

< 논문 >

진동 교반기가 있는 미소채널에서 혼합에 대한 Karman 와의 영향

김용대[†] · 안상준* · 맹주성**

(2005년 8월 22일 접수, 2005년 12월 30일 심사완료)

The Effect of Karman Vortex for Mixing in a Micro-channel with an Oscillating Micro-stirrer

Yongdae Kim, Sangjoon An and Joosung Maeng

Key Words: Karman Vortex(Karman 와), Active Mixer(능동혼합기), Oscillating Stirrer(진동교반기), Perfect Mixing(완전혼합), Lattice Boltzmann Method(격자볼츠만법)

Abstract

In order to consider the effect of Karman vortex for mixing, mixing indices are calculated for 4 models of micro channel flows driven from the combinations of a circular cylinder and a oscillating stirrer. And their results are compared to that of a simple straight micro channel flow(model I). The mixing rate is improved 5.5 times by Karman vortex (model II) and 11.0 times by the stirrer(model III) respectively. In case of successive mixing by the cylinder and the stirrer(model IV), 27% of shortening the channel length for the complete mixing as well as 1.37 times improvement of mixing efficiency then model III. And then, variation of mixing indices are much stable comparing with the others. Thus, it is found that the Karman vortex plays a good role as a pre-mixing method. The D2Q9 Lattice Boltzmann methods are used.

1. 서 론

생화학, 생체공학 분야의 미세 유동 시스템에서 혼합 효율은 시스템의 성능을 결정하는 중요한 인자이다. 두 용액의 높은 혼합율은 결과의 신뢰성을 향상시키고, 시스템의 성능을 개선하는 효과가 있다. 혼합은 와에 의한 확산과 bulk 확산, 그리고 분자 확산의 3가지 메커니즘에 의하여 이루어진다. 거시적 영역에서 혼합은 난류 eddy와 bulk 확산의 난류 효과에 의하여 급격하게 이루어지며, 분자 확산에 의한 영향은 매우 작기 때문에 무시된다. 그러나 미소 형상의 경우, 필연적으로 작은 레이놀즈수의 영향으로 층류 유

동이 형성되기 때문에 난류 확산은 발생하지 않는다. 따라서 분자확산이 지배적인 혼합 인자가 된다. 그러나 분자 확산은 매우 느리게 진행되기 때문에 혼합에 요구되는 거리와 시간이 길어진다는 단점이 있다. 수 μm 폭의 채널을 유체가 느리게 흐를 경우, 분자확산을 이용한 혼합은 비교적 빠르고 효과적이지만, 유량이 작기 때문에 제한적이고, 채널의 폭을 수백 μm 로 크게 할 경우 Peclet 수가 커짐에 따라 완전혼합거리가 매우 길어지기 때문에 적절하지 않다. 따라서 미소 형상을 갖는 MEMS 기반 시스템이나 Lab-on-a-chip 장치에서 빠른 혼합은 매우 중요한 문제이다.

미소 형상에서 유체의 혼합을 가속화 하는 방법에는 수동적인 혼합과 능동적인 혼합이 있다. 수동형 혼합은 유로의 형상을 늘이거나 꺾어서 유체간 접촉면의 길이 및 시간을 늘려주거나, 유로 구조를 통하여 접촉면의 수를 증가시켜 분자 확산 효과를 향상시키는 방법이 있다.⁽¹⁾ 최근에는 serpentine channel⁽²⁾이나 twisted channel⁽³⁾과 같이

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 대학원 기계공학부
E-mail : unsteady@ihanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0439 FAX : (02)2298-4634

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학부

** 회원, 한양대학교 기계공학부

복잡한 3차원 형상의 유로를 형성하여 유동의 방향을 급격히 변화시킴으로써 혼돈류를 발생시켜 혼합을 빠르게 하는 방법이 많이 연구되고 있다. 혼돈류는 낮은 레이놀즈수에서도 효과적으로 혼합 효율을 증가시킬 수 있는 방법이다. 그러나 이러한 혼합기는 제조 과정이 복잡하기 때문에 실제 제작이 어렵고, 높은 비용을 필요로 한다.

능동형 혼합은 역학적으로 직접 유체를 교란시키는 방법,⁽⁴⁾ MHD(Magneto-hydrodynamic),⁽⁵⁾ EHD(Electro-hydrodynamic)⁽⁶⁾에 의한 혼합, 그리고 2차 유동을 발생시키기 위한 acoustic streaming⁽⁷⁾ 등의 방법이 있다. 외력에 의하여 직접 유체를 교란하여 혼합하는 능동형 혼합기는 간단한 구조와 원리의 혼합 방식으로 빠르게 혼합을 성취할 수 있는 방법으로 주기적으로 유체에 난동을 발생시킴으로써 혼합을 성취할 수 있으며, 난동 성분의 크기와 주기를 조절함으로써 혼합율을 제어할 수 있다.

본 연구에서는 원형 실린더와 진동 교반기가 배열된 미소 채널형 혼합기를 제안하였다. 단순 직선채널과 채널에 실린더와 교반기가 각각 설치된 혼합기를 해석하여 분자확산, Karman 와흐림, 그리고 교반기 진동에 의한 단일 혼합효과들을 고찰하였다. 제안된 혼합기는 상류에서 실린더에 의해 Karman 와흐림이 발생하고 연속적으로 진동 교반기에 의한 난동이 발생하여 유체를 혼합한다. 단일 혼합효과들과의 비교를 통하여 제안된 혼합기의 혼합 성능을 평가하고, 교반기에 의한 능동형 혼합에서 Karman 와의 효과를 규명하였다. 그 결과, Karman 와는 혼합율을 개선할 뿐 아니라 혼합성능의 안정성을 높이는 역할을 한다.

2. 수치해석방법

2.1 격자 볼츠만법

BGK(Bhatnagar-Gross-Krook)접근법⁽⁸⁾으로 충돌연산자를 단순화한 볼츠만 방정식은 다음과 같다.

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

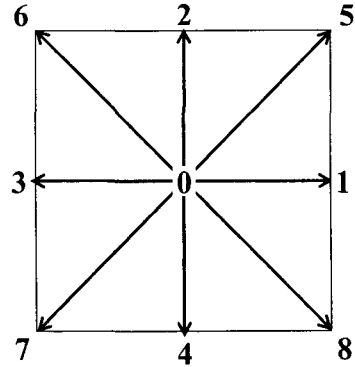


Fig. 1 Two-dimensional square lattice model(D2Q9)

여기서 f 는 단일 입자 분포함수이고, \vec{e} 는 입자의 속도, τ 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 전과과정을 나타내고 있다. 이산 속도 \vec{e}_i 는 아래와 같이 나타낼 수 있으며, 하첨자 i 는 D2Q9모델의 이산 속도의 각 방향을 나타낸다.

$$\vec{e}_i = \begin{cases} c(0,0), & i = 0 \\ c(\cos\theta_i, \sin\theta_i), & i = 1,2,3,4 \\ \sqrt{2}c(\cos\theta_i, \sin\theta_i), & i = 5,6,7,8 \end{cases} \quad (3)$$

$$\theta_i = (i-1)\pi/2, \quad \text{for } i = 1-4$$

$$\theta_i = (i-5)\pi/2 + \pi/4, \quad \text{for } i = 5-8$$

여기서 $c \equiv \delta x / \delta t$, δx 는 격자크기, δt 는 시간간격을 나타낸다. 평형분포함수 f_i^{eq} 는 다음과 같다.

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

여기서, w_i 는 weighting factor로 각 격자점에 대하여 다음의 값을 갖는다.

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

입자분포함수에 따라 거시적 물리량인 밀도와 속도는 다음과 같다.

$$\rho = \sum_{i=0}^8 f_i, \quad \vec{\rho u} = \sum_{i=0}^8 f_i \vec{e}_i \quad (6)$$

격자 볼츠만 방정식을 Chapman-Enskog 전개⁽⁸⁾에 따라 2차 정밀도의 Navier-Stokes 방정식으로 전개하면, 동점성 계수와 압력은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nu = \frac{2\tau - 1}{6} \quad (7)$$

$$p = c_s^2 \rho \quad (8)$$

여기서, c_s 는 음속을 나타내며 $c_s = c/\sqrt{3}$ 이다.

2.2 농도 방정식

비용해성 물질의 농도 분포에 대한 확산방정식은 계산된 유동분포를 사용하여 격자 볼츠만 방정식의 Passive scalar법으로 계산하였다. 이산화된 농도방정식은 다음과 같다.

$$g_i(\vec{x} + \vec{e}_i \delta t, t + \delta t) = g_i(\vec{x}, t) - \frac{1}{\tau_c} [g_i(\vec{x}, t) - g^{eq}(\vec{x}, t)] \quad (9)$$

여기서, g_i 는 농도분포함수, τ_c 는 농도방정식에 대한 완화계수, g_i^{eq} 는 농도 방정식에 대한 평형분포함수로 다음과 같이 나타낸다.

$$g_i^{eq} = w_i C \left[1 + 3 \frac{\vec{e}_i \cdot \vec{u}}{c^2} \right] \quad (10)$$

여기서, C 는 기준 농도를 나타낸다. 거시적인 농도값과 분자 확산계수는 다음과 같다.

$$\sum_{i=0}^8 g_i = C, \quad (11)$$

$$d = \frac{2\tau_c - 1}{6} \quad (12)$$

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

$$\overline{D}_T = \frac{1}{T} \int_T \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{C_i - C_{mean}}{C_{mean}} \right)^2} dt \quad (13)$$

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 정의⁽⁹⁾하고, 이때의 거리를 ‘완전혼합거리’라 하여 성능을 평가하는 기준으로 사용하였다.

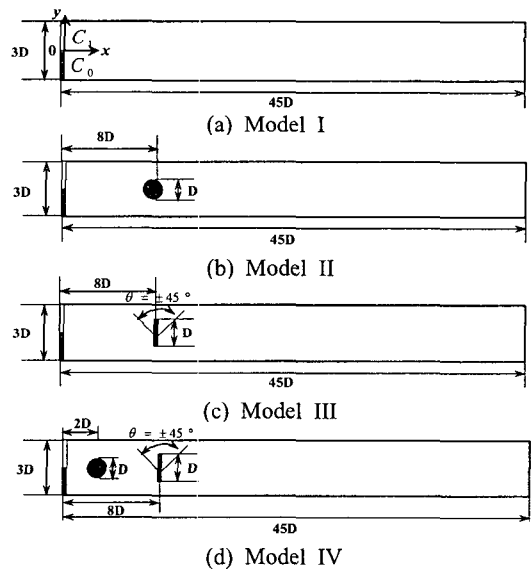


Fig. 2 Schematic view of four mixer models: (a) Straight channel; (b) Channel with a circular cylinder; (c) Channel with an oscillating stirrer; (d) Channel with both a cylinder and an oscillating stirrer

2.3 수치 조건

Fig. 2는 본 연구에서 해석한 채널형 혼합기를 나타낸 것이다. 모델 I은 단순한 직선 채널, 모델 II는 원형 실린더를 설치한 채널로 실린더의 위치는 입구로부터 실린더 지름의 8배이다. 모델 III은 동일한 위치에 교반기가 있는 채널이다. 교반기는 유동에 수직할 때를 기준(0°)으로 ±45°의 진동각을 일정한 속도로 주기적으로 회전 진동한다. 마지막으로 모델 IV는 본 연구에서 제안한 혼합기로 교반기의 상류에 원형 실린더가 있는 형태이며 실린더와 교반기의 거리는 실린더 지름의 6배로 하였다. 원형 실린더의 지름 D를 특성 길이로 정의하고, 채널의 폭은 3D, 길이는 충분한 혼합이 이루어지도록 45D로 하였다. 유동 경계조건은 입구에 등속조건 원형 실린더 및 채널 벽면에는 Bounce-back 조건을 이용한 점착조건, 출구에는 Neumann 조건을 사용하였다. 모델 III 과 IV의 진동하는 교반기를 해석하기 위하여 이동경계조건(Moving boundary condition)⁽¹⁰⁾을 사용하였다. 이동 경계조건은 고정된 벽면에 대한 일반적인 점착조건인 Bounce-back 조건에 벽의 이동에 의해 유체에 가해지는 힘의 항을 추가한 형태로써 다음과 같다.



Fig. 3 Concentration distribution (Model I)

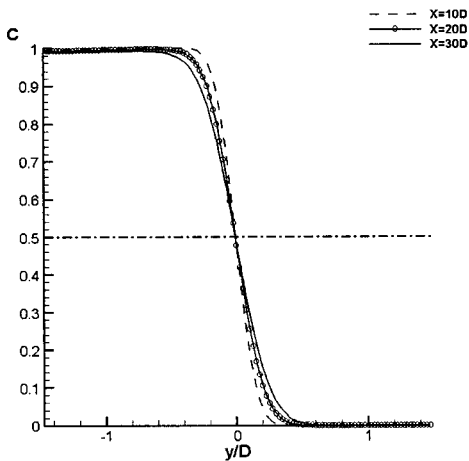


Fig. 4 Concentration profiles at various downstream positions (Model I)

$$f_{\vec{i}}(\vec{x}, t) = f_i(\vec{x} + \vec{e}_i \delta t, t) + 6w_i(\vec{e}_i \cdot \vec{u}_w) \quad (14)$$

여기서, $f_{\vec{i}}$ 는 f_i 와 방향이 반대인 요소($\vec{e}_{\vec{i}} \equiv -\vec{e}_i$)의 분포함수, \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 고체벽면 및 출구면에는 zero-flux 조건을 사용하였다. 해의 안정성을 높이기 위해 교반기를 유동과 평행한 상태로 계산을 시작하여 유동이 충분히 안정된 후 회전하도록 하였다. 레이놀즈수(\overline{UD}/ν)와 Peclet 수(\overline{UD}/d)는 실린더 지름(D), 입구 평균유속(\overline{U}) 그리고 확산계수(d)를 기준으로 각각 80과 800으로 계산을 수행하였다. 실린더 후류에서 발생하는 Karman 와흐림의 스트로할 수는 0.32, 교반기의 무차원 진동수는 0.15이다.

3. 결 과

4가지 형태의 채널형 혼합기를 동일한 조건에서 수치적으로 모사하여 혼합성능을 비교하였다.

3.1 분자확산에 의한 혼합

Fig. 3은 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. 4는 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(ν/d) 10으로 분자확산도가 큰 물질임에도 불구하고 레이놀즈수가 큰 경우 분자확산의 효과는 매우 작기 때문에 적절한 혼합 방법이 아님을 확인하였다.

3.2 Karman 와흐림에 의한 혼합

모델 II는 직선 채널의 내부에 원형 실린더를 삽입하여 Karman 와를 생성하고, 와에 의해 혼합이 이루어지는 혼합기이다. Fig. 5는 와흐림 한 주기 동안의 농도분포 및 와도분포 이다. 시간을 와흐림 주기(T)로 표준화하여 농도와 와도분포를 1/4주기 간격으로 나타내었다. 상하 교번의

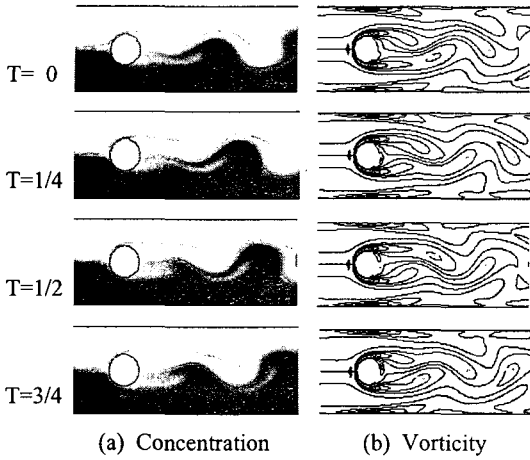


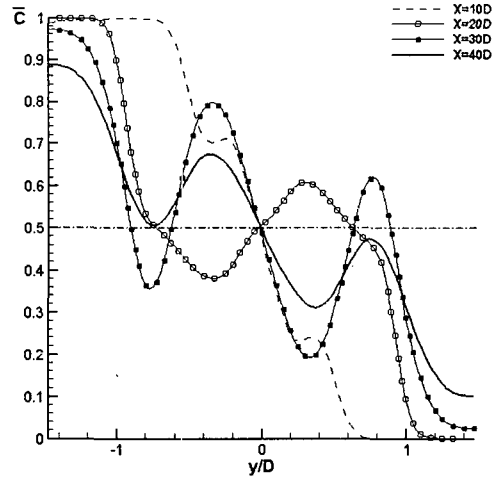
Fig. 5 Concentration and vorticity distribution for one vortex shedding cycle (model II)

와가 실린더로부터 주기적으로 생성되어 분리되고 있으며 와를 따라 유체가 혼합되고 있다.

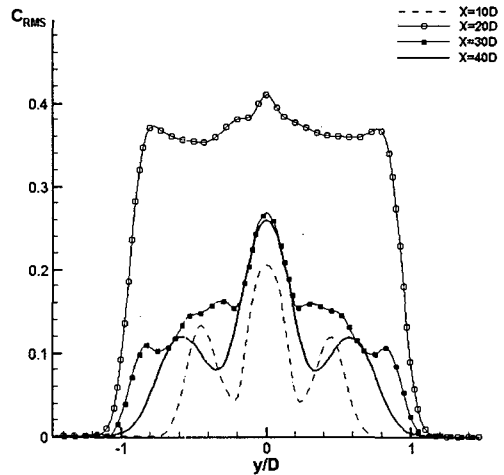
또한 동일한 시간에 농도와 와도 분포가 매우 유사한 양상을 나타내고 있다. 이것은 와에 의해 유체의 혼합이 이루어지고 있음을 의미한다. Fig. 6의 (a)는 주기 동안 채널 단면의 시간평균 농도 분포(\bar{C}) 이고, (b)는 시간평균 농도분포에 대한

국부 농도 변화량을 $C_{RMS} = \frac{1}{T} \sqrt{\int_T (C_i - \bar{C})^2 dt}$

과 같이 제곱평균으로 나타낸 것이다. 실린더 후류 2D의 위치($x=10D$)에서 혼합 영역은 $y/D=\pm 0.6$ 의 범위로 위치별 농도값의 변화가 작고, Fig. 6의(b)에서 보는바와 같이 농도의 시간 변화 또한 작다. 이 영역은 실린더로부터 와가 충분히 발달하지 않은 영역이다. $x=20D$ 에서 와가 충분히 발달하면서 혼합영역이 $y/D=\pm 1$ 로 확장되고 위치에 따른 평균 농도의 편차가 커진다. 이것은 와에 의하여 혼합이 빠르게 이루어지고 있기 때문이다. 그러나, 국부 농도의 시간 변화폭이 0.4정도로 급격히 증가하였으며, 이것은 교번 와홀림의 영향으로 충분히 혼합되지 않은 두 유체가 교대로 단면을 통과하고 있음을 의미한다. 이후 30D와 40D에서 와에 의한 혼합범위는 $y/D=\pm 1$ 로 거의 일정하지만, 시간 변화폭은 감소한다. 그러나, 30D이후 채널 중앙($y/D=0$)의 농도 변화량은 거의 감소되지 않고 0.26정도의 큰 값을 유지하고 있다. 이 영역에서 평균 농도는 완전 혼합인 0.5에 접근하고 있으나 시간에 따른 국부 농도는 매우



(a) Mean concentrations



(b) RMS-values of concentration fluctuations

Fig. 6 Mean concentrations and concentration fluctuations at various downstream positions (Model II)

큰 폭으로 변화하고 있으며, 이러한 큰 변화량은 결과적으로 시간에 따른 혼합율의 변화를 크게 하기 때문에 혼합성능을 불안정하게 만든다. Fig. 6(a)와 (b)의 결과에서 보는 바와 같이 빠르게 혼합이 이루어지고 있는 영역은 $y/D=\pm 1$ 으로, Karman 와에 의한 혼합영역이고, 이외의 벽 근방 영역은 분자확산에 의하여 혼합이 이루어지고 있다. 이것은 본 연구의 수치조건인 $Re=80$ 에서 자연적으로 발생하는 Karman 와홀림에 의한 혼합영역이 실린더 지름의 2배임을 나타낸다.

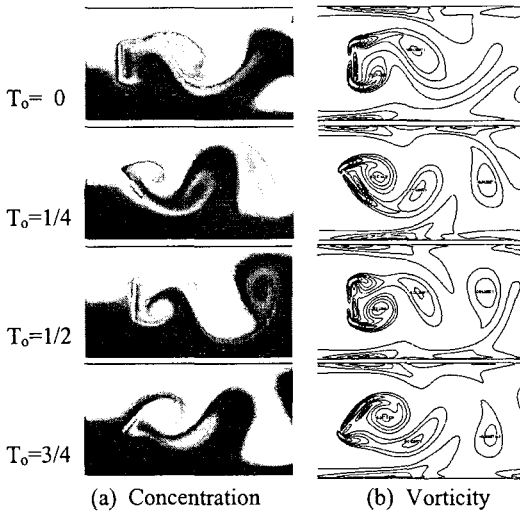
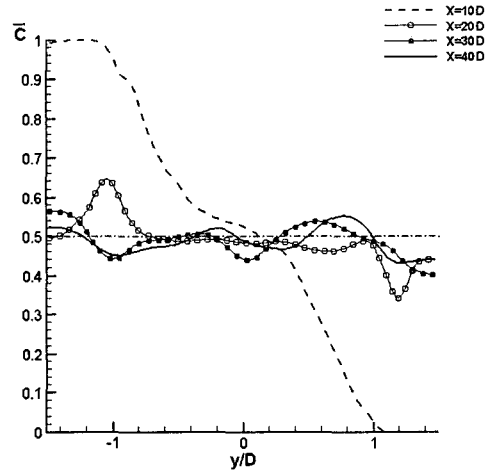


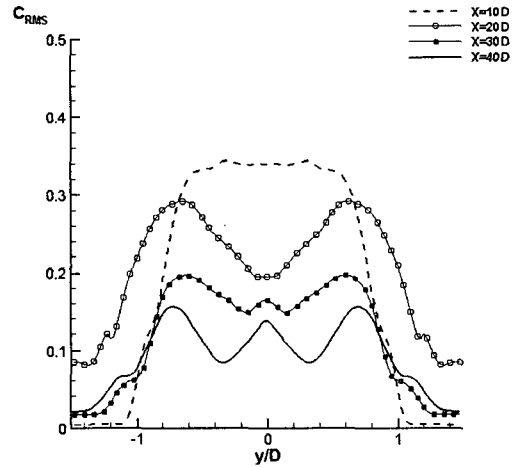
Fig. 7 Concentration and vorticity distribution during a period of stirrer oscillation (Model III)

3.3 교반기에 의한 혼합

모델 III은 채널 내부의 bar형 교반기를 주기적으로 진동시킴으로써 혼합을 성취하는 혼합기이다. Fig. 7은 교반기의 진동주기 동안의 농도 및 와도분포이다. 시간을 교반기 진동 주기(T_0)로 표준화하였다. 외력에 의하여 강제 진동하는 교반기에 의해 후류에서 와홀림이 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. Fig. 8은 각 단면의 시간평균농도 및 주기 동안 농도의 변화량을 나타낸 것이다. 10D에서 혼합이 진행되는 영역은 $y/D=\pm 1$ 이지만, 20D이후에는 전 영역에서 빠른 혼합이 이루어지고 있다. 교반기의 진동에 의해 발생된 와의 혼합효과는 채널 전 영역에 영향을 미치고 있다. 이미 20D에서 평균농도분포는 완전 혼합 상태인



(a) Mean concentrations



(b) RMS-values of concentration fluctuations

Fig. 8 Mean concentrations and concentration fluctuations at various downstream positions (Model III)

0.5 부근에서 형성되고 있으나, 평균 농도에 대한 변화량이 크다. 농도의 변동성분은 후류로 진행 하면서 감소하지만, 40D에서도 0.16 정도의 값을 나타내고 있다. 외력에 의하여 구동하는 교반기에 의한 난동은 후류에 강한 와를 형성하여 채널의 전 영역에서 두 유체를 빠르게 혼합하는 효과가 있으나, 갑작스런 유동의 교란으로 인하여 농도분포를 불안정하게 하기 때문에, 시간에 대하여 불안정한 혼합 성능을 보이고 있다.

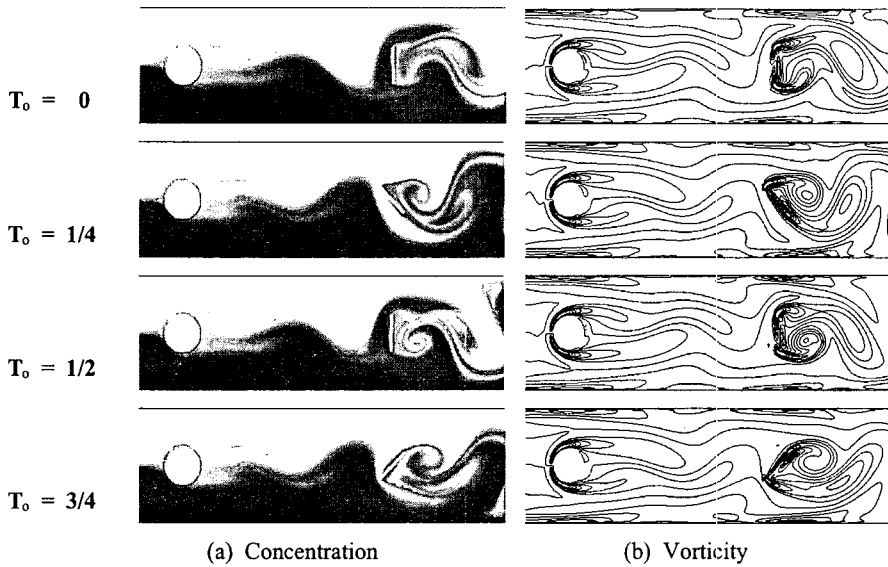


Fig. 9 Concentration and vorticity distributions during a period of stirrer oscillation (Model IV)

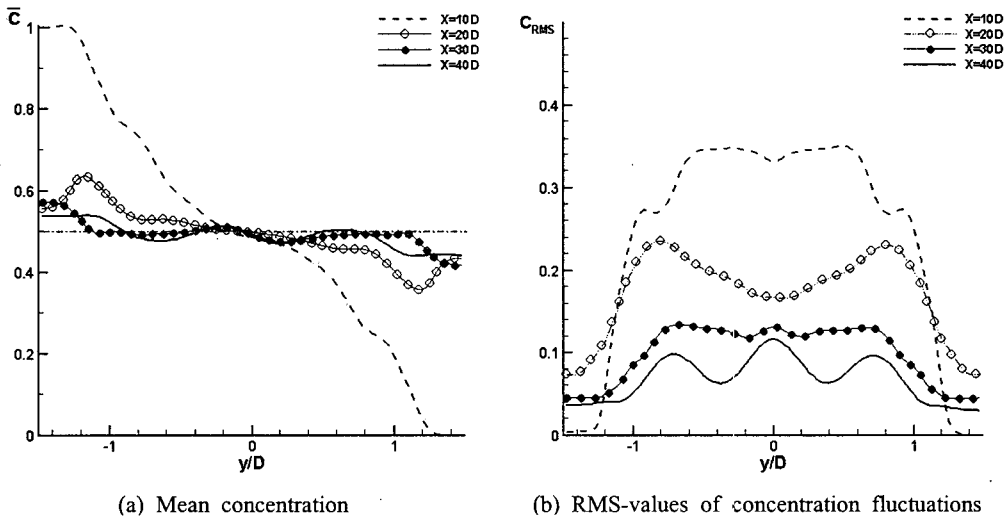


Fig. 10 Mean concentrations and concentration fluctuations at various downstream positions (Model IV)

3.4 연속적 혼합에서 Karman와의 효과

모델 IV는 진동 교반기의 상류에 간단한 형상의 원형 실린더를 삽입하여 Karman 와를 발생함으로써 Karman 와홀림과 교반기의 요동에 의한 연속적 혼합을 성취하는 혼합기이다. Fig. 9는 교반기의 회전주기 동안의 농도 및 와도 분포이다. 시간을 교반기 진동주기로 표준화하여 1/4주기 간격으로 나타내었다. 상류의 실린더 후류에서 Karman 와가 발생하고, 연속해서 진동 교반기의 회전에 의하여 강한 와가 생성되고 있다. 실린더

와 진동 교반기 후류의 와도 구조는 실린더와 교반기 각각의 단일 혼합기 결과와 정성적으로 유사하다. 그러나 Karman 와의 영향으로 교반기의 경사면을 따라 반대편으로 이동되는 유체의 양이 단일 교반기를 사용한 모델에 비하여 증가되었다. Fig. 10은 모델 IV의 각 단면에서 농도분포를 나타낸 것이다. (a)의 평균농도분포는 교반기를 지난 직후인 10D에서 모델 III의 진동 교반기만을 가진 혼합기에 비하여 혼합 영역이 넓다. 이것은 상류에서 발생된 Karman 와의 영향이다.

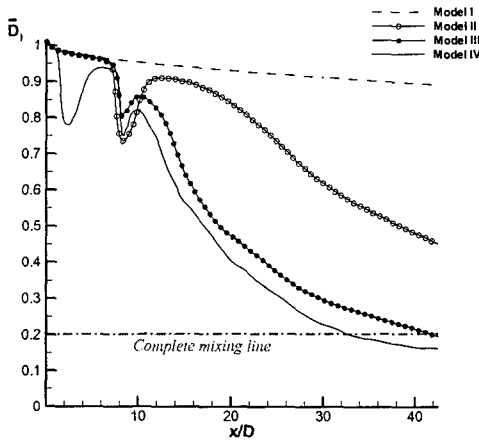


Fig. 11 The mixing indices of each model at different distance x/D

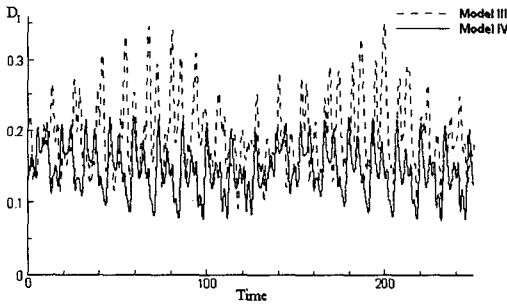


Fig. 12 The variations of mixing indices at outlet of Model III and IV

20D 이후부터 완전 혼합분포인 0.5에 근접한 결과를 나타내고 있으며, 30D와 40D에서는 대부분의 영역에서 완전혼합과 거의 같은 평균농도분포를 보이고 있다. 이것은 다른 혼합기들보다 더욱 뛰어난 결과이다. (b)의 농도 변화의 제곱평균값의 분포 양상은 단일 교반기의 결과와 유사하지만 빠르게 감소되어, 40D에서는 0.1이하의 값을 나타내고 있으며, 이것은 앞선 혼합기들에 비하여 매우 향상된 결과이다. 따라서, 모델 IV는 다른 모델들에 비하여 혼합율의 시간변화가 작기 때문에 안정적인 혼합 성능을 발휘할 수 있다.

3.5 혼합 성능의 비교

각 혼합기의 혼합 성능을 평가하기 위해 주기 동안 시간평균한 혼합지수를 Fig. 11에 도시하였

Table 1 Mixing length of each model from $x=8D$

	Model I	Model II	Model III	Model IV
Perfect Mixing Length	370D	67D	33.8D	24.7D

다. X축은 입구로부터 채널의 유동방향 거리를 실린더 지름으로 일반화한 것이다. 혼합지수가 0.2에 도달하는 위치를 완전혼합거리로 정의하여 각 모델의 성능을 비교하였다. 모델 I의 직선채널은 혼합이 매우 느리게 진행되고 있으며 본 연구의 계산 영역에서 충분한 혼합거리에 도달하지 못하였다. 모델 II는 실린더가 위치한 8D 이후 Karman 와에 의하여 혼합이 빠르게 이루어지고 있으나 역시 충분한 혼합에 이르지 못하였다. 모델 III은 진동 교반기를 지나면서 와에 의한 급격한 혼합이 이루어지고 있으며 Karman 와에 비하여 더욱 빠르게 혼합되어 입구로부터 약 40D 부근에서 혼합지수가 0.2에 도달하고 있다. 모델 IV는 2D에 위치한 실린더에서 발생하는 Karman 와의 영향으로 초기 혼합이 이루어지고 8D에서 진동 교반기에 의하여 더욱 빠르게 혼합이 진행된다. 30D를 지나면서 0.2에 도달하여 가장 좋은 혼합성능을 보이고 있다. Fig. 12은 채널의 출구에서 시간에 따른 혼합지수의 변화를 나타낸 것이다. 모델 III은 평균혼합지수가 완전 혼합영역인 0.2에 도달하였으나, 시간에 따른 혼합지수의 변화는 0.35에서 0.1까지 큰 편차를 갖는다. 이에 비해 모델 IV는 혼합지수의 시간변화가 0.2에서 0.08로 모든 시간영역에서 완전 혼합인 0.2이하의 혼합율을 나타내고 있으며, 혼합지수의 편차도 모델 III에 비해 절반정도로 혼합성능의 안정성이 매우 향상되었다.

Table 1은 각 모델에서 완전히 혼합이 이루어진 거리를 정밀하게 비교한 것이다. 모델 I의 분자확산에 의한 혼합은 혼합지수의 변화가 선형적이므로 외삽법에 의하여 계산하였다. 모델 II는 정확한 완전혼합거리를 얻기 위해 계산영역을 보다 확장하여 계산을 수행하였다. Karman 와에 의한 혼합은 분자확산에 비하여 혼합거리를 5.5배 감소시키는 효과가 있고, 모델 III은 수동적으로 발생하는 Karman 와에 비하여 혼합거리를 1/2로 하므로 2배의 혼합 효과가 있다. 모델 IV는 모델 III에 비하여 약 27%의 혼합 향상 효과가 있다.

4. 결 론

유동 해석 방법인 LBM을 이용하여 진동 교반기에 의한 능동형 미소혼합기를 모사한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) $Re=80$ 에서 Karman 와홀림은 분자확산에 비하여 혼합 성능을 5.5배이상 향상시키는 효과가 있다.

(2) 진동형 교반기는 더욱 강한 와를 생성하여 혼합을 가속하고 있으며, Karman와에 비하여 혼합성능을 2배 촉진시킨다.

(3) 실린더와 교반기가 연속적으로 배열된 혼합기에서 Karman 와는 혼합율을 27% 향상시키고, 진동 교반기가 가진 혼합율의 시간변화량을 감소 시킴으로써 혼합성능을 안정시키는 효과가 있어 예혼합 방법으로 매우 적절하다.

참고문헌

- (1) Nguyen, N. T. and Wereley, S. T., 2002, "Fundamentals and Applications of Microfluidics."
- (2) 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.
- (3) Bertsch, A., Heimgartner, S., Cousseau, P. and Renalud, P., 2001, "3D Micromixers-Downscaling Large Scale Industrial Static Mixers," *Proc. IEEE MEMS Workshop*, pp. 507~510.
- (4) Lu, L. H., Ryu, K. S. and Liu, C., 2002, "A Magnetic Microstirrer and Array for Microfluidic Mixing," *J. MEMS.*, Vol. 11, No. 5, pp. 462~469.
- (5) Lemoff, A. V. and Lee, A. P., 2000, "An Ac magneto-hydrodynamic Micropump," *Sensor Actuators B*, Vol. 63, pp. 178~185.
- (6) Choi, J. W. and Ahn, C. H., 2000, "An Active Microfluidic Mixer Using Electrohydrodynamic(EHD) Convection," *Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, pp. 52~55.
- (7) Zhu, X. and Kim, E. S., 1998, "Microfluidic Motion Generation with Acoustic Waves," *Sensors Actuators A*, Vol. 66, pp. 355~360.
- (8) Succi, S., 2001, "The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond."
- (9) Evans, J., Liepmann, D. and Pisano, P., 1997, "Planar Laminar Mixer," *Proceeding of the IEEE 10th Annual Workshop of MEMS*, pp. 96~101.
- (10) Lallemand, P. and Luo, L. S., 2003, "Lattice Boltzmann Method for Moving Boundaries," *J. Comp. Physics*, Vol. 184, pp. 406~421.