

## Y-Channel 마이크로 믹서의 혼합 개선을 위한 연구<sup>§</sup>

김진욱\* · 김상우\* · 이도형\*\* · 강형민\*\*

\* 한양대학교 기계공학부, \*\* 서울대학교 기계항공공학부

### Study of a Y-Channel Micromixer with Obstacles to Enhancing Mixing

Jin Wook Kim\*, Sang Woo Kim\*, Do Hyung Lee\*\* and Hyung Min Kang\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.,

\*\* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

(Received May 11, 2010 ; Revised July 26, 2010 ; Accepted July 28, 2010)

**Key Words:** Micromixer(마이크로 믹서), Microchannel(마이크로 채널), Mixing Efficiency(혼합효율), Concentration(농도), Optimum Design(최적설계)

**초록:** 작은 장치 스케일과 낮은 Reynolds number를 수반하는 마이크로 채널에서의 혼합효율 최대화를 위하여 사각형 장애물을 이용한 Passive 마이크로 믹서의 최적 설계를 수행하였다. 이를 위해 본 연구에서는 구조가 단순한 Y-Channel내부에 사각형 장애물의 개수와 그 크기, 그리고 위치를 변화시켜가면서 비정렬 해석 기법을 이용하여 해석을 수행하였다. 또한 최대 허용 압력 강하값을 제한 조건으로 설정하여 제한조건을 만족하면서 혼합 효율을 최대화하는 Y-Channel 형상의 최적화를 수행하였다. 이를 통하여 2개의 사각형 장애물을 사용할 경우 원형 장애물의 결과와 비교했을 때 최대 2.5% 혼합 효율이 향상됨을 확인하였다.

**Abstract:** In this study, an experiment was performed to obtain the optimum design of a passive micromixer for effective mixing by using a micro-sized device and rectangular obstacles; a low Reynolds number was maintained in the microchannel. The experiment was carried out by varying the number, size, and location of the rectangular obstacles. Further, the Y-channel's shape was optimized for maximizing the mixture ratio, which has limit qualification that an allowed value of pressure drop. The increase in the efficiency of mixing was observed to be greater than that in the case of circular obstacles by approximately 2.5%.

## 1. 서론

지난 수년간 주요 부품소재들의 핵심기술의 발전은 크기의 축소에 많은 초점이 맞추어져 있었다. 이러한 경향은 기계 분야에서도 예외는 아니어서 마이크로 스케일 시스템 즉, 초소형 시스템에 대한 관심과 기대가 갈수록 증대되고 있다. MEMS (Micro Electro Mechanical System)로 일컬어지는 미소전자기계 시스템은 첨단 기술산업으로 21세기에 들어와 우리나라를 비롯한 세계 각국에서 연구개발과 투자가 활발하게 이루어지고

있는 산업분야이다. 또한 MEMS의 가공기술 발전과 생화학(biochemical application)과 생명공학(biomedical engineering)분야에서 Lab-on-a-chip (LOC)의 개발에 관한 연구가 점차 늘어남에 따라 여러 가지 유체를 혼합하는 마이크로 믹서의 연구 또한 중요한 위치를 차지하고 있다.

마이크로 믹서는 그 작동 방식에 따라 능동적(Active) 마이크로 믹서와 수동적(Passive) 마이크로 믹서로 나눌 수 있다. Active 마이크로 믹서는 초음파(ultrasonic waves),<sup>(1)</sup> 유체 제트(forming nanoscale fluid jets)<sup>(2)</sup> 등 외부입력을 통하여 강제적으로 혼합하는 방식이며 Passive 마이크로 믹서는 T-Channel 마이크로 믹서(T-Channel micro mixer),<sup>(3)</sup> 유로의 분할 및 통합을 이용한 혼합(geometrically splitting and recombining substreams),<sup>(4-7)</sup> 혼돈믹서(chaotic mixer),

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 유체공학부 논문 춘계 학술대회(2010. 4. 22-24., 목포대) 발표논문임

† Corresponding Author, dohyung@hanyang.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

유동의 수직변환을 이용한 혼합(Mixing by altering flow direction laterally)<sup>(8,9)</sup> 등 유로의 단면이나 경로를 변환시키거나 유로 내에 장애물을 설치하여 수동적으로 혼합하는 방식이다. 혼돈믹서를 위하여 Strook 등<sup>(10)</sup>은 마이크로 채널 바닥면에 물고기 뼈 모양의 홈을 만들었고 효과적인 혼합이 이루어지는 것을 확인하였다. Liu 등<sup>(11)</sup>은 3차원 뱀 구조의 마이크로 믹서를 고안해 실험을 통해 혼합 성능향상을 확인하였고 다양한 구조를 지닌 마이크로 믹서의 혼합성능을 비교하여 뱀 구조가 가장 높은 효율을 보인 것을 확인했다. 또한 Wang 등<sup>(12)</sup>은 Y-Channel 내부에 장애물을 위치시켜 혼합을 증대시키는 방법을 제안하였다.

Passive 마이크로 믹서는 혼합을 위한 별도의 추가 장치가 불필요하기 때문에 Active 마이크로 믹서와 비교했을 때 낮은 혼합 효율을 보이지만 제작이 용이하고 경제적이다 할 수 있다. Passive 마이크로 믹서의 혼합효율 개선을 위해서는 앞서 언급한 것과 같이 유로의 단면이나 경로의 변화 또는 장애물을 설치하여야 하지만 이는 큰 압력 강하를 수반하게 되어 설계 및 제조공정상의 어려움을 유발하게 된다. 따라서 본 연구에서는 구조가 단순한 Y-Channel 내부에 사각형 장애물을 위치시키고 그 개수와 크기를 변화시켜 혼합효율의 변화를 해석하고자 한다.

## 2. 유동 모델링 및 수치기법

### 2.1 유동 모델링

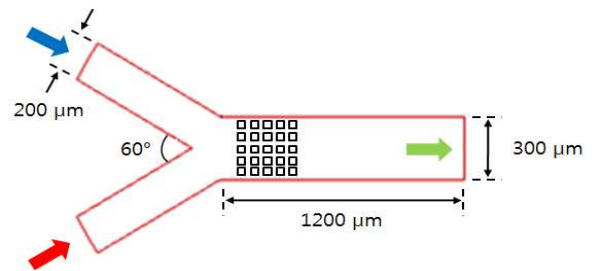
본 연구에서 혼합해석을 위하여 사용하게 될 Y-Channel 마이크로 믹서의 형상을 Fig. 1에 도시하였다. 60°의 각을 이루는 두 유입구로부터 서로 다른 두 종류의 유체가 들어와 혼합영역(mixing region)을 지나 출구로 빠져나간다. 두 유입 채널의 폭은 각각 200  $\mu\text{m}$ 이며 출구의 폭은 300  $\mu\text{m}$ 이고 혼합이 이루어지는 채널 내부의 길이는 1200  $\mu\text{m}$ 이다. 입구로 들어가는 작동유체(working fluid)는 각각 20°C의 물과 에탄올(Ethanol)로 가정하였으며, 두 유체의 물성치를 Table 1에 나타내었다.

### 2.2 유동 지배방정식

채널내부 유동은 비평형도가 극히 적은 연속류 영역(continuum flow regime:  $\text{Kn} < 0.001$ )에 해당된다. 따라서 비압축성 Navier-Stokes 방정식과 고

**Table 1** Properties of the two 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-9	1.2E+3	7.89E-16



**Fig. 1** Schematic of the Y-Channel micromixer

착경계조건(no-slip wall condition)을 사용하여 해석할 수 있다. 또한 두 작동유체 사이에 화학 변화 등의 현저한 물성치 변화가 없는 혼합만 발생할 것이므로 농도 변화를 고려하지 않은 단순 농도 수송 방정식(concentration transport equation)으로 혼합 정도를 예측할 수 있다. 이 지배방정식들을 다음과 같이 무차원 형태로 표현할 수 있다.

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

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

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

여기에서,  $\vec{V}$  는 유체의 속도 벡터,  $p$  는 압력,  $c$  는 농도(concentration)이다. 또한 각 채널 단면에서의 혼합 정도를 평가하기 위하여 농도 수송 방정식으로부터 계산된 농도분포를 이용한다. 본 연구에서는 채널 출구에서의 혼합된 정도를 알아보기 위해 다음과 같이 정의된 혼합효율<sup>(13)</sup>을 사용하였다.

$$\eta = \left( 1 - \frac{\int_0^{2l} |c - c_\infty| dx}{\int_0^{2l} |c_0 - c_\infty| dx} \right) \times 100\% \quad (4)$$

여기에서,  $c$  는 출구에서의 농도를 나타내며  $l$  은 출구 높이의 1/2 이다.  $c_0$  는 두 유체가 혼합 되기 전의 초기농도,  $c_\infty$  는 두 유체가 완전히 혼

합되었을 때의 농도를 나타낸다.

2.3 Y-Channel 혼합해석

Navier-Stokes 방정식과 농도 수송 방정식을 수치적으로 계산하기 위해서, 비압축성 유동해석에 적절한 압력수정기법(pressure correction method)<sup>(14)</sup>인 SIMPLE법을 사용하였다. 수렴조건은 오차의 비(ratio)가 1.0e-3이하로 하였다. 또한 비정렬격자해법(unstructured grid method)<sup>(15,16)</sup>을 적용하여 복잡한 형상에 쉽게 적용 가능하도록 하였으며, 종속 스칼라 방정식(passive scalar equation)인 농도 수송 방정식은 유동장을 계산한 이후에 독립적으로 계산을 수행하였다.

본 연구에서는 선행연구<sup>(17)</sup>를 통해 해석해와 상용코드간의 관계가 유사함이 검증 되었고 장애물의 형상이 원형<sup>(18)</sup>일 때 최적화 되었던 결과를 바탕으로 사각형상에 따른 최적화 위치와 크기를 찾기 위한 방향으로 진행되었다.

2.3.1 위치 변화에 따른 효율변화

장애물의 위치에 따른 효율변화를 알아보기 위해 Y-Channel의 내부에 한 개의 장애물을 Fig. 2와 같이 25가지 case에 대해 수치해석을 수행하였다. 1번 장애물의 위치는 두 유체가 만나는 혼합부로부터 x축 방향으로 150  $\mu\text{m}$ , 채널의 중심에서 y 방향으로 90  $\mu\text{m}$  떨어진 곳이다.

또한 두 개의 장애물 사용에 대해 수치계산을 수행하였다. Wang 등<sup>(12)</sup>은 장애물이 두 개인 경우 이를 비대칭으로 배열함으로써 높은 효율을 얻을 수 있다고 밝히고 있다. 이에 Fig. 3와 같이 I부터 III의 위치 중 하나의 장애물을 고정시키고 다른 하나의 장애물을 1에서 20번 중 한곳에 위치시킨 후 각각에 대해 수치해석을 수

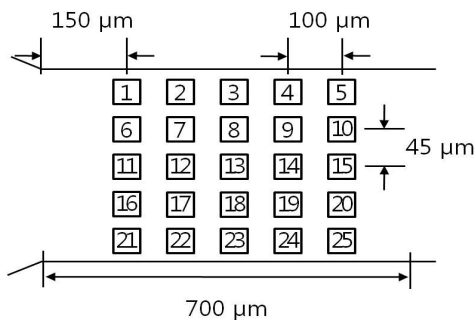


Fig. 2 Location of obstacles (one obstacle)

행하였다. 이 중 가장 높은 효율을 얻을 수 있는 조합들을 고정된 장애물(I, II, III) 각각에 대해 수치해석 한 결과 일정한 간격을 두고 비대칭적인 배열이 되었을 때 (I-14, II-15, III-15 조합) 가장 높은 효율을 얻을 수 있었다.

2.3.2 크기 변화에 따른 효율변화

장애물이 한 개인 경우 장애물의 반지름을 각각 35  $\mu\text{m}$ 와 45  $\mu\text{m}$ 로 정하여 25가지 case에 대한 혼합효율을 계산하였다. 그 결과 Fig. 4와 같이 장애물의 반지름이 커지고 벽면에 가까이 위치시킬수록 혼합효율이 증가함을 보여준다. 그러나 장애물이 벽면에 근접(y 축 방향 약 50  $\mu\text{m}$  이후) 할 경우 혼합효율이 조금 감소하거나 거의 변하지 않는다. 이는 수직방향 속도 성분의 크기가 벽면 근처에서 작게 생성되기 때문이다.

또한 장애물이 두 개인 경우 세가지 조합(I-14, II-15, III-15 조합)에서 각각의 반지름 변경에 따른 수치해석을 수행한 결과 Fig. 5를 얻을 수 있었다.

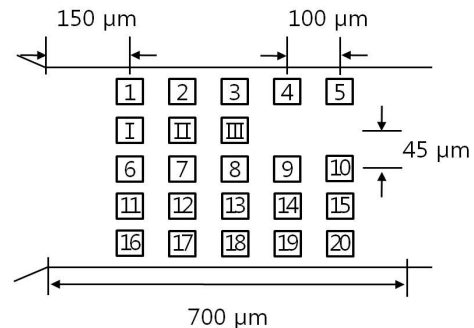


Fig. 3 Location of obstacles (two obstacles)

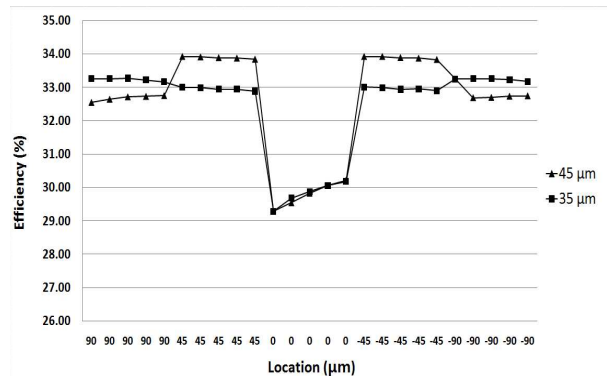


Fig. 4 Variations of mixing efficiencies for the cases with one obstacle:  $r=35\mu\text{m}$ ,  $r=45\mu\text{m}$

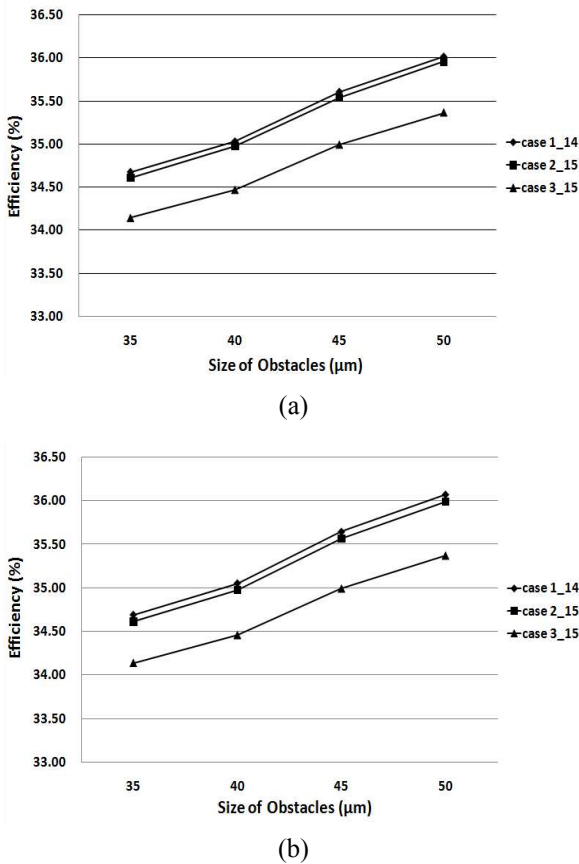


Fig. 5 Variations of mixing efficiencies for the cases with two obstacles: one obstacle fixed at I, II, III

Fig. 5(a)는 I-14, II-15, III-15의 조합에서 I, II, III의 반지름을  $30\ \mu\text{m}$ 로 고정하고 14, 15, 15의 반지름을  $35\sim 50\ \mu\text{m}$ 로 변경시켜가며 얻은 결과이다. Fig. 5(b)는 반대로 I, II, III의 반지름을 변화시켜가며 얻은 결과이다. 두 그래프에서 두 개의 장애물 중 어느 것이든 반지름을 증가시키면 효율이 증가하는 동일한 결과를 보여준다. 또한 II-15, III-15의 조합의 결과를 통해 알 수 있듯이 같은 두 장애물의 간격이 충분히 떨어지지 않았을 경우에 다른 조합에 비해 상대적으로 적은 혼합효율을 얻을 수 있었다.

### 3. 설계 요구조건 및 최적화 기법

#### 3.1 설계문제의 정식화

장애물의 개수가 다른 각각의 경우에 대하여 최적설계를 수행하였다. 먼저 장애물이 하나일 경우에 대해 설계변수는 장애물 중심의 좌표( $x_1, y_1$ )와 반지름( $r_1$ ), 총 3개로 선정하였다. 이 변

수들을 최대 혼합효율을 얻을 수 있도록 최적화하는 것이 설계문제가 되므로 다음과 같이 설계문제를 정의할 수 있다.

Maximize

$$\eta \quad (5)$$

Subject to

$$\Delta P \leq \Delta P_{critical} \quad (6)$$

식 (6)에서  $\Delta P$ 는 입구와 출구 사이의 압력강하(pressure drop)를 나타낸다. 여기에서 최대 허용 압력강하  $\Delta P_{critical}$ 을  $1.0\text{e-}6\text{MPa}$ 으로 설정하였다.

장애물이 두 개인 경우, 설계 변수는 장애물 중심의 좌표( $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$ )와 반지름 ( $r_1, r_2$ ), 총 6개로 선정하였다. 이 변수들을 최대 혼합효율을 얻을 수 있도록 최적화하는 것이 설계문제가 되므로 다음과 같이 설계문제를 정의할 수 있다.

Maximize

$$\eta \quad (7)$$

Subject to

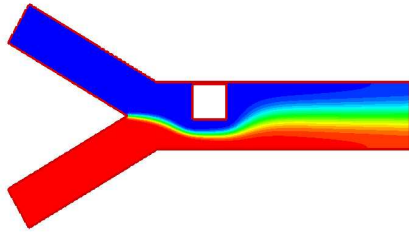
$$\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \geq r_1 + r_2 + \epsilon \quad (8a)$$

$$\Delta P \leq \Delta P_{critical} \quad (8b)$$

식 (8a)는 두 장애물이 겹치지 않도록 하기 위한 형상구속조건이 된다.

#### 3.2 형상최적화 방법

본 Y-Channel 마이크로 믹서의 경우 설계공간이 비선형적이며 다결점 구조(multi-nodal)를 가지므로 반응면 기법(Response Surface Method : RSM)과 같이 2차 다항식의 형태로 근사화를 시키는 것에는 무리가 있다. 또한 크리깅(Kriging) 모델과 같이 내재적 함수를 이용하여 근사모델을 구성할 경우 최적화 과정의 계산시간이 증가되어 효율적이지 못하다. 따라서 본 연구에서는 비선형성을 잘 표현할 수 있을 뿐만 아니라 계산시간이 비교적 짧아 효율적이라 할 수 있는 신경망 이론을 이용하여 근사모델을 구성하였다. 실험점들은 장애물이 하나인 경우에 대해 라틴방격(Latin square)을 이용하여 25개의 실험점을 선택하였다. 장애물이 두 개인 경우에는 2중 혼합법(Central Composite Design)을 이용하여 78개의 실험점을



Iteration	Efficiency (%)	Pressure Drop (Mpa)
6	37.31	9.78E-07

Fig. 6 Results of optimization : mass concentration contour at optimum configuration.

선택하였다. 이들 실험점들에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 혼합효율에 대한 근사모델을 구축하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 한 개의 장애물의 경우

장애물이 한 개인 경우에 대해 최적설계과정 중의 효율과 압력강하의 변화, 그리고 최적화된 믹서내부의 질량농도분포를 Fig. 6에 나타내었다.

한 개의 장애물의 경우 혼합효율과 수직방향 속도성분을 계산하였을 때 일반적으로 수직방향 속도성분은 혼합효율과 비례하여 증가함을 볼 수 있었다. 해석 결과를 살펴보면 x 축 방향의 변화는 혼합효율에 큰 영향을 미치지 않고 있다.

총 6 번의 반복횟수 동안 효율은 초기값 37.77% 압력강하 1.07e-06MPa에서 37.31%, 압력강하 9.78e-07MPa 로 설계 요구 조건을 만족하는 결과를 얻었다. 초기 값은 라틴방격(Latin square)을 이용해 설정된 실험 값 중 가장 높은 효율을 나타낸 실험점을 선정하였으며, 최적화를 위해 허용 압력강하를 만족하도록 반복 수치계산 되었다. 그 결과 7번째 반복 이후 압력강하는 허용압력강하 이하로 낮아지는 결과를 얻었으며, x축 방향으로 100  $\mu\text{m}$  이동하였으며, y축 방향은 반지름 크기에 맞게 중심으로 이동하였다. 반지름 또한 설계구간의 최대값인 80  $\mu\text{m}$ 로 크기가 커졌다.

##### 4.2 두 개의 장애물의 경우

두 개인 경우는 일정한 사이의 간격을 두고 비대칭적인 배열이 되었을 때(I-14, II-15 조합) 혼합효율이 가장 높게 된다. 따라서 Y-Channel을 4 등분하였을 때 Fig. 7 과 같이 2, 4 사분면에 2중

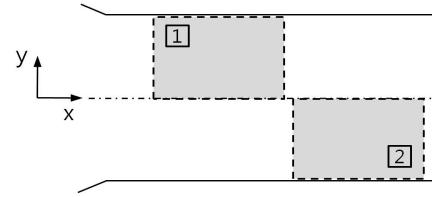
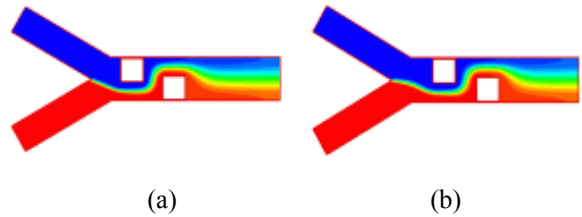


Fig. 7 Two configuration cases for initial design



Name	Iteration	Efficiency (%)	Pressure Drop (Mpa)
Case 1	6	44.55	9.94E-07
Case 2	6	44.66	9.97E-07

Fig. 8 Results of optimization : (a) contour of the case 1 (b) contour of the case 2

혼합법을 통해 실험점을 생성하였다. 각각의 실험점을 수치계산 했을 때 가장 높은 효율을 보인 두 개의 Case를 선정하였으며 이 두 초기 위치 값들을 이용하여 압력강하조건을 만족시키는 범위 내에서 각각 최적설계를 수행하였다.

이 두 최적설계 과정에서 혼합효율과 압력강하의 변화, 그리고 최적화된 형상에서의 질량농도분포를 Fig. 8 에 나타내었다. 그 결과를 살펴보면 Case 1 은 6번의 반복 수행으로 44.55% 의 혼합효율을 얻을 수 있었다. 4번째의 반복으로 44.68% 까지 효율이 상승하였으나, 압력강하가 설계한도 값  $\Delta P_{critical}$  을 벗어남으로 인해 최적설계 과정에서 설계변수 값들을 다시 조정하였다. Case 2 또한 총 6회의 반복 수행으로 44.66%의 혼합효율을 얻었다. Case 1 과 마찬가지로 6번째 반복에서 44.83% 까지 효율이 상승하였으나, 설계한도 값  $\Delta P_{critical}$  을 벗어남으로 인해 최적설계과정에서 설계변수 값들이 다시 조정되어 해석이 진행되었다.

장애물의 반지름이 증가하게 되면 혼합효율은 향상되지만 Y-Channel내부의 압력강하 또한 증가하게 된다. 따라서 최적화된 장애물의 크기와 위치는 혼합효율의 향상을 위해 장애물의 반지름 크기를 최대로 설계하였으며 그로 인해 수반되는

**Table 2** Comparison between the initial and optimum values of design variables

Design variables	Initial value	Optimum value
x1 ( $\mu\text{m}$ )	350.00	250.00
y1 ( $\mu\text{m}$ )	112.00	62.00
r1 ( $\mu\text{m}$ )	55.00	80.00
Efficiency (%)	Optimization :	37.31

**Table 3** Comparison between the initial and optimum values of design variables for case 1

Design variables	Initial value	Optimum value
x1 ( $\mu\text{m}$ )	233.00	150.00
x2 ( $\mu\text{m}$ )	467.00	448.00
y1 ( $\mu\text{m}$ )	56.00	61.40
y2 ( $\mu\text{m}$ )	-56.00	-61.40
r1 ( $\mu\text{m}$ )	55.00	80.00
r2 ( $\mu\text{m}$ )	55.00	80.00
Efficiency (%)	Optimization :	44.55

**Table 4** Comparison between the initial and optimum values of design variables for case 2

Design variables	Initial value	Optimum value
x1 ( $\mu\text{m}$ )	233.00	253.00
x2 ( $\mu\text{m}$ )	467.00	550.00
y1 ( $\mu\text{m}$ )	112.00	61.40
y2 ( $\mu\text{m}$ )	-112.00	-61.40
r1 ( $\mu\text{m}$ )	55.00	80.00
r2 ( $\mu\text{m}$ )	55.00	80.00
Efficiency (%)	Optimization :	44.66

**Table 5** Comparison between the optimum value of obstacle types

Circular Obstacle	One obstacle	Efficiency (%)	36.43
	Two obstacles	Efficiency (%)	42.12
Square Obstacle	One obstacle	Efficiency (%)	37.31
	Two obstacles	Efficiency (%)	44.66

압력강하의 값이 설계 상한값 내에서 만족할 수 있도록 장애물 위치는 최대한 벽면에 위치시켰고

장애물간 거리 또한 충분히 넓게 고려되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 혼합효율을 향상시키기 위해 두 개의 장애물을 갖는 Y-Channel 믹서의 최적설계를 수행하였다. 선행연구<sup>(18)</sup>되었던 원형 장애물의 해석과 같은 조건과 방법으로 장애물이 하나인 경우와 두 개인 경우에 대해 근사최적화 방법을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 장애물이 한 개인 경우와 두 개인 경우 모두 근사최적화를 통하여 설계요구조건들을 만족시키며 혼합효율이 향상되었다. 최적화 하는 과정에서 장애물이 벽면에 완벽히 밀착된 경우 압력강하에는 효과적이거나 혼합효율 측면에서는 내부에 위치한 장애물의 결과와 비교해 낮은 혼합효율을 나타내었다.

둘째, 장애물이 하나인 경우 장애물의 위치와 크기를 최적화함으로써 Wang 등이 제시한 9개의 장애물을 갖는 Y-Channel 믹서에 준하는 높은 혼합효율을 얻었고, Table 5에서와 같이 선행연구된 원형장애물의 결과와 비교해 약 1%의 혼합효율이 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

셋째, 장애물이 두 개인 경우 최적 설계를 통하여 설계조건을 모두 만족하는 범위 내에서 Table 5에서와 같이 선행연구된 원형장애물의 결과와 비교해 약 2.5%의 혼합효율이 향상되는 결과를 얻을 수 있었다.

따라서 본 연구에서 실시한 최적화 방법을 통하여 혼합을 위해 별도의 외부장치가 불필요한 수동적(Passive) 마이크로 믹서를 제작함으로써 혼합효율을 만족시키는 범위 내에서 제작이 간편해 대량생산이 가능할 것으로 기대된다.

## 후 기

이 논문은 2007년 지역대학우수과학자 지원사업에 의하여 지원되었음. (KRF-2007-521-D00070)

## 참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Wolfgang, E., Volker, H. and Holger, L., 2000, "Microreactors," Wiley, New York, pp. 41~85.
- (5) Schwesinger, N., Frank, T. and Wurmus, H., 1996, "Modular Microfluid System with an Integrated Micromixer," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 6, pp. 99~102.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Stroock, A. D., Dertinger, S. K. W., Ajdari, A., 2002, "Chaotic Mixer for Microchannel," *Science*, Vol. 295, pp. 647~651.
- (11) Liu, Y. Z., Kim, B. J., Sung, H. J., 2004, "Two-Fluid Mixing in a Microchannel," *J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, pp. 986~995.
- (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) 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. 311~316.
- (14) Nocedal, J. and Wright, S. J., 1999, "Numerical Optimization," Springer, New York, pp. 528~573.
- (15) Demirdzic, I. and Muzaferija, 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.
- (16) Jessee, J. P. and Fiveland, W. A., 1996, "Cell Vertex Algorithm for the Incompressible Navier-Stokes Equations on Non-Orthogonal Grids," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 23, pp. 1~21.
- (17) Choi, J. W., Choi, H. I., Lee, D. H. and Lee, D. H., 2005, "Study on Mixing Enhancement of a Y-channel Micromixer with Obstacles," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 12.
- (18) Shin, Y. S., Choi, H. I., Lee, D. H. and Lee, D. H., 2005, "Optimum Design of a Y-Channel Micromixer for Enhanced Mixing," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 30, No. 3, pp. 302~309.