

## 능동형 미소혼합기의 근사최적화

박재용\*, 김상락<sup>+</sup>, 유진식<sup>+</sup>, 임민규<sup>+</sup>, 김용대<sup>+</sup>, 한석영<sup>++</sup>, 맹주성<sup>+++</sup>  
(논문접수일 2008. 6. 16, 심사완료일 2008. 7. 18)

### Approximate Optimization of an Active Micro-Mixer

Jae-Yong Park<sup>+</sup>, Sang-Rak Kim<sup>+</sup>, Jin-Sik Yoo<sup>+</sup>, Min-Gyu Lim<sup>+</sup>, Young-Dae Kim<sup>+</sup>,  
Seog-Young Han<sup>++</sup>, Joo-Seung Maeng<sup>+++</sup>

#### Abstract

An active micro-mixer, which is composed of an oscillating micro-stirrer in the micro-channel to provide effective mixing was optimized. The effects of molecular diffusion and disturbance by the stirrer were considered with regard to two types of mixer models: the simple straight micro-channel and micro-channel 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 were compared. From the results, it was found that the mixer with an oscillating stirrer was much more enhanced and stabilized. Therefore, an approximate optimization of an active micro-mixer with an oscillating stirrer was performed using Kriging method with OLHD(Optimal Latin Hypercube Design) in order to determine the optimal design variables. The design parameters were established as the frequency, the length and the angle of the stirrer. The optimal values were obtained as 1.0346, 0.66D and  $\pm 45^\circ$ , respectively. It was found that the mixing index of the optimal design increased by 88.72% compared with that of the original design.

**Key Words** : Micro-Mixer(미소혼합기), Lattice Boltzmann methods(LBM), Design of Experiment(실험계획법), Optimal Latin Hypercube Design(OLHD), Kriging Method(크리깅기법)

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

## 1. 서론

DNA의 추출, 약물의 이송, 혈액 반응물의 검출 등 생화학, 생체공학 분야의 미세 유동 시스템에서 균질한 혼합은 전체 성능을 결정하는 데 있어 매우 중요한 인자이다. 마이크로 단위의 유동장은 층류 유동이기 때문에 대부분 분자확산에 의해 혼합이 이루어진다. 이 분자확산은 미소채널 내에서 짧은 확산거리와 잔류시간으로 충분한 혼합을 이루기 매우 어렵기 때문에 혼합에 대한 많은 연구가 수행되어 오고 있다.

미소 영역에 사용되는 혼합기의 종류로는 수동형 혼합과 능동형 혼합이 있다. 수동형 혼합은 유로의 형상을 변화시켜 유체 간 접촉면의 길이 및 시간을 늘려주거나, 유로 구조를 통하여 접촉면의 면적을 증가시켜 분자 확산 효과를 향상시키는 방법이 있다. 미소 영역에서의 혼합기는 유동이 흐르는 속도에 따라 그 효과가 다르게 나타날 수 있다<sup>(1-3)</sup>. 일반적인 MEMS의 해석범위는  $0.01 \leq Re \leq 100$ <sup>(4-6)</sup>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  $Re=1$ 을 임계값으로 밝혔고, Girault 등<sup>(6)</sup>은 Zigzag 채널에서 20℃ 물의 경우  $Re=7$ 을 임계값으로 찾았다. An 등<sup>(7)</sup>은 채널내 실린더와 진동 교반기에 의한 혼합 효과를 LBM 수치 기법을 통해 분석하였고, 채널폭을 특성길이로 하여  $Re=240$ 에서 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>(8)</sup>은 진동 교반기의 혼합효과가 회전 교반기보다 우수하다는 것을 밝혔다. 그리고, Williamson<sup>(9)</sup>은  $Re=150$ 부터 와홀림(shedding)이 발생한다는 것을 밝혔다. Kim<sup>(10)</sup>은 또한 채널폭을 특성길이로 하여  $Re=50$ 에서 혼합효과가 뛰어나다는 것을 밝혔다. 그러나, MEMS의 해석범위인  $0.01 \leq Re \leq 100$ 의 혼합효율의 개선과 혼합성능의 안정성을 높이기 위한 진동 교반기를 가진 미소 채널형 혼합기의 근사최적화는 지금까지 수행된 바 없다.

본 연구에서는 진동 교반기를 가진 미소 채널형 혼합기의 혼합성능을 채널폭을 특성길이로 설정하여  $Re=50$ 에서의 분자확산과 진동 교반기에 의한 단일 혼합효과를 C언어를 이용한 코딩을 통하여 고찰하였다. 그리고, 진동 교반기를 가진 미소 채널형 혼합기의 혼합효율을 개선하고 혼합성능

의 안정성을 높이기 위하여 교반기의 회전속도, 회전각도, 길이의 형상인자를 선택하고, 데이터 샘플링을 위하여 OLHD (Optimal Latin Hypercube Design) 기법을 적용하여 형상 인자들의 설계점을 설정하였다. 그리고, 설정된 설계점을 기반으로 크리깅 모델을 구성하여 근사 최적설계를 수행하였고, 미소 채널의 혼합효율을 개선하는 인자들의 비선형적인 최적조합을 구하였다.

## 2. 수치해석법

### 2.1 격자 볼츠만법

BGK(Bhatnagar-Gross-Krook) 접근법으로 충돌연산자를 단순화한 Boltzmann 방정식<sup>(8)</sup>은 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 Boltzmann-Maxwellian 분포함수이다.

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

방정식의 우변은 충돌 연산자에 의한 입자의 충돌과정을 나타내고, 좌변은 입자의 전파과정을 나타내고 있다.  $\vec{e}_i$ 는 이산속도, 하첨자  $i$ 는 D2Q9모델의 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.

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

여기서,  $g_i$ 는 농도분포함수,  $\tau_c$ 는 농도방정식에 대한 완화 계수,  $g^{eq}$ 는 농도 방정식에 대한 평형분포함수이다.

농도의 혼합 정도를 나타내기 위하여 통계적 방법인 혼합 지수(Mixing Index)<sup>(9)</sup>가 많이 사용되고 있다. 본 연구에서 모사되는 대부분의 유동은 시간에 따라 변하는 비정상상태

유동이기에 때문에 국부적인 혼합지수( $\bar{D}_I$ )를 일정한 주기 동안 시간 평균하여 혼합을 평가하였으며, 다음과 같은 식을 제안하였다.

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

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( $0^\circ$ )으로  $\pm 45^\circ$ 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 식 (5)와 같다<sup>(10)</sup>.

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

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 경계조

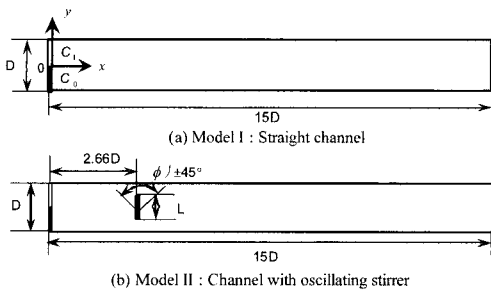


Fig. 1 Schematic views of two models of the micro-mixers

건은 입구면에서 채널 중앙을 중심으로 아래쪽 반은  $C_0 = 1$ , 위쪽은  $C_1 = 0$ 의 일정한 농도 유입조건을 사용하고 고체벽면 및 출구면에는 zero-flux 조건을 사용하였다. 해의 안정성을 높이기 위해 교반기를 유동과 평행한 상태로 계산을 시작하여 유동이 충분히 안정된 후 회전하도록 하였다. 레이놀즈수( $\bar{U}D/\nu$ )와 Peclet수( $\bar{U}D/d$ )는 채널폭을 특성길이로 하여 각각 50과 500으로 계산을 수행하였다.

### 3. 혼합기의 수치 모사

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 농도 분포를 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



Fig. 2 Concentration distribution(Model I)

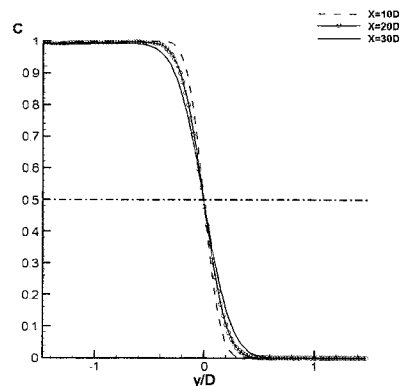


Fig. 3 Concentration profiles at various downstream positions(Model I)

아님을 확인하였다.

### 3.2 교반기에 의한 혼합

모델 II는 채널 내부의 bar형 교반기를 주기적으로 진동시킴으로써 혼합을 성취하는 혼합기이다. Fig. 4는 교반기의 진동주기 동안의 농도(concentration) 및 와도(vorticity)분포이다. 시간을 교반기 진동 주기( $T_o$ )로 표준화하였다. 외력에 의하여 강제 진동하는 교반기에 의해 후류에서 와홀림이 발생하고 있으며, Karman와 (Karman vortex)에 비해 더욱 크고 강한 와가 생성되고 있다. 교반기의 진동주기동안 상하 2쌍의 와가 생성되어 분리되며, 와도와 농도의 분포는 매우 유사한 양상을 띠고 있다.

### 4. 교반기의 근사 최적화

본 연구에서는 실린더가 있는 경우보다 교반기가 있는 경우 혼합성능이 우수하므로 교반기를 가진 미소 채널의 근사 최적 설계를 수행하였다. 설계인자는 교반기의 진동수, 길이, 각도의 3가지 인자로 설정하였다. Fig. 5에 각 인자를 나타내었다. 크리깅 모델을 사용하기 위한 데이터 샘플링기법으로는 OLHD(Optimal Latin Hypercube Design)기법을 적용하였다. 설계변수는 3개, 수준은 3수준으로 선정하였다. Table 1은

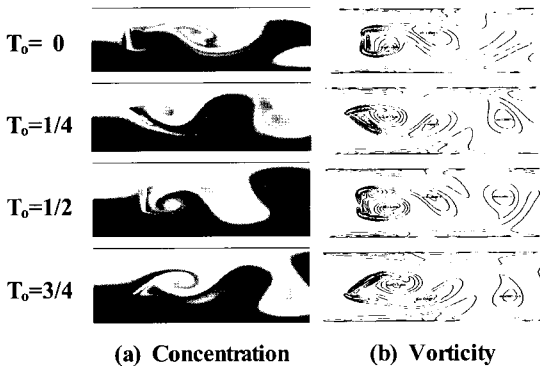


Fig. 4 Concentration and vorticity distribution during a period of stirrer oscillation(Model III)

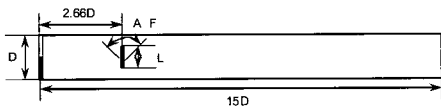


Fig. 5 Design parameters of a micro-mixer with an oscillating stirrer

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

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

교반기의 진동수, 길이 및 각도의 수준별 값을 나타내고 있다.

#### 4.1 OLHD의 생성방법

본 연구에서는 주어진 설계영역에서 고르게 분포하는 실험점을 선택하기 위하여 Maximin 조건을 이용한 OLHD를 사용하였다. 이는 두 실험점 간 거리들 중 가장 작은 값을 최대화하는 것으로, Morris와 Mitchell은 이를 하나의 식으로 표현한  $\phi_p$  조건을 제안하였다<sup>(14,16)</sup>.

$$\min \phi_p = \left[ \sum_{i=1}^s J_i d_i^p \right]^{1/p} \quad (6)$$

여기서,  $d_i$ 는 두 실험점 간의 거리이고,  $J_i$ 는 동일한 거리를 갖는 실험점 쌍의 개수이며,  $p$ 는 양의 정수이다. 만약  $p$ 가 충분히 크다면, 이는 Maximin 조건과 동일하게 된다.

#### 4.2 크리깅 기법<sup>(15~18)</sup>

본 연구의 크리깅 모델은 실제 응답함수의 평균을 나타내는 전역모델  $f(x)^T \beta$ 와 이것으로부터의 편차(deviation)를 나타내는  $z(x)$ 의 합으로 표현한다.

$$y(x) = f(x)^T \beta + z(x) \quad (7)$$

여기서  $f(x)$ 는 회귀모델을 구성하는 함수이며,  $\beta$ 는 회귀 모델계수이다.  $z(x)$ 는 평균이 0이며 공분산은 정규분포를 따르는  $y(x)$ 의 분산인  $\sigma^2$ 과  $\theta$ 를 파라미터로 갖는 상관행렬  $R(x^i, x^j, \theta)$ 의 곱으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Cov[z(x^i), z(x^j)] = \sigma^2 R(x^i, x^j, \theta) \quad (8)$$

식 (8)의 상관행렬을 구성하는 상관함수  $R(x^i, x^j)$ 는 임의의 두 실험점  $x^i$ 와  $x^j$  사이의 상관관계를 나타낸다. 상관함수는 설계자들에 의해서 식 (9)과 같이 결정되는데 지수상관함수( $p=1$ )와 가우스상관함수( $p=2$ )등을 주로 사용한다<sup>(15)</sup>.

$$R(x^i, x^j, \theta) = \exp\left[-\sum_{k=1}^{n_d} \theta_k |x^i - x^j|^p\right] \quad (9)$$

식 (9)에서  $n_d$ 는 설계변수의 개수,  $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_{n_d}]^T$ 는 상관인자이다. 상관인자는 양의 실수이며 크리깅 모델의 곡률을 결정한다. 즉  $\theta_k$ 가 클수록 함수는 비선형성이 강하다. 지수인자  $p$ 에 따른 비교 연구를 수행한 결과  $p=2$ 인 가우스상관함수가 크리깅 모델에 더 적합한 것으로 알려져 있다. 선

행실험에 의한 응답값들을  $Y = [y(x^1), y(x^2), \dots, y(x^n)]^T$ 라고 하면 크리깅 모델은 다음과 같이 유도된다<sup>(17)</sup>.

$$\hat{y}(x) = f(x)^T \hat{\beta} + r(x)^T R^{-1}(Y - F\hat{\beta}) \quad (10)$$

여기서  $\hat{\beta} = (F^T R^{-1} F)^{-1} F^T R^{-1} Y$ 로 표현되며,  $r(x)$ 는 예측점과 선행 실험점들간의 상관관계를 나타내는 상관벡터이다.

### 4.3 능동형 미소 혼합기의 근사 최적화

능동형 미소 혼합기의 근사 최적화를 위해서 데이터 샘플링단계, 크리깅 메타모델 구성단계, 근사 최적해를 구하는 단계로 3단계의 근사 최적화 과정을 구성하였다. 첫 단계인 데이터 샘플링은 OLHD기법을 이용하여 27개 설계변수 샘플링을 하였다. 그리고, 샘플링된 설계변수를 이용하여 27개의 혼합지수를 해석하여, 설계변수와 혼합지수로 이루어진 27개의 실험계획이 구성되었다. 표 2에 27개의 설계변수와 설계변수에 대한 각각의 혼합지수 해석결과를 나타내었다. 두 번째 단계인 크리깅 메타모델의 구성은 이전 단계의 27개의 실험계획을 이용하여 구성하였고, 구성된 크리깅 메타모델을 이용하여 유전자 알고리즘을 이용한 근사 최적해를 예측하였다. 크리깅 메타모델과 유전자알고리즘의 구성은 Matlab을 이용하여 코딩하였다. 표 3에 LBM을 이용하여 해석한 초기 설계변수, 혼합지수의 값과 크리깅 메타모델로 예측한 근사 최적화 값을 비교하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 크리깅 기법을 이용하여 진동 교반기를 가진 능동형 미소 채널형 혼합기의 혼합 성능을 높이기 위한 근사최적화를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Re=50에서는 실린더와 진동 교반기가 배열된 능동형 미소 채널형 혼합기의 혼합성능 해석이 불가능하여, 실린더를 제외한 진동 교반기만 배열된 능동형 미소 채널형 혼합기의 혼합성능을 해석하였다.
- (2) 진동 교반기가 배열된 능동형 미소 채널형 혼합기에 대

Table 2 Optimum design solution of the micro-mixer

Freq.	Diameter	Length	Mixing Index
1.00000	0.51154	0.58974	0.18339
1.07692	0.55769	0.70513	0.12449
1.15385	0.58077	0.50000	0.15536
1.23077	0.68462	0.64103	0.10698
1.30769	0.66154	0.75641	0.12827
1.38462	0.67308	0.52564	0.08955
1.46154	0.75385	0.71795	0.10236
1.53846	0.59231	0.60256	0.17844
1.61538	0.56923	0.78205	0.21047
1.69231	0.76538	0.56410	0.09834
1.76923	0.52308	0.67949	0.20130
1.84615	0.69615	0.82051	0.21688
1.92308	0.50000	0.53846	0.10796
2.00000	0.65000	0.66667	0.24908
2.07692	0.80000	0.79487	0.16353
2.15385	0.60385	0.51282	0.21939
2.23077	0.77692	0.65385	0.21186
2.30769	0.53462	0.76923	0.27491
2.38462	0.73077	0.55128	0.25417
2.46154	0.70769	0.73077	0.23787
2.53846	0.54615	0.61538	0.34515
2.61538	0.62692	0.80769	0.08300
2.69231	0.63846	0.57692	0.05379
2.76923	0.61538	0.69231	0.17386
2.84615	0.71923	0.83333	0.09599
2.92308	0.74231	0.62820	0.16946
3.00000	0.78846	0.74359	0.14784

Table 3 Optimum design solution of the micro-mixer

	Freq.	Length	Angle	Mixing Index
Initial	1	0.5D	± 45°	0.2116
Optimum	1.0346	0.66D	± 45°	0.0239

하여 OLHD 데이터 샘플링 기법과 크리깅 기법을 적용하여 메타모델을 이용한 근사최적화를 수행하였고, 그 결과에 대한 3개 설계인자(진동 교반기의 진동수, 각도, 길이)의 최적조합을 찾았다.

- (3) 최적조합의 설계인자 값들을 이용한 예측결과와 초기에 설정한 설계인자 값들을 이용한 해석보다 88.72%의 뛰어난 혼합성능 양상을 나타내었다.

## 후 기

이 논문은 2008년도 2단계 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었음.

## 참 고 문 헌

- (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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Chiem, N., Colyer, C. and Harrison, J. D., 1997, Microfluidic Systems for clinical Diagnostics, *Proc. Int. Solid-State Sensor and Actuators Conf.*, Chicago, IL, pp. 183~186.
- (6) 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.
- (7) Kim, Y. D., An, S. J. and Maeng, J. S., 2006, "The Effect of Karman Vortex for Mixing in a Micro-channel with an Oscillation Micro-Stirrer," *J. of KSME Series B*, Vol. 30, No. 2, pp. 144~152.
- (8) 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.
- (9) Williamson, C. H. K., 1996, "vortex Dynamics in the Cylinder Wave," *Annu. Rew. Fluid. Mech.*, Vol. 28, pp. 477~539.
- (10) 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.
- (11) Park, S. H., 2003, *Design of Experiments*, Minyoung Press.
- (12) Chi, L. Z., Kwak, J. S. and Ha, M. K., 2004, "Geometric Error Analysis of Surface Grinding by Design of Experiments," *Trans. of KSMTE*, Vol. 13, No. 4, pp. 1~8.
- (13) Park, J. S., 1994, "Optimal Latin-hypercube designs for computer experiments," *J. of Statistical Planning and Inference*, Vol. 39, pp. 95~111.
- (14) Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J. and Wynn, H. P., 1989, "Design and Analysis of Computer Experiments," *Statistical Science*, Vol. 4, No. 4, pp. 409~435.
- (15) Shin, Y. S., Lee, Y. B., Ryu, J. S. and Choi, D. H., 2005, "Sequential Approximate Optimization Using Kriging Metamodels," *Trans. of KSME*, Vol. 29, No. 9, pp. 1199~1208.
- (16) Sakata, S., Ashida, F. and Zako, M., 2003, "Structural optimization using Kriging approximation," *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 192, pp. 923~939.
- (17) Sakata, S., Ashida, F. and Zako, M., 2004, "An efficient algorithm for Kriging approximation and optimization with large-scale sampling data," *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 193, pp. 385~404.
- (18) Lee, T. H. and Jung, J. J., 2008, "A sampling technique enhancing accuracy and efficiency of metamodel-based RBDO: Constraint boundary sampling," *Computers and Structures*, Vol. 86, pp. 1463~1476.