

## 〈 기술논문 〉

## Y-채널 마이크로믹서의 혼합 증대에 관한 연구

최장욱\* · 최형일\*\* · 이동호\*\* · 이도형†

(2005년 5월 17일 접수, 2005년 11월 22일 심사완료)

## Study on Mixing Enhancement of a Y-channel Micromixer with Obstacles

Jangwook Choi, Hyung-il Choi, Dong-ho Lee and Dohyung Lee

**Key Words :** Micromixer(마이크로 믩서), Microchannel(마이크로 채널), Mixing Efficiency(혼합 효율), Concentration(농도)

## Abstract

Effective mixing gives strong advantageous impact on microfluidic applications since mixing is in general very slow process motivated by molecular diffusion transport only on the micro-scale. In this work, the mixing characteristics are analyzed in a Y-channel micromixer with obstacles. For the through analysis, our laboratory in-house unstructured grid CFD code is validated through solving a concentration transport in a uniform microchannel. The solutions well correspond to both exact solutions and those from MemCFD. Mixing in a Y-channel micromixer with obstacles is numerically investigated by the in-house code to search the optimal radius and layout of obstacles. From the simulations, the mixing efficiency appears to be proportional to the magnitude of the formation of lateral velocity component. It is also shown that the asymmetric layout and radius enlargement of obstacles greatly improves mixing efficiency.

## 1. 서 론

최근 생화학(biochemical applications)과 생명공학(biomedical engineering)분야에서 Lab-on-a-chip의 개발에 관한 연구가 점차 늘어나고 있다. 이것은 샘플의 준비, 청결화, 혼합, 반응, 분리 등의 일련의 과정들을 하나의 마이크로 시스템(integrated micro-system)상에서 이루어질 수 있도록 한 집적 장치로서, 대량생산이 가능하며 적은 양의 시료를 사용할 수 있다는 장점이 있다. 따라서, 향후 더 다양한 분야에서 널리 쓰여질 수 있다.<sup>(1)</sup>

마이크로 분석 시스템에서는 두 가지 혹은 그 이상의 시약이나 샘플을 효과적으로 혼합시키기 위한 혼합기구(mixer)가 필수적이다. 일반적으로

혼합을 증가시키기 위하여 난류를 생성시키는 혼합기구를 고려할 수 있다. 그러나, 마이크로 단위에서는 매우 작은 형상크기와 유동속도로 인해 Reynolds 수가 매우 작게 되므로( $Re \ll 1$ ), 난류를 생성시키는 것이 불가능하게 된다. 나아가 확산에 의해 대부분의 혼합이 이루어지게 되며 이는 매우 느린 속도로 진행되게 된다. 따라서, 충분한 혼합을 얻기 위해서는 복잡한 형상을 적용하거나 길이가 긴 마이크로 채널을 사용해야 한다. 결과적으로 이러한 채널은 큰 압력강하를 수반하게 되어 유체기구의 효율성을 저하시키고, 설계와 제조 공정의 어려움을 초래할 수 있다. 이를 극복하기 위해서 빠른 혼합 시간(fast mixing time)과 장치 면적(device area)을 고려하는 혼합 기구를 설계해야 한다.<sup>(2)</sup> 즉, 혼합되는 경로를 줄이면서 혼합되는 면적을 넓게 하는 것이 효과적인 혼합기구 설계의 전제 조건이 된다.

마이크로 크기의 유체 기구에서 효과적인 혼합을 위하여 여러 가지 혼합 방식들이 제안되고 있다. 이들은 크게 동적 방식(dynamic type)과 정적 방식(static type)으로 나뉘어진다. 동적 방식은 외부입력을 이용

\* 한양대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 서울대학교 기계정보공학부

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계정보공학부

E-mail : dohyung@hanyang.ac.kr

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

하여 강제적인 대류효과를 생성시키는 방법으로서, 주로 외부로부터의 강제 질량이송을 이용하는 동적 혼합(dynamic mixing with the aid of externally forced mass transport),<sup>(3)</sup> 초음파를 이용하는 혼합(mixing using ultrasonic waves),<sup>(3)</sup> 그리고, 유체 제트를 이용하는 혼합(mixing by forming nanoscale fluid jets)<sup>(4)</sup> 등이 있다. 반면, 정적 방식은 외부 입력 없이 혼합 경로의 형상변화를 통하여 혼합을 증대시키는 방식으로서, T-채널 마이크로 믹서(T-channel micromixer),<sup>(5)</sup> 유로의 분할 및 통합을 이용한 혼합(mixing by geometrically splitting and recombining substreams),<sup>(6-9)</sup> 혼돈믹서(chaotic mixer)<sup>(1)</sup>, 유동방향의 수직변환을 이용한 혼합(mixing by altering flow direction laterally)<sup>(10,11)</sup> 등이 있다. 동적 방식의 믹서들은 혼합량을 크게 할 수 있으나, 제작이 어렵고 외부 입력을 이용하기 때문에 비경제적이라 할 수 있다. 이와는 달리 정적 방식의 마이크로 믹서들은 동적 방식에 비하여 혼합량이 상대적으로 적으나, 외부 입력을 사용하지 않으며 대량생산이 가능하다. 따라서, 높은 혼합효율을 가지는 정적 믹서를 개발, 사용하는 것이 바람직하다 할 수 있다.

이들 중 Y-채널 마이크로 믹서의 내부에 장애물들을 배열시켜 혼합효율을 증대시키는 정적 방식의 믹서가 최근 Wang 등<sup>(12)</sup>에 의해 제안되었다. 이 혼합방식은 단순한 형상을 가지며 장애물의 배열구조에 따라 혼합효율을 높일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 수치계산을 통하여 채널 내부 장애물의 배열 구조와 크기 변화에 따른 혼합효율의 변화를 해석하였다. 또한, 이를 바탕으로 혼합효율의 극대화를 위한 설계 방향을 제시하고자 한다. 먼저, 기존의 비정렬격자 Navier-Stokes 해석기법을 바탕으로 농도수송방정식(concentration transport equation)을 계산할 수 있도록 확장하였다. 이의 검증을 위해서 2 차원 마이크로 채널 내에서의 혼합을 수치계산하였으며, 엄밀해(exact solution)와 상용프로그램인 MemCFD의 계산결과와 비교하였다. 다음으로 Y-채널 마이크로 믹서에서 내부 장애물의 배열과 크기를 변화시켜가며 혼합효율에의 영향을 고찰하였다. 특히 장애물이 1 개일 때와 2 개일 때 효율향상을 위한 배열구조에 관해 고찰하였으며 이를 통하여 최적설계를 이용하여 효율극대화를 가져올 수 있음을 보였다.

## 2. 지배방정식 및 수치기법

본 연구에서 대상으로 하는 마이크로 채널은 수백  $\mu\text{m}$ 의 폭을 갖는다. 이 경우 유동의 비평형효과

를 무시할 수 있는 연속류(continuum flow regime:  $\text{Kn} < 0.001$ )에 속하게 된다. 또한, 매우 느린 저속유동으로 비압축성 유동에 해당된다. 따라서, 비압축성 Navier-Stokes 방정식과 고착경계조건(no-slip wall condition)을 사용하여 해석할 수 있다. 여기에 두 유체의 혼합을 예측하기 위해 농도 수송방정식을 적용한다. 따라서, 정상 2차원 비압축성 지배방정식들을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

$$(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

$$(\vec{V} \cdot \nabla)c = \frac{1}{\text{Pe}} \nabla^2 c \quad (3)$$

여기에서,  $\vec{V}$ 는 유체 속도,  $p$ 는 압력,  $c$ 는 농도(concentration)이다. 확산을 포함하는 비압축성 유동에서 중요한 무차원수인 Reynolds 수와 Peclet 수는 다음과 같다.

$$\text{Re} = \frac{\rho \bar{u} l}{\mu} = \frac{\bar{u} l}{\nu} \quad (4)$$

$$\text{Pe} = \frac{\bar{u} l}{D} \quad (5)$$

여기에서,  $\rho$ 는 유체 밀도,  $\bar{u}$ 는 평균속도,  $\mu$ 는 점성계수,  $l$ 은 특성길이,  $\nu$ 는 동점성계수, 그리고  $D$ 는 확산계수이다. 수치계산을 위해서 비압축성 유동해석에 적절한 압력수정기법(pressure correction method)의 일종인 SIMPLE<sup>(13)</sup>법을 사용하였다. 수렴조건은 첫 번째 반복(iteration)의 L2 오차와 현 반복의 L2 오차의 비(ratio)가  $1.0\text{e-}3$  이하로 하였다. 복잡한 형상에 쉽게 적용할 수 있는 비정렬격자해법(unstructured grid method)<sup>(13,14)</sup>을 사용하였으며, 종속 스칼라 방정식(passive scalar equation)인 농도수송방정식은 유동장을 계산한 이후에 독립적으로 계산한다.

마이크로 채널에서의 두 유체의 혼합된 정도를 알아보기 위해 다음과 같이 정의된 혼합효율을 사용한다.<sup>(15)</sup>

$$\eta = \left( 1 - \frac{\int_0^{2l} |c - c_\infty| dx}{\int_0^{2l} |c_0 - c_\infty| dx} \right) \times 100\% \quad (6)$$

여기에서,  $c$ 는 출구에서의 농도를 나타내며  $l$ 은 출구 높이의 1/2이다.  $c_0$ 는 두 유체가 혼합되기 전의 초기 농도,  $c_\infty$ 는 두 유체가 완전히 혼합되었을 때의 농도를 나타낸다. 작동 유체(working

Table 1 Properties of working fluids at 20 °C

Fluid	Viscosity ( $\text{kg } \mu\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	Diffusivity ( $\mu\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )	Density ( $\text{kg } \mu\text{m}^{-3}$ )
Water	9.0E-10	1.2E+3	9.998E-16
Ethanol	1.2E-09	1.2E+3	7.89E-16

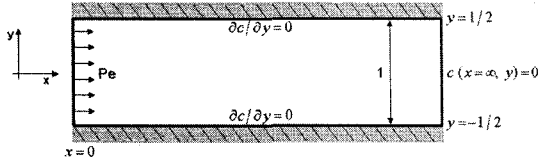


Fig. 1 Dimensionless model of two-dimensional uniform microchannel

fluid)는 물과 에탄올 (Ethanol)을 대상으로 하였으며, 20°C에서의 물성치를 적용하였다(Table 1). 이 경우 확산에 의한 혼합 시간은 Wang 등<sup>(12)</sup>에 따르면, 약  $10^{-1}$  (s) 정도(order)가 소요된다.

### 3. 해석프로그램의 검증

본 연구에서 사용할 수치계산 프로그램의 검증을 위해 먼저 Fig. 1 과 같은 2 차원 마이크로 채널 내부의 유동을 채택하였다. 채널의 길이는  $5000 \mu\text{m}$  이고 입구의 폭은  $100 \mu\text{m}$  로 하였으며 속도 조건은 균일 속도 분포로 하였다.

확산과 대류의 효과를 고려한 농도수송방정식 (concentration transport equation)은 2 차원의 긴 마이크로 채널의 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) = \text{Pe} \frac{\partial c}{\partial x} \quad (7)$$

두 유체가 들어오는 입구와 혼합되어 나가는 출구, 그리고 벽면 경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} c(x=0, 0 < y < 1/2) &= 1/2 \\ c(x=0, -1/2 < y < 0) &= -1/2 \\ c(x=\infty) &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial c}{\partial y} \right|_{y=\pm 1/2} = 0 \quad (9)$$

먼저 식 (7)~(9)의 지배방정식과 경계조건을 적용하여 채널 내부의 속도가 등속유동일 경우를 고려한다. 이때 Wu 등<sup>(16)</sup>이 구한 엄밀해는 다음과 같다.

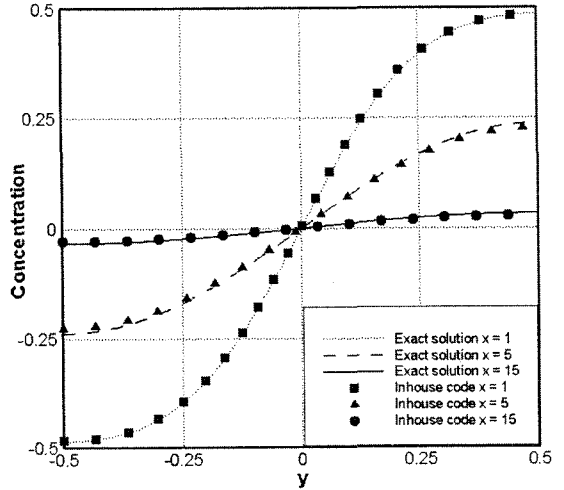


Fig. 2 Concentration variations across a microchannel (Pe=50, Re=0.053)

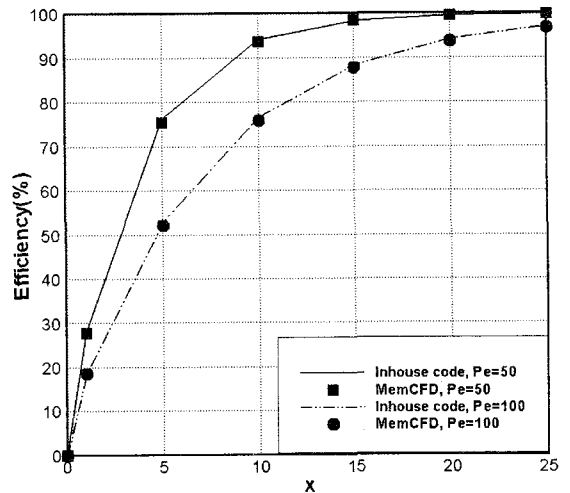


Fig. 3 Mixing efficiency variations through the micro-channel (Pe=50, Pe=100)

$$\begin{aligned} c(x, y) &= \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left[ \frac{\text{Pe} - \sqrt{\text{Pe}^2 + 4(2n-1)^2 x}}{2} \right] \\ &\times \sin[\pi(2n-1)y] \frac{1 - \cos[\pi(2n-1)]}{2n-1} \end{aligned} \quad (10)$$

이 엄밀해와 해석프로그램을 사용하여 구한 수치해를 x의 위치가 각각 1, 5, 15 인 지점에서 비교하였다. Fig. 2 에서 Pe=50 일 때 각 단면에서의 농도 분포를 도시하였다. 엄밀해와 수치해석 결과와의 평균오차는 x=5 에서 약 3.3%, x=1, 15 에서 2% 이하로 나타났다. 다음으로 등속유동조건 없

이 Navier-Stokes 방정식과 농도수송방정식을 이용하여 실제 채널 내 유동을 계산하였다. 혼합되는 두 유체는 Table 1 과 같이 물과 에탄올로 가정하였다.  $Pe=50$  과  $Pe=100$  일 경우에 대해 상용프로그램인 MemCFD 를 이용한 계산 결과와 비교하였다. Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 채널의 출구 방향으로 갈수록 혼합효율이 증가하며 Peclet 수가 작을 경우 더 짧은 혼합거리를 갖게 된다. 또한, 두 계산 결과는  $x$  축 방향의 전 구간에서 1% 미만의 차이를 보였다.

4. Y-채널 마이크로 믹서의 혼합 개선

4.1 Y-채널 마이크로 믹서의 혼합

본 연구에서는 Y-채널 마이크로 믹서에서 장애물의 배치에 따른 혼합효과를 해석하기 위해 Fig. 4 와 같은 채널을 해석대상으로 하였다. 두 개의 입구와 한 개의 출구를 가진 일반적인 Y-채널이며 두 입구 사이의 각도는  $60^\circ$  이다. 입구와 출구의 폭은 각각  $200\ \mu m$ ,  $300\ \mu m$  이고 혼합되는 채널부의 길이는  $1200\ \mu m$  이다. 두 유입구는 균일 속도 분포로 가정하였다. 여기에서도 물과 에탄올을 작동 유체로 가정 하였다.(Table 1) 먼저 Wang등<sup>(12)</sup>의 수치모사와 유사하게 장애물의 개수와 배열구조를 선택하여 수치계산을 수행하였다. 각 Case 1부터 Case 7 까지 7 가지 경우 장애물의 개수를 Table 2 에 나타내었다. Fig. 5 에서는 Peclet 수가 100 인 경우로 두 개의 장애물을 비대칭하게 위치시켰을 때의 유선과 속도벡터를 도시하였다. 장애물에 의해서 유체의 수직방향 속도성분이 생성되며 장애물을 지난 후 분리된 흐름(stream)이 다시 만나게 된다. 이와 같이 채널 내부에 장애물을 적절히 배치함으로써 확산현상뿐만 아니라 수직방향 흐름성분의 생성을 통하여 혼합을 증대시키는 데 그 목적이 있다. Fig. 6 은 Table 2 의 각 경우들에 대해서 수치해석을 수행한 결과로 질량 농도 분포를 나타낸 그림이다. 여기에서, 장애물의 반지름  $30\ \mu m$ , 입구 쪽으로부터 가장 앞쪽에 위치한 장애물의 위치는  $150\ \mu m$  이다. 그리고, Fig. 7 에서는 이에 따른 혼합효율을 나타내었다.

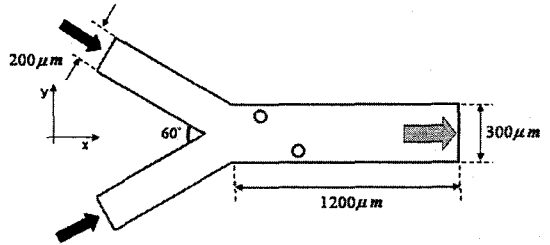


Fig. 4 Schematic of the Y-channel micromixer

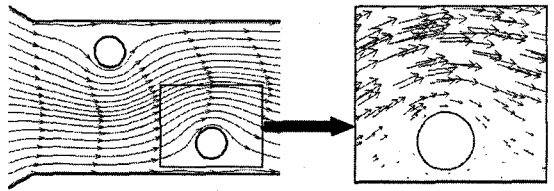


Fig. 5 Streamlines and velocity vector plot around obstacles

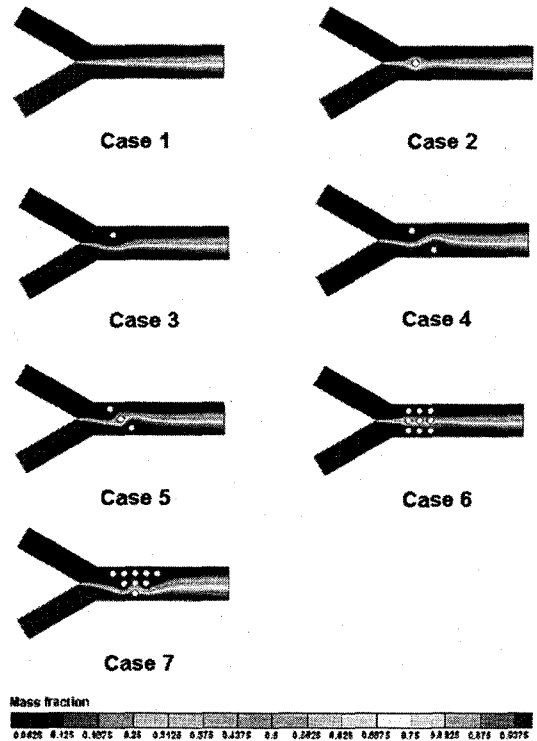


Table 2 Configurations of the mixers with obstacles

Case No.	1	2	3	4	5	6	7
No. of obstacles	0	1	1	2	3	9	9

Fig. 6 Mass concentration contours ( $Pe=100$ ) : All obstacles are located at  $x=150\ \mu m$  from the inlet and have their radii of  $30\ \mu m$

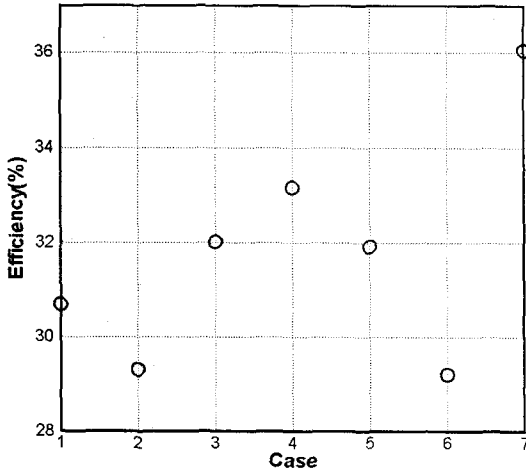


Fig. 7 Mixing efficiencies for the seven cases (illustrated at Fig. 6)

Case 1 부터 Case 7 까지 장애물의 수와 위치에 따라 확산현상과 수직방향 유체 흐름을 통해 두 유체가 혼합되는 정도가 달라지는 것을 볼 수 있다. Case 2 의 경우 Case 1보다 효율이 오히려 미소하게 감소하였다. 이는 채널의 중앙에 장애물을 위치시킬 경우 두 유체 사이의 확산 면이 감소하여 오히려 혼합이 저해되기 때문이다. Case 2 와 Case 3 은 하나의 장애물을 갖는 경우로 장애물을 벽면에 가깝게 위치시킨 Case 3의 경우 혼합효율이 약 3% 가량 더 높게 예측되었다. Case 4(33.3%) 는 장애물 2 개를 비대칭 구조로 배열한 경우로 장애물을 3개 이하로 사용한 5개의 Case 중 가장 높은 효율을 보였다. 장애물 9개를 대칭으로 배열시킨 Case 6의 경우 채널 중앙에 위치한 세 개의 장애물이 오히려 확산면을 감소시키므로 가장 낮은 효율을 나타내었다. 위의 결과를 종합해 보면, 장애물을 비대칭적으로 배열할 때, 그리고, 개수가 많을수록 혼합효율은 증가하는 경향을 보인다. 그러나, 장애물을 채널의 중앙에 위치시킨 경우에는 두 유체 사이의 확산 면의 감소로 오히려 혼합을 저해하는 결과를 보여준다.

4.2 하나의 장애물을 가진 Y-채널 마이크로믹서

다음으로 채널 내부에서의 혼합효율과 장애물에 의해 생성되는 수직방향 속도성분의 상관관계를 알아보기 위해 장애물이 하나일 경우를 고려하였다. 장애물에 의해 생성되는 채널 내부의 수직방향 속도성분의 크기를 다음과 같이 정의하였다.

$$\phi_{net} = \phi - \phi_0 \tag{11}$$

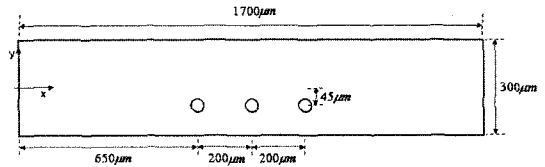


Fig. 8 Two-dimensional microchannel with obstacle

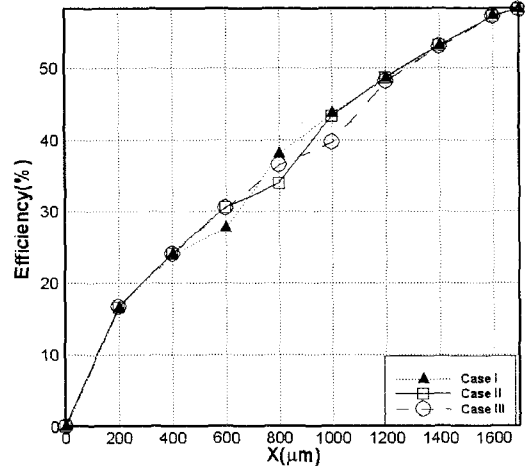


Fig. 9 Mixing efficiency variations through the channel

$$\phi = \frac{[\sum A_{c.v.} |V|]}{\sum A_{c.v.}} \tag{12}$$

여기에서,  $\phi_0$  는 장애물이 없을 경우 채널내부에서 생성되는 수직방향 속도 성분의 면적 평균 값이다. 따라서, 장애물에 의해 생성된 수직속도 성분의 평균값  $\phi_{net}$ 은 식 (11)과 같이  $\phi$ 와  $\phi_0$ 의 차로 나타낼 수 있다.

먼저 장애물의 x 축 방향의 위치에 따른 혼합효율, 그리고 수직방향속도 생성량  $\phi_{net}$ 의 상관관계를 알아보기 위해 Fig. 8 과 같이 2 차원 마이크로 채널을 이용하였다. 장애물은 입구로부터 각각 650, 850, 1050 µm 떨어진 곳(각 Case I, II, III)에 위치시켜 각각에 대해 수치해석을 수행하였다. Fig. 9 는 채널 내부에서 출구방향으로 혼합이 진행되는 것을 보여주고 있다. 혼합효율의 증가율이 장애물 앞에서 일시적으로 감소하나 장애물을 지난 후에 다시 증가하게 된다. 결과적으로 x 방향의 장애물의 위치에 관계없이 출구에서는 세 가지 경우 모두 같은 효율을 보였다. 따라서, 장애물의 위치가 x 방향에 따라 다를 때 혼합효과에는 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

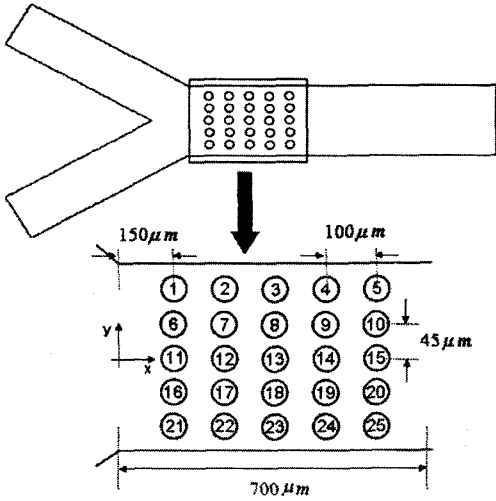


Fig. 10 Locations of obstacles

다음으로 Y-채널 내부에 하나의 장애물을 위치시켜 각 위치에 따른 혼합효과의 변화를 해석하였다. Fig. 10 과 같이 장애물의 위치를 x 축 방향으로 5 개, y 축 방향으로 5 개를 설정하여 모두 25 가지 경우를 대상으로 하였다. 채널의 전체적인 형상은 Fig. 4 와 동일하며, 중심축으로부터 x 방향으로 150 μm, y 방향으로 90 μm 에 위치한 Case 1 부터 일정간격을 유지하며 장애물을 위치시켰다. Fig. 11 의 (a), (b)와 (c), (d)는 25 가지 모든 경우를 각각 장애물의 반지름이 30 μm 와 40 μm 일 때의 혼합효율과  $\phi_{net}$  으로 나타내고 있다. 장애물의 반지름이 커지고 벽면에 가까울수록 채널 내의  $\phi_{net}$  가 증가하며 혼합효율 또한 증가하는 경향을 보인다. 그러나 2 차원 균일 채널과는 달리 Y-채널의 경우는 혼합부 입구에서  $\phi_{net}$  가 다소 감소함을 볼 수 있다. 이는 두 입구에서 들어오는 각도에 의해 생성되는 수직방향 속도성분이 장애물에 의해 생성되는 속도성분과 서로 상쇄됨으로 인해  $\phi_{net}$  이 미미하게나마 작아지게 되기 때문이다. 한편, 장애물을 벽면 부근에 위치시킬 경우 혼합효율은 조금 감소하거나 거의 변하지 않으며,  $\phi_{net}$  는 감소하게 된다.

4.3 두 개의 장애물을 가진 Y-채널 믹서

다음으로 두 개의 장애물을 사용할 경우에 대해 수치계산을 수행하였다. Fig. 12 와 같이 I 부터 VI 의 위치에 하나의 장애물을 고정시키고 나머지

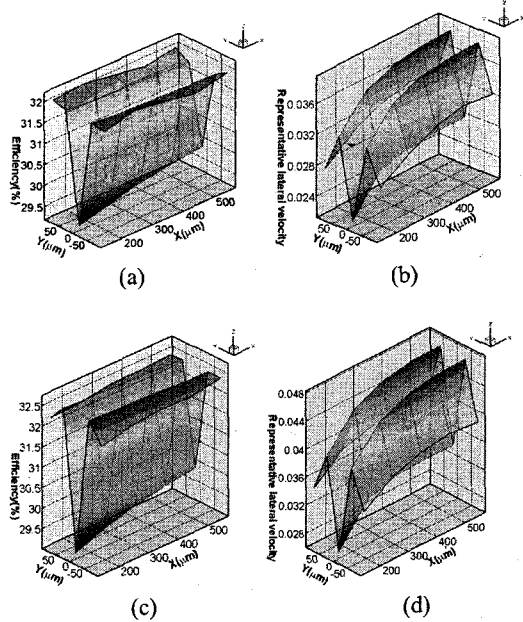


Fig. 11 Variations of efficiency and representative lateral velocity scale: (a), (b)  $r=30 \mu m$ ; (c), (d)  $r=40 \mu m$

하나의 장애물의 위치를 1 에서 20 까지 변화시켜가며 수치해석을 수행하였다. 먼저 장애물의 반지름을 30 μm 로 하였을 때 가장 높은 효율을 얻을 수 있는 조합들을 Table 3 에 나타내었다. 4.1 의 결과들과 유사하게 벽면부근과 채널의 중앙에 장애물을 하나씩 위치시킬 경우 그리고 채널 내부에 비대칭적으로 위치시킬 경우 가장 큰 효율을 얻을 수 있었다.

효율이 가장 높은 이들 조합을 가지고 장애물의 반지름을 변화시켜가며 혼합효율을 예측해보았다. Fig. 13 은 고정된 장애물 I 부터 VI 까지 x 좌표와 장애물의 반지름에 따른 혼합효율의 변화를 나타내고 있다. 여기에서, x 축은 장애물의 x 방향 위치, y 축은 장애물의 반지름 변화를 나타낸다.

(a)와 (c)는 I 부터 VI 위치의 장애물의 반지름을 30 μm 로 고정하고 나머지 장애물의 반지름을 35~50 μm 로 변화시켰을 때의 효율을 나타내고, (b)와 (d)는 Case 6, 7, 8, 14, 15, 4 의 반지름을 30 μm 로 고정하고 I 부터 VI 에 위치한 장애물의 반지름을 35~50 μm 로 변화시켰을 때의 효율을 나타낸다. 여기에서 장애물의 반경을 증가시켰을 경우 효율이 증가함을 볼 수 있다. I 에서 III 까지의 경우 x 의 위치는 효율에 크게 영향을 주지 않음을 알 수 있다[Fig. 13(a)~(b)]. 한편 IV 에서 VI 까지의 경우 x 의 위치가 채널의 뒤로 이동할수록 효율이 감소함

Table 3 Cases for high mixing efficiency

Fixed obstacle	I	II	III	IV	V	VI
Case	6	7	8	14	15	4

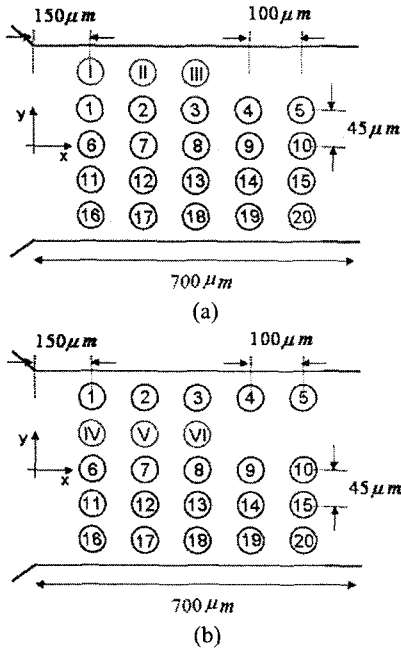


Fig. 12 Locations of obstacles

을 보여준다[Fig. 13(c)~(d)]. 가장 높은 효율은 각각 고정된 장애물 I 과 Case 6 의 조합과 IV 과 Case 14 의 경우에서 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한, 고정된 장애물 I 과 Case 6 을 조합한 경우 36.5%의 혼합효율을 얻을 수 있었으며 이는 기존 채널에서 9 개의 장애물을 비대칭으로 배열했을 경우(Fig. 7)보다 0.5% 높은 효율이다. 따라서, 장애물들의 배열 위치와 크기를 최적화함으로써 적은 수의 장애물을 가지며 높은 효율을 갖는 Y-채널 마이크로 믹서의 설계가 가능함을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 Y-채널 마이크로 믹서에서 장애물의 배열구조와 크기에 의한 혼합효율의 변화를 해석하였다. 먼저 해석 프로그램의 검증을 위해 2 차원 마이크로 채널 내부의 혼합유동을 수치 계산하여 엄밀해 그리고 MemCFD 의 해석결과와 비교하였다. 이를 통하여 수치계산이 정확한 결과를 보여줌을 확인하였다. 다음으로 Y-채널 마이크로 믹서 내부의 혼합효과 해석을 통해 다음과 같은

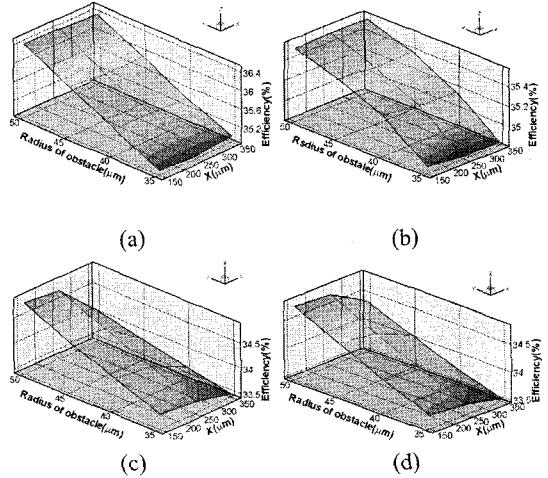


Fig. 13 Variations of mixing efficiencies for the cases with two obstacles

결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 장애물을 여러 개 사용하는 7 가지 Case 에서는 장애물의 개수가 증가할수록, 그리고 배열이 비대칭일 경우 높은 혼합효율을 얻을 수 있다. 채널중앙을 중심으로 장애물이 대칭으로 위치할 경우 유체의 혼합을 저해한다.

둘째, 하나의 장애물을 사용할 경우 채널 내에서  $\phi_{net}$  의 증가는 혼합효율의 증대를 가져옴을 알 수 있다. 또한, 장애물의 위치가 x방향에 따라 다를 때 일반적으로 혼합효과에는 영향을 미치지 않는다.

셋째, 두 개의 장애물을 가진 Y-채널 믹서에서 배열구조와 크기에 따라 기존의 9 개의 장애물을 사용하는 경우보다 높은 효율을 얻을 수 있었다. 따라서, 장애물의 크기와 위치를 최적화하여 혼합효율을 극대화할 수 있는 마이크로 믹서의 설계가 요구된다.

### 후 기

이 논문은 2005 년도 서울대학교 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

### 참고문헌

- (1) Stroock, A. D., Dertinger, S. K. W, Ajdari, A., Mezic, I., Stone, H. A. and Whitesides, G. M., 2002, "Chaotic Mixer for Microchannels," *Science*, Vol. 295, pp. 647~651.
- (2) Nguyen, N. T. and Wereley, S. T., 2002,

- Fundamentals and Applications of Microfluidics, *Artech House*, Boston, pp. 386~401.
- (3) Yang, Z., Goto, H., Matsumoto, M. and Maeda, R., 2000, "Active Micromixer for Microfluidic Systems Using Lead-Zirconate-Titanate (PZT)-Generated Ultrasonic Vibration," *Electrophoresis*, Vol. 21, Issue 1, pp. 116~119.
- (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, No. 17, pp. 3863~3866.
- (5) Jacobson, S. C., Mcknight, T. E. and Ramsey, J. M., 1999, "Microfluidic Devices for Electrokinetically Driven Parallel and Serial Mixing," *Anal. Chem.*, Vol. 71, pp. 4455~4459.
- (6) Wolfgang, E., Volker, H. and Holger, L., 2000, *Microreactors*, Wiley, New York, pp. 41~85.
- (7) Schwesinger, N., Frank, T. and Wurmus, H., 1996, "A Modular Microfluid System with an Integrated Micromixer," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 6, pp. 99~102.
- (8) Koch, M., Chatelain, D., Evans, A. G. R. and Brunnschweiler, A., 1998, "Two Simple Micromixers Based on Silicon," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 8, pp. 123~126.
- (9) Koch, M., Witt, H., Evans, A. G. R. and Brunnschweiler, A., 1999, "Improved Characterization Technique for Micromixers," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 9, pp. 156~158.
- (10) Liu, R. H., Stremmler, 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.
- (11) He, B., Burke, B. J., Zhang, X., Zhang, R. and Regnier, F. E., 2001, "A Picoliter-Volume Mixer for Microfluidic Analytical Systems," *Anal. Chem.*, Vol. 73, pp. 1942~1947.
- (12) Wang, H., Iovenitti, P., Harvey, E. and Masood, S., 2002, "Optimizing Layout of Obstacles for Enhanced Mixing in Microchannels," *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, pp. 662~667.
- (13) Demirdzic, I. and Muzafferija, S., 1995, "Numerical Method for Coupled Fluid Flow, Heat Transfer and Stress of Arbitrary Topology," *Comput. Methods appl. Mech. Engrg.*, Vol. 125, pp. 235~255.
- (14) Jessee, J. P. and Fiveland, W. A., 1996, "A Cell Vertex Algorithm for the Incompressible Navier-Stokes Equations on Non-orthogonal Grids," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 23, pp. 1~21.
- (15) Jeon, N. L., Dertinger, S. K. W., Chiu, D. T., Choi, I. S., Stroock, A. D. and Whitesides, G. M., 2000, "Generation of Solution and Surface Gradients Using Microfluidic Systems," *Langmuir*, Vol. 16, pp. 8311~8316.
- (16) Wu, Z., Nguyen, N. T. and Huang, X., 2004, "Nonlinear Diffusive Mixing in Microchannels: Theory and Experiment," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 14, pp. 604~611.