

# 혼합 효율 향상을 위한 마이크로 동적 믹서의 형상최적화

박재용<sup>+</sup>, 김상락<sup>+</sup>, 이원구<sup>+</sup>, 유진식<sup>+</sup>, 김용대<sup>+</sup>, 한석영<sup>++</sup>, 맹주성<sup>+++</sup>

(논문접수일 2007. 6. 25, 심사완료일 2007. 8. 28)

## Shape Optimization of an Active Micro-Mixer for Improving Mixing Efficiency

Jae-Yong Park<sup>+</sup>, Sang-Rak Kim<sup>+</sup>, Won-Gu Lee<sup>+</sup>,  
Jin-Sik Yoo<sup>+</sup>, Young-Dae Kim<sup>+</sup>, Seog-Young Han<sup>++</sup>, Joo-Seung Maeng<sup>+++</sup>

### Abstract

An active micro-mixer, which was composed of an oscillating micro-stirrer in the microchannel to provide rapid, effective mixing at high flow, rates was analyzed. The effects of molecular diffusion and disturbance by the stirrer were considered with regard to two types of mixer models: the simple straight microchannel and microchannel with an oscillating stirrer. Two types of mixer models were studied by analyzing mixing behaviors such as their interaction after the stirrer. The mixing was calculated by Lattice Boltzmann methods using the D2Q9 model. In this study, the time-averaged mixing index formula was used to estimate the mixing performance of time-dependent flow. The mixing indices of the two models compared. From the results, it was found that the mixer with an oscillating stirrer was much more enhanced and stabilized. Therefore, an optimum design for a dynamic micro-mixer with an oscillating stirrer was performed using Taguchi method in order to obtain a robust solution. The design parameters were established as the frequency, the length and the angle of the stirrer and the optimal values were determined to be 2, 0.8D and  $\pm 75^\circ$ , respectively. It was found that the mixing index of the optimal design increased 80.72% compared with that of the original design.

**Key Words** : Micro-Mixer(미소혼합기), Design of Experiment(실험계획법), Taguchi Method(다구찌법)

## 1. 서론

최근 미소 기계장치를 만들 수 있는 제조 공정이 발달함에

따라 미소 유동 시스템은 생화학, 생체공학 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 그 중 미세 유동 시스템의 혼합효율은 시스템의 성능을 결정하는 중요한 인자이다. 미소 형상에서 유

<sup>+</sup> 한양대학교 대학원 기계공학과  
<sup>++</sup> 교신저자, 한양대학교 기계공학부 (syhan@hanyang.ac.kr)  
주소: 133-791 서울시 성동구 행당동 17  
<sup>+++</sup> 한양대학교 기계공학부

체 혼합을 가속화하는 방법에는 수동형 혼합과 능동형 혼합이 있다. 수동형 혼합은 유로의 형상을 변화시켜 유체간 접촉면의 길이 및 시간을 늘려주거나, 유로 구조를 통하여 접촉면의 수를 증가시켜 분자 확산 효과를 향상시키는 방법이 있다.<sup>(1,2)</sup> 미소 영역에서의 혼합기는 유동이 흐르는 속도에 따라 그 효과가 다르게 나타날 수 있다.

일반적인 MEMS 해석 범위는  $0.01 \leq Re \leq 100^{(4-6)}$ 이며, 단순채널의 경우 유속이 커지면 확산시간의 감소로 혼합은 줄어들게 된다. 수동형 혼합기의 경우 혼합의 효과는 특정 임계 Re수 이상일 때 증가하는 유속이 혼합요소, 즉 급격한 유로의 변경이나 장애물에 의해 혼돈류를 발생시켜 혼합성능을 높여주는 역할을 하게 된다. Liu 등<sup>(2)</sup>은 3차원 Serpentine 혼합기에서 Re=1을 임계값으로 밝혔고, Girault 등<sup>(7)</sup>은 Zigzag 채널에서 20°C 물의 경우 Re=7을 임계값으로 찾았다. An 등<sup>(8)</sup>은 채널내 실린더와 진동 교반기에 의한 혼합 효과를 LBM 수치 기법을 통해 분석하였고, 채널폭을 특성길이로 하여 Re=240에서 실린더와 진동 교반기를 가진 채널의 교반속도에 따른 혼합효과를 연구하여 진동 교반기와 실린더를 가진 채널이 진동 교반기만을 가진 채널보다 우수한 혼합성능을 나타낸다는 것을 밝혔다. 또한, An 등<sup>(9)</sup>은 혼합효과가 진동 교반기가 회전 교반기보다 우수하다는 것을 밝혔다. 그리고, Williamson<sup>(10)</sup>은 Re=150부터 실린더의 와류림이 발생한다는 것을 밝혔다. 따라서, MEMS분야에 적용 가능한 레이놀즈 수의 범위인  $0.01 \leq Re \leq 100$ 에서는 실린더가 포함된 미소 채널형 혼합기는 와류림(shedding)이 발생하지 않으므로 적용할 수가 없다. Kim<sup>(11)</sup>은 또한 채널폭을 특성길이로 하여 Re=50에서 혼합효과가 뛰어나다는 것을 밝혔다. 하지만, MEMS의 해석범위인  $0.01 \leq Re \leq 100$ 에서의 혼합효율의 개선과 혼합성능의 안정성을 높이기 위한 진동 교반기를 가진 미소 채널형 혼합기의 최적설계는 아직 이루어지지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 진동 교반기를 가진 미소 채널형 혼합기의 혼합성능을 채널폭을 특성길이로 하여 Re=50에서 해석하여 분자확산과 진동 교반기에 의한 단일 혼합효과를 고찰하였다. 그리고, 진동 교반기를 가진 미소 채널형 혼합기의 혼합효율을 개선하고 혼합성능의 안정성을 높이기 위하여 교반기의 회전속도, 회전각도, 길이의 형상인자를 선택하고 다구찌법을 적용하여 혼합효과와 혼합성능의 안정성을 높일 수 있는 최적의 형상인자 값을 결정하였다.

## 2. 수치해석방법

### 2.1 격자 볼츠만법

BGK(Bhatnagar-Gross-Krook)접근법으로 충돌연산자를 단순화한 볼츠만 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{e} \cdot \nabla f = -\frac{1}{\tau}(f - f^{eq}) \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 단일 입자 분포함수이고,  $\vec{e}$ 는 입자의 속도,  $\tau$ 는 충돌에 의한 완화 시간, 그리고  $f^{eq}$ 는 볼츠만-Maxwellian 분포함수이다. 식 (1)의 볼츠만 방정식을 2차원 D2Q9 모델을 사용하여 이산화 하면 다음과 같은 격자 볼츠만 방정식으로 나타낼 수 있다. Fig. 1은 본 연구에 사용한 D2Q9 모델을 나타낸 것이다.

$$f_i(\vec{x} + \vec{e}_i \delta t, t + \delta t) = f_i(\vec{x}, t) - \frac{1}{\tau} [f_i(\vec{x}, t) - f^{eq}(\vec{x}, t)] \quad (2)$$

방정식의 우변은 충돌 연산자에 의한 입자의 충돌과정을 나타내고, 좌변은 입자의 전파과정을 나타내고 있다. 이산 속도  $\vec{e}_i$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있으며, 하첨자  $i$ 는 D2Q9 모델의 이산 속도의 각 방향을 나타낸다.

### 2.2 농도 방정식

비용해성 물질의 농도 분포에 대한 확산방정식은 계산된 유동분포를 사용하여 격자 볼츠만 방정식의 Passive scalar 법으로 계산하였다. 이산화 된 농도방정식은 다음과 같다.

$$g_i(\vec{x} + \vec{e}_i \delta t, t + \delta t) = g_i(\vec{x}, t) - \frac{1}{\tau_c} [g_i(\vec{x}, t) - g^{eq}(\vec{x}, t)] \quad (3)$$

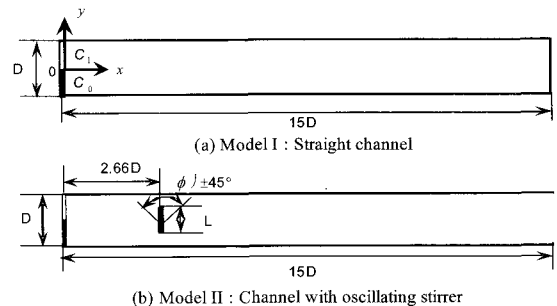


Fig. 1 Schematic views of two models of the micro-mixers

여기서,  $g_i$ 는 농도분포함수,  $\tau_c$ 는 농도방정식에 대한 완화 계수,  $g_i^{eq}$ 는 농도 방정식에 대한 평형분포함수로 다음과 같이 나타난다.

농도의 혼합 정도를 나타내기 위하여 통계적 방법인 혼합 지수(9)가 많이 사용되고 있다. 본 연구에서 모사되는 대부분의 유동은 시간에 따라 변하는 비정상상태 유동이기 때문에 국부적인 혼합지수( $D_T$ )를 일정한 주기 동안 시간 평균하여 혼합을 평가하였으며, 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\overline{D_T} = \frac{1}{T} \int_T \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{C_i - C_{mean}}{C_{mean}} \right)^2} dt \quad (4)$$

여기서,  $T$ 는 유동 양상이 일정하게 반복되는 주기를 나타낸다.  $C_{mean}$ 은 입구 평균농도,  $C_i$ 는 동일한 단면에서 국부적인 농도값을 나타낸다.

혼합지수 0.2이하에서 충분한 혼합에 도달한다고 정의하고, 이때의 거리를 ‘완전혼합거리’라 하여 성능을 평가하는 기준으로 사용하였다.

### 2.3 수치 조건

Fig. 1은 본 연구에서 해석한 채널형 혼합기를 나타낸 것이다. 모델 I은 단순한 직선 채널, 모델 II은 동일한 위치에 교반기가 있는 채널이다. 교반기는 유동에 수직할 때를 기준(0°)으로 ±45°의 진동각을 일정한 속도로 주기적으로 회전 진동한다. 유동 경계조건은 벽면에는 Bounce-back 조건을 이용한 점착조건, 출구에는 Neumann 조건을 사용하였다. 모델 II의 진동하는 교반기를 해석하기 위하여 이동경계조건(Moving boundary condition)을 사용하였다. 이동경계조건은 고정된 벽면에 대한 일반적인 점착조건인 Bounce-back 조건에 벽의 이동에 의해 유체에 가해지는 힘의 항을 추가한 형태로써 다음과 같다.

$$f_i(\vec{x}, t) = f_i(\vec{x} + \vec{e}_i \delta t, t) + 6w_i(\vec{e}_i \cdot \vec{u}_w) \quad (5)$$

여기서,  $f_i$ 는  $f_i$ 와 방향이 반대인 요소( $\vec{e}_i = -\vec{e}_i$ )의 분포 함수,  $\vec{u}_w$ 는 이동하는 고체벽의 속도벡터이다. 농도 경계조건은 입구면에서 채널 중앙을 중심으로 아래쪽 반은  $C_0 = 1$ , 위쪽은  $C_1 = 0$ 의 일정한 농도 유입조건을 사용하고 고체 벽면 및 출구면에는 zero-flux 조건을 사용하였다. 해의 안정성을 높이기 위해 교반기를 유동과 평행한 상태로 계산을 시작하여 유동이 충분히 안정된 후 회전하도록 하였다. 레이

놀즈수( $\overline{UD}/\nu$ )와 Peclet수( $\overline{UD}/d$ )는 채널폭을 특성길이로 하여 각각 50과 500으로 계산을 수행하였다.

## 3. 결과

2가지 형태의 채널형 혼합기를 동일한 조건에서 수치적으로 모사하여 혼합성능을 비교하였다.

### 3.1 분자확산에 의한 혼합

Fig. 2는 모델 I, 단순 직선채널의 농도분포를 나타낸 것이다. 접촉면에서 분자확산에 의하여 혼합이 진행되고 있으며 분리된 두 유체는 출구면에서도 거의 혼합이 이루어지지 않고 있음을 확연히 확인할 수 있다. Fig. 3은 각 단면의 농도분포를 나타낸 것이다. 두 유체의 접촉면인 채널의 중앙( $y/D=0$ )에서 혼합이 이루어지고 있으나, 진행 속도가 매우 느리다. 본 연구의 수치 조건이 Schmidt 수( $\nu/d$ ) 10으로 분자확산도가 큰 물질임에도 불구하고 레이놀즈수가 큰 경우 분자확산의 효과는 매우 작기 때문에 적절한 혼합 방법이 아님을 확인하였다.

### 3.2 교반기에 의한 혼합

모델 II는 채널 내부의 bar형 교반기를 주기적으로 진동시킴으로써 혼합을 성취하는 혼합기이다. Fig. 4는 교반기의



Fig. 2 Concentration distribution (Model I)

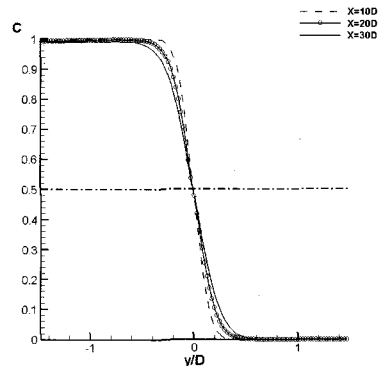


Fig. 3 Concentration profiles at various downstream positions (Model I)

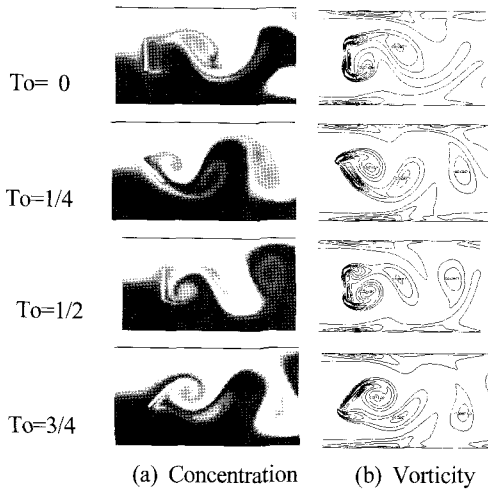


Fig. 4 Concentration and vorticity distribution during a period of stirrer oscillation (Model III)

진동주기 동안의 농도 및 와도분포이다.

시간을 교반기 진동 주기( $T_0$ )로 표준화하였다. 외력에 의하여 강제 진동하는 교반기에 의해 후류에서 와흐림이 발생하고 있으며, Karman 와에 비해 더욱 크고 강한 와가 생성되고 있다. 교반기의 진동주기동안 상하 2쌍의 와가 생성되어 분리되며, 와도와 농도의 분포는 매우 유사한 양상을 띠고 있다.  $T_0=1/4$ 에서 교반기가  $+45^\circ$ 까지 반시계방향으로 회전함에 따라 상반부의 유체는 교반기의 경사면을 따라서 반대편 하반부의 유체영역으로 이동하고,  $T_0=1/2$ 까지 시계방향으로 회전할 때 교반기의 뒷면에 발생하는 강한 와에 의하여 두 유체는 빠르게 혼합된다.  $T_0=3/4$ 에서는 반대로 하반부의 유체가 경사면을 따라 상반부로 이동하여 동일한 양상으로 혼합이 진행되고 있다.

#### 4. 다구찌 실험계획법을 이용한 강건설계

본 연구에서는 실린더가 있는 경우보다 교반기가 있는 경우 혼합성능이 우수하므로 교반기를 가진 미소 채널의 강건설계를 하였다. 다구찌 실험계획법을 적용하기 위하여 교반기 설계인자를 교반기의 길이, 각도, 속도의 3가지 인자로 결정하였다. Fig. 5에 각각 인자를 나타내었다. 표 1은 교반기 속도인자인 진동수, 교반기 길이 인자인 Diameter와 각도 인자인 Angle의 수준별 값을 나타내고 있다. 설계인자가 3개뿐이므로 최소한의 실험횟수로 최대한의 인자를 배치할 수 있는  $L_{18}$  직교배열표를 이용하여 주요와 인자를 검출하는

Table 1 List of the design parameters for 3 levels and 3 factors

	Frequency	Length	Angle
Level 1	1	0.5D	$\pm 45^\circ$
Level 2	2	0.65D	$\pm 60^\circ$
Level 3	3	0.8D	$\pm 75^\circ$

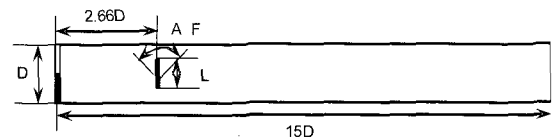


Fig. 5 Design parameters of a micro-mixer with an oscillating stirrer

과정 대신에  $L_{27}$  직교배열표를 적용하여 인자들과 교호작용에 대한 SN ratio를 찾을 수 있었다. 표 2에  $L_{27}$  직교배열표와 SN ratio를 나타내었다. SN ratio는 다구찌 실험계획법의 망소특성 계산식을 이용하여 제안하였다(13).

$$SN\ ratio = -10\log(Mixing\ Index^2) \quad (6)$$

표 3은  $L_{27}$  직교배열표를 이용하여 계산한 분산분석표를 나타낸다. 표 3에서 인자 F, A와 교호작용  $F*A$ ,  $D*A$ 는 유의수준이 1보다 작으므로 이 경우는 항상 유의하다. 그러나, 유의수준이 1보다 크면  $\alpha$ 값에 따라서 유의하는지, 유의하지 않은지 판단해야 한다. 따라서,  $\alpha=0.10$ 에서 인자 D는  $F(0.10)$ 값보다  $F(0)$ 값이 크기 때문에 유의하고, 교호작용  $F*A$ 는  $F(0.10)$ 값보다  $F(0)$ 값이 작기 때문에 유의하지 않다. 따라서, Fig. 5에서 인자 F, A, D와 교호작용  $F*A$ ,  $D*A$ 를 고려한 인자들의 최적조합은  $F_2D_3A_3$ 가 된다.

다구찌 법을 이용하여 찾게 된 인자들의 최적조합으로 교반기를 가진 미소 채널형 혼합기의 혼합 성능을 해석하면, 표 4와 같이 초기에 실시한 해석에서는  $Mixing\ Index=0.169033$ 이었고, 인자들의 최적조합을 이용하여 획득한  $Mixing\ Index=0.03259$ 로 80.72%의 좋은 혼합 성능을 보이는 설계 인자를 획득하였다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 다구찌 실험계획법을 이용하여 진동 교반기가 배열된 능동형 미소 채널형 혼합기의 혼합 성능을 높이기 위한 최적설계를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

Table 2 Orthogonal array table of L27(313)

Experiment No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	SN ratio
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13.49
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5.68
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	6.64
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	15.70
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	6.78
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	8.77
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	15.94
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	8.70
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	12.87
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	12.32
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	9.02
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	9.51
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	12.09
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	11.40
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	11.41
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	12.55
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	12.85
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	15.31
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	17.06
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	23.25
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	17.43
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	16.03
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	6.33
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	20.27
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	16.34
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	29.74
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	20.34
	L	A	L*A	L*A	F	L*F	L*F	A*F	e	e	A*F	e	e	

Table 3 ANOVA table(L27)

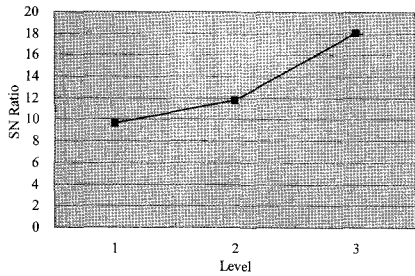
요인	S	phi	V	F0	F(0.10)
F	6.195	2	3.0975	0.144	3.11
D	341.874	2	170.937	7.925	3.11
A	37.001	2	18.501	0.858	3.11
F*D	59.705	4	14.926	0.692	2.81
F*A	110.458	4	27.615	1.28	2.81
D*A	56.302	4	14.075	0.653	2.81
E	172.561	8	21.57		
T	784.096	26			

(1) Re=50에서는 실린더와 진동 교반기가 배열된 능동형 미소 채널형 혼합기의 혼합성능 해석이 불가능하여, 실린

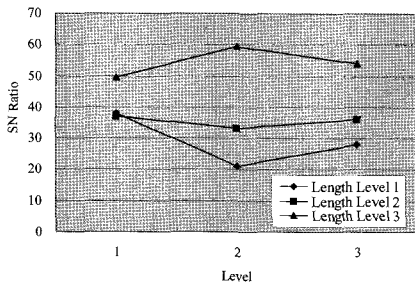
Table 4 Robust optimum design solution of the micro-mixer

	Freq.	Length	Angle	Mixing Index
Initial	1	0.5D	±45°	0.1690
Optimum	2	0.8D	±75°	0.0326

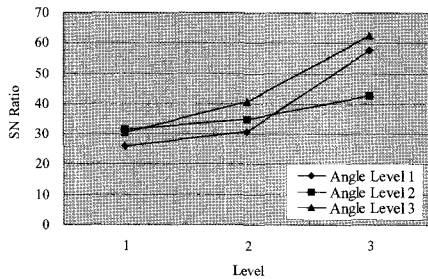
- 터를 제외한 진동 교반기만 배열된 능동형 미소 채널형 혼합기의 혼합성능을 해석하였다.
- (2) 진동 교반기가 배열된 능동형 미소 채널형 혼합기에 대하여 다구찌 실험계획법을 적용하였고, 그 결과에 대한 분산분석을 이용하여 3개 설계인자(진동 교반기의 각속도, 각도, 길이)의 최적조합을 찾았다.
- (3) 최적조합의 설계인자 값들을 이용하여 진동 교반기가 배열된 능동형 미소 채널형 혼합기의 혼합성능 양상을 해



(a) L



(b) F\*L



(c) L\*A

Fig. 7 Main and interaction effects plot for SN ratio of (a) L (b) F\*L (c) L\*A

석한 결과, 초기에 설정한 설계인자 값들을 이용한 해석 보다 80.72%의 뛰어난 혼합성능 양상을 나타내었다.

### 후기

이 논문은 한국과학재단 특정기초연구(R-01-2005-000-102-38-0)와 2007년도 2단계 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

### 참고 문헌

(1) Bertsch, A., Heimgartner, S., Cousseau, P. and

Renaud, P., 2001, Static Micromixers Based on Large-scale Industrial Mixer Geometry, *Lab on a Chip*, vol. 1, pp. 56~60.

(2) Liu, R. H., Mark, A. S., Kendra, V. S., Michael, G. O., Juan, G. S. and Ronald, J. A., 200, "Passive Mixing in a Three-dimensional Serpentine Microchannel," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 9, pp. 190~197.

(4) Anderson, R. C., Bogdan, G. J., Puski, A. and Su, X., 1998, "Genetic analysis Systems: Improvements and Methods," *Proc. Solid-State Sens. Actuator Workshop, Hilton Head, SC*, pp. 7~10.

(5) Bisson, C., Campbell, J., Cheadle, R., Chomiak, M., Lee, J., Miller, C., Milley, C., Pialis, P., Shaw, S., Weiss, W. and Widrig, C., 1998, "Microanalytical Device for the Assessment of coagulation Parameters in Whole Blood," *Proc. solid-State Sens. Actuator Workshop, Hilton Head, SC*, pp. 1~6.

(6) Chiem, N., Colyer, C. and Harrison, J. D., 1997, "Microfluidic Systems for clinical Diagnostics," *Proc. Int. Solid-State Sens. Actuators Conf., Chicago, IL*, pp. 183~186.

(7) Chiem, N., colyer, C. and Harrison, J. D., 1997, "Microfluidic Systems for clinical Diagnostics," *Proc. Int. Solid-State Sens. Actuators Conf., Chicago, IL*, pp. 183~186.

(8) Girault, H. H., Jossierand, J. and Mengeaud, V., 2002, "Mixing Processes in a Zigzag Microchannel: Finite Element Simulations and Optical Study," *Analytical chemistry*, Vol. 74, No. 16, pp. 4279~4289.

(9) Kim, Y. D., An, S. J. and Maeng, J. S., 2006, "The Effect of Karman Vortex for Mixing in a Microchannel with an Oscillation Micro-Stirrer," *J. of KSME Series B*, Vol. 30, No. 2, pp. 144~152.

(10) An, S. J., Kim, Y. D. and Maeng, J. S., 2006, "A Study on Mixing Enhancement by Rotating and Oscillating Stirrers in the Micro Channel," *J. of KSME Series B*, Vol. 30, No. 5, pp. 430~437.

(11) Williamson, C. H. K., 1996, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wave," *Annu. Rev. Fluid. Mech.*, Vol. 28, pp. 477~539.

(12) Kim, Y. D., 2007, *A study for mixing Characteristics and Performance of an Active Micro-Mixer by the Lattice Boltzmann Method*. Doctorial Thesis,

Hanyang Univ., Seoul, Korea.

(13) Park, S. H., 2003, *Design of Experiments*, Minyoung Press.