〈 논문 〉

헤링본 미세혼합기의 크리깅 모델을 사용한 최적형상설계

아매드 앤사리† · 김 광 용*

(2007년 5월 2일 접수, 2007년 7월 9일 심사완료)

Shape Optimization of A Micromixer with Herringbone Grooves Using Kriging Model

Mubashshir Ahmad Ansari and Kwang-Yong Kim

Key Words : Shape Optimization(형상최적화), Micromixer(미세혼합기), Herringbone Groove(헤링본 홈), Navier-Stokes Equations(나비어-스톡스 방정식), Kriging Model(크리깅 모델)

Abstract

Shape optimization of a staggered herringbone groove micromixer using three-dimensional Navier-Stokes analysis has been carried using Kriging model. The analysis of the degree of mixing is performed by the calculation of spatial data statistics. The calculation of the variance of the mass fraction at various nodes on a plane in the channel is used to quantify mixing. A numerical optimization technique with Kriging model is applied to optimize the shape of the grooves on a single wall of the channel. Three design variables, namely, the ratio of groove width to groove pitch, the ratio of the groove depth to channel height ratio and the angle of the groove, are selected for optimization. A mixing index is used as the objective function. The results of the optimization show that the mixing is very sensitive to the shape of the groove which can be used in controlling mixing in microdevices.

기호설명

D : 홈의 깊이
F : 목적함수
L : 유로길이
Pi : 홈의 피치
h : 유로높이
M : 혼합지수
P : 홈의 비대칭도
$p, \Delta p$: 압력과 압력강하
Pe : 페클리트수(Peclet number)
W_d : 홈의 폭
W : 유로의 폭
x,y,z : 직교 좌표

그리스문자

σ : 분산
θ : 홈의 각도

† 책임저자, 인하대학교 대학원 기계공학과
* 회원, 인하대학교 기계공학부
E-mail : kykim@inha.ac.kr
TEL : (032)872-3096 FAX : (032)868-1716

1. 서 론

랩온칩(lab-on-chip)의 개념이 발전함에 따라 미세유로(microchannel), 미세반응기(microreactor), 미세펌프(micropump) 및 미세혼합기(micromixer) 등의 미세 장치들에 대한 관심이 높아지고 있다. 랩온칩은 분리, 혼합, 반응 및 해석 등을 하나의 칩

에서 수행하는 장치이다. 화학반응에서 물질들의 용액을 균질화하는 문제를 비롯해 이러한 미세장치들에서 유체의 혼합을 제어하는 문제는 여러 응용분야에서 매우 중요한 과제이다.

미세혼합기는 크기가 작아서 유동의 대부분이 층류가 되는데, 이는 유체혼합의 효율을 현저히 떨어뜨리는 요인이 된다. 층류의 경우 유체의 혼합은 분자확산에 의존하므로 혼합이 매우 느리게 진행된다. 분자 확산은 유체 간의 접촉면적을 늘리거나 확산 경로를 줄임으로써 증진시킬 수 있다. 이러한 혼합과정을 촉진시킬 수 있는 방법을 연구하는 것은 중요하다.

많은 종류의 미세혼합기가 개발되었는데, 이들은 크게 능동형(active)과 수동형(passive) 미세혼합기로 분류된다. 능동형 미세혼합기는 구동장치를 활용하거나 전기장 또는 자기장과 같은 외부 에너지원을 이용한다. 수동형 미세혼합기는 어떤 구동장치나 외부 에너지원을 이용하지 않고 많은 경우에 혼합기 유로 표면의 형상을 변화시킴으로써 횡류를 유발하여 혼합을 증진시키는 방식을 사용한다. Nguyen 과 Wu[1]는 능동형과 수동형 미세혼합기 모두에 대해 설계기술을 연구하여 미세혼합기 성능을 평가하는 정량적인 기술에 대해 보고하였다. Hassell 등[2]은 능동형과 수동형 미세혼합기의 혼합 원리에 대한 조사연구를 수행하고 혼합기의 대표적인 설계와 응용분야들을 소개하였다.

유체의 혼합에는 확산, 신장(stretching) 과 홀딩(holding), 그리고 붕괴(breakup)의 과정이 수반된다. 확산은 유체간의 농도구배에 의해 발생한다. 신장과 홀딩은 대류에 의해 발생하는데 유체의 대류는 유로 표면형상의 변화에 의해 크게 영향을 받을 수 있다. 신장과 홀딩은 유체 간의 경계면을 증가시킴으로써 지수적으로 증가하고 이는 혼합효율을 증가시킨다.[3]

수동형 혼합기의 혼합을 증진시킬 수 있는 방법 중 하나는 혼합유로의 표면에 일정한 패턴을 각인하는 것이다. Stroock 등[4]은 미세혼합기 유로의 바닥에 헤링본(herringbone) 무늬의 비대칭형상의 얕은 부조(bas-relief)를 반복함으로써 혼합이 증진될 수 있다는 것을 실험을 통해 보였다. 이러한 설계의 기본 개념은 횡류를 유발하여 혼합될 유체들 간의 접촉면적을 늘리는 것이다. 아울러, Stroock 등[4]은 엇갈린 헤링본 혼합기의 혼합성능을 분석하였다. Stroock 과 McGraw[5]는 해석적으로 홈(groove)의 비대칭성 효과를 분석하여 최적 비대칭형상의 범위를 보고하였다.

Stroock 등[4]이 제시한 형상에 대해 수많은 연구들이 그 후 진행되었는데 이들은 공통적으로 홈의 형상이 유체의 혼합에 매우 영향이 크다고 보고하고 있다. Aubin 등[6]은 혼합기의 설계를 개선하기 위한 목적으로 엇갈린 헤링본 미세혼합기의 기하학적 형상변수들이 혼합효율에 미치는 영향을 수치해석적으로 연구하였다. 이들은 입자추적법(particle tracing method)을 혼합성능을 정량화하고 가시화하는데 사용하여 혼합효율이 표면형상의 미세한 변화에도 매우 민감한 영향을 받는다는 것을 보고하였다. Liu 등[7]은 서펀타인(serpentine) 혼합기와 엇갈린 헤링본 혼합기에서 두 유체 간의 삼차원적인 혼합에 대해 연구하였다. 이들은 수치해석적으로 혼합에 대해 유체의 특성과 농도의 구배가 미치는 영향을 연구하였다. Wang 등[8]도 역시 전산유체역학적 해석과 입자추적법을 사용해 미세유로 내 혼합에 대해 연구하였다. 최근에 Hassel 과 Zimmerman[9]은 단일 유체유동에서 세가지 홈의 형상에 대해 수치적으로 연구하였고, 형상이 유동구조에 미치는 영향에 대해서도 보고하였다.

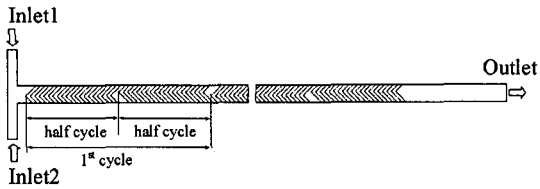
이상의 연구에서 알 수 있듯이 미세혼합기에서 홈의 형상이 혼합성능에 미치는 영향이 매우 크고, 일부 연구에서 이들의 영향을 실험이나 수치적으로 시험한 바 있으나 체계적인 수치최적화기법[12]을 사용한 기학학적 최적설계에 관한 연구는 아직 수행된 바 없다.

지난 십년간 최적설계기법은 매우 빠른 속도로 발전하였다. 수치최적화기법이 일반적인 설계수단으로 간주되기 시작했고, 여러 가지 잇점, 즉 자동설계기능, 다양한 제한조건, 다학제간 적용 등의 장점이 있다는 것이 밝혀졌다. 그러나, 과다한 계산시간을 요하는 삼차원 나비어-스톡스 해석과 결합된 최적설계는 컴퓨터의 발달에 힘입어 최근에 들어서야 실용화되기 시작했다. 크리깅(Kriging) 모델을 비롯한 대리 모델(surrogate model)들은 이미 최적화기법으로서의 효용성을 인정받아 다목적/다학제 최적설계에 폭 넓게 사용되어 왔다.

본 연구에서는 홈이 아래 벽면에 부조된 엇갈린 헤링본 미세혼합기의 형상을 최적화하여 혼합성능을 증진시키기 위한 방법에 대해 연구하였다. 삼차원 나비어-스톡스(Navier-Stokes) 방정식을 사용한 해석을 수행하였으며 크리깅 모델을 최적화기법으로 사용하였고 유로높이에 대한 홈의 깊이 비 및 홈의 각도 등 두 가지 기하학적 변수를 설계변수로 사용하였다.

2. 수치해석 방법

유동장과 유체혼합에 대한 수치해석을 위해서는 상용 전산유체역학 코드인 ANSYS CFX-10.0[10]을 사용하였다. 이 코드는 범용의 전산유체역학 코드로서 나비어-스톡스 방정식을 유한체적법으



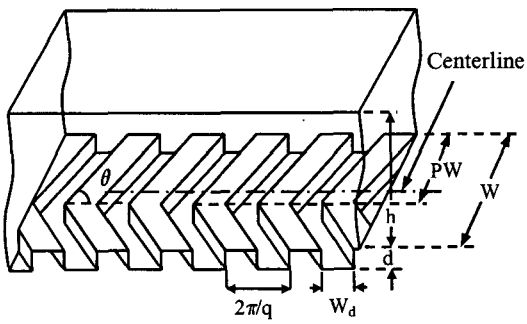


Fig. 1 Geometry of micromixer with staggered herringbone grooves

로 계산한다. 본 연구에서는 삼차원 정상상태 층류에 대해 지배방정식인 질량보존방정식과 운동량 방정식이 계산되었고, 대류-확산 모델(advection-diffusion model)을 사용해 미세혼합기내의 혼합과정을 계산하였다. 물과 에탄올(ethanol)을 작동유체로 사용하였다.

사면체의 비정렬격자계가 사용되었고 벽 근처에서는 속도구배의 정확한 계산을 위해 육면체 격자를 사용하였다. 격자의 구성이 잘 되었는지 면밀히 확인하고 수정을 통해 수렴과 해의 정확성을 증진시키는 작업이 수행되었다.

Fig. 1 은 헤링본 미세혼합기의 기하학적 형상을 보여준다. 이 형상은 Strook 등[4]이 시험한 형상과 유사하다. 헤링본 무늬의 꼭지점 위치에 따라 비대칭성이 달라 지는데 이 위치는 벽으로부터 PW 거리에 위치한다고 정의한다. 여기서, W 는 유로의 폭이다. 전체 혼합기는 헤링본 홈의 5 개 주기로 구성되는데 한 주기는 20 개의 홈으로 구성된다.

경계조건으로 입구에서는 속도가 지정되고 출구에서는 정압이 0 으로 지정된다. 입구 1(Inlet 1)에서는 100% 에탄올이, 그리고 입구 2(inlet 2)에서는 100% 물이 유입된다. 벽에서는 점착조건이 적용된다. 물과 에탄올의 20 °C 에서의 특성이 table 1 에 주어져 있다. 물과 에탄올 간의 확산계수는 1.2×10^{-5} cm^2s^{-1} 이다. 페클리트 수는 2.0×10^3 이다. 계산에 사용된 미세혼합기의 길이는 10 mm 이다.

Table 1 Properties of fluids at 20 °C

Fluid	Density ($kg\ m^{-3}$)	Viscosity ($Kg\ m^{-1}\ s^{-1}$)	Diffusivity ($m^2\ s^{-1}$)
Water	9.98×10^3	0.9×10^{-3}	1.2×10^{-9}
Ethanol	7.89×10^3	1.2×10^{-3}	1.2×10^{-9}

3. 최적화 방법

3.1 목적함수와 설계변수

본 연구에서의 최적화 문제는 목적함수 $F(\mathbf{x})$ 를 $x_i^l \le x_i \le x_i^u$ 범위 내에서 최대화하는 문제로 정의된다. 여기서 $\mathbf{x}$ 는 설계변수들의 벡터이고 x_i^l 과 x_i^u 는 각각 설계변수들의 상한과 하한이다.

혼합의 정량적 분석은 혼합기 내에서 유체 종의 분산(variance)을 계산함으로써 수행되었다. 미세혼합기 내의 혼합 정도를 평가하기 위해 유동방향에 수직한 단면 내에서 질량 비의 분산을 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{1}{N}\sum (c_i - \bar{c}_M)^2} \tag{1}$$

여기서 N 은 단면 내 격자점의 수, c_i 는 격자 i 에서의 질량비, 그리고 $\bar{c}_M$ 는 최적 혼합질량비를 나타낸다. 혼합기내 패턴 홈 끝에서의 혼합지수(mixing index), M 이 본 연구의 목적함수로 정의된다. 이 혼합지수는 다음과 같다.

$$F = [M]_{x=x_o} = \left[1 - \sqrt{\frac{\sigma_M^2}{\sigma_{\max}^2}}\right]_{x=x_o} \tag{2}$$

여기서 σ_{max} 은 최대분산을 나타낸다. $x=x_o$ 는 10 mm 지점, 즉 패턴 홈의 끝을 나타낸다.

Fig. 1 에 나타난 바와 같이 미세혼합기에는 P, W, h, d, W_d, q 및 θ 등 일곱가지 기학학적 변수들이 존재하는데, 이 중에서 유로높이 대 홈의 깊이 비, d/h, 홈의 각도, θ 및 홈의 폭 대 피치(pitch)의 비, W_d/Pi 등 세 가지 변수를 최적화를 위한 설계변수로 선택하였다. 여기서 홈의 피치 Pi 는 그림에서와 같이 $2\pi/q$ 에 해당된다. 다른 변수들은 Strook 등[4]이 사용한 값으로 고정하였다. 즉, h=77 μm, W=200 μm 및 q= $2\pi/100$ μm^{-1} 이다. 홈 무늬 꼭지점의 벽으로부터의 거리는 PW 이며 P=2/3 이다.

3.2 크리깅 모델(Kriging model)

크리깅 메타모델(Kriging metamodel)로 알려진 KRG 모델[16]은 최적화를 위한 대리 모델 의 일종

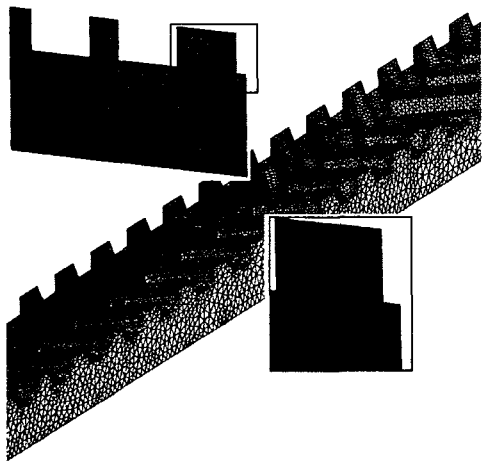


Fig. 2 Example of tetrahedral grid system (w_d/Pi, θ=45 and d/h=0.40)

으로 본 연구에서는 이 모델을 최적화과정에 채택하였다. Gauss 상관함수를 사용한 선형 다항식 함수가 이 모델의 구축을 위해 사용되었다. 크리깅의 가정은 다음과 같이 전역 모델(global model) f(x)와 이탈(departures) Z(x)의 합으로 나타난다.

$$\hat{F}(x) = f(x) + Z(x) \tag{3}$$

여기서 F(x)는 미지의 함수이고, f(x)는 x 의 알려진 함수, 그리고 Z(x)는 평균은 영(zero)이지만 영이 아닌 공분산(covariance)을 갖는 확률적인 과정의 실현이다. f(x)는 전역적인 설계공간을 나타내고 Z(x)는 국부적인 분산을 나타낸다.

3.3 최적화 과정

본 연구의 최적화과정에서는 우선 세가지 설계변수가 선정되고 설계영역이 설정된다. 그 다음, 실험계획법(DOE: design of experiment)에 의해 설계점들을 선정하고 이 점들에서 목적함수(혼합지수) 값을 유동해석에 의해 얻는다. 본 연구에서는 실험계획법으로 삼단계 fractional factorial design 을 사용하였다. 그리고, D-optimal 설계[15]를 사용하여 세 변수에 대한 설계점의 수를 25 개로 줄였다. 각 설계점에서의 목적함수값의 계산은 위에서 언급한 바와 같이 삼차원 나비어-스톡스 해석에 의해 수행하였다.

4. 결과 및 검토

해석을 위한 최적의 격자계를 결정하기 위해 격자의존성 시험을 수행하였다. 선정된 격자의 대

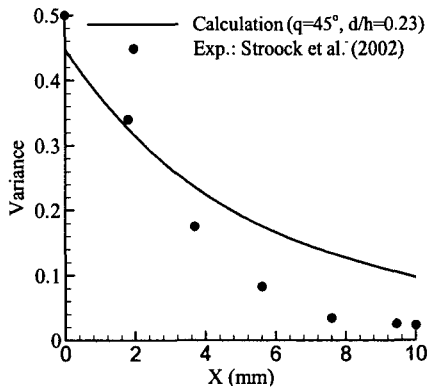


Fig. 3 Comparison with experimental results

Table 2 Design variables and ranges

Design variable	Lower limit	Upper limit
W_d/Pi	0.40	0.60
θ	45	70
d/h	0.23	0.50

표적인 예가 Fig. 2 에 나타나 있다. 본 계산 결과는 Stroock 등[4]의 실험결과와 분산, σ_M 의 분포에 대해 Fig. 3 에 나타난 바와 같이 정성적으로 비교되었다. 실험에서 사용된 두 유체는 100% 물과 80% glycelol 과 20% 물의 혼합물이다. Glycerol/물 혼합물의 점성계수는 $6.7\text{x}10^{-2}$ kg $m^{-1}s^{-1}$ 이고 에탄올의 점성계수는 $1.2\text{x}10^{-3}$ $kgm^{-1}s^{-1}$ 이다. 수치해석과 최적화 과정에서 상용한 작동유체는 이미 언급한 바와 같이 물과 순수 에탄올이다. Stroock 등[4]의 실험에서 사용한 미세혼합기는 15 주기의 홈을 가지고 있어 본 연구에서 사용한 혼합기 보다 훨씬 길다. 그러므로 Fig. 3 에 나타난 차이는 이러한 기하학적 형상과 작동유체의 차이에 기인한다, 그러나, 계산치의 정성적인 경향은 정성적으로 실험치와 잘 일치한다.

본 연구에서는 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 한 벽면에 헤링본 홈들이 부조된 미세혼합기 형상에 대해 물과 에탄올을 작동유체로 하여 Pe=2.0 $\text{x}10^3$ 에서 목적함수인 혼합기 출구에서의 혼합지수를 최대화하기 위해 최적설계를 수행하였다. 설계변수들의 범위는 Table 2 에 주어진 바와 같다.

Fig. 4 는 목적함수의 민감도 분석결과를 보여준다. 각 설계변수 값의 변화는 최적치의 ±10% 범위 내에서 이루어 진다. 하첨자 opt 는 최적점에서의 값을 나타낸다. 민감도 분석결과는 두 유체의 혼합이 홈의 각도 보다는 d/h 와 W_d/Pi 에 훨씬 더 민감한 것을 보여준다. 그리고, d/h 와 W_d/Pi 에 대한 민감도는 그 정도가 유사하다.

Table 3 Results of optimization

	W_d/Pi	θ (degree)	d/h	Objective function, F	
				Prediction by Kriging, F_{KRG}	Calculation by NS analysis, F_{NS}
Optimum	0.53	59.7	0.46	0.8741	0.8731
Reference[15]	0.50	45.0	0.23	-	0.8061

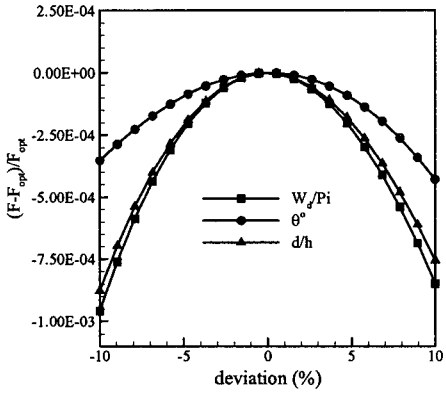


Fig. 4 Sensitivity analysis of objective function

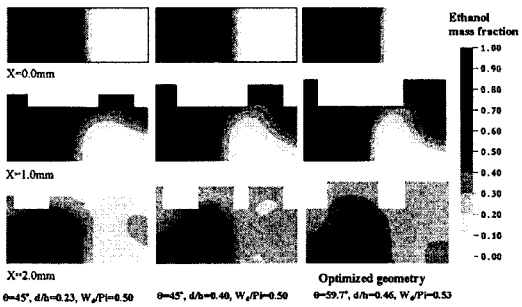


Fig. 5 Mass fraction distributions of ethanol on planes at various locations along the length of the mixer

최적설계 결과 설계변수 W_d/Pi, θ 및 d/h 에 대한 최적치는 각각 0.53, 59.7° and 0.46 로 얻어졌다. Table 3 에 나타난 바와 같이 최적점에서 Kriging 모델이 예측한 목적함수는 0.8741 이고, 이 점에서 나비어-스톡스 방정식 계산을 수행한 결과는 0.8731 을 나타내고 있다. 이는 Kiriging 모델이 최적점에서 0.1% 정도의 오차로 매우 정확히 목적함수를 예측하고 있음을 알 수 있다. 일반적인 대리모델들의 성능으로 보아 이 값은 우연히 이례적으로 작은 값을 보인 것으로 사료되나 Kriging 모델의 우수성을 보여주고 있다고 사료된다.

Fig. 5 는 W_d/Pi = 0.50 에서 최적형상과 두 가지 기준형상 (θ=45° & d/h=0.23 및 θ=45° & d/h=0.40) 에 대해 미세혼합기 길이방향 몇 가지 단면에서 질량비 분포를 보여주고 있다. 정성적인 결과는

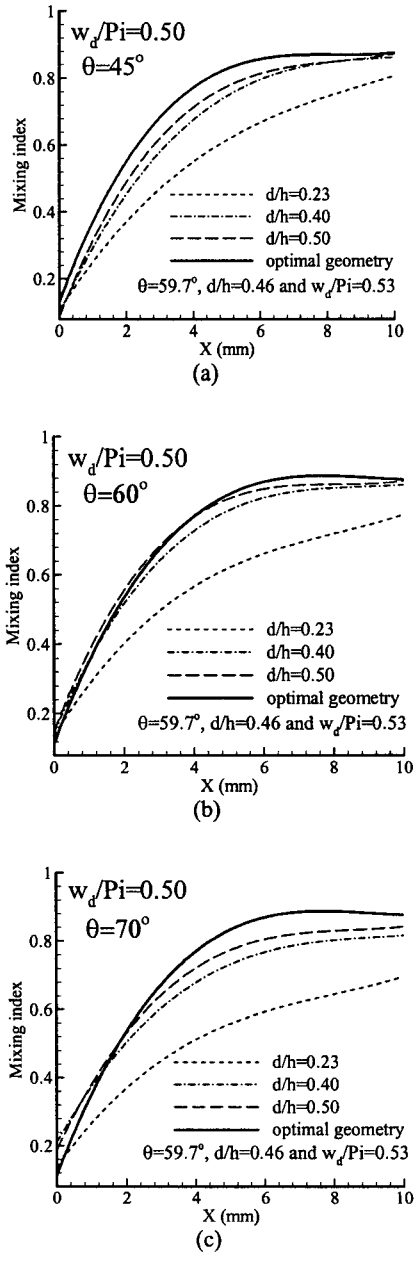


Fig. 6 Mixing index distributions

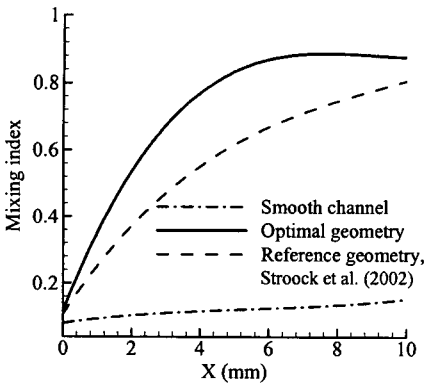


Fig. 7 Mixing index distributions in optimal micromixer

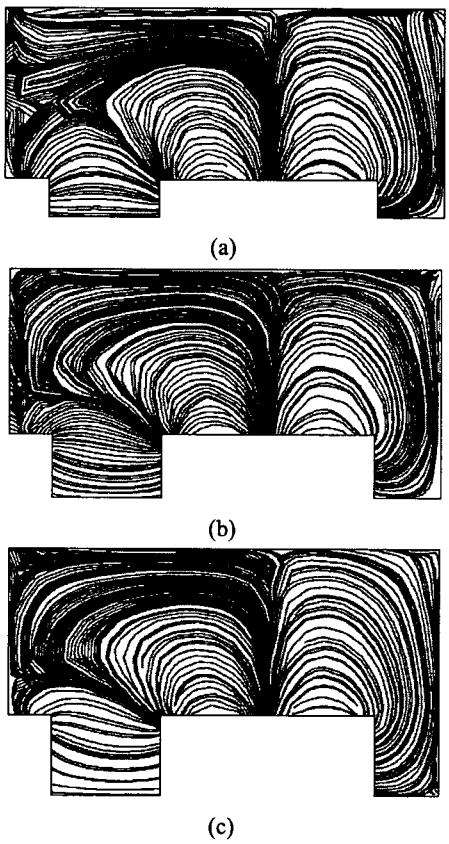


Fig. 8 Streaklines on yz-planes at x=0.60mm for W_d/Pi=0.50 and θ=45° (a) d/h=0.23 (b) d/h=0.40 (c) d/h=0.50

d/h 가 증가함에 따라 질량비 분포는 보다 균일해지고 있음을 보여준다.

유로 높이에 대한 홈 깊이의 비가 유체의 혼합에 미치는 효과가 Fig. 6 에 나타나 있다. 혼합지수는 d/h 의 증가에 따라 증가하고 있으며 이는 Wang 등[8]이 보고한 바와도 일치한다. 혼합지수의 분포는 민감도 분석 결과 Fig. 4 에 나타난 바와도 같이 홈의 각도에 의해서는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타난다. 혼합지수의 구배는 입구에서 최대이고 하류로 갈수록 감소한다.

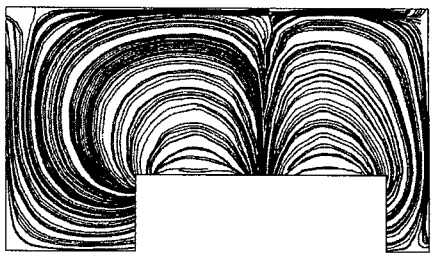


Fig. 9 Streaklines on yz-plane at x=0.60mm for optimal shape; W_d/Pi=0.53 θ=59.7° and d/h=0.46

Fig. 7 은 최적형상과 Stroock 등[4]이 제시한 형상에 대해 혼합지수 분포를 비교하고 있다,. 홈이 없는 유로에 대한 결과도 같이 제시되었다. 홈이 없는 경우에는 홈이 있는 경우에 비해 현저히 낮은 혼합지수값을 보여주고 있다. 이 결과는 헤링본 홈에 의해 유발되는 두 개의 큰 와동(vortex)이 유체의 혼합을 촉진시키기 때문이다. 그리고, 형상의 최적화를 통해 혼합지수는 유로의 전구간에 걸쳐 상당히 개선되고 있음을 알 수 있다. 특히 상류 절반 구간에서 최적화에 의해 혼합지수의 구배가 증가되어 하류에서는 거의 무시할 정도가 되고 있음을 알 수 있다. 목적함수의 값(출구에서의 혼합지수)들은 최적형상과 기준형상에서 각각 0.8731 과 0.8061 로 얻어지는데 이는 최적설계로 인해 이 값이 7.67% 증가하였음을 나타낸다.

홈의 각도는 횡류를 발생시켜 유체의 흐름을 유로를 따라 회전시킴으로써 유동의 혼합을 촉진시킨다. Stroock 등[4]은 최대의 횡류를 발생시키는 각도를 45° 로 제시한 바 있으나, 본 연구의 수치최적화에서는 최대의 혼합을 가져오는 각도가 59.7° 로 예측되었다.

Fig. 8 과 9 에서는 주유동방향에 수직한 yz-평면 상에서의 유동구조를 보여준다. 유로높이에 대한 홈 깊이 비의 효과가 Fig. 8 에 나타나 있다. Fig. 9 는 최적형상에서의 유동구조를 보여준다. 이 그림들은 유로단면의 대부분의 영역을 점하는 두 개의 큰 와동(vortex)이 유동을 지배하고 있음을 보여준다. 서로 다른 d/h 에 따른 유동구조 비교에서 유동장의 정성적인 변화는 발견되지 않으나 d/h 가 낮아질수록 유동구조가 복잡해짐을 알 수 있다. 이에 반해 최적형상에 대한 유동구조를 나

타낸 Fig. 9 에서는 단순하게 두 개의 큰 와동이 전체 유동장을 채우고 있다. 이는 유동의 혼합이 단면 내에서 생성되는 와동의 수 보다 와동의 강도에 더 좌우됨을 나타낸다.

5. 결 론

엇갈린 헤링본 무늬가 부조된 미세유로에 대한 최적화가 두 가지 유체의 혼합을 최대화하기 위해 수행되었다. 최적화에 사용된 세가지 설계변수는 홈의 각도, 유로높이에 대한 홈 깊이 비, 그리고 홈 피치에 대한 홈 폭의 비이다. 민감도 해석의 결과는 유체의 혼합이 홈의 각도에 비해 나머지 두 변수에 더 민감함을 보였다. 최적화의 결과로 유체의 혼합이 홈의 형상 변화에 의해 상당히 향상되었음을 알 수 있었다. 최적형상은 특별히 미세혼합기 입구 근처에서의 혼합을 증진시키는 효과를 나타내었다.

후 기

이 논문은 2006 년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. R01-2006-000-10039-0) 임을 밝힌다.

참고문헌

(1) Nguyen, N.T. and Wu, Z., 2005. "Micromixers- a Review," *Journal of Micromechanics and Micro-engineering*, 15, R1-R16.

(2) Hessel, V., Lowe, H., Schonfeld, F., 2005. "Micromixers-a Review on Passive and Active Mixing Principles," *Chemical Engineering Science* 60, 2479~2501.

(3) Ottino, J.M., 1989, The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos and Transport. Cambridge: Cambridge University Press.

(4) Stroock, A.D., Dertinger, S.K., Ajdari, A., Mezic, I., Stone, H.A. and Whitesides, G. M., 2002. "Chaotic Mixer for Microchannels," Science 295, 647~651.

(5) Stroock, A.D. and McGraw, G.J., 2004, "Investigation of the Staggered Herringbone Mixer with a Simple Analytical Model," *Philosophical Transactions Royal Society London*, Series A, Vol. 362, pp. 971~986.

(6) Liu, Y. Z., Kim, B. J. and Sung , H. J., 2004. "Two Fluid Mixing in Microchannel," *International Journal of Heat and Fluid Flow* 25, 986~995.

(7) Hassell, D. G., and Zimmerman, W. B., 2006, "Investigation of the Convective Motion Through a Staggered Herringbone Micromixer at Low Reynolds Number Flow," *Chemical Engineering Science* 61, 2977~2985

(8) Wang, H., Ioveitti P., Harvey, E. and Masood, S., 2003, "Numerical Investigation of Mixing in Microchannels with Patterned Grooves," *Journal of Micromechanics and Microengineering* 13, 801~808.

(9) Aubin, J., Fletcher, D. F. and Xuereb C., 2005, "Design of Micromixer Using CFD Modeling," *Chemical Engineering Science* 60, 2503~2516.

(10) CFX-10.0, Solver Theory, ANSYS 2004.

(11) MATLAB®, The Language of Technical Computing, Release 14. The MathWorks, Inc., 2004.

(12) Ansari, M. A. and Kim, K. Y., 2007, "Application of Radial Basis Neural Network to Optimization of a Micromixer," *Submitted to Chemical Engineering and Technology.*

(13) Kim, K.Y. and Seo, S. J., 2006, Application of Numerical Optimization Technique to Design of Forward-Curved Blades Centrifugal Fan JSME International Journal-Series B 49 (1), 152~158.

(14) Vanderplaats, G.N., 1984. "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications," McGraw-Hill.

(15) Myers, R.H., Montgomery, D.C., 1995. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiment. Wiley, New York.

(16) Martin, J.D. and Simpson, T.W., 2005, "Use of Kriging Models to Approximate Deterministic Computer Models," *AIAA Journal*, Vol. 43, No. 4, pp. 853~863.