 형상의 변화가 혼합에 미치는 영향을 보기 위해 Fig. 3 과 같은 세가지 형상의 스로틀링을 본 연구에 사용하였다. Case 2 와 Case 6 은 채널 폭이 가운데로 좁아지는 스로틀링 형상을 지니고 Case 3, 4, 7, 8 은 채널 폭이 좌측이나 우측 방향으로 좁아지는 형상을 지닌다. 혼합 효율을 살펴보면 좌측이나 우측방향으로 폭이 좁아지는 채널이 가운데로 폭 좁아지는 스로틀링보다 2%~3% 혼합효율이 다소 높게 나왔다.

좌, 우 방향으로 스로틀링 된 채널들만의 혼합 효율은 1% 정도의 차이로 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 좌, 우측으로 유체가 스로틀링이 되면서 흐름이 좀 더 교차되는 결과라고 생각된다. 최종적으로 Case 8 이 두 유체의 흐름을 가장 많이 교차시켜 혼합을 한 스로틀링 형상이며 혼합 효율 역시 71.0%로 가장 높은 효율을 나타내었다.

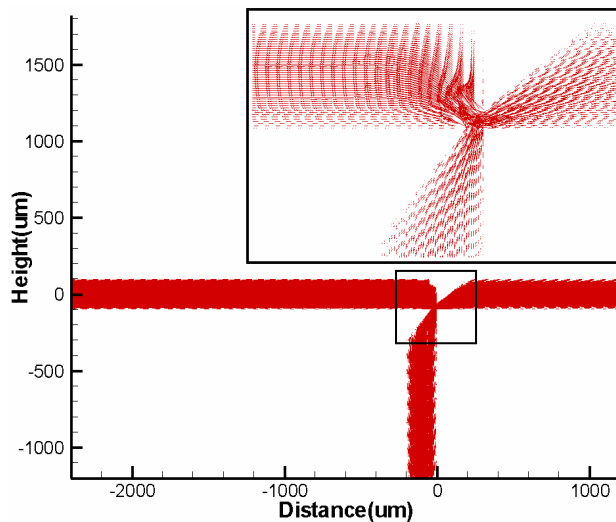
Table. 2 Mixing efficiency for different cases

Case No.	1	2	3	4
Efficiency (%)	38.5%	63.2%	65.2%	65.4%
Case No.	5	6	7	8
Efficiency (%)	41.2%	68.5%	69.5%	71.0%

Table. 2 는 모든 Case 에 대한 혼합 효율을 수치적으로 계산한 결과를 보여주고 있다. 혼합 효율의 결과로 두 유체가 합쳐지는 각도와 스로틀링 형상의 차이는 혼합 효율에 다소 영향을 미치는 것으로 나타났고 스로틀링이 있는 구조의 채널은 없는 경우에서의 채널보다 상당히 높은 효율을 나타내고 있음을 보여준다.



(a)



(b)

Fig. 5 (a) Velocity vector of microchannel without throttling , (b) Velocity vector of microchannel with throttling

Fig. 5는 가장 높은 혼합 효율을 보인 Case 8과 스로틀링 구조를 갖지 않는 일반적인 채널 Case 5의 속도 벡터 분포를 나타낸다. 각 경우의 속도 벡터 분포를 살펴보면 Case 5의 경우 속도 벡터가 교차되지 않음을 볼 수 있다. 이는 두 유체의 흐름이 잘 혼합되지 않음을 보여준다. 반면 Case 8의 경우 속도 벡터의 분포를 볼 때 두 입구가 만나는 지점에 큰 속도 벡터의 분포를 보여 속도가 갑자기 빨라짐을 보이고 서로 교차되는 속도 벡터들을 나타내고 있어 유체의 흐름이 서로 혼합됨을 알 수 있다. 따라서 스로틀링의 구조를 지닌

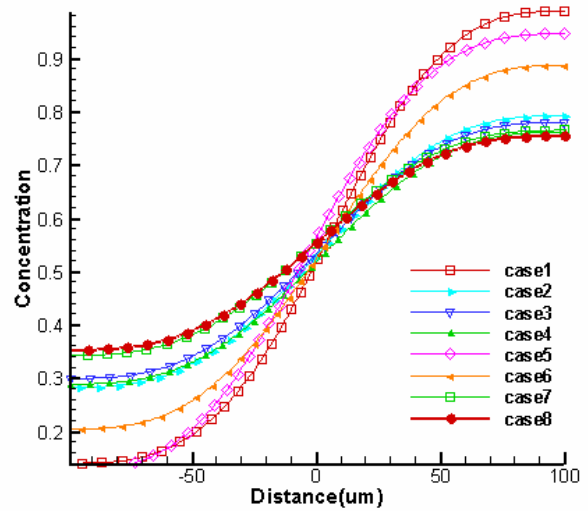


Fig. 6 Dimensionless concentration at outlet

Case 8이 스로틀링 구조를 갖지 않은 Case 5보다 혼합 효율이 30% 높게 나타났다.

Fig. 6은 각각의 Case에 따른 출구에서의 농도 분포를 나타낸 것이다. 채널의 길이가 무한히 길어진다면 농도 분포가 0.5에 근접하겠지만 본 연구에서는 주어진 채널 길이 (2.4mm)에서의 출구의 상대적인 농도 분포를 나타내고 있다. 가장 높은 효율을 보인 Case 8이 다른 Case들과 비교해 볼 때 Concentration이 0.5에 가장 근접해 있음을 보아 계산된 수치 결과 중 가장 이상적인 혼합 효율을 보였다.

6. 결론

본 연구에서는 유체 유동의 확산(Diffusion)과 채널의 형상 변화에 의한 방법인 Passive Mixing 혼합을 연구 하였다. 혼합 효율을 높이기 위한 연구로 두 유체가 합쳐지는 각도를 변화시키고 세가지 형태의 스로틀링 구조를 지닌 채널에 대한 설계를 하였다. 이에 따라 총 8가지 경우의 유동을 수치해석을 수행하여 해를 구하였다.

두 유체가 합쳐지는 각도를 고려해 볼 때 180도로 합쳐지는 경우보다 90도로 합쳐지는 경우의 혼합 효율이 다소 높게 나왔다. 이는 두 유체의 흐름에 있어서 수평, 수직 흐름으로 합쳐지는 유동이 수평 흐름만으로 합쳐지는 유동보다 혼합이 더 잘 이루어짐을 보여준다.

스로틀링이 없는 채널과 스로틀링이 있는 채널을 비교 해보면 스로틀링이 있는 채널의 경우 혼합이 훨씬 더 잘 이루어 짐을 보였다. 스로틀링으로 두 유체가 합치는 지점에서 갑자기 속도가 빨라져 두 유동의 혼합이 이루어졌음을 알 수 있다.

스로틀링 형상에 대한 영향을 볼 때 채널 입구폭의 중심으로 좁아지는 형상 보다 채널 폭이 좌측이나 우측 방향으로 좁아지는 형상이 다소 높은 효율을 보였다. 이는 채널 구조가 두 유동을 교차시키는 정도에 따른 차이로 보인다.

본 연구에서 사용된 스로틀링 방법은 구조가 간단하여 설계, 제작상의 많은 단점들을 해결할 것으로 사료된다. 본 연구에서 사용된 정보는 마이크로 채널 내에서의 혼합 효율에 응용 될 수 있다.

후 기

본 연구는 한양대학교 교내 연구비에 의해 진행되었으며 이에 감사합니다.

참고문헌

- (1) Abraham D. Stroock, et al., 2002, "Chaotic Mixer for Microchannels," *Science*, 295, 647-651.
- (2) Nam-Trung Nguyen, et al., 2002, "Fundamentals and Applications of Microfluidics," Artech House, 386-401
- (3) i.Mengeaud, V., Josserand, J. and Girault, H. H. "Mixing Processes in Zigzag Microchannel: FiniteElement Simulations and Optical Study" *Anal. Chem.* 74, 279-4286
- (4) Hengzi Wang, et al., 2002 "Optimizing layout of obstacles for Enhanced Mixing in Microchannels," *Smart Material and Structures*, 11, 662-667
- (5) Purcell E M, 1977, "Life at low Reynolds number," *Am. J. Phys.*, 45, 3-11
- (6) Jeon NL, Dertinger S K W, Chiu D T, Choi I S, Stroock A D and Whitesides GM 2000 Generation of solution and surface gradients using microfluidics systems *Langmuir* 16, 8311-16