

## ◎ 논문

## 마이크로 채널에서 두 유체 혼합

류 임 정<sup>1</sup>, 김 병 재<sup>2</sup>, 성 형 진<sup>3</sup>

## Two-Fluid Mixing in a Microchannel

Ying Zheng LIU, Byoung Jae KIM and Hyung Jin SUNG

A numerical study of the mixing of two fluids(pure water and a solution of glycerol in water) in a microchannel was carried out. By varying the glycerol content of the glycerol/water solution, the variation in mixing behavior with changes in the difference of the properties of the two fluids(e.g., viscosity, density, diffusivity) was investigated. The mixing phenomena were tested for three micromixers: a square mixer, a three-dimensional serpentine mixer, and a staggered herringbone mixer. The governing equations of continuity, momentum and solute mass fraction were solved numerically. To evaluate mixing performance, a criterion index of mixing of mixing uniformity was proposed. In the systems considered, the Reynolds numbers based on averaged properties were 1 and 10. For low Reynolds number ( $Re = 1$ ), the mixing performance varied inversely with mass fraction of glycerol due to the dominance of molecular diffusion. The mixing performance by diffusion deteriorated due to a significant reduction in the residence time of the fluid inside the mixers.

**Key Words:** 두 유체 혼합(Two-fluid Mixing), 마이크로 채널(Microchannel), 분자 확산(Molecular Diffusion), 마이크로 믩서(Micromixer), 혼돈류(Chaotic Advection)

## 1. 서 론

미세유체요소(microfluidic device)에서 두 유체의 혼합은 많이 쓰이며 중요하다. 유체 혼합의 예로는 생물의학, 생화학 과정 중 DNA 추출, PCR(polymer chain reaction), 효소 반응 등을 들 수 있는데, 이 과정들의 성능은 시료와 시약을 얼마나 빠르고 효과적으로 혼합하는데 좌우된다. 유체의 점성, 밀도, 확산도 등은 온도, 농도와 같은 유체의 물성치에 따라 변하기 때문에 두

유체의 혼합을 평가하기 위해서는 혼합과정 중 물성치의 변화까지 고려되어야 한다.

지금까지 두 유체 혼합에 관한 대부분의 실험 연구에서는 혼합성능을 평가하기 위하여 가시화 기법을 사용하였다. 이를 위해 Koch 등은 에탄올에 녹인 빨간 잉크와 녹색 잉크를 이용하였고 [1], Liu 등과 Beebe 등은 에틸알코올에 녹인 페놀프탈레인과 수산화나트륨의 반응을 이용하였다 [2][3]. 또한, Lee 등과 Stroock 등은 채널에 투명한 유체와 형광물질이 들어 있는 유체를 동시에 흘려보내고 형광물질에서 나오는 빛의 강도를 측정하여 형광물질 분포를 구하여 혼합되는 성능을 평가하였다[4][5]. 그러나 아직까지 혼합되는 두 유체의 물성치 차이의 변화를 고려한 연구는 보고 되지 않고 있다.

마이크로 채널(micro-channel) 내 유동은 일반

\* 2003년 3월 25일 접수

\*1 Shanghai Jiaotong University, Department of Power Machinery Engineering

\*2 한국과학기술원 기계공학과

\*3 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

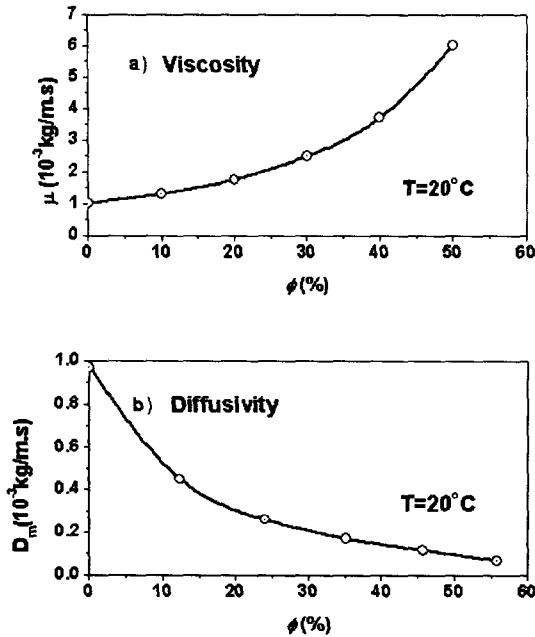


Fig. 1 Dependence of viscosity and diffusivity of mixture on mass fraction of glycerol at 20°C

적으로 층류이며 분자 확산에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다[6]. 따라서 채널 내에 유체의 흐름을 방해하는 어떤 장애물을 놓아 난류를 만드는 것은 쉽지 않다[7]. 게다가 유체를 기계적으로 저어주는 방법은 채널의 크기와 제작의 어려움 등으로 쉽지 않다. 마이크로 믹서(micro-mixer)는 마이크로 채널 내 유체의 혼합을 증대시키기 위한 것인데, 크게 수동형과 능동형으로 나뉜다. 능동형 혼합기는 외부에서 유체에 에너지를 가하는 방법인데, 짧은 시간에 유체를 완전히 혼합시킬 수 있다[4][8]. 그러나 제작, 작동, 유지가 어려운 단점이 있다. 반면 수동형 혼합기는 유로의 형상을 변화시켜 유체의 혼합을 증대시키는데, 주로 혼돈류(chaotic advection)를 이용한다. 혼돈류를 만들기 위하여 Liu 등은 C 모양의 채널이 반복되는 3차원 뱀모양 혼합기(3-D serpentine mixer)를 만들었고[2], Bertsch 등은 헬리컬 모양의 두 채널이 서로 교차하는 혼합기를 만들었다[9]. 위의 두 수동형 혼합기들은 그 형상이 기존의 화학 반응이나 산업에서 사용되던 혼합기의 모양과 비슷하다. 최근에 Stroock 등은 채널의 바닥에 물고기 뼈 모양의 홈을 지그재그로 낸 혼합기(staggered herringbone mixer)

에서  $Re = 0.01 \sim 10$  일 때 매우 효과적이며 빠른 유체 혼합을 얻었다[5]. 이 혼합기의 특징은 주 유동 방향의 압력차이만을 가지고 쉽게 혼돈류를 증대시키는 2차 유동을 만들 수 있다는 것이다.

본 연구에서는 마이크로 채널 내에서 물성치가 다른 두 유체가 혼합될 때 혼합 특성에 대하여 알아보려고 한다. 이를 위하여 서로 혼합되기 쉬운 물과 글리세롤 용액의 혼합을 수치적으로 연구하였다. 유체의 물성치는 글리세롤 수용액의 질량 농도( $\phi$ )를 변화시켜 조정하였다. 3차원 뱀모양 혼합기, 물고기 뼈 모양의 혼합기, 사각파 혼합기에서  $Re = 1, 10$  일 때 두 유체 혼합에 대하여 수치해석을 수행하였고, 혼합 정도를 평가하기 위하여 혼합균일도( $C_{mix}$ )를 사용하였다. 유체의 농도에 따른 혼합 특성을 알아보기 위하여 글리세롤 수용액의 질량농도  $\phi = 0, 0.2, 0.4$  일 세 종류를 사용하였다.

## 2. 수치해석

온도가  $20^\circ\text{C}$  일 때 글리세롤 수용액에서 글리세롤의 질량농도에 따른 수용액의 점성계수와 확산계수의 변화는 그림 1에 나타나 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 글리세롤 수용액의 점성계수와 확산계수는 질량농도  $\phi$ 에 매우 민감하다. 확산계수는  $\phi$ 에 대략 반비례하고 점성계수는  $\phi$ 에 증가한다.

두 유체(물, 글리세롤 수용액)가 혼합될 때 글리세롤의 농도분포는 다음의 연속 방정식, 3차원 모멘텀 방정식, 물질전달 방정식을 통하여 구할 수 있다[10].

$$\nabla \cdot [\rho(\phi) \vec{V}] = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot [\rho(\phi) \nabla u] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot [\mu(\phi) \nabla u] \tag{2}$$

$$\nabla \cdot [\rho(\phi) \nabla v] = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot [\mu(\phi) \nabla v] \tag{3}$$

$$\nabla \cdot [\rho(\phi) \nabla w] = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot [\mu(\phi) \nabla w] \tag{4}$$

$$\nabla \cdot [\rho(\phi) \phi \vec{V}] = \nabla \cdot [D(\phi) \nabla \phi] \tag{5}$$

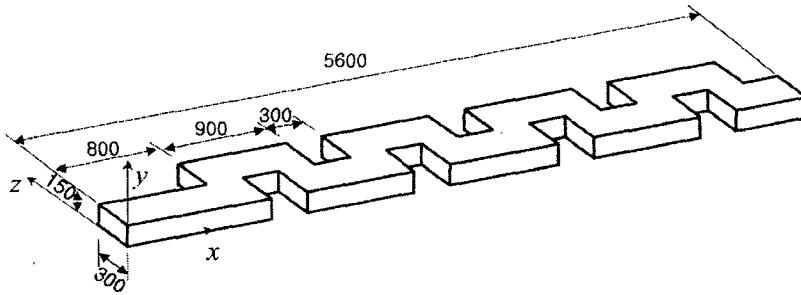


Fig. 2 Geometry of square-wave mixer(unit:μm)

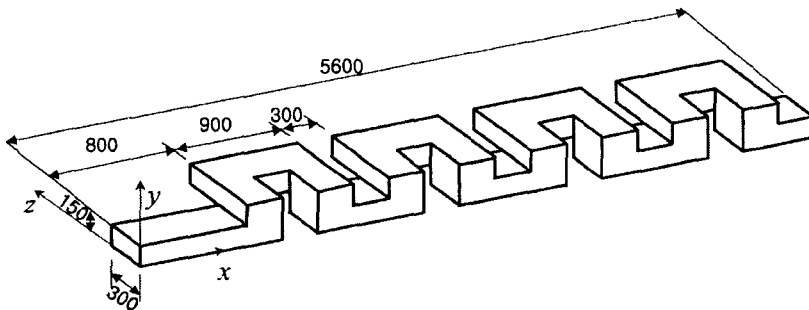


Fig. 3 Geometry of three-dimensional serpentine mixer(unit:μm)

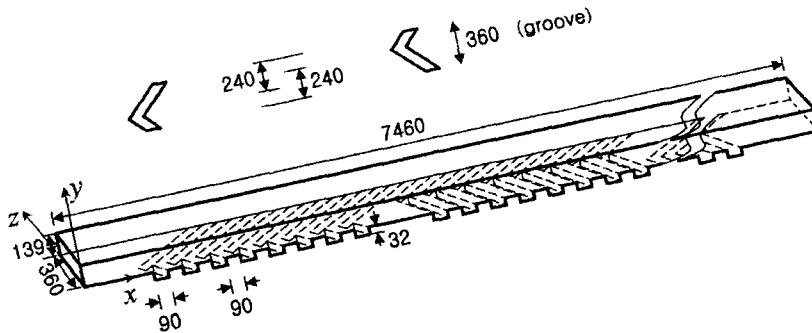


Fig. 4 Geometry of staggered herringbone mixer(unit:μm)

여기서  $\rho$ 는 유체 밀도,  $D$ 는 확산계수,  $\vec{V}$ 는 속도 벡터이며,  $\phi$ 는 식 (6)와 같이 글리세롤 수용액의 질량 농도이다.

$$\phi = \frac{m_g}{m_g + m_w} \quad (6)$$

여기서  $m_g$ 와  $m_w$ 는 각각 글리세롤 수용액을 이루는 글리세롤과 물의 질량이다.

경계조건은  $\phi$ 의 경우 채널의 입구에서는 상향

에 따라 값으로 주어지고 채널의 벽과 출구에서는 노이만 조건으로 주어진다. 속력의 경우 채널의 입구에서는 단면에 수직하며 일정한 속력 조건으로 주어지고 채널 벽에서는 no-slip 조건이 사용된다.

사각과 혼합기, 3차원 뱀 모양 혼합기, 물고기 뼈 모양 혼합기의 모양은 그림 2-4에 나타나 있다. 세 혼합기의 단면적의 크기는 각각  $300 \times 150$ ,  $300 \times 150$ ,  $360 \times 139 \mu m$ 이고, 수력 직경( $D_h$ )은 모두  $200 \mu m$ 이다. 물고기 뼈 모양 혼합기는 원래  $D_h = 111 \mu m$ 이나 다른 혼합기와

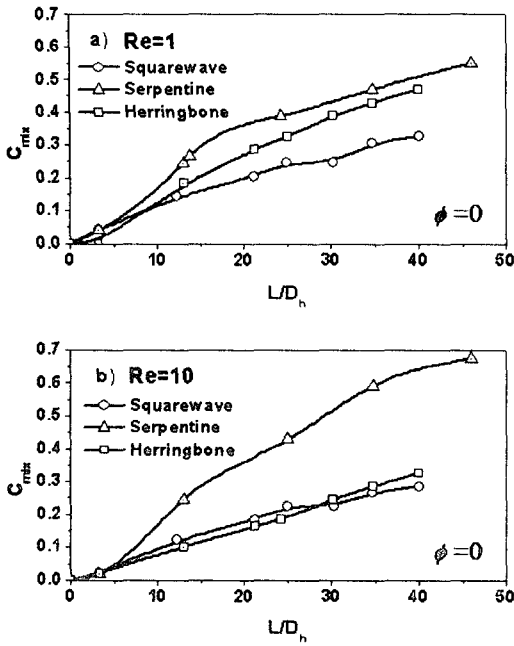


Fig. 5 Mixer performance comparison of three mixers at  $\phi = 0$ : a)  $Re = 1$  b)  $Re = 10$

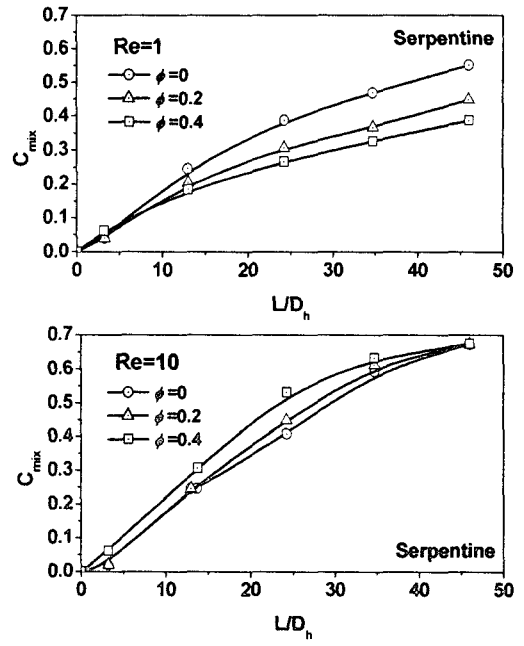


Fig. 6 Mixing performance of three-dimensional serpentine mixer

비교하기 위해 단면적의 크기를 조절하였다[5]. 같은 유량을 갖으며 농도가 다른 두 글리세롤 수용액을 각각의 혼합기 입구에 같은 조건으로 주입하였다.

식(1)-(6)을 풀기 위하여 SIMPLEC 방법을 사용하였다.  $\phi$ 의 변화가 상대적으로 0.01% 이하일 때 수렴되는 것으로 판단하였다. 단면의 격자수는  $20 \times 45$  이고, 총 수는 사각과 혼합기, 3차원 뱀 모양 혼합기, 물고기 뼈 모양 혼합기의 경우 각각 750,000개, 980,000개, 1,420,000개이다.

### 3. 혼합평가 지수

지금까지 연구들은 용질의 농도에 따른 빛의 강도를 이용하여 구한 용질의 분포로 혼합 정도를 평가하였다[2]. Liu 등(200)은 3차원 뱀 모양 혼합기에서의 두 유체혼합을 다음과 같이 평가하였다[2].

$$C = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - I_{max})^2} \quad (7)$$

여기서  $I_i$ 는 영상의 픽셀 값,  $I_{max}$ 는 영상에서 최대 픽셀 값,  $N$ 은 영상의 전체 픽셀 수이다. 식(7)은 서로 다른 평균 강도를 가지는 영상들을 비교하기 위하여 정규화(normalization)가 필요하다.

본 연구에서는 그레이 스케일 농도분포로 농도의 균일성을 다음과 같이 정의하였다.

$$C_{dev} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - I_{mean})^2}}{2^n - 1} \quad (8)$$

여기서  $I_{mean}$ 은 농도의 평균값,  $n$ 은 그레이 스케일의 크기를 나타내는 비트 수이다. 서로 다른 혼합기의 성능평가를 위하여 혼합기의 출구 뿐 아니라 입구에서의 농도 분포도 고려하여 좀 더 개선된 평가지수를 정의하였다.

$$C_{mix} = \frac{C_{dev-inlet} - C_{dev-outlet}}{C_{dev-inlet}} \quad (9)$$

여기서  $C_{dev-inlet}$ ,  $C_{dev-out}$ 은 각각 입구와 출구

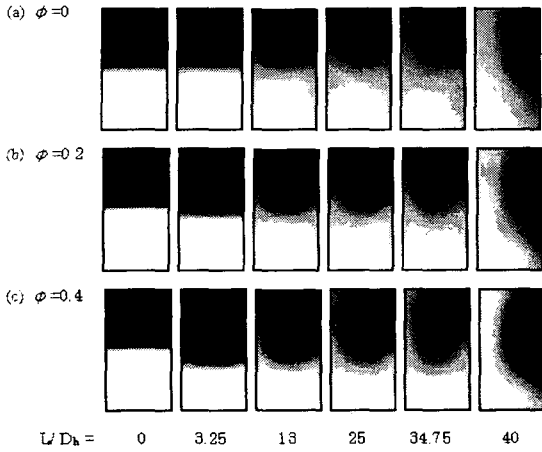


Fig. 7 Cross-sectional mixing photograph (white:  $\phi = 0$ ) of three-dimensional serpentine mixer at  $Re = 1$

에서의  $C_{dev}$ 이다. 만약 두 유체가 채널 내에서 완전히 혼합이 된다면, 식 (8)에서  $I_i$ 들은 모두 같고,  $C_{mix}$ 는 1이다. 반대로 전혀 혼합되지 않은 경우에  $C_{mix}$ 는 0이 된다. 식 (9)으로 정의되는  $C_{mix}$ 를 혼합 균일도(mixing uniformity)라 한다.

#### 4. 결과 및 토의

서로 다른 혼합기들의 성능을 비교하기 위해 주 유동방향으로의 직선거리가 아닌 채널 단면적의 중앙점을 따라가는 거리( $L$ )를 고려하였다( $L$ 이 길어질수록 유체가 흘러간 거리는 길어진다). 이 때 전체거리  $L$ 은 사각과 혼합기일 때  $8,000 \mu m$ , 3차원 뱀 모양 혼합기일 때는  $9,200 \mu m$ 이다. 물고기 뼈 모양 혼합기의 경우  $L$ 은 주 유동 방향으로 하였고  $8000 \mu m$ 이다. 레이놀즈 수는 두 유체 물성치의 평균을 이용하여  $Re = \bar{\rho} \bar{u} D_h / \bar{\mu}$ 로 하였다. 여기서  $\bar{\rho}$ 는 입구에서 두 유체의 평균 밀도,  $\bar{u}$ 는 평균 속도,  $\bar{\mu}$ 는 평균 점성계수이다.

먼저 두 유체의 농도가  $\phi = 0.001$ 으로 같고  $Re = 1, 10$ 일 때 수치해석을 수행하였다. 이 경우  $\phi = 0.001$ 은 농도가 극히 낮으므로  $\phi = 0$ 으로 생각하여도 무방하다. 이는 단일 유체를 가지고 혼합기의 성능을 수치해석으로 구하는 일반적인 방법이다[13]. 그림 5는 위에서 언급한 세

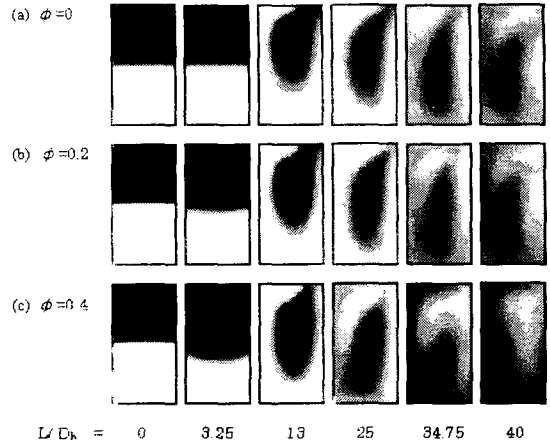


Fig. 8 Cross-sectional mixing photograph of three-dimensional serpentine at  $Re = 10$

가지 종류의 혼합기의 단면에서 혼합 균일도를 보여준다. 그림 5는 3차원 뱀 모양 혼합기와 물고기 뼈 모양 혼합기가 사각과 모양의 혼합기보다 우수함을 보여준다. 그래서 농도가 다른 유체의 혼합의 경우 3차원 뱀 모양 혼합기와 물고기 뼈 모양 혼합기에 대하여 적용하였다.

그림 6은 3차원 뱀 모양 혼합기에서  $Re = 1, 10$ 일 때, 한 유체는 물이고 다른 유체는 글리세롤 수용액 농도가  $\phi = 0, 0.2, 0.4$ 인 세 가지 경우에 대하여 혼합거리( $L/D_h$ )에 따른 혼합 균일도의 변화를 보여준다. 먼저  $Re = 1$ 일 경우 혼합 균일도는 농도가 낮을수록, 혼합거리가 길어질수록 커짐을 알 수 있다. 그 이유는  $Re = 1$ 일 때는 유체 혼합은 확산에 의해 주로 지배를 받는데, 동일한  $Re$  조건에서  $\phi$ 가 증가할수록 점성계수와 유체 속력을 증가시켜 유체가 채널 내에 머무르는 시간, 즉 확산시간이 감소시키기 때문이다.

$Re = 1$ 일 때 혼합되어 가는 과정을 그림 7에 나타나 있다. 그림 7은 혼합기의 혼합 거리에 따른 각 단면에서 농도 분포를 보여주는데, 세 농도 모두 혼합되어가는 과정이 비슷함을 알 수 있다. 글리세롤 수용액(위쪽 유체)은 첫 번째 유닛(unit)에서 회전을 하고 두 번째 유닛에서 엄지손가락 모양을 이루게 된다. 혼합거리가 길어질수록 글리세롤이 물(아래쪽 유체)로 침투하며,  $L/D_h = 25$  근방에서 글리세롤이 대류 및 확산

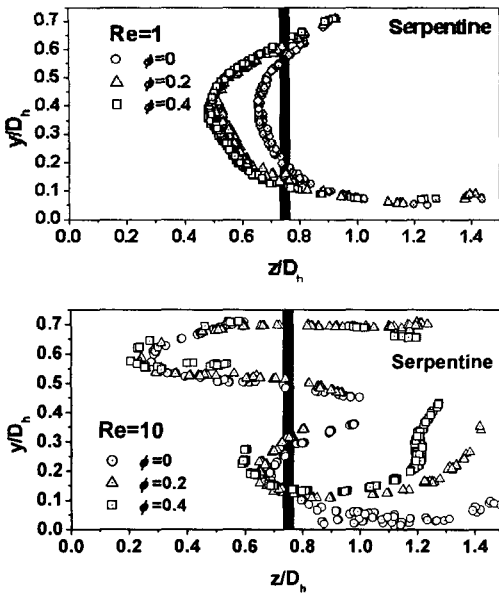


Fig. 9 Particle traces at the outlet cross section of three-dimensional serpentine mixer

에 의하여 바닥까지 이동하였음을 볼 수 있다. 그림 9에서 위쪽 그림은  $Re = 1$  일 때, 입구에서 두 유체의 경계면에 있는 입자들이 출구에서 어떤 위치로 갔는지 보여준다. 그림 9에서  $y, z$ 는 각각 혼합기 단면의 높이와 너비를 나타내며 굵은 직선은 입구에서 두 유체의 경계를 나타낸다. 농도가 높을수록 출구에서 입자분포 곡선이 더 길어지고 더 왼쪽으로 편향됨을 알 수 있다. 이는 농도가 높아질수록 혼합이 잘 되지 않았던 그림 6의 위쪽 결과에 위배된다. 이는 다음과 같이 해석할 수 있다. 그림 7의 위쪽 그림을 보면 농도가 높아질수록  $L/D_h = 3.25$  일 때 검은 영역(글리세롤 수용액)이 흰 영역(순수 물)보다 큼을 볼 수 있다. 이는 흰 영역과 검은 영역의 유량이 같을 경우, 검은 영역 농도의 속력이 작음을 의미한다. 글리세롤 수용액의 점성계수가 순수 물보다 작으므로 검은 영역의 속력이 실제로 작다. 그림 7을 보면, 유체가 180도 회전하게 하므로 그림 9와 같은 결과가 나오게 된다.

$Re = 10$  이고  $\phi = 0, 0.2, 0.4$  일 때 3차원 뱀모양 혼합기 내 혼합 균일도 변화는 그림 6의 아래 부분에 나타나 있다. 혼합 균일도는 혼돈류 때문에  $Re = 1$  일 때 보다 전반적으로 높아짐을

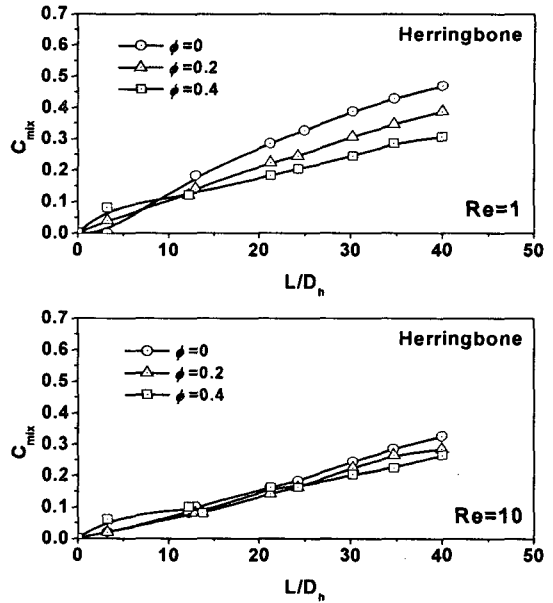
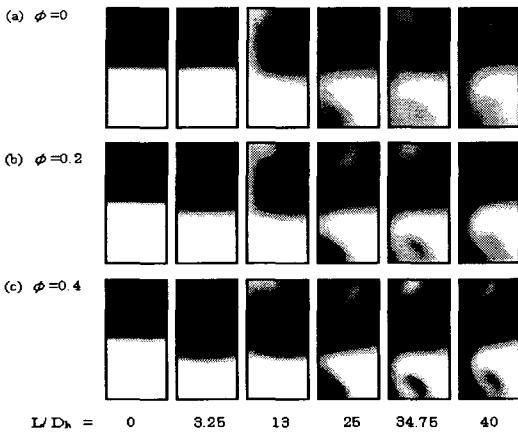


Fig. 10 Mixing performance of staggered herringbone mixer

볼 수 있다[2].  $Re = 1$  일 때와는 반대로  $\phi$ 가 높아질수록 혼합 균일도가 높아진다. 그러나  $\phi$ 의 영향이  $Re = 1$  일 때보다 작은 것으로 보아 확산보다는 혼돈류가 혼합에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 또 그림 6에서 보는 바와 같이  $Re = 1$  일 때는  $\phi$ 가 증가할 때 혼합이 덜되지만  $Re = 10$  일 때는  $\phi$ 가 증가할 때 혼합이 더 잘 된다.  $\phi$ 의 혼합에 대한 역전은 혼합의 지배적인 메커니즘이 확산에서 혼돈류로 전환되었음을 말해 준다. 그 이유는  $\phi$ 가 증가하여 유체의 속력이 증가하게 되면 확산시간은 작아지더라도 혼돈류가 크게 발생하여 두 유체가 혼합하기 때문이다.

그림 8은 각 단면에서의 농도 분포변화를 보여준다.  $\phi$ 의 증가에 따른 농도 분포는  $Re = 1$  일 때와 비교하여  $L/D_h = 13$  일 때 엄지모양의 글리세롤 수용액 분포 형태가 좀더 가늘어진 것을 제외하고 비슷하다.  $\phi = 0.2, 0.4$  일 때 글리세롤 수용액은  $L/D_h = 25$  일 때 채널의 윗벽에서 떨어져서 채널 중앙으로 이동함을 볼 수 있다. 이는 두 유체 사이의 접촉면 증가와 그에 따른 두 유체 사이 확산의 증가를 의미한다.  $\phi = 0.4$  일 경우 글리세롤수용액은  $L/D_h = 34.75$  일 때 채

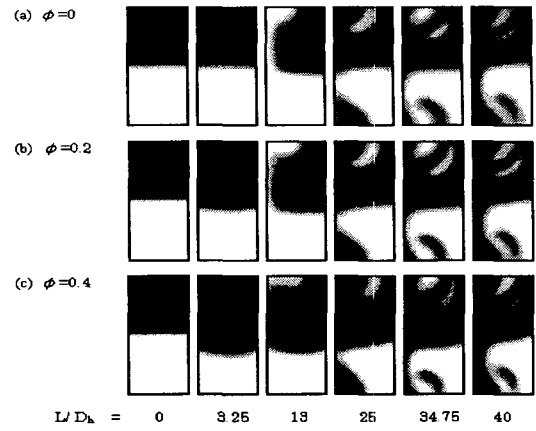


**Fig. 11** Cross-sectional mixing photograph of staggered herringbone mixer at  $Re = 1$

널의 밑바닥에 도착하고, 글리세롤은 채널 단면의 전 영역에 걸쳐 분포한다.  $L/D_h = 40$ 일 때는 세 경우 모두 두 유체의 경계를 알아보기 어려울 정도로 혼합되었다.

그림 9의 아래 부분은 3차원 뱀 모양 혼합기에서  $Re = 10$ 일 때 혼돈류가 혼합에 영향을 미치는 것을 보여준다.  $Re = 1$ 일 때와 비교하여 매우 복잡한 모양을 하고 특히 채널의 중앙 부분에서 입자 분포가 연속적이기 않고 깨져 있음을 볼 수 있다.

다음으로 물고기 뼈 모양 혼합기의 경우,  $Re = 1$ 일 때 혼합 균일도의 변화는 그림 10의 위쪽 부분에서 보여준다.  $Re = 1$ 인 경우 3차원 뱀 모양 혼합기와 비교할 때,  $\phi$ 가 증가함에 따른 혼합 균일도의 변화는 비슷하지만 혼합성능은 전체적으로 약간 감소하였다. 이는 물고기 뼈 모양 혼합기도 작은  $Re$ 에서는 확산이 혼합의 주된 이유임을 말해 준다. 그림 10은  $Re = 10$ 일 때 혼합 균일도 변화가  $Re = 1$ 일 때와 비슷함을 보여주는데, 이는 혼합이  $Re$ 에 무관함을 말해 준다. 이는 그림 11과 그림 12를 비교함으로써도 확인된다. 단면의 왼쪽 면이 채널의 바닥이다. 혼합 성능이  $Re$ 에 무관한 이유는 채널의 형상이 유체의 속력에 관계없이 유체가 회전하게 하는 모양을 가지고 있기 때문이다. 이 혼합기 밑바닥의 비스듬한 홈들은 2차 유동을 형성시켜 혼돈류를 발생시킨다.[18]. 특히 주목할 만 것은  $Re = 10$ 일 때



**Fig. 12** Cross-sectional mixing photograph of staggered herringbone mixer at  $Re = 10$

의 성능이  $Re = 10$  때 보다 약간 감소했다는 것이다. 그 이유는 물고기 뼈 모양의 혼합기는  $Re$ 에 상관없이 비슷한 2차 유동이 생기므로 혼합에서  $Re$ 에 따른 혼돈류의 영향은 일정한 반면, 유속이 빨라지면 확산시간을 감소시키기 때문이다.

그림 13은 입구에서 두 유체의 경계면에 위치한 입자들의 출구에서의 분포를 보여주는데, 입자들이 크게 흩어지지 않고 서로 이웃하여 선을 형성하고 있고,  $\phi$ 가 증가하여도 입자 분포가 크게 변하지 않음을 볼 수 있다. 이것도 물고기 뼈 모양 혼합기의 성능이  $Re$ 에 무관함을 뒷받침한다.

## 5. 결론

3차원 뱀 모양 혼합기와 물고기 뼈 모양 혼합기에 대하여 두 유체혼합에 관한 수치해석이 수행되었다. 물과 질량농도가 0, 0.2, 0.4인 세 가지 글리세롤 수용액을 각각 섞었을 때 혼합특성을 조사하였다.  $Re = 1, 10$ 일 때 질량농도  $\phi$ 의 영향을 조사하였다. 그 결과,  $Re = 1$ 일 때에는 3차원 뱀 모양 혼합기, 물고기 뼈 모양 혼합기 모두  $\phi$ 가 낮을수록 혼합이 잘 되었다. 그 이유는  $Re = 1$ 일 때에는 확산이 혼합에 지배적인데, 동일한  $Re$ 에서  $\phi$ 가 작을수록 점성계수, 유체속력이 작아서 채널 내에서 유체가 확산하는 시간이 길기 때문이다.  $Re = 10$ 로 증가하였을 때, 3차원 뱀 모양 혼합기 경우에는  $\phi$ 가 증가할수록

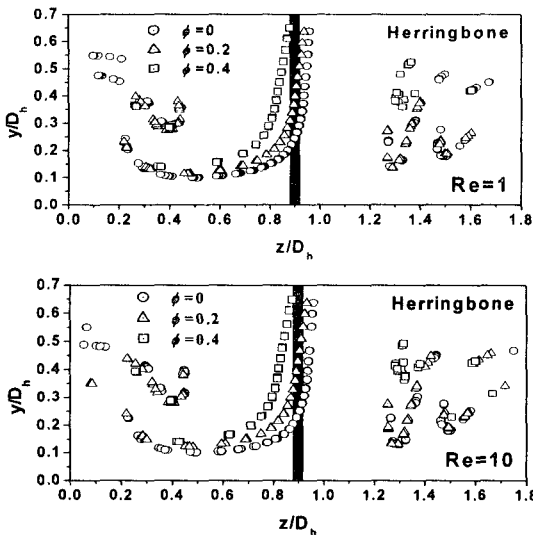


Fig. 13 Particle traces at the outlet cross section of staggered herringbone mixer

혼합이 잘되었고, 물고기 뼈 모양의 경우  $\phi$ 에 크게 영향을 받지 않았다.  $Re = 10$  일 때에는 혼합에서 혼돈류의 비중이 커지는데,  $\phi$ 가 증가할수록 유체속력이 커져 혼돈류가 많이 생성된다. 그러나 물고기 뼈 모양 혼합기의 성능이  $\phi$ 에 무관한 이유는 혼합기가 유체의 속력이 관계없이 유체가 일정한 패턴으로 움직이도록 설계되었기 때문이다. 이 특징으로 물고기 뼈 모양의 경우 유체의 속력이 증가하면 오히려 확산시간의 감소로 혼합성능이 약간 감소함도 보였다.

### 후기

이 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

### 참고문헌

- [1] Koch, M., Witt, H, Evans, A.G.R. and Brunnschweiler, A., "Improved characterization technique for micromixers," J. Micromech. Microeng, Vol.9, (1999), p.156.
- [2] Liu, R.H, Mark, A.S. and Kendra, V.S., "Passive mixing in a three-dimensional serpentine microchannel," Journal of MEMS, (2000), Vol.9, p.19.
- [3] Beebe, D.J., Adrian, R.J., Michael, G.O., Mark, A.S., Hassan, A. and Jo, B.H., "Passive mixing in microchannels: Fabrication and flow experiments," Mec.Ind., Vol.2, (2001), p.34.
- [4] Lee, Y.K., Tabeing, P. and Shih, C., "Characterization of a MEMS-fabricated mixing device," Proc. ASME IMECE, (2002). p.505.
- [5] Stroock, A.D., Dertinger, S.K.W., Ajdari, A., Mezic, I., Stone, H.A. and Whitesides, G.M., "Chaotic mixer for microchannels," Science, Vol.295, (2002), p.64.
- [6] Norbert, S., Thomas, F. and Helmut, W., "A modular microfluid system with an integrated micromixer," J. Micromech. Microeng., Vol.6, (1996), p.9.
- [7] Giridharan, M.G., Krishnamoorthy, S. and Krishnan, A., "Computational simulation of microfluidics, electrokinetics and particle transport in biological MEMS devices," Symp. Design, Test, and Microfabrication of MEMS/MOEMS, (1999). p.150.
- [8] Jones, S.W. and Aref, H., "Chaotic advection in pulsed source-sink systems," Phys. Fluids, Vol.31, (1998), p.46.
- [9] Bertsch, A., Heimingartner, S. and Cousseau, P., "3D micromixers-downscaling large scale industrial static mixers," Proc. IEEE MEMS, (2001). p.507.
- [10] Cussler, E.L., Diffusion mass transfer in fluid system, Cambridge university press, Cambridge (1990). p.65.
- [11] Cohen, B. and Huppert, D., "Non-exponential smoluchowski dynamics in fast acid-base reaction," J. Am. Chem. Soc., Vol.122, (2000), p.3838.
- [12] Lide, D.R. and Frederikse, H.P.R., Handbook of Chemistry and Physics, 77ed., CRC express, Boca Raton (1996).
- [13] Greiner, K.B., Deshpande, M. and Gilbert, J. R., "Design analysis and 3D measurement of diffusive broadening in a Y-mixer," Technical Proceedings of Micro Total Analysis Systems, (2002). p.87.