

〈 논문 〉

격자 볼츠만 방법을 이용한 미소 채널에서의 혼합효율 증가를 위한 수동형 믹서의 최적화

윤준용[†] · 한규석* · 변성준*
(2004년 10월 14일 접수, 2005년 3월 7일 심사완료)

Optimization of Passive Mixer for Enhanced Mixing in a Micro-channel by Using Lattice Boltzmann Method

Joon-Yong Yoon, Gyu-suk Han and Sung-Joon Byun

Key Words: Micro-Mixer(마이크로 믹서), Two-Phase Mixing(이상 혼합), Passive Mixer(수동형 믹서), Mixing Efficiency(혼합 효과), Lattice Boltzmann Method(격자 볼츠만 방법)

Abstract

In this work, Scalar Passive code in Lattice Boltzmann Method is employed to simulate two-phase flow of low Reynolds number in a micro-channel. The mixing characteristics in a micro-channel is a function of Peclet number. The mixing length increases with the Peclet number. It is found that with the inclusion of static elements at the channel, rapid mixing of two liquids can be achieved, as shown by the results of computer simulations. The enhancement in mixing performance is thought to be caused by the generation of eddies and by lateral velocity component when the mixture flows past static elements. The results indicate that the size of static element has more effect on the mixing than the number of static element.

기호설명

n_i : 분포함수	D : 확산 계수
Ω_i : 충돌 연산자	N_2 : 2차 물질 질량
c_i : 속도 벡터	J_x : 전체 유량
c : 격자 속도	C : 출구 질량유량
n^{eq} : 평형분포 함수	
τ : 완화 시간	
ω_i : 가중치 상수	
ρ : 밀도	
u : 유동 속도	
P : 압력	
ν : 동점성계수	

1. 서론

최근 BT(Bio Technology), NT(Nano Technology)에 관한 관심이 높아짐에 따라 Bio-MEMS에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. Lab-on-a-Chip이나 DNA칩과 같은 바이오칩의 경우 미소 채널을 통해 용액과 시료를 운반한다.⁽¹⁾ 따라서 미소영역에서의 신속한 혼합은 생화학 분석, 약물의 이송, 그 외의 다른 미소 유동의 응용에 필수적으로 되었으며 미소영역에서의 수치유동해석은 생화학 분야나 BT분야에서 광범위하게 사용되고 있다.

구체적으로 미소영역에서의 수치해석방법은 세포내에서 비교적 분자의 크기가 큰 DNA 또는

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 기계정보경영공학부
E-mail : jyoonyoon@hanyang.ac.kr
TEL : (031)400-5282 FAX : (031)418-5282

* 한양대학교 대학원 기계공학과

단백질의 분류공정, 미소채널에서의 화학반응, 효소반응 또는 극미량 (1~10nl)물질 부피량의 이동 등에 적용되고 있다.⁽²⁾

거시영역에서의 혼합은 관성력을 크게 해줌으로써 난류를 발생시켜 효율적인 혼합을 수행하게 되지만 미소영역에서의 혼합은 일반적으로 층류영역에서 이루어지므로 난류를 이용한 혼합은 불가능하고 채널 내에 임의의 장치를 설치하는 방법은 제작상의 문제로 인해 사용이 극히 제한적이다.⁽³⁾ 따라서 미소채널에서는 분자의 확산만으로 혼합을 수행하게 되는데, 이러한 분자의 확산만을 이용한 혼합방법은 혼합에 필요한 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 따라서 미소 채널 내에 인위적으로 와류를 발생시켜서 혼합효율을 증대시키는 마이크로 믹서에 대한 연구가 현재 주된 연구 경향이다.⁽⁴⁾

마이크로 믹서는 크게 수동형 믹서와 능동형 믹서로 나눈다. 수동형 믹서는 고정된 채널 구조에서 입출구의 압력차나 펌프 등 유체 유동에 필요한 에너지만으로 혼합시키는 방식이다. Wong 등⁽⁵⁾은 십자형의 채널에 수동형 믹서를 삽입하여 혼합효율을 증대시켰으며 Johnson 등⁽⁶⁾은 T형 채널 안에 Ablated Well을 파서 혼합효율을 증대시키는 연구를 수행하였고 Wang 등⁽⁷⁾은 채널 내에 Obstacle을 삽입하여 Obstacle의 배열을 최적화하는 연구를 수행하였다.

능동형 믹서는 유동장에 주기적으로 간섭을 주는 혼돈류(Chaotic Advection)에 기반을 두며 일반적으로 채널 내에 회전체를 삽입하여 혼합효율을 증대시키는 방식이다. Lu 등⁽⁸⁾은 회전하는 막대기를 채널 안에 삽입하여 급속히 혼합효율을 높였으며 Ukita 등⁽⁹⁾은 서틀콕 모양의 회전체를 채널 안에 삽입해서 혼합효율을 높이는 연구를 수행하였지만 수동형 믹서에 비해 외부전력과 더 복잡한 패키지와 조절장치들을 필요로 하는 단점이 있다.

수동형 믹서에 대해 십자형의 채널에 수동형 믹서를 삽입하여 기존의 Y형 채널에 비해 혼합효율을 증대시킨 Wong 등⁽⁵⁾의 연구는 십자형으로 된 채널에서 유체를 혼합시키는 방법으로 유체 주입을 위해 펌프가 더 필요하여 비용이 상승하게 된다. 더구나 채널설계에서 압력강하는 고려하지 않았다. T형 채널 안에 홈을 파서 혼합효율을 증대시킨 Johnson 등⁽⁶⁾의 연구도 채널

설계 시 압력강하에 대한 부분은 고려하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 단순 채널에서 두 유체의 혼합효율과 채널 내에서의 압력강하를 고려하여 수동형 믹서의 최적화에 대해 논하고자 한다.

본 연구에서는 격자 볼츠만 방법을 이용하여 수동형 믹서의 형상크기 및 개수에 따른 미소 채널에서 각 상황별로 농도와 압력을 측정하여 비교함으로써 혼합효율 증가와 작은 압력강하를 위한 믹서의 최적화를 연구하였다. 수치해석을 위하여 격자 볼츠만 방법 중 Scalar Passive Code를 사용하여 계산을 수행하였다.

2. 격자 볼츠만 방법

2.1 격자 볼츠만 방법의 소개

격자 볼츠만 방법(LBM)은 최근에 발전하기 시작하였다. LBM은 미소영역에 기초를 두고 거시영역의 복잡한 유동을 표현하고 있는데 이것은 LBM에 있어 중요한 장점이다.⁽¹⁰⁾

따라서 Fig. 1⁽¹¹⁾에 보는 것처럼 기존의 유체역학이 연속체 가정에 기반을 둔 유체를 묘사하는 식을 이산화하여 계산하는 반면에 LBM은 미소 입자들의 거동을 단순화하여 유체를 묘사하는 방법을 쓴다. 즉 유체의 유동이 입자거동의 거시현상이라는 사실을 이용하는 방식이다.

LBM의 장점으로는 우선 선형적인 형태라는 것이다. 기존의 CFD방식이 비선형으로 이루어진 반면에 LBM은 선형적인 형태로 컴퓨터 파워나 계산시간 등에서 장점으로 작용한다.

두 번째로 입자들의 거동에 기반을 둔 방식이므로 병렬화가 용이해서 다수의 컴퓨터로 병렬화가 쉽다는 장점이 있다.

압력은 상태방정식을 통해서 유도된 식을 사용하여 쉽게 구할 수 있고, Champman-Enskog 전개를 통해 질량보존식과 Navier-Stokes방정식을 만족하게 된다.

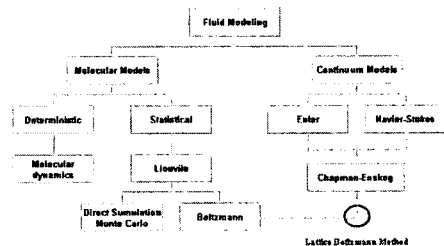


Fig. 1 Lattice Boltzmann method

2.2 격자 볼츠만 방정식 (LBM)

2.2.1 2차원에서의 LBM

많은 LBM중 D2Q9 모델을 사용하였다. D2Q9은 2차원이며 위치는 Fig. 2처럼 각 격자점에만 있을 수 있으며 속도벡터는 정지되어 있는 것을 포함하여 총 9개의 성분으로 이루어져 있다.

$$n_i(x+c_i\Delta t, t+\Delta t) - n_i(x, t) = \Omega_i(x, t) \quad (1)$$

$$\Omega_i(x, t) = -\frac{1}{\tau} [n_i(x, t) - n_i^{eq}(x, t)] \quad (2)$$

$\Omega_i(x, t)$ 는 충돌 식이며 Bhatnagar, Gross, Krook은 single time relaxation을 사용하여 단순한 형태의 충돌 식을 제안하였다.⁽¹²⁾

n_i 는 i 방향의 분포이고 τ 는 완화시간을 n^{eq} 는 평형분포함수를 뜻한다.

식 (1)에서 속도벡터 c_i 는 다음과 같다.

$$c_i = \begin{cases} c[\cos(\frac{i-1}{2}\pi), \sin(\frac{i-1}{2}\pi)] & \text{for } i=1,2,3,4 \\ \sqrt{2}c[\cos(\frac{i-4}{2}\pi), \sin(\frac{i-4}{2}\pi)] & \text{for } i=5,6,7,8 \end{cases} \quad (3)$$

c 는 격자의 속도이다.

각각의 위치에서의 밀도와 속도는 다음과 같이 분포함수의 합으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \rho(x) &= \sum_i n_i(x) \\ \rho u(x) &= \sum_i c_i n_i(x) \\ P(x) &= c_s^2 \rho \quad c_s^2 = \frac{c^2}{3} \quad [c_s: \text{음속}, c: \text{속도벡터}] \\ v &= \frac{2\tau-1}{6} \end{aligned} \quad (4)$$

그리고 식 (2)에서 평형 분포 함수 $n_i^{eq}(x, t)$ 는 Maxwell 분포를 속도에 대해서 Taylor 전개를 하여 속도의 2차항까지 나타낸다.

$$n_i^{eq}(x, t) = \omega_i \rho \left[1 + 3 \frac{c_i \cdot u}{c^2} + \frac{9}{2} \frac{(c_i \cdot u)^2}{c^4} - \frac{3 u \cdot u}{2 c^2} \right] \quad (5)$$

$$n_i^{eq}(x, t) = \omega_i \rho \left[1 + 3 \frac{c_i \cdot u}{c^2} \right] \quad (6)$$

ρ 는 유체의 밀도이며 u 는 유동속도를 뜻한다. 여기서 ω_i 는 weighting 상수로서 다음과 같은 값을 갖는다.

$$\omega_i = \begin{cases} 4/9 & i=0 \\ 1/9 & i=1,2,3,4 \\ 1/36 & i=5,6,7,8 \end{cases} \quad (7)$$

2.2.2 충돌과 이류

충돌은 식 (2)인 충돌 연산자를 계산하는 단계이며 이류는 충돌연산자에서 구해진 새로운 분포 함수를 다음 격자점으로 분산시켜주는 단계다.

이 두 단계가 끝나고 계산영역의 경계에서 경계조건을 계산하는 것으로 시간 t 에서 LBM의 계산이 마무리된다.

2.3 Scalar Passive

본 연구에서는 두 물질의 질량이 같고 두 물질 사이의 상호작용이 없다고 가정하였다. 따라서 유체 전체에 대한 밀도와 속도는 첫 번째 성분 유체의 밀도와 속도로만 표현되며 이 방법은 혼합을 계산하는 다른 분야에도 적용이 많이되고 있다. MEMS 분야에서 사용되는 미소영역의 확산 정도를 예측하는 방법으로 가장 적합하다.

식 (6)식을 Champman-Enskog 전개하면 식 (8)과 같은 농도방정식을 구할 수 있다. 따라서 식 (6)을 이용하여 수치해석을 수행하였다.

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} + \nabla \cdot (N_2 u) = \nabla \cdot (D \nabla u) \quad (8)$$

2.4 LBM에서의 무차원수

LBM에서 Re수는 다음과 같이 완화시간 (relaxation time), 격자수, 마하수 등으로 나타낸다.

$$Re = \frac{ULr}{\nu} = MaNl \frac{2\sqrt{3}}{2\tau-1} = \frac{6}{2\tau-1} U_l N_l \quad (9)$$

U_l 은 격자 유닛의 속도 N_l 은 채널 폭의 격자 수(ly) 그리고 τ 는 완화시간을 의미한다.

Scalar Passive로 계산하는 경우 확산(Diffusivity, D)과 점성(Kinematic Viscosity, ν)의 비로 Sc수가 정해지며 식은 아래와 같다.

$$Sc = \frac{\nu}{D} = \frac{2\tau_1-1/6}{2\tau_2-1/6} = \frac{2\tau_1-1}{2\tau_2-1} \quad (10)$$

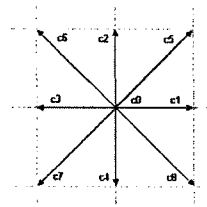


Fig. 2 Velocity vector of D2Q9 model

τ_1 은 유체의 완화시간을 뜻하며 τ_2 는 두 번째 성분의 완화시간을 말한다.

즉 Sc수는 서로 다른 유체성분의 relaxation time의 비의 함수가 되며 Pe수는 Re수와 Sc수의 곱으로 즉 관성력과 확산의 비로 이루어진다.

2.5 경계조건 및 혼합효율

2.5.1 개방된 경계조건

본 연구에서는 개방된 경계조건으로 계산을 수행하였다. 일반적으로 LBM에서는 첫 번째 열의 값을 마지막 열의 값에서 가져오게 되는 주기적인(Periodic) 경계조건을 쓰게 되는데 본 연구에서 다루었던 문제는 주기적인(Periodic) 경계조건을 사용하기 힘든 상황이므로 Sauro Succi가 언급한 개방된 경계조건⁽¹³⁾을 사용하였다. 입구 경계조건은 아래와 같다.

$$n_n(y) = n^{eq}[\rho_{in}, u_{in}(y)] \tag{11}$$

출구 경계조건은 아래의 식으로 표현하게 된다.

$$\begin{aligned} J_{out}^{out} &= n_1 + n_2 + n_8 = \frac{\rho}{36}(6+18u_{out}) \\ J_{in}^{out} &= n_5 + n_6 + n_4 = r \frac{\rho}{36}(6-18u_{out}) \\ r &= \frac{1+3u_{out}-6u_{in}}{1-3u_{out}} = 1 + 6 \left(\frac{u_{out}-u_{in}}{1-3u_{out}} \right) \end{aligned} \tag{12}$$

식 (11), (12)에서 u_{out} 는 출구속도, u_{in} 은 입구 속도이며 J는 전체유량을 뜻한다.

2.5.2 혼합효율

미소영역에서의 혼합을 정량화하기 위해서 많은 식들이 발표되었다. Jeon 등⁽¹⁴⁾은 혼합효율을 발표하였으며 그 밖에 Lu 등⁽⁸⁾이 제시한 혼합지수 등이 있다. 본 연구에서는 Jeon 등⁽¹⁴⁾의 혼합효율로 미소채널에서의 혼합을 정량화하였다.

$$\left(1 - \frac{\int_0^1 |C - C_\infty| dx}{\int_0^1 |C_0 - C_\infty| dx} \right) \times 100 \tag{13}$$

C는 출구에서의 농도이고 C_∞ 는 혼합완료시 농도이며 C_0 는 혼합 전 초기농도이다.



Fig. 3 The specification of 2D channel flow

3. 수치해법

3.1 Hagen-Poiseuille 유동

LBM 코드를 검증하기 위하여 2차원 채널 유동을 해석하였다. 이 유동은 완전 발달 유동에서 해석적인 해가 존재하므로 본 연구에서 적용한 LBM 방법을 이용한 결과와 정량적인 비교가 가능하다. Fig. 3에 나타낸 해석 해는 다음과 같다.

$$u(y) = - \frac{dp}{dx} \frac{h^2}{2\mu} \left[1 - \left(\frac{y}{H} \right)^2 \right] \tag{14}$$

Re=1, Re=10 그리고 Re=50 일 때의 속도 분포와 해석결과를 비교하였다.

Fig. 4를 살펴보면 속도분포가 해석 결과와 약간의 차이를 보이고 있다는 사실을 알 수 있다. 이는 1차 정확도를 가지는 Bounce Back 조건을 사용하였기 때문으로 사료되며 대체적으로 LBM 코드가 실제의 유동을 잘 묘사하고 있다.

3.2 계산 조건

미소 구조체가 3차원 구조를 가지지만 2차원 형상을 쌓아올린 형태를 가지는 경우이므로 2차원 계산을 수행하였다. 2차원 LBM모델로는 D2Q9 모델의 Scalar Passive Code를 이용하였다.

대부분의 미소유동에서는 액체는 연속체로 간주하게 된다.⁽¹⁵⁾ 따라서 연속체 구역 즉, 점착(No-Slip) 조건인 Bounce-Back 이론을 사용하여 계산을 수행하였으며, 표면 거칠기 영향은 고려하지 않았다. 그리고 N2의 경계조건으로는 Neumann Condition을 사용하였으며 출구조건으로는 개방된 경계조건(Open Boundaries)으로 사용하여 50,000번 반복 수치 계산하였다.

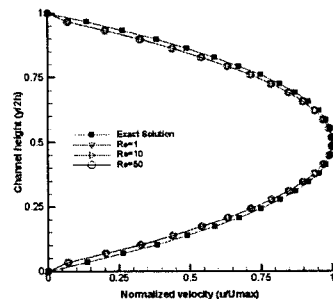


Fig. 4 The non-dimensionalized streamwise velocity profile for various Reynolds numbers

단순채널의 경우 $Re=1$ $Sc=1$ 즉 $Pe=1$ 일 때, $Re=1$ $Sc=10$ 즉 $Pe=10$ 일 때, 그리고 $Re=10$ $Sc=10$ 즉 $Pe=100$ 일 때 세 가지 경우에 대하여 계산하였으며 수동형 믹서의 경우 $Re=10$ $Sc=10$ 즉 $Pe=100$ 일 때의 경우에서 고정물의 형상을 변화시키면서 계산을 수행하였다.

3.3 채널 설계

형상은 2차원의 단순 채널과 수동형 믹서 등 두 가지 형상에 대하여 계산을 수행하였다. 단순채널의 경우는 미소 구조에서의 혼합의 경향을 알아보기 위함이며, 수동형 믹서는 고정물의 크기와 개수에 따른 혼합의 형상을 알아보기 위함이다.

단순 채널의 형상은 Fig. 5에 나타내었다. 왼쪽 입구는 가운데 분리막이 있으며 위쪽과 아래쪽으로 각각 다른 유체가 들어온다. 두 유체의 밀도는 1로 가정하였고 윗부분으로 흐르는 유체에는 식별성을 주기 위해서 속도에 영향을 주지 않으며 두 유체 사이에 상호작용이 없는 물질(예를 들어 실험에서 유체의 식별성을 위해 형광물질을 첨가하는 것처럼)을 첨가하였다.

능동형 믹서에 대한 실험적 연구를 수행한 Lu 등⁽⁸⁾의 논문에서는 채널길이와 폭의 비율을 $Lx=9.3Ly$ 이다.

그래서 본 연구에서는 위의 선행 연구자와 비슷하게 채널길이와 폭의 비를 $Lx=10Ly$ 로 하였으며, 실험에 사용된 채널의 폭 $300\ \mu\text{m}$ 와 채널의 길이 3mm 를 상사하여 채널을 설계하였다. 따라서 격자는 x방향 300개와 y방향 30개로 총 9,000개를 사용하였다. 그리고 식 (8)을 이용하여 레이놀즈 상사를 이루는 입구속도를 구하여 계산의 입구조건으로 사용하였다.

수동형 믹서의 형상은 Fig. 6에 나타난 것과 같다. 왼쪽 입구는 가운데 분리막이 있으며 위쪽과 아래쪽으로 각각 다른 유체가 들어온다. $Re=10$ 일 때 입구길이와 채널 폭의 비가 0.6인 지점에서 완전발달유동이 된다.⁽¹⁵⁾ 따라서 입구에서 첫 번째 고정물까지의 거리를 Ly 로 하였다.

채널의 길이는 단순 채널과 같이 $Lx=10Ly$ 로 하였다. 고정물을 한 개부터 네 개까지 총 4가지

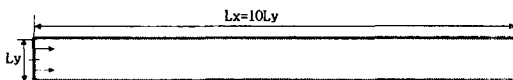


Fig. 5 Single channel design

경우에 대해 계산하였으며 고정물의 크기는 폭(b)을 $Lx/3$ 으로 고정시키고 높이(h)를 변화시켜 $b/h=0.5$, $b/h=0.67$, $b/h=1$, $b/h=2$ 로 총 열 여섯 가지 경우에 대해서 계산을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 단순 채널의 계산 결과

단순 채널의 경우 계산은 $Re=1$ $Sc=1$ 즉 $Pe=1$ 일 때, $Re=1$ $Sc=10$ 즉 $Pe=10$ 일 때 그리고 $Re=10$ $Sc=10$ 즉 $Pe=100$ 일 때 총 세 가지 경우에 대해서 계산을 수행하였다.

Fig. 7의 ㉑와 ㉒를 보면 동일한 Re 수에서 Sc 수가 1에서 10으로 증가함에 따라서 N2 성분의 확산이 일어나는 구간이 길어졌음을 알 수 있는데 이것은 Pe 수가 10배 증가함으로 인해 확산의 영향보다는 관성력의 영향이 더 커졌기 때문이다.

Fig. 7의 ㉓와 ㉔를 보면 동일한 Sc 수에서 Re 수가 10배 증가하면서 N2성분의 확산이 일어나는 구간이 더 길어졌음을 알 수 있는데 이것은 ㉔의 경우 Pe 수가 10배 더 증가하여 확산보다는 관성력의 영향이 커졌기 때문이다.

결론적으로 Pe 수가 제일 큰 ㉔의 경우 ㉑와 ㉒의 경우보다 혼합이 잘 안 이루어 졌다.

Fig. 8의 그래프를 보면 더 명확히 알 수 있다. $Re=1$ $Sc=1$ 즉 $Pe=1$ 일 경우 $x/Ly=1.67$ 이전에 혼합이 이루어졌음을 볼 수 있으며 $Re=1$ $Sc=10$ 즉 $Pe=10$ 일 경우 $x/Ly=2.67$ 이전에 혼합이 이루어졌음을 알 수 있다. 하지만 $Re=10$ $Sc=10$ 즉 $Pe=100$ 의 경우 $x/Ly=10$ 까지 확산이 완전히 이루어지지 않았음을 알 수 있다.

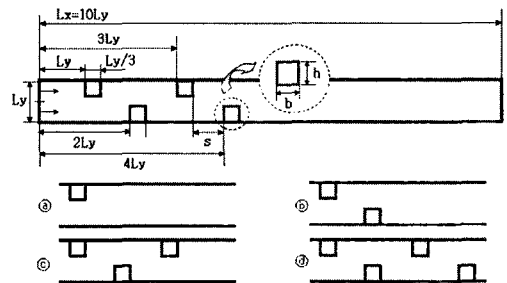


Fig. 6 Static mixer design

- ㉑ One of Static Element, ㉒ Two of Static Element,
- ㉓ Three of Static Element, ㉔ Four of Static Element

Fig. 7와 Fig. 8을 종합해보면 Pe수가 증가할수록 혼합이 지연되고 있다. 따라서 Pe수가 혼합에 많은 영향을 주는 것을 확인할 수 있으며 적은 Pe수에서 혼합을 하는 것이 더 좋은 혼합효율을 보일 것이라는 것을 예측할 수 있다.

이와 같이 단순 채널에서는 Re=10 Sc=10 즉 Pe=100일 때 혼합이 완전히 이루어지지 않는 사실을 인식하고, 아래 수동형 믹서에서는 Re=10 Sc=10 즉 Pe=100의 경우에서 혼합효율을 높이기 위한 고정물의 최적화에 대해서 논하고자 한다.

4.2 수동형 믹서의 계산 결과

단순 채널의 결과로부터 Pe수가 혼합에 많은 영향을 끼친다는 사실을 확인하였다. 따라서 미소 채널에서는 Pe수가 커질수록 확산만으로는 완전한 혼합이 수행되지 않는다. 그리고 실제 MEMS상에서의 미소채널은 짧은 채널 내에서의 빠른 혼합을 요구하기 때문에 본 연구에서는 짧은 시간 동안에 혼합효율을 증대시키기 위한 수동형 믹서를 사용하였다. 고정물(Static Element)은 작은 Re수에서 난류를 발생시키지는 못하지만 강제로 두 유체를 이류 시키면서 혼합을 증대시키게 된다.

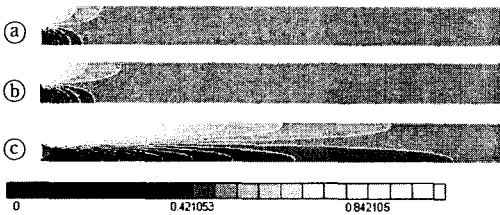


Fig. 7 N2 Contour plot in single channel

- (a) Re=1 Sc=1 (Pe=1), (b) Re=1 Sc=10 (Pe=10),
- (c) Re=10 Sc=10 (Pe=100)

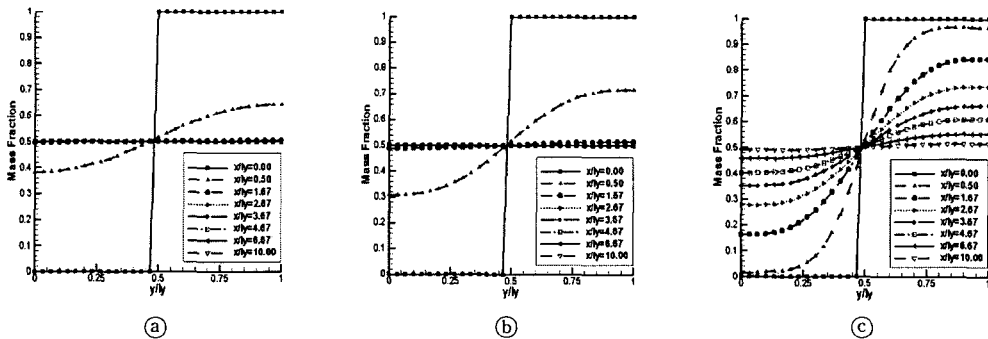


Fig. 8 N2 graph in single channel

- (a) Re=1 Sc=1 (Pe=1), (b) Re=1 Sc=10 (Pe=10), (c) Re=10 Sc=10 (Pe=100)

본 연구에서는 단순 채널과 수동형 믹서의 혼합효율의 차이를 비교하고 수동형 믹서의 상황별 혼합효율을 비교하기 위해서 Jeon 등의 논문에 게재된 혼합효율을 적용하여 혼합을 정량화 하였다. 그리고 압력강하를 단순채널과 수동형 믹서의 각 상황별로 측정하여 $\Delta P/P_{inlet}$ 으로 무차원화하여 정량화하였다.

미소채널에서의 압력강하는 펌프의 용량을 좌우하는 만큼 비용이 증가하게 되기 때문에 미소 채널의 혼합에서는 혼합효율 증가도 중요하지만 압력강하 최소화도 중요한 문제가 된다. 따라서 본 연구에서는 혼합효율과 압력강하를 동시에 다루면서 수동형 믹서의 최적화에 대해 논하고자 한다.

수동형 믹서의 압력분포를 나타낸 Fig. 9를 보면 고정물 주변에서 압력이 떨어지는 것을 볼 수 있는데 이것은 고정물 주위에서 속도를 증가시키는 원인이 된다

Fig. 10은 Fig. 9의 중간에 점선으로 표시된 부분 즉 수동형 믹서에서 중간부분의 압력을 측정하였다. 이것을 보면 고정물 주위에서의 부분적으로 압력이 떨어지는 것을 잘 알 수 있다. 각 수동형 믹서에서 고정물이 있는 부분인 x/Ly 가 1.0~1.4, 1.8~2.2, 2.8~3.2 그리고 3.8~4.2에서 큰 압력강하가 일어남을 그래프를 통해서 알 수 있으며 고정물을 모두 지난 경우에는 급격하게 압력이 줄어들지 않고 완만하게 압력이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 고정물의 개수가 많아질수록 더 심한 국부적인 압력강하가 나타나게 되고 고정물 자체가 유동저항으로 작용하게 된다. 따라서 고정물의 형상과 개수에 따라서 전·후단의 압력차가 더 커지게 되는 결과를 가져오게 된다.

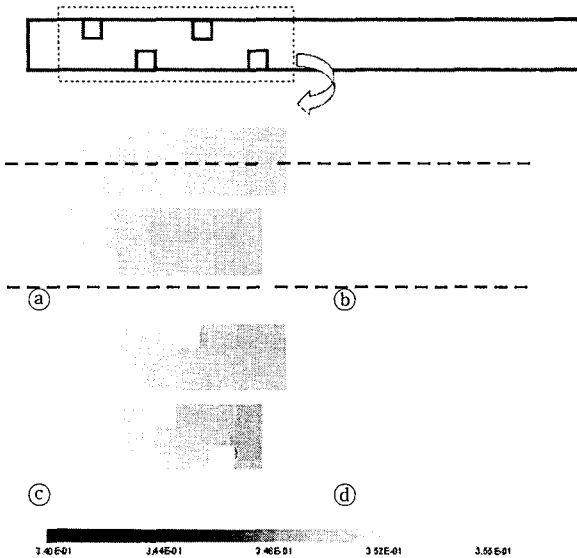


Fig. 9 Pressure contour in static mixer ($b/h=1$)

- Ⓐ One of Static Element, Ⓑ Two of Static Elements,
- Ⓒ Three of Static Elements, Ⓓ Four of Static Elements

수동형 믹서에서의 유선을 나타낸 Fig. 11을 보면 고정물 뒷부분에서 와류가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 고정물 주변에서 압력강하로 인한 속도의 증대와 유동박리로 인해 발생하는데, 유로의 수축과 팽창, 그리고 고정물 뒤에 생기는 와류현상에 의해 유동장에 y방향 속도 성분이 생기게 되어 두 유체간의 혼합효율이 증대된다. 결국 고정물의 크기가 커지고 개수를 증가시키면 혼합효율이 더욱 증대될 것으로 판단된다.

Table. 1에서 $x/Ly=10$ 일 때의 혼합효율을 보면 단순 채널에서와 수동형 믹서에서의 혼합효율 차이가 별로 없음을 알 수 있다. 이는 측정한 채널의 길이에서 이미 두 유체의 혼합이 거의 완료되었기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 $x/Ly=6.67$ 일 때의 혼합효율과 압력강하 수치를 바탕으로 수동형 믹서를 최적화하려 한다.

$x/Ly=6.67$ 일 때의 혼합효율과 압력강하를 보게 되면 고정물의 크기와 개수에 따라서 많은 차이가 있음을 알 수 있는데 고정물의 크기가 커질수록 혼합효율은 향상되지만 반대로 압력강하도 커짐을 알 수 있다. 단순채널의 경우 93.43%이고 압력강하는 0.107E-01이다.

네 개의 고정물의 b/h 크기가 1/2일 경우 단순채널에 비해서 6.53%정도 향상 되었으나 압력강하는 거의 여섯 배정도 증가하였다. 이것은 혼합효율을

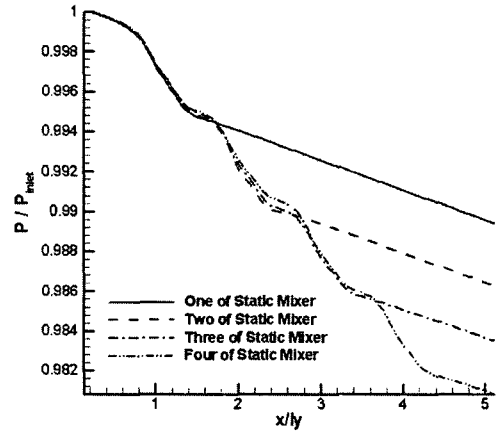


Fig. 10 Pressure graph in center line ($b/h=1$)

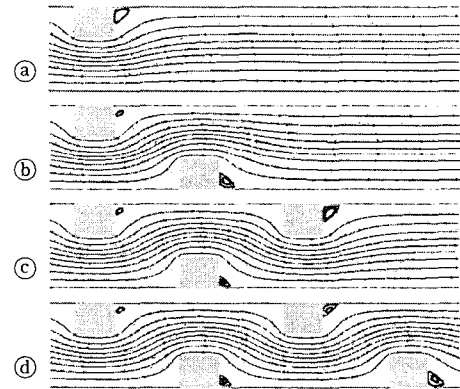


Fig. 11 Stream line in static mixer ($b/h=1$)

- Ⓐ One of Static Element, Ⓑ Two of Static Elements,
- Ⓒ Three of Static Elements, Ⓓ Four of Static Elements

6% 향상시키기 위해서 비용이 여섯 배 이상 증가하는 것을 뜻한다. 다시 말하면 고정물을 크게 설치하면 혼합효율은 증가하지만 그만큼 공정상의 어려움과 펌프의 비용이 커지게 되어 비효율적이다.

고정물의 개수에 따른 혼합효율을 보면 고정물의 개수가 늘어나는 것에 비해 혼합효율은 낮게 향상됨을 알 수 있다. 하지만 고정물의 크기를 크게 하면 압력강하도 동시에 커져서 비용이 증대되므로 고정물의 크기의 정량화가 필요하게 된다.

따라서 고정물의 개수와 크기에 따른 혼합효율과 압력강하를 동시에 비교해서 상황에 맞는 고정물의 개수와 크기를 결정한다면 적은 비용으로 혼합효율이 높은 수동형 믹서를 설계할 수 있다.

Table 1 Mixing efficiency and pressure drop

	b/h	Mixing Efficiency(%)		Pressure Drop ($\Delta P/P_{inlet}$)
		x/Ly=6.67	x/Ly=10	
Single channel	.	93.43	98.24	0.159E-01
One of Static Element	1/2	99.09	99.84	0.367E-01
	2/3	96.74	99.23	0.233E-01
	1	95.03	98.72	0.186E-01
	2	93.96	98.40	0.166E-01
Two of Static Elements	1/2	99.44	99.88	0.489E-01
	2/3	98.67	99.72	0.299E-01
	1	96.43	99.12	0.213E-01
	2	94.49	98.56	0.173E-01
Three of Static Elements	1/2	99.96	99.93	0.566E-01
	2/3	99.44	99.90	0.354E-01
	1	97.45	99.40	0.238E-01
	2	94.96	98.70	0.181E-01
Four of Static Elements	1/2	99.96	99.87	0.619E-01
	2/3	99.67	99.77	0.399E-01
	1	98.22	99.60	0.261E-01
	2	95.42	98.83	0.188E-01

본 연구에서의 최적의 믹서는 99%의 혼합효율을 가지는 다섯 가지의 수동형 믹서 중에서 압력강하가 가장 적게 일어나는 것으로 결정하였다. 따라서 혼합효율과 압력강하를 동시에 고려한 최적의 수동형 믹서는 고정물이 세 개이고 b/h가 2/3일 때의 믹서로 나타났다. 단순 채널에 비해 5.24%정도 혼합효율이 향상되었으며 압력강하는 240% 정도로 적게 증가하여 다른 수동형 믹서에 비해 혼합효율도 높고 압력강하도 적게 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 격자 볼츠만 방법을 이용하여 단순 미소채널내의 혼합과 수동형 믹서의 혼합에 대하여 압력 강하와 혼합효율 두 가지 면에서 비교 분석하였다.

미소채널에서의 혼합에 영향을 주는 인자에 대해서 알아보았으며 수동형 믹서에서의 혼합에 대해서 유선과 압력분포를 통해 물리적으로 규명하였다. 그리고 수동형 믹서의 크기와 개수에 따른 혼합효율과 압력강하를 정량적으로 규명하여 수동형 믹서의 최적화에 대해 다음과 같은 결론을 내렸다.

(1) 단순 채널의 경우 Pe수가 커질수록 더 혼합이 잘 안 되는 것을 알 수 있다. 이것은 미소채널에서 Pe수가 혼합에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

(2) 수동형 믹서의 경우 고정물의 개수가 많아지고 크기가 커질수록 혼합효율은 증가하나 동시에 압력강하도 커진다.

(3) 고정물의 개수와 크기에 따른 혼합효율과 압력강하를 동시에 비교해서 상황에 맞는 고정물의 개수와 크기를 결정한다면 적은 비용으로 혼합효율이 높은 수동형 믹서를 설계할 수 있으며 본 연구에서는 고정물이 세 개이고 b/h가 2/3인 수동형 믹서가 혼합효율과 압력강하 측면에서 가장 좋은 결과를 보였다.

참고문헌

- (1) Sang-Joon Lee, Jeong-Ki Huh, Guk-bae Kim, Seung Seob Lee, 2002, "Velocity Field Measurements of Flow inside a Microchannel Using a Micro-PIV" *KSME, In: Proceeding of KSME fluid dynamics conference*, pp. 1595~1599.
- (2) Abraham D. Stroock, Stephan K., W. Dertinger, Armand Ajdari, Igor Mezic, Howard A. Stone, George M. Whitesides, 2002, "Chaotic Mixer for Microchannels," *Science*, 295, pp. 647~651.
- (3) Lee, Y., Deval, J., Tabeling, P. and Ho, C., 2001, "Chaotic Mixing in Electrokinetically and Pressure Driven Micro Flows," *Technical digest of the 14th IEEE int. Conf. MEMS, Interlaken, Switzerland*, pp. 483~486.
- (4) Liu, R. H., Mark, A. S., Kendra, V. S., Michael, G. O., Juan, G. S. and Ronald, J. A., 2000, "Passive Mixing in a Three-Dimensional Serpentine Microchannel," *J. MEMS*, Vol. 9, No. 2, pp. 190~197.
- (5) Seck Hoe Wong, Patrick Bryant, Michael Ward, Christopher Wharton, 2003, "Investigation of Mixing

- in a Cross-Shaped Micromixer with Static Mixing Elements for Reaction Kinetics Studies," *Sensors and Actuators B* 95, pp. 414~424.
- (6) Timothy J. Johnson, David Ross, and Laurie E. Locascio, 2002, "Rapid Microfluidic Mixing," *Anal. Chem.*, 74, pp. 45~51.
- (7) Hengzi Wang, Pio Iovenitti, Erol Harvey and Syed Masood, 2002, "Optimizing Layout of Obstacles for Enhanced Mixing in Microchannels," *Smart Mater. Struct.*, 11, pp. 662~667.
- (8) Liang-Hsuan Lu, Kee Suk Ryu and Chang Liu, 2002, "A Magnetic Microstirrer and Array for Microfluidic Mixing," *Journal of MEMS*, Vol. 11 No. 5, pp. 462~469.
- (9) Hiroo Ukita and Motoki Kanehira, 2002, "A Shuttlecock Optical Rotator-Its Design, Fabrication and Evaluation for a Microfluidic Mixer," *IEEE*, Vol. 8, No. 1, pp. 111~117.
- (10) Yang, Z. L., Dinh, T. N., Nourgaliev, R. R. and Sehgal, B. R., 2000, "Evaluation of the Darcy's Law Performance for Two-Fluid Flow Hydro Dynamics in a Particle Debris Bed Using a Lattice-Boltzmann Model," *Heat and Mass Transfer*, 36, pp. 295~304.
- (11) Mohamed Gad-el-Hak, 2001, "Flow Physics in MEMS," *Mec. Ind.*, 2, pp. 313~341.
- (12) Ho-Keun Kang, Michihisa tsutahara, Ki-Deok Ro, Young-Ho Lee, 2003, "Numerical Analysis of a Weak Shock Wave Propagating in a Medium Using Lattice Boltzmann Method," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 12, pp. 2034~2041.
- (13) Sauro Succi, 2001, "The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond," Clarendon Press-Oxford, pp. 90~91.
- (14) Jeon N. L., Dertinger S. K. W., Chiu D. T., Choi I. S., Stroock A. D. and Whitesided G. M., 2000, "Generation of Solution and Surface Gradients Using Microfluidic Systems," *Langmuir*, 16, pp. 8311~8316.
- (15) Nam-Trung Nguyen, Steven T., Werelys, 2002, "Fundamentals and Applications of Microfluidics," Artech House, INC, pp. 42~44.