

< 논문 >

미소채널 내 회전교반기와 진동교반기에 의한 혼합향상의 연구

안상준[†] · 김용대* · 맹주성**

(2005년 9월 23일 접수, 2006년 3월 6일 심사완료)

A Study on Mixing Enhancement by Rotating and Oscillating Stirrers in the Micro Channel

Sang-joon An, Yong-dae Kim and Joo-sung Maeng

Key Words : Active Mixer(능동형 혼합기), Micro Mixer(미소 혼합기), Lattice Boltzmann Method(격자볼츠만법), Oscillating Stirrer(진동 교반기), Rotating Stirrer(회전 교반기)

Abstract

The mixing effect is studied by comparing rotating and oscillating stirrers in the micro channel. The cases of $Re=10$ to 80 with various stirring speeds are considered to analysis the effect of Re and stirrer speed for the mixing. Under $Re=20$, the oscillating stirrer represents better mixing rate than the rotating stirrer up to the critical stirrer speed which has a maximum efficiency. Over $Re=30$, the results of oscillating and rotating stirrer show that the faster the stirrer speed, the higher the mixing effect within the concerned stirrer speed range and the oscillating stirrer keeps the higher mixing rate. It was found that the mixing effect is a function which has an optimum of the the Reynolds number and the stirrer speed. The D2Q9 Lattice Boltzmann Method is used due to the merits of calculation for the unsteady flow with moving boundary.

1. 서론

DNA의 추출, 약물의 이송, 혈액 반응물의 검출 등 MEMS 기술을 기반으로 하는 장치들에서 균질한 혼합은 전체 성능을 결정하는 데 있어 매우 기본적인 중요 인자이다. 그러나 마이크로 단위의 유동장은 층류 유동이기 때문에 대부분 분자확산에 의해 혼합이 이루어진다. 이 분자확산은 미소 채널 내에서 짧은 확산거리와 잔류시간으로 충분한 혼합을 이루기 매우 어렵기 때문에⁽¹⁾ MEMS 기술이 시작된 초기부터 혼합에 대한 많은 연구가 수행되어 오고 있다.

미소 영역에서 사용되는 혼합기의 종류로는 크게 수동형 혼합기와 능동형 혼합기가 있다. 수동

형 혼합기는 유체를 운송하기 위한 구동력 이외에 외부에서의 에너지 부가가 없는 방식이다. 채널 내 유로를 증가시켜 확산시간을 늘리거나, 유동에 저항을 주는 채널 형상을 이용해 와를 발생시켜 혼합을 유도하는 방식이 적용⁽²⁻⁴⁾되고 있으나 매우 짧은 채널 내에서는 효과적인 혼합을 이루지 못할 수도 있다. 능동형 혼합기는 동적으로 기관이 운동을 하거나, 압력 구배를 변화시켜 유동장을 조정하는 방식이다. 또한 능동형 혼합기는 이동부가 있는 경우(PZT 박막의 진동,⁽⁵⁾ 자성 회전교반기,⁽⁶⁾ etc.)와 이동부가 없는 경우(MHD 대류,⁽⁷⁾ EHD 대류,⁽⁸⁾ etc.)로 나누어진다.

미소 영역에서의 혼합기는 유동이 흐르는 속도에 따라 그 효과가 다르게 나타날 수 있다. 일반적인 MEMS 해석 범위는 $0.01 \leq Re \leq 100$,⁽⁹⁻¹¹⁾이며, 단순채널의 경우 유속이 커지면 확산시간의 감소로 혼합은 줄어들게 된다. 수동형 혼합기의 경우 혼합의 효과는 특정 임계 Re 수 이상일 때 증가하는 유속이 혼합요소, 즉 급격한 유로의 변경이나 장애물에 의해 혼돈류를 발생시켜 혼합성능을

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 대학원 기계공학부

E-mail : sjan@ihanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0439 FAX : (02)2298-4634

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학부

** 회원, 한양대학교 기계공학부

높여주는 역할을 하게 된다. Liu 등⁽⁹⁾은 3 차원 Serpentine 혼합기에서 $Re=1$ 을 임계값으로 밝혔고, Girault 등⁽¹³⁾은 Zigzag 채널에서 20°C 물의 경우 $Re = 7$ 을 임계값으로 찾았다. 반면, 능동형 혼합기에서는 Re 수와 함께 동적 혼합요소의 진동이나 이동을 하는 속도 또한 혼합효과에 영향을 미칠 수 있으나 이에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 논문에서는 채널내 교반기가 각각 회전과 진동을 할 때, Re 수와 교반기속도에 따라 발생하는 혼합의 특성과 효과를 수치해석을 통해 고찰하였다.

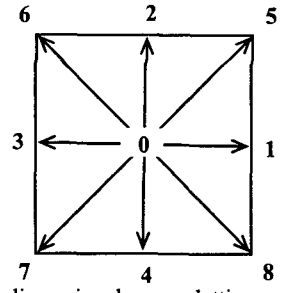


Fig. 1 Two dimensional square lattice model (D2Q9)

2. 수치해석방법

격자 볼츠만법(LBM; Lattice Boltzmann Method)은 기존의 연속체 가정 기반의 유동 모사와 달리, 유체의 입자 거동을 충돌과 병진 과정을 통해 나타낸다.

2.1 격자 볼츠만법

BGK(Bhatnagar-Gross-Krook) 접근법⁽¹⁴⁾으로 충돌 연산자를 단순화한 볼츠만 방정식은 다음과 같다.

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

위 식에서의 f 는 단일 입자 분포함수이며, \vec{e} 는 입자의 속도, τ 는 충돌에 의한 완화 시간, 그리고 f^{eq} 는 Boltzmann-Maxwellian 평형 분포함수이다. 식 (1)의 볼츠만 방정식을 2 차원 D2Q9 모델 (Fig. 1)을 사용하여 이산화 하면 다음과 같은 격자 볼츠만 방정식으로 나타낼 수 있다.

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

우변은 충돌 연산자에 의한 입자의 충돌 과정을 나타내고, 좌변은 입자의 이류과정을 나타낸다. 이산속도 \vec{e}_i 는 식 (3)과 같으며, 하첨자 i 는 D2Q9 모델의 각 방향에 대한 속도를 의미한다.

$$\vec{e}_i = \begin{cases} c(0,0) & i=0 \\ c(\cos \theta_i, \sin \theta_i), & \theta_i = (i-4)\pi/2 & i=1-4 \\ \sqrt{2}c(\cos \theta_i, \sin \theta_i), & \theta_i = (i-4)\pi/2 + \pi/2, & i=5-8 \end{cases} \quad (3)$$

격자속도, $c \equiv \Delta x / \Delta t$, Δx 는 격자의 크기, Δt 는 시간 간격을 나타낸다. 평형 분포함수 f_i^{eq} 는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$f_i^{eq} = w_i \rho \left[1 + 3 \frac{\vec{e}_i \cdot \vec{u}}{c^2} + \frac{9}{2} \frac{(\vec{e}_i \cdot \vec{u})^2}{c^4} - \frac{3}{2} \frac{\vec{u} \cdot \vec{u}}{c^2} \right] \quad (4)$$

이때, w_i 는 weighting factor 로 각 격자점에 대하여 다음의 값을 갖는다.

$$w_i = \begin{cases} 4/9, & i=0 \\ 1/9, & i=1-4 \\ 1/36, & i=5-8 \end{cases} \quad (5)$$

거시적 물리량인 밀도(ρ), 속도(\vec{v})는 입자분포 함수에 대하여 다음과 같이 표현된다.

$$\rho = \sum_{i=0}^8 f_i \quad (6)$$

$$\vec{v} = \frac{1}{\rho} \sum_{i=0}^8 f_i \vec{e}_i \quad (7)$$

격자 볼츠만 방정식을 Chapman-Enskog 전개⁽¹⁴⁾에 따라 2 차 정밀도의 Navier-Stokes 방정식으로 전개하면, 동점성 계수(ν)와 압력(p)은 다음과 같이 나타난다.

$$\nu = \frac{2\tau - 1}{6} \quad (8)$$

$$p = \rho \cdot c_s^2 \quad (9)$$

c_s 는 음속(sound speed)으로 격자속도(c)의 식으로 표현된다. ($c_s = c / \sqrt{3}$)

2.2 농도 방정식

비 용해성 물질의 농도 분포에 대한 확산방정식은 계산된 유동분포를 사용하여 격자 볼츠만 방정식의 Passive scalar 형태로 나타낸다. 입자분포 방정식과 동일한 방법으로 전개한 입자농도분포 방정식은 다음과 같다.

$$g_i(\vec{x} + \vec{e}_i \delta t, t + \delta t) = g_i(\vec{x}, t) - \frac{1}{\tau_c} [g_i(\vec{x}, t) - g^{eq}(\vec{x}, t)] \quad (10)$$

여기서 g_i 는 입자농도분포함수, τ_c 는 농도분포 방정식에 대한 완화계수, g_i^{eq} 는 농도 방정식에 대한 평형분포함수로 다음과 같다.

$$g_i^{eq} = w_i C [1 + 3 \frac{\vec{e}_i \cdot \vec{u}}{c^2}] \quad (11)$$

w_i 는 식 (5)와 동일한 값을 갖는다.

표준농도(C)는 식 (12)와 같이 입자농도로 표현되며, 분자확산계수(d)는 농도분포에 대한 완화계수(τ_c)를 이용하여 나타낸다.⁽¹⁴⁾

$$\sum_{i=0}^8 g_i = C \quad (12)$$

$$d = \frac{2\tau_c - 1}{6} \quad (13)$$

혼합의 척도가 되는 혼합지수(Mixing Index, D_I)는 각 단면에 대한 농도 값들의 표준편차를 나타내는 다음의 식으로 표현된다.^(6,15,16)

$$D_I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\frac{C_i - C_{mean}}{C_{mean}})^2} \quad (14)$$

이 혼합지수는 채널 길이방향의 각 위치에서의 값이며, C_{mean} 은 입자유동의 평균농도, C_i 는 채널 폭 방향의 농도 값들을 나타낸다.

2.3 해석 모델과 수치 조건

본 연구에서 해석한 두 교반기의 형상은 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)는 채널 내 단일 방향으로 회전하는 회전교반기이며, Fig. 2(b)는 교반기가 채널에 수직인 상태를 중심으로 90°의 변위로 왕복 진동운동을 하는 진동교반기이다. 채널 폭 L 을 특성길이로 정의하고, 채널 길이는 10L 로 하였다. 회전교반기의 회전속도는 rpm(revolution per minute)

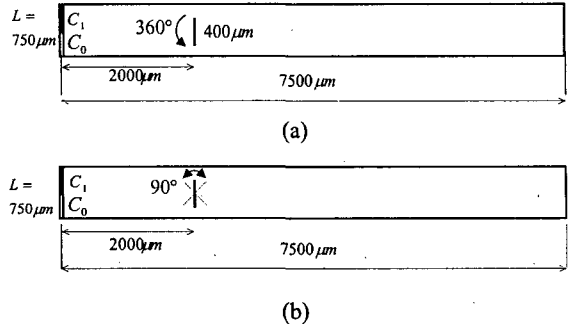


Fig. 2 Schematic view for each mixer; (a) rotating stirrer channel, (b) oscillating stirrer channel

으로 표현하였으며, 진동교반기에서의 rpm 은 회전교반기의 rpm 과 동일한 각속도를 의미한다. 유동에 대한 경계조건으로 입구에 등속조건, 채널 벽면에는 Bounce-back 조건을 이용한 점착조건, 그리고 출구는 Neumann 조건을 사용 하였다. 회전이나 진동하는 교반기를 모사하기 위해 교반기의 벽면에 대해 이동경계조건(Moving boundary condition)을 사용하였다.⁽¹⁷⁾

이것은 고정된 벽면에 대한 Bounce-back 조건에 벽이 이동하는 속도를 추가한 형태로써 다음과 같이 나타낸다.

$$f_i(\vec{x}, t) = f_i(\vec{x} + \vec{e}_i \delta t, t) + 3w_i(\vec{e}_i \cdot \vec{u}_w) \quad (15)$$

$$w_i = \begin{cases} 2/9, & i=1-4 \\ 2/36, & i=5-8 \end{cases}$$

여기서, f_i 는 f_i 와 이산속도의 방향이 반대인 요소($\vec{e}_{-i} \equiv -\vec{e}_i$)에 대한 분포함수이며, \vec{u}_w 는 이동하는 교반기의 속도벡터이다. 농도에 대한 경계조건은 채널입구의 아래 절반은 $C_0 = 0$ 의 농도를, 위 절반은 $C_1 = 1$ 의 일정 농도 유입조건을 사용하였고, 채널벽면 및 출구는 Neumann 조건을 사용하였다. 격자의 수는 145,000 개를 사용하였으며, 채널 출구에서 주기적인 D_I 값을 얻기 위하여 소요된 계산 시간은 Pentium4 3Ghz 의 연산속도로 약 90 시간이 소요되었다.

Reynolds 수($Re = UL/\nu$)와 Peclet 수($Pe = UL/d$)의 비로 표현되는 Schmidt 수는 점성계수(ν)와 분자확산계수(d)의 비로 나타나게 된다. LBM 에서 이 계수들은 각각 입자의 충돌완화시간과 입자농도에 대한 충돌 완화시간의 함수로 식 (16)과 같이 표현된다.

$$Sc = \frac{Pe}{Re} = \frac{\nu}{d} = \frac{[2\tau - 1]/6}{[2\tau_c - 1]/6} = \frac{[2\tau - 1]}{[2\tau_c - 1]} \quad (16)$$

이때, 완화시간은 격자의 수와 함께 계산의 정밀도에 직접적인 영향을 주는 변수가 된다. 본 연구에서는 완화시간과 격자 수에 따른 계산시간을 고려하여 Schmidt 수를 10 으로 하였다.

2.4 해석 기법의 검증

본 연구에 사용한 LBM 코드의 정확도를 검증하기 위해 2 차원 상판 끌림 공동유동을 해석하였다. Fig. 3(a)는 공동의 형상과 경계조건이며, Fig. 3(b)는 유동장의 검증을 위해 Re=1000 일 때 Ghia 등⁽¹⁸⁾

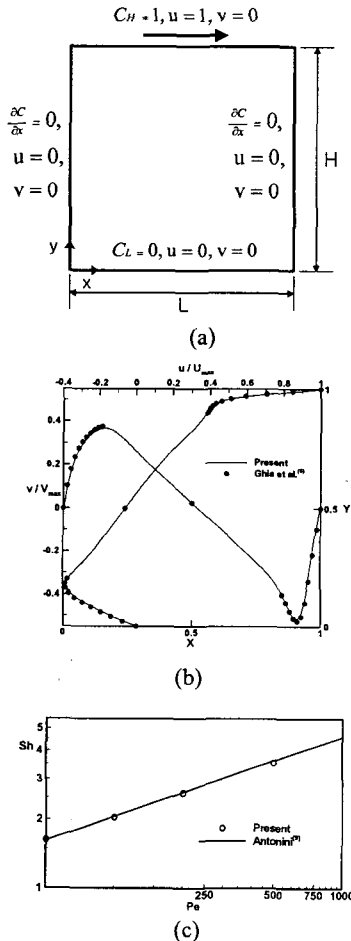


Fig. 3 (a) Schematic view of cavity and boundary conditions (b) Comparison of u, v velocity profiles along centerlines, Re=1000 (c) Comparison of the present and other Sherwood number for cavity, Re=50

의 결과와 비교한 것이다. 해석 영역의 도심을 통과하는 두 수직선에서의 u, v 속도가 잘 일치하는 결과를 보였다. 농도 방정식에 대한 검증으로는 Re=50 일 때에 대하여 Antonini⁽¹⁹⁾의 실험값을 이용한 준 이론적 수식과 비교하였다. Fig. 3(c)에서 직선으로 나타낸 Antonini의 값과, 원으로 나타낸 결과값이 매우 잘 일치하고 있다. 이때 벽면에서 물질 전달 비율로 사용되는 Sherwood 수⁽¹⁹⁾는 다음과 같이 정의된다.

$$Sh = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{\partial C}{\partial y} dx \Big|_{y=0 \text{ or } H} \quad (17)$$

3. 결과

Fig. 4(a), (b)는 교반기의 효과가 없는 순수 확산에 대한 고찰로, 정지한 상태에 대한 출구면의 혼합지수 (\$D_f\$)는 Re=10 일 때 0.267 과 Re=80 일 때 0.832 로 나타났다. 이 혼합지수들은 각 Re 수에서 “기준혼합” 값으로 삼는다. Fig. 4(c), (d)는 Re=10 에서 회전과 진동하는 두 교반기의 200rpm 에 대한 농도분포로 와도분포와 매우 유사한 형태를 갖는다는 것이 밝혀졌다.⁽²⁰⁾ 두 교반기 주위에서는 서로 다른 형태의 와로 인한 농도분포를 보여주지만 곧 유사한 초승달 모양으로 변하여 후류로 전파된다. 이러한 후류의 형태는 Niu 등⁽²¹⁾이 단순 직관



Fig. 4 Concentration distributions for various cases ; (a) Re=10, without stirring (b) Re=80, without stirring (c) Re=10, rotating, 200rpm (d) Re=10, oscillating, 200rpm (e) Re=80, rotating, 600rpm (f) Re=80, oscillating, 600rpm

의 위, 아래에서 주기적인 압력의 교란을 가한 경우와도 유사하다. Fig. 4(e), (f)는 Re=80 일 때 600rpm 에 대한 두 교반기의 농도분포이다. 진동 교반기의 경우가 두 유체 사이에 더 큰 접촉면을 갖게 됨을 알 수 있다. 이러한 접촉면의 증가는 동시에 확산시간을 증가시켜 혼합을 향상시키게 된다.

3.1 Re=10 에 대한 해석

교반기 운동에 의한 유동은 비정상 상태로, 임의 시간에 대해 나타내는 기존 혼합지수 (D_t)는 혼합을 설명하는 데 어려움이 있다. 본 연구에서는 시간에 대해 일정한 주기(T)를 갖는 유동의 혼합에 대해 “평균혼합지수,” (\bar{D}_t)를 식 (18)과 같이 새롭게 정의하였다.

$$\bar{D}_t = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{C_i - C_{mean}}{C_{mean}} \right)^2} \quad (18)$$

Fig. 5 는 두 교반기가 200rpm 으로 각각 회전과 진동을 할 때 채널 길이에 따른 평균혼합지수 (\bar{D}_t)를 나타낸 것이다. 이점 섹션의 평균혼합지수 선은 단순 채널에서의 순수 분자 확산에 의한 혼합지수를 나타내어, 각 경우에 대한 이 곡선을 “기준 혼합지수선”으로 정의한다. 채널 입구에서 교반기가 위치한 곳까지 두 교반기는 기준혼합지수선과 동일한 값을 보이며, 교반기가 위치한 곳에서는 계산상의 교반기 농도 값이 “0”을 갖게 되어 평균혼합지수의 급격한 감소가 나타난다. 이러한 현상은 Lu 등(6)의 실험에서도 동일한 결과

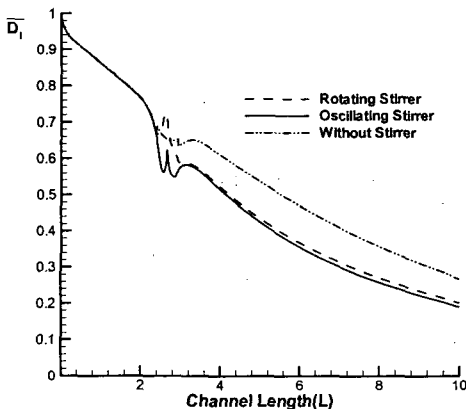


Fig. 5 Time averaged Mixing index through the channel (Re=10, 200rpm)

를 볼 수 있다. 교반기를 통과한 직후 기준혼합지수 선에 비해 두 교반기는 평균혼합지수 값이 차이를 보이며 출구까지 유사한 양상으로 감소하고 있다. 이것은 Fig. 4 에서 설명한 바와 같이 유체간의 접촉면이 증가되어 확산에 의한 혼합이 증진됨을 말해 주는 것이다. Fig. 6 은 두 교반기의 교반 속도에 따른 영향을 채널 출구에서 나타낸 것이다. 200rpm 까지는 교반기의 회전수가 빨라질수록 혼합의 효과가 향상된다. 그러나 300rpm 이상에서 회전교반기는 회전수가 증가하여도 평균혼합지수의 변화가 거의 없는 반면에 진동교반기는 회전수가 늘어나면서 급격한 혼합효과 감소의 감소를 가져온다. 따라서 진동 교반기의 경우 200rpm 과 300rpm 사이에 혼합 효율에 대한 임계 회전수가 존재하며,

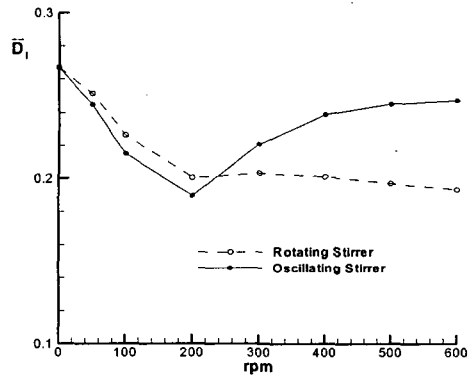


Fig. 6 Time averaged Mixing Index at outlet for various stirrer speed (Re=10)

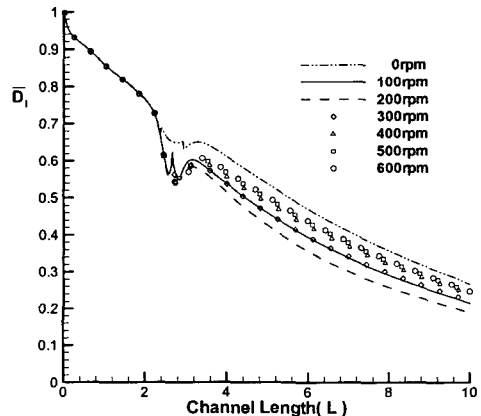


Fig. 7 Time averaged Mixing Index through the channel for oscillating stirrer with all speed (Re=10)

두 교반기 모두 300rpm 이상은 구동력의 관점에서 효율적인 작동 구간을 벗어나게 된다.

Table 1은 $Re=10$ 의 기준혼합지수에 대한 각 교반기의 출구면 혼합향상율을 식 (19)를 이용해 나타낸 결과이다. 최대 혼합향상은 200rpm 일 때 진동교반기에서 나타난다.

$$\text{혼합향상율} = \frac{(D_I)_{st} - (\bar{D}_I)_{out}}{(D_I)_{st}} \times 100(\%) \quad (19)$$

$(D_I)_{st}$: 기준혼합지수

$(\bar{D}_I)_{out}$: 출구면평균혼합지수

Fig. 7은 진동교반기의 채널길이에 따른 평균혼합지수를 교반기의 회전수에 대하여 나타낸 것이다. 200rpm까지 향상되던 혼합이 300rpm 이상에서 기준혼합지수 선으로 다시 접근해 가는 것을 볼 수 있다.

3.2 $Re=80$ 에 대한 해석

Fig. 8은 두 교반기가 600rpm으로 각각 회전과 진동을 할 때 채널 길이에 따른 평균혼합지수 값을 나타낸 것이다. 교반기를 지난 뒤부터 약 7L까지 회전교반기와 진동교반기는 급격하게 평균혼합

Table 1 Mixing improvement rate for molecular diffusion in various stirrer speeds ($Re=10$)

rpm	100	200	300	400	500	600
Rotating Stirrer(%)	15.13	24.93	23.89	24.61	26.15	27.57
Oscillating Stirrer(%)	19.47	29.02	17.20	10.40	8.10	7.35

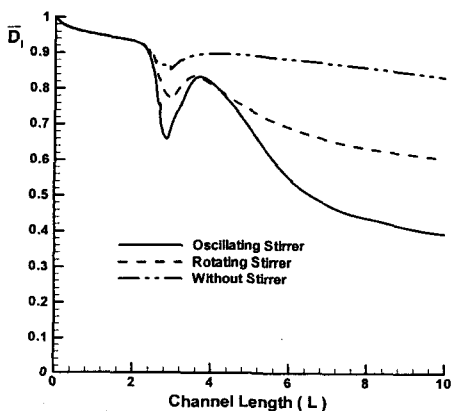


Fig. 8 Time Averaged Mixing Index through the channel ($Re=80, 600rpm$)

지수가 감소한 뒤 약 7L 이후에서는 기준혼합지수 선과 비슷한 기술키를 갖는다. 이것은 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 교반기를 지나며 곧바로 일정한 와의 형태를 갖추는 $Re=10$ 의 경우와 달리, $Re=80$ 에서는 교반기에서부터 어느 구간(약 7L)까지 와의 발생이 계속되며, 이 과정에서 두 유체간 접촉면 또한 계속 증가하여 혼합을 더욱 향상시키게 된다. $Re=80$ 일 때, 출구에서의 기준혼합지수에 대한 회전 교반기와 진동 교반기의 평균혼합지수는 각각 약 27%와 약 53%의 향상을 보였다. 두 교반기의 이러한 혼합의 차이는 Fig. 9의 농도 분포를 통해서도 나타난다. 그림은 각각의 교반운동이 충분히 반복된 이후 교반기가 수직일 때부터 진동교반기의 교반 주기(T)를 4구간으로 나누어 농도 분포를 비교한 것이다. 회전교반기의 경우, 수직으로 있던 교반기가 시계방향으로 45° ($1/4T$) 회전하며 와를 발생시키지만 이 와는 교반기가 수평위치($2/4T$)로 이어지면서 장애물효과(blockage effect)가 사라져 매우 약해지게 된다. 하지만 진동 교반기의 경

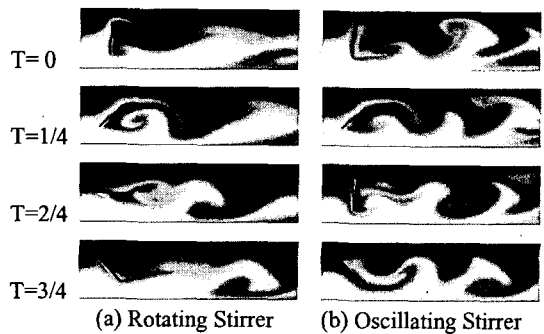


Fig. 9 Concentration contours for periodic motions of each stirrer ($Re=80, 600rpm$)

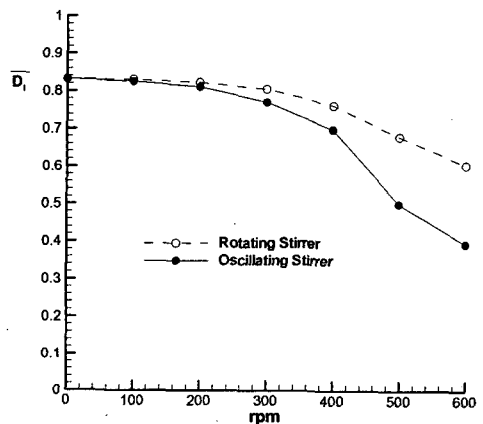


Fig. 10 Time averaged Mixing Index at outlet faces for various stirrer speed ($Re=80$)

Table 2 Mixing improvement rate for molecular diffusion in various stirrer speeds (Re=80)

rpm	100	200	300	400	500	600
Rotating Stirrer(%)	0.13	1.07	3.08	8.32	18.31	27.42
Oscillating Stirrer(%)	0.76	2.48	7.33	15.97	39.91	52.68

우 45° (1/4T)까지 교반기가 동일한 역할을 한 뒤 다시 반대 방향으로 이동하며 와를 교번으로 발생 시키게 된다.

Fig. 10 은 Re=80 일 때 각 교반기의 회전수 변화에 따른 출구면의 평균혼합지수이다. 회전수가 증가하면 할수록 혼합율이 급격히 향상되며 진동 교반기의 혼합향상이 더욱 크게 나타난다. Table 2 에 두 교반기의 혼합향상을 나타내었다. 최대 혼합향상은 600rpm 의 진동 교반기에서 나타난다.

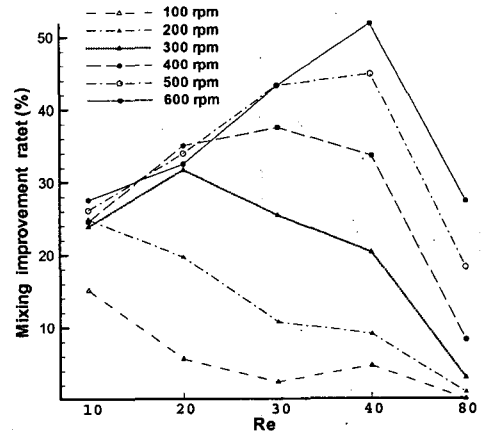
3.3 혼합 향상의 비교

미소채널 내에서의 분자확산에 의한 혼합시간 (T_{mix})과 혼합거리(L_{mix})는 식 (20)⁽¹⁵⁾과 식 (21)⁽¹²⁾로 표현된다.

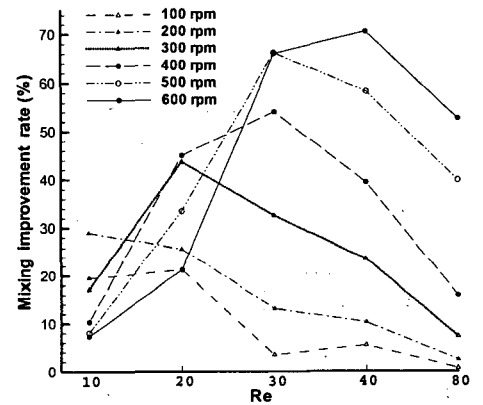
$$T_{mix} \sim \frac{L^2}{d} \tag{20}$$

$$L_{mix} \sim \frac{UL^2}{d} = Pe \times L \tag{21}$$

위 식에서의 L 은 특성길이, U 는 입구유속, d 는 확산계수를 나타내며, 식 (21)에서와 같이 혼합거리는 Pe 수에 선형적인 관계를 나타내어 Pe 수는 분자확산에 대한 혼합의 척도가 된다. 수행된 영역 ($10 \leq Re \leq 80, 100 \leq rpm \leq 600$)에 대한 혼합성능을 비교하기 위해 Fig. 11 에 각 유속에 해당하는 혼합향상을 나타내었다. 회전교반기에서는 100rpm 과 200rpm 일 때 유속이 증가하면서 혼합향상이 감소하고 있고 회전수가 300rpm 일 때는 $Re=20, 400rpm$ 일 때 $Re=30, 500rpm$ 과 $600rpm$ 일 때 $Re=40$ 근방에서 혼합향상이 증가하다가 다시 감소한다. 진동 교반기의 경우 역시 200rpm 까지 유속 증가시에 혼합향상이 감소하고 300rpm 일 때 $Re=20, 400rpm$ 과 500rpm 일 때 $Re=30$ 그리고 600rpm 일 때 $Re=40$ 근방에서 최대 혼합향상을 나타낸다. 임계값을 나타내지 않고 있는 두 교반기의 200rpm 이하 회전수는 수행된 계산보다 더 작은 Re 수에서 임계값이 나타날 것으로 예상



(a) Rotating Stirrer



(b) Oscillating Stirrer

Fig. 11 Mixing improvement rate by various stirrer speeds for the molecular diffusion of each Reynolds number

된다. Re 수에 대한 교반기의 혼합성능에 대한 임계회전수는 $Re=30$ 이하에서 나타났으며, $Re=40$ 이상의 경우는 600rpm 보다 더 큰 회전수에서 임계값이 나타날 것으로 예측할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 미소 채널 내 교반기의 회전과 진동에 의한 혼합 효과를 LBM 수치 기법을 통해 분석하였다. $Re=10 \sim 80$ 의 범위에서 회전교반기와 진동교반기의 교반속도에 따른 혼합 효과를 연구하였다. 혼합 향상에 있어 각 교반기의 회전속도에 대한 임계 레이놀즈 수가 존재하며 그 구간은 교반기의 회전수가 클수록 더 큰 레이놀즈 수에서

나타난다. 실험 범위 내 낮은 레이놀즈수 ($10 \leq Re \leq 20$)에서의 높은 rpm($Re=10$; $300 \leq rpm \leq 600$, $Re=20$; $500 \leq rpm \leq 600$)인 경우를 제외한 모든 영역에서 진동교반기가 회전교반기보다 우수한 혼합 능력을 나타내었다. 또한 레이놀즈수에 대한 임계 교반속도 또한 존재하며 이 값은 레이놀즈수가 클수록 더 큰 회전수에서 나타나게 된다. 따라서 혼합성능은 레이놀즈수와 교반속도에 대해 최적값을 갖는 함수관계에 있다.

참고문헌

- (1) Chate, H. and Villermaux, E., 1996, "Mixing Chaos and Turbulence," *J.-M. Chomez, Ed. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers*, pp. 37~56.
- (2) 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.
- (3) 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. Microelectromech. Syst.*, Vol. 9, pp. 190~197.
- (4) Bertsch, A., Heimgartner, S., Cousseau, P. and Renaud, P., 2001, "3D Micromixers-Downscaling Large Scale Industrial Static Mixers," *Proc. IEEE MEMS Workshop, Interlaken, Switzerland*, pp. 507~510.
- (5) Zhu, X. and Kim, E., 1998, "Microfluidic Motion Generation with Acoustic Waves," *Sens. Actuat.*, A66, pp. 355~360.
- (6) Lu, L., Ryu, K. and Liu, C., 2002, "A Magnetic Microstirrer and Array for Microfluidic Mixing," *Journal of microelectromechanical systems*, Vol. 11, No. 5.
- (7) Bau, H., Zhong, J. and Yi, M., 2001, "A Minute Magneto Hydro Dynamic(MHD)mixer," *Sens. Actuat.*, B79, pp. 207~215.
- (8) Choi, J. and Ahn, C., 2000, "Active Microfluidic Mixer for Mixing of Microparticles and Liquids," *Microfluidic devices and systems*, Vol. III, pp. 154~161.
- (9) 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.
- (10) Bisson, C., Campbell, J., Cheadle, R., Chomiak, M., Lee, J., Miller, C., Milley, C., Pialis, P., Shaw, S. Weiss, W. and Widrig, C., 1998, "A Microanalytical Device for the Assessment of Coagulation Parameters in Whole Blood," *Proc. Solid-State Sens. Actuator Workshop, Hilton Head, SC*, pp. 1~6.
- (11) 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.
- (12) Stroock, A. D. et. al., 2002, "Chaotic Mixer for Microchannels," *Science*, Vol. 295, pp. 647~651.
- (13) Girault, H. H., Josserand, J. and Mengeaud, V., 2002, "Mixing Processes in a Zigzag Microchannel: Finite Element Simulations and Optical Study," *Analytical Chemistry*, Vol. 74, No. 16, pp. 4279~4286.
- (14) Succi, S., 2001, "The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond," *Clarendon Press, Oxford*.
- (15) Evans, J., Liepmann, D. and Pisano, A. P., 1997, "Planar Laminar Mixer," *Proceeding of the IEEE 10th Annual Workshop of MEMS*, pp. 96~101.
- (16) Ottino, J. M., 1989, "The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos and Transport," *New York: Cambridge University Press*.
- (17) Lallemand, P. and Luo, L., 2003, "Lattice Boltzmann Method for Moving Boundaries," *J. Comput. Phys.*, Vol. 18, pp. 406~421.
- (18) Ghia, U., Ghia, K. N. and Shin, C. T., 1982, "High-Re Solution for Incompressible Flow Using the Navier-Stokes Equations and a Multigrid Method," *J. of Comput. Phys.*, Vol. 48, pp. 387~411.
- (19) Antonini, G., Gelus, M., Guiffant, G. and Zoulalian, A., 1981, "Caracteristiques des Transferts Simultanes de Masse et de Quantite de Mounement dans des Ecoulements de Recirculation Force," *Int. J. Heat Mass transfer*, Vol. 24, No. 8, pp. 1313~1323.
- (20) Kim, Y., An, S. and Maeng, J., 2006, "The Effect of Karman Vortex for Mixing in a Microchannel with an Oscillating Micro-stirrer," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 30, No. 2, pp. 144~152.
- (21) Niu, X. and Lee, Yi-Kuen, 2003, "Efficient Spatial-Temporal Chaotic Mixing in Microchannels," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 13, pp. 454~462.