

< 논문 >

혼합 개선을 위한 Y-채널 마이크로 믹서의 최적설계

신용수* · 최형일** · 이동호*** · 이도형†

(2005년 8월 24일 접수, 2006년 2월 7일 심사완료)

Optimum Design of a Y-channel Micromixer for Enhanced Mixing

Yong-su Shin, Hyung-il Choi, Dong-ho Lee and Dohyung Lee

Key Words : Micromixer(마이크로 믹서), Microchannel(마이크로 채널), Mixing Efficiency(혼합 효율), Mass Concentration(질량농도), Optimum Design(최적설계)

Abstract

Effective mixing plays a crucial role in microfluidics for biochemical applications. Owing to the small device scale and its entailing the low Reynolds number, the mixing in microchannels proceeds very slowly. In this work, we optimize the configuration of obstacles in the Y-channel mixer in order to attain maximum mixing efficiency. Before the optimum design, mixing characteristics are investigated using unstructured grid CFD method. Then, the analysis method is employed to construct the approximate analysis model to be used in the optimization procedure. The main optimization tool in the present work is sequential quadratic programming method. Using this approximate optimization procedure, we may obtain the optimum layout of obstacles in the Y-channel mixer in an efficient manner, which gives the maximum mixing efficiency.

1. 서 론

최근 생화학(biochemical applications)과 생명공학(biomedical engineering)분야에서 미세유체기계 시스템(microfluidic systems)이 널리 이용되기 시작하였다. 여기에 관련된 응용 과정들로는 샘플의 준비, 청결화, 혼합, 화학반응, 분리 등이 있다. 이러한 일련의 과정들을 하나의 집적 마이크로 시스템(integrated micro-system)상에서 이루어질 수 있도록 한 것이 Lab-on-a-chip 이다. 이것의 장점으로는 대량생산의 가능과 적은 양의 시료를 사용할 수 있다는 것이다. 따라서, 향후 더 다양한 분야에 적용되어질 수 있을 것으로 전망된다.⁽¹⁾

마이크로 분석 시스템에서 시약이나 샘플을 효과적으로 혼합시키기 위한 혼합기구(Mixer)가 필수적이다. 전통적인 매크로 영역에서는 난류생성

을 통해 혼합을 증진시키는 것이 효과적인 방법이라 할 수 있다. 그러나, 마이크로 크기의 유체기구에서는 매우 작은 특성길이와 유동속도로 인해 난류를 생성시키는 것이 불가능하게 된다. 나아가 혼합은 대부분 확산에 의해 일어나므로 매우 느리게 진행되게 된다. 따라서, 효과적인 혼합을 위해서는 복잡한 형상을 적용하거나 아주 긴 마이크로 채널을 이용하여야 한다. 이는 큰 압력강하를 수반하게 될 가능성이 있으며, 설계와 제조 공정상의 어려움을 유발시킬 수 있다. 이를 극복하기 위해서 단순한 형상을 가지며, 혼합되는 경로를 줄이면서 면적은 넓게 하는 것이 효과적인 믹서설계의 전제조건이 된다.⁽²⁾

마이크로 믹서는 혼합방법에 따라 크게 동적 방식(dynamic type)과 정적 방식(static type)으로 나뉘어진다. 동적 방식은 유체를 휘젓기 위해 외부동력을 이용한다. 이러한 방식에는 주로 외부로부터의 강제질량이송을 이용하는 동적 혼합(dynamic mixing with the aid of externally forced mass transport),⁽³⁾ 초음파를 이용하는 혼합(mixing using ultrasonic waves),⁽³⁾ 그리고 유체 제트를 이용하는 혼합(mixing by forming nanoscale fluid jets)⁽⁴⁾ 등이 있

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

*** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계정보공학부

E-mail : dohyung@hanyang.ac.kr

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

다. 한편, 정적 방식의 믹서는 외부입력 없이 혼합 경로의 변화를 통하여 혼합을 증대시키는 방식이다. 여기에는 T-채널 마이크로 믹서(T-channel micromixer),⁽⁵⁾ 유로의 분할 및 통합을 이용한 혼합(mixing by geometrically splitting and recombining substreams),⁽⁶⁻⁹⁾ 혼돈믹서(chaotic mixer),⁽¹⁾ 유동방향의 수직변환을 이용한 혼합(mixing by altering flow direction laterally)^(10,11) 등이 있다. 동적 방식의 믹서들은 뛰어난 혼합특성을 얻을 수는 있으나 제작이 어렵고 외부입력을 이용하기 때문에 비경제적이라 할 수 있다. 이와는 달리 정적 방식의 마이크로 믹서들은 외부입력을 사용하지 않고 용이하게 많은 양을 처리할 수 있다는 장점이 있다. 그러므로, 높은 혼합효율을 갖는 정적 방식의 믹서개발 및 사용이 바람직하다 할 수 있다.

정적 방식 마이크로 믹서의 한 종류로서 장애물을 Y-채널 내부에 위치시켜 혼합을 증대시키는 방법이 최근 Wang 등⁽¹²⁾에 의해 제안되었다. 마이크로 채널의 형상은 단순하나 장애물들의 위치와 크기를 적절히 조절함으로써 혼합효율을 증가시킬 수 있다. 이에 본 연구에서는 장애물이 하나 그리고 두 개일 경우에 대하여 혼합을 해석하였다. 이 결과를 바탕으로 실제 최적설계를 수행하여 효율을 극대화하였다. 먼저 해석 단계에서는 비점렬격자 Navier-Stokes 해석기법⁽¹³⁾에 농도 수송 방정식(concentration transport equation)을 해석하는 모듈을 추가하였다. 이를 이용하여 Y-채널 내부에 추가된 장애물의 반지름과 배열구조에 따른 혼합효율의 변화를 해석하였다. 장애물이 한 개와 두 개일 때의 경향을 파악함으로써 혼합효율을 증대시키는 최적설계의 방향을 제시한다. 또한 본 연구에서는 이를 바탕으로 근사최적화 방법을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 장애물이 있는 Y-채널 내부와 같이 비선형성이 강한 영역을 적절히 묘사 할 수 있도록 신경망(neural network) 이론⁽¹⁴⁾을 이용하여 근사모델(approximate analysis model)을 구성하였다. 이 근사모델에 대하여 복잡한 해 공간에서도 정밀도가 강한 SQP(Sequential Quadratic Programming)⁽¹⁵⁾를 이용하여 최적화를 수행하였다. 이를 통하여 장애물이 하나일 경우와 두 개일 경우 최대 효율을 갖는 믹서형상을 얻을 수 있었다.

2. 유동 모델링 및 해석

2.1 유동모델

본 연구에서 대상으로 하는 Y-채널 마이크로 믹

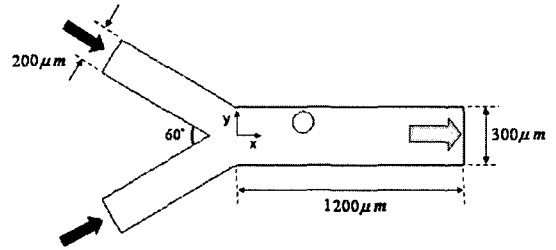


Fig. 1 Schematic of the Y-channel micromixer

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

서의 형상을 Fig. 1 에 도시하였다. 서로 다른 두 유체가 60°의 각을 이루는 두 유입구로부터 들어와 혼합영역(mixing region)을 지나 출구로 빠져나간다. 두 유입 채널의 폭은 각각 200 μm 이며 출구의 폭은 300 μm 이다. 전체 혼합영역의 길이는 1200 μm 이다. 입구로 들어가는 작동유체(working fluid)는 각각 20°C의 물과 에탄올(Ethanol)로 가정하였으며, 이 두 유체의 물성치를 Table 1에 나타내었다. 이 경우 확산에 의한 혼합시간을 Wang 등⁽¹²⁾에 따라 대략적으로 추정해 보면, 약 10⁻¹ (s) 정도(order)이다.

본 연구에서 사용한 채널의 폭은 수백 μm 의 크기이고, 액체유동으로 유동의 비평형도가 극히 적은 연속류 영역(continuum flow regime)에 해당된다. 따라서, 비압축성 Navier-Stokes 방정식과 고착경계조건(no-slip wall condition)을 사용하여 해석할 수 있다. 또한 두 작동유체 물성치의 큰 차이가 없어 화학 변화 등의 현저한 물성치 변화가 없는 혼합만 발생할 것이다. 그러므로 농도 변화를 고려하지 않은 단순 농도 수송 방정식(concentration transport equation)으로 두 유체의 혼합 정도를 예측할 수 있다. 이 지배방정식들을 다음과 같이 무차원 형태로 표현할 수 있다.

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

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

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

여기에서, \vec{V} 는 유체의 속도 벡터, p 는 압력, c 는 농도(concentration)이다. 이 유동에서 중요한 두 무차원수는 Reynolds 수와 Peclet 수로 다음과 같

이 나타낼 수 있다.

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

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

여기에서, ρ 는 유체 밀도, \bar{u} 는 평균속도, μ 는 점성계수, l 은 특성길이, ν 는 동점성계수, 그리고 D 는 확산계수이다.

앞서 기술한 Navier-Stokes 방정식과 농도 수송 방정식을 수치적으로 계산하기 위해서, 비압축성 유동해석에 적절한 압력수정기법(pressure correction method)인 SIMPLE⁽¹⁵⁾법을 사용하였다. 수렴조건은 상대 L_2 norm 수정값(correction or residual)을 $1.0e-3$ 이하로 하였다. 복잡한 형상에 쉽게 적용할 수 있는 비정렬격자 해법(unstructured grid method)^(16,17)을 적용하였으며, 종속 스칼라 방정식(passive scalar equation)인 농도 수송 방정식은 유동장을 계산한 이후에 독립적으로 계산하였다. 이는 선행연구⁽¹⁸⁾에서 해석해와 상용코드와의 비교결과 타당함이 검증되었다.

각 채널 단면에서의 혼합 정도를 평가하기 위하여 농도 수송 방정식으로부터 계산된 농도분포를 이용한다. 본 연구에서는 채널 출구에서의 혼합된 정도를 알아보기 위해 다음과 같이 정의된 혼합효율을 사용하였다.⁽¹⁹⁾

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

여기에서, c 는 출구에서의 농도를 나타내며 l 은 출구 높이의 1/2 이다. c_0 는 두 유체가 혼합되기 전의 초기농도, c_∞ 는 두 유체가 완전히 혼합되었을 때의 농도를 나타낸다.

2.2 장애물을 갖는 Y-채널 믹서의 혼합 해석

본 연구에서는 장애물이 한 개 일 경우와 두 개 일 경우에 대해 혼합효율을 극대화 하기 위해 최적설계를 수행하고자 한다. 따라서 각각의 경우에 대해 장애물의 위치와 크기에 따른 혼합효율의 변화를 수치해석을 통해 먼저 살펴보았다.

2.2.1 장애물이 한 개인 경우

장애물이 한 개인 경우 위치에 따른 효율의 변

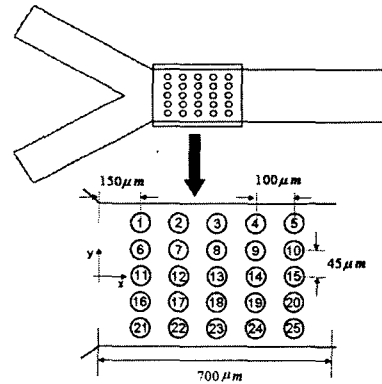


Fig. 2 Locations of obstacles

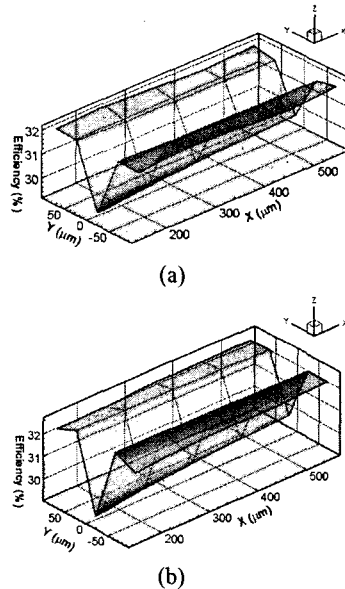


Fig. 3 Variations of mixing efficiencies for the cases with one obstacle: (a) $r=30 \mu m$, (b) $r=40 \mu m$

화를 알아보기 위해 Fig. 2 와 같이 25 가지 위치에 대해 수치해석을 수행하였다. 채널의 전체적인 형상은 Fig. 1 과 동일하고, 1 번 장애물의 위치는 혼합 부로부터 x 축 방향으로 $150 \mu m$, 채널의 중심에서 y 방향으로 $90 \mu m$ 떨어진 곳이다. 각각의 경우에 대해 혼합효율과 수직방향 속도성분을 계산하였다. 일반적으로 수직방향 속도성분은 혼합효율과 비례하여 증가함을 볼 수 있었다.⁽¹⁸⁾ 장애물이 놓인 위치에 따른 혼합효율의 변화를 Fig. 3 에 도시하였다. (a)와 (b)는 각각 장애물의 반지름이 $30 \mu m$ 와 $40 \mu m$ 일 때의 혼합효율을 나타내고 있다. 먼저 x 축 방향의 변화는 혼합효율에 큰 영향을 미치지 않고 있다. 한편, 장애물의 반지름이

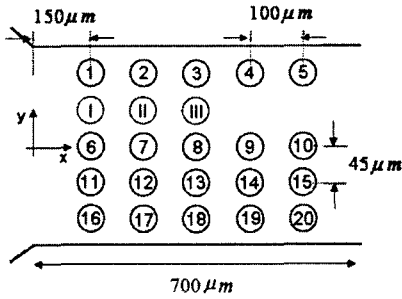


Fig. 4 Locations of obstacles

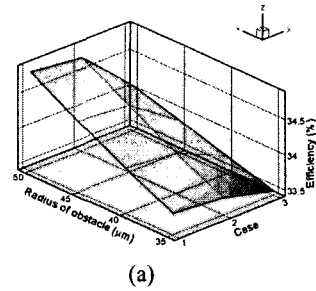
Table 2 Cases for high mixing efficiency

Fixed obstacle	I	II	III
Case	14	15	4

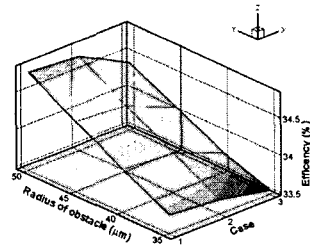
커지고 벽면에 가까이 위치시킬수록 혼합효율이 증가함을 보여준다. 그러나 장애물이 벽면에 근접 (y 축 방향 약 50 μm 이후) 할 경우 혼합효율이 조금 감소하거나 거의 변하지 않는다. 이는 수직방향 속도 성분이 벽면 근처에서 그 크기가 작게 생성되기 때문이다.

2.2.2 장애물이 두 개인 경우

다음으로 두 개의 장애물을 사용할 경우에 대해 수치계산을 수행하였다. Wang 등⁽¹²⁾은 장애물이 두 개인 경우 이를 비대칭하게 배열함으로써 높은 효율을 얻을 수 있다고 밝히고 있다. 이에 Fig. 4와 같이 I부터 III의 위치 중 한곳에 하나의 장애물을 고정시키고 다른 하나의 장애물을 1에서 20 중 한곳에 위치시킨 후 각각에 대해 수치해석을 수행하였다. 이 중 가장 높은 효율을 얻을 수 있는 조합들을 고정된 장애물(I, II, III) 각각에 대해 Table 2에 나타내었다. 그 결과 일정한 간격을 두고 비대칭적인 배열이 되었을 때 (I-14, II-15, III-4 조합) 가장 높은 효율을 얻을 수 있었다. 추가적으로 Table 2의 세가지 조합을 각각의 반지름을 변경시켜가며 수치해석을 수행해본 결과 Fig. 5를 얻을 수 있었다. Fig. 5(a)는 I-14, II-15, III-4의 조합에서 I, II, III의 반지름을 30 μm로 고정하고 14, 15, 4의 반지름을 35~50 μm로 변경시켜가며 얻은 결과이다. Fig. 5(b)는 반대로 14, 15, 4의 반지름을 30 μm로 고정하고 I, II, III의 반지름을 변화시켜가며 얻은 결과이다. 두 그래프에서 두 개의 장애물 중 어느 것이든 반지름을 증가시키면 효율이 증가하는 동일한 결과를 보여준다. 또한 III-4 조합과 같이 두 장애물의 간격이 충분히 떨어져 있지 않았을 경우에 다른 조합에 비해 상대적으로



(a)



(b)

Fig. 5 Variations of mixing efficiencies for the cases with two obstacles: (a) one obstacle fixed at I,II,III (b) one obstacle fixed at 14,15,4

로 적은 혼합효율을 얻을 수 있었다. 이를 종합해 볼 때 두 장애물의 위치와 크기를 최적화 함으로써 혼합효율을 극대화 할 수 있다.

3. 최적설계

3.1 설계문제의 정식화와 설계기법

장애물이 하나, 그리고 두 개인 경우 각각에 대하여 최적설계를 수행하였다. 먼저 장애물이 하나 일 경우에 대해 설계 변수는 장애물 중심의 좌표 (x_i, y_i)와 반지름(r_i), 총 3 개로 선정하였다. 이 변수들을 최대 혼합효율을 얻을 수 있도록 최적화 하는 것이 설계문제가 되므로 다음과 같이 설계 문제를 정의할 수 있다.

$$\text{Maximize } \eta \tag{7}$$

Subject to

$$|y_i| + r_i \leq \frac{h}{2} - \varepsilon \tag{8a}$$

$$\Delta P \leq \Delta P_{critical} \tag{8b}$$

식 (8a)는 장애물이 채널의 벽면과 만나지 않도록 하기 위한 기하학적 구속조건이다. 여기에서, h는 채널 중심에서 벽면까지의 거리이고 ε은 장애

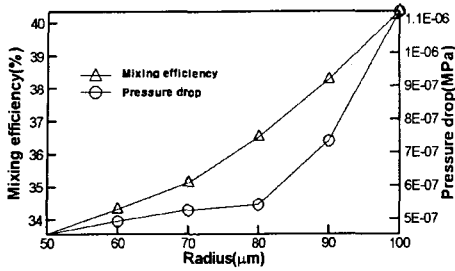


Fig. 6 Effects of the obstacle radius on the mixing efficiency and pressure drop

물과 장애물 사이 및 장애물과 벽면 사이의 최소 간극으로 8 μm 로 가정하였다. 또한 식 (8b)에서 ΔP는 입구와 출구 사이의 압력강하(pressure drop)를 나타낸다. 여기에서 최대 허용 압력강하 ΔP_{critical}을 1.0e-6 MPa 으로 설정하였다. 다음으로 설계변수인 반지름의 설계구간을 결정하기 위하여 반지름의 변화에 따른 압력강하와 혼합효율의 변화를 알아보았다. Fig. 2 에서 가장 높은 효율을 보인 2 번 위치에 대하여 반지름을 50 μm 에서 100 μm 까지 변화시켜가면서 수치해석을 수행하였으며, 이 결과를 Fig. 6 에 도시하였다. 압력강하의 변화가 비교적 완만한 80 μm 이하를 장애물 반지름의 설계영역으로 설정하였다. x 좌표 값의 설계구간은 2.2 절의 경우와 동일하게 설정하였다. 또한 설계변수인 y 좌표 값은 최저 반지름 30 μm 일 때를 기준으로 장애물과 벽면이 겹치지 않도록 완충구간 8 μm 를 고려한 112 μm 로 설정하였다. 이들 설계변수들의 설계구간을 Table 3 에 정리하였다.

장애물이 두 개인 경우, 설계 변수는 장애물 중심의 좌표(x₁, y₁, x₂, y₂)와 반지름(r₁, r₂), 총 6 개로 선정하였다. 이 변수들을 최대 혼합효율을 얻을 수 있도록 최적화하는 것이 설계문제가 되므로 다음과 같이 설계문제를 정의할 수 있다.

Maximize η (9)

Subject to

$$|y_1| + r_1 \leq \frac{h}{2} - \varepsilon \quad (10a)$$

$$|y_2| + r_2 \leq \frac{h}{2} - \varepsilon \quad (10b)$$

$$\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \geq r_1 + r_2 + \varepsilon \quad (10c)$$

$$\Delta P \leq \Delta P_{critical} \quad (10d)$$

Table 3 Ranges of design variables for one obstacle

Design variables	Lower bound	Baseline	Upper bound
x_1 (μm)	150.00	350.00	550.00
y_1 (μm)	-112.00	0.00	112.00
r_1 (μm)	30.00	55.00	80.00

Table 4 Ranges of design variables for two obstacles

Design variables	Lower bound	Baseline	Upper bound
x_1 (μm)	150.00	233.00	316.00
x_2 (μm)	384.00	467.00	550.00
y_1, y_2 (μm)	-112.00	0.00	112.00
r_1, r_2 (μm)	30.00	55.00	80.00

장애물이 한 개인 경우와 유사한 구속조건들 [(10a)-(10d)]을 가지게 되며 식 (10c)는 두 장애물이 겹치지 않도록 하기 위한 형상구속조건이 된다. 설계구간은 장애물이 하나인 경우와 유사하게 Table 4 와 같이 설정하였다. 앞서 해석한 바와 같이 두 장애물들이 비대칭으로 위치해 있을 때, 가장 높은 효율을 얻을 수 있었다. 따라서 두 장애물의 x 좌표 값들은 설계구간을 전 후반부로 나누어 각각의 영역에 하나의 장애물이 위치하도록 설정하였다.

본 Y-채널 마이크로 믹서의 경우 설계공간이 비선형적이며 다결점 구조(multi-nodal)를 갖으므로 반응면 기법(Response Surface Method: RSM)과 같이 2 차 다항식의 형태로 근사화를 시키는 것에는 무리가 있다. 또한 크리깅(Kriging) 모델과 같이 내재적 함수를 이용하여 근사모델을 구성 할 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 라틴 방격(Latin square)을 이용하여 25 개의 실험점을 선택하였다. 장애물이 두 개인 경우에는 2 중점 혼합법(Central Composite Design)을 이용하여 78 개의 실험점을 선택하였다. 이들 실험점들에 대하여 수치해석을 수행하였으며 혼합효율에 대한 근사모델을 구축하였다. 이 모델들의 결정계수(R²)의 값은 각각 0.997, 0.998 로 설계공간을 잘 모사하고 있다고 판단된다. 이 근사모델을 바탕으로 SQP(Sequential Quadratic Programming)를 사용하여 최적화를 수행하였다.

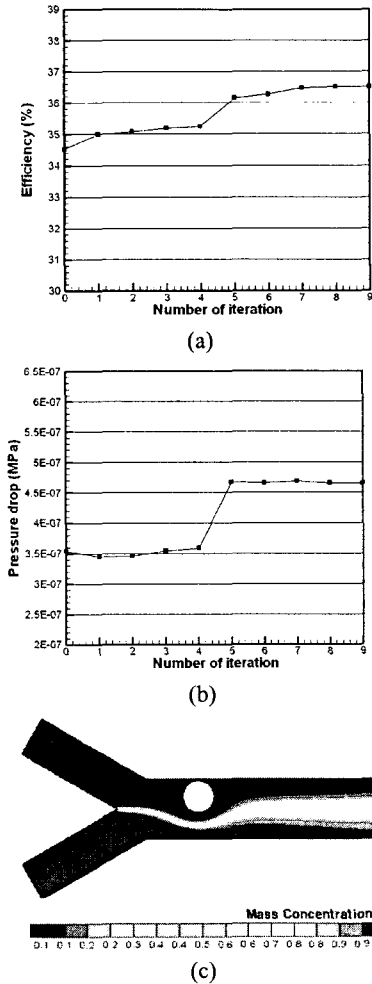


Fig. 7 Results of optimization: (a) convergence history of the objective function (b) convergence history of the pressure drop (c) mass concentration contour at optimum configuration

3.2 최적설계 수행 결과

3.2.1 한 개의 장애물을 갖는 경우

장애물이 한 개인 경우에 대해 최적설계과정 중의 효율과 압력강하의 변화, 그리고 최적화된 믹서내부의 질량농도분포를 Fig. 7에 나타내었다. 총 9 번의 반복횟수 동안 효율은 초기값 35%에서 36.5%까지 증가하였다. 압력강하는 다섯 번째 반복 이후 약 4.7e-7 MPa로 유지되고 있다. 설계변수의 초기값과 최적화된 이후의 값을 Table 5에 나타내었다. x 축 방향으로 약 85 μm 유입구 방향으로 이동하였으며, y 축 방향으로 반지름의 크기에 맞게 중심으로 이동하였다. 반지름이 설계

Table 5 Comparison between the initial and optimum values of design variables

Design variables	Initial value	Optimum value
x_l (μm)	350.00	264.75
y_l (μm)	112.00	62.00
r_l (μm)	55.00	80.00
Efficiency (%)	Optimization :	36.50
	Validation :	35.38

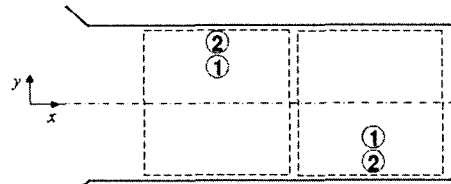


Fig. 8 Two configuration cases for initial design.

구간의 최대값인 80 μm로 커진 것과 벽과 장애물 사이의 완충구간 8 μm를 감안하면 최대한 벽면에 붙은 결과이다. 이는 2.2.1의 해석결과와 동일한 경향을 보이고 있다. 최적화된 설계변수의 값으로 실제 해석을 수행한 결과 혼합효율은 35.38%로 근사모델을 이용한 최적화 값과 약 1.12%의 차이를 보였다. Wang 등에 의해 제시된 형상에서의 해석결과⁽¹⁸⁾와 비교하면, 가장 높은 효율을 보여준 9 개의 장애물을 비대칭으로 배열한 경우와 거의 같은 효율을 얻었다(-0.62%).

3.2.2 두 개의 장애물을 갖는 경우

장애물이 두 개인 경우는 2.2.2 절에서 밝힌 바와 같이 일정한 사이의 간격을 두고 비대칭적인 배열이 되었을 때(I-14, II-15 조합) 혼합효율이 가장 높게 된다. 따라서, Fig. 8의 Case 1의 위치를 설계변수의 초기값으로 설정하였다. 또한 한 개의 장애물의 경우 장애물이 벽면에 가까이 갈수록 혼합효율이 높아짐을 알고 있으므로 Case 2의 위치를 또 하나의 설계변수의 초기값으로 설정하였다. 이 두 초기 위치 값들을 이용하여 각각 최적설계를 수행하였다. 이 두 최적설계 과정에서 혼합효율과 압력강하의 변화, 그리고 최적화된 형상에서의 질량농도분포를 Fig. 9에 나타내었다. Case 1은 8 번의 반복수행으로 42.11%의 혼합효율을 얻을 수 있었다. 4 번째 반복에서 42.7%까지 효율이 상승하였으나, Fig. 9(c)에서 보는 바와 같이 압력강하가 설계한도 값 $\Delta P_{critical}$ 을 벗어남으로 인해 최적설계 과정에서 설계변수 값들이 다시 조정되기 때문이다. 또한 Case 2는 7 회의 반복수행으로 42.12%의 혼합효율을 얻을 수 있었다. 4 번째 반복에서 42.3%까지 효율이 상승하였으나, Case 1과 마찬가지로 압력강하가 설계 한도 값

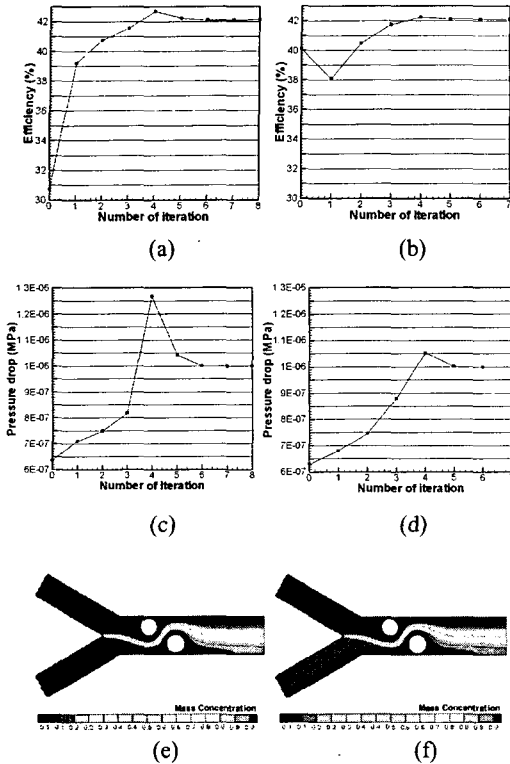


Fig. 9 Results of optimization: (a) convergence history of the objective function for case 1 (b) convergence history of the case 2 objective function (c) convergence history of the case 1 pressure drop (d) convergence history of the case 2 pressure drop (e) contour of the case 1 (f) contour of the case 2

$\Delta P_{critical}$ 을 벗어남으로 인해 최적설계과정에서 설계변수 값들이 다시 조정된다. 최적설계를 통한 설계변수들의 최적 값들과 최적화된 이후의 혼합 효율, 그리고 혼합효율의 검증결과를 Table 6 과 Table 7 에 나타내었다. 최적화 결과들에서 x 좌표 값의 변화는 미미하게 나타났다. y 좌표 값은 장애물이 한 개인 경우와 마찬가지로 장애물의 반지름과 완충구간을 고려했을 때 최대한 벽면으로 이동함을 알 수 있다. 특히, 첫 번째 장애물과 두 번째 장애물이 비대칭적인 배열구조로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 또 하나의 설계변수인 반지름은 상한 값 $80 \mu m$ 까지 증가하지는 않는다. 이는 반지름이 커질수록 압력강하가 증가 되므로, 구속조건에 의한 압력강하의 상한 값을 벗어나지 않도록 설계 과정에서 제한되기 때문이다. 결국 최적화된 값들을 비교해 봤을 때, Case 1 과

Table 6 Comparison between the initial and optimum values of design variables for case 1

Design variables	Initial value	Optimum value
$x_1 (\mu m)$	233.00	238.23
$x_2 (\mu m)$	467.00	459.94
$y_1 (\mu m)$	56.00	70.97
$y_2 (\mu m)$	-56.00	-65.70
$r_1 (\mu m)$	55.00	71.03
$r_2 (\mu m)$	55.00	76.30
Efficiency (%)	Optimization :	42.11
	Validation :	40.42

Table 7 Comparison between the initial and optimum values of design variables for case 2

Design variables	Initial value	Optimum value
$x_1 (\mu m)$	233.00	236.00
$x_2 (\mu m)$	467.00	461.03
$y_1 (\mu m)$	112.00	71.54
$y_2 (\mu m)$	-112.00	-64.89
$r_1 (\mu m)$	55.00	70.46
$r_2 (\mu m)$	55.00	77.11
Efficiency (%)	Optimization :	42.12
	Validation :	40.44

Case 2 의 설계변수들은 거의 동일한 값들을 보여 주고 있으며 목적함수인 효율 또한 0.009% 차이로 동일한 값이라 할 수 있다. 본 연구의 최적화를 통해서 Wang 등에 의해 제시된 장애물 9 개를 사용했을 경우보다 약 4.4% 이상의 높은 혼합효율을 갖는 Y-채널 믹서의 형상을 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 혼합효율을 향상시키기 위해 두 개의 장애물을 갖는 Y-채널 믹서의 최적설계를 수행하였다. 먼저 한 개 또는 두 개의 장애물의 위치와 크기 변화에 따른 혼합효율의 영향을 수치계산을 통해 알아보았다. 장애물이 하나인 경우와 두 개인 경우에 대해 근사최적화 방법을 이용한 최적설계를 수행하였으며, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 장애물이 한 개인 경우와 두 개인 경우 공히 근사최적화를 통하여 설계요구조건들을 모두 만족시키며 효율적인 최적설계를 할 수 있었다.

둘째, 장애물이 하나인 경우 장애물의 위치와 크기를 최적화함으로써 Wang 등이 제시한 경우인 9 개의 장애물을 갖는 Y-채널 믹서에 준하는 높은 혼합효율을 얻을 수 있었다.

셋째, 장애물이 두 개인 경우 최적 설계를 통하여 최대 효율을 갖는 Y-채널 믹서형상을 얻을 수 있었다.

따라서 위와 같은 최적화를 통하여 장애물의 수를 줄임과 동시에 높은 효율을 갖는 마이크로 믹서를 설계함으로써 제작상의 편리성과 기구의 효율성을 동시에 만족 시킬 수 있다.

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., Stremmer, 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) Choi, H. I., Kim, J. M., Choi, D. H. and Maeng, J. S., 2003, "Optimum Design of a Viscous-driven Micropump with Single Rotating Cylinder for Maximizing Efficiency," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 27, No. 11, pp. 1889~1896.
- (14) Cichocki, A. and Unbehauen, R., 1993, "Neural Networks for Optimization," *Wiley*, New York, pp. 359~408.
- (15) Nocedal, J. and Wright, S. J., 1999, "Numerical Optimization," *Springer*, New York, pp. 528~573.
- (16) 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.
- (17) 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.
- (18) Choi, J. W., Choi, H. I., Lee, D. H. and Lee, D., 2005, "Study on Mixing Enhancement of a Y-Channel Micromixer with Obstacles," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 12
- (19) 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.