

〈 논문 〉

## 재순환 영역이 존재하는 마이크로 혼합기

이종광\* · 김용대\* · 최재훈\*\* · 권세진†

(2006년 9월 14일 접수, 2006년 10월 22일 심사완료)

### A Micro Mixer with Recirculation Zones

Jongkwang Lee, Youngdae Kim, Jaehoon Choe and Sejin Kwon

**Key Words :** Micro Mixer(마이크로 혼합기), Multilamination(다적층), Recirculation Zone(재순환 공간), Photosensitive Glass(감광 유리)

#### Abstract

This paper describes enhancement of the mixing efficiency of a multilamination micro mixer by adding a number of recirculation zones downstream of the mixing zone. Numerical simulation was employed to estimate the mixing efficiency and the pressure drop under various conditions. Numerical results indicated that recirculation micro mixer brought about not only the increase of the mixing efficiency but also the decrease of the pressure drop. Micro mixers were fabricated using photosensitive glass by anisotropic wet etching technique. The width and height of the micro channel were 150  $\mu\text{m}$  and 500  $\mu\text{m}$ , respectively. The performance of micro mixer was measured using color intensity variation of the fluid. Except for extremely low Re below 40, the recirculation micro mixer of the present study showed improved mixing. And the enhancement of the mixing increased as Re rose. When Re increased beyond 400, more than 90% of the mixing was observed in the experiment.

#### 1. 서론

마이크로 시스템의 가능성이 고기능성, 경량화, 저가 대량 생산의 장점을 제공할 수 있는 MEMS 기술 개발과 함께 제시되면서 효율적인 장치를 개발하기 위한 연구들이 수행되고 있다. 이 중 다양한 응용 분야를 가지며 높은 시장성을 지닌 마이크로 반응 시스템의 경우 다른 어느 분야보다도 빠른 속도로 발전하고 있다. 마이크로 반응 시스템의 대표적인 것은 마이크로 플랜트로서 마이크로 반응기, 마이크로 열교환기, 마이크로 혼합기 등으로 구성된다.<sup>(1,2)</sup>

수 mm 크기의 마이크로 반응기에서 화학 반응을 수행한다는 생각은 매우 혁명적이며, 현재 화

학 또는 화학 공학을 전공하는 사람들에게도 생소한 개념이다. 하지만 마이크로 플랜트는 기존의 거대 화학 공정 플랜트에서 소요되는 많은 양의 시약과 오랜 반응 시간을 줄여, 이에 따른 비용과 시간을 줄일 수 있는 장점과 더불어 기존의 소품종 대량 생산 방식에서 벗어나 다품종 소량 생산 방식으로 전환을 가능케한다. 또한 연구실에서의 연구 결과를 생산으로 빨리 전환할 수 있는 장점을 가지기 때문에 잠재적인 가능성이 매우 크다.<sup>(3)</sup>

이 논문에서는 앞서 언급한 마이크로 플랜트의 모듈들 중 액체나 기체간의 혼합을 가능케하는 마이크로 혼합기에 관한 연구 결과를 보고 하겠다.

마이크로 플랜트에 적용되는 마이크로 혼합기는 일반적으로 ml/h ~ 1/h의 유량으로 운영되며, 채널의 특성 길이가 현저히 짧기 때문에 낮은 레이놀즈 수를 가지며 층류를 형성하게 된다.<sup>(4)</sup> 층류를 가지는 마이크로 혼합기의 경우 난류에 의한 대류 혼합을 기대하기 어려우며 확산에 의한 혼합이 지배적이다. 확산에 의한 혼합은 확산 계수와 유동간의 접촉 면적 그리고 농도 구배에 비례한다. 층

† 책임저자, 회원, KAIST 항공우주공학전공  
E-mail : melody@kaist.ac.kr  
TEL : (042)869-3721 FAX : (042)869-3710  
\* 회원, KAIST 항공우주공학전공  
\*\* LG 화학기술연구원 공정연구소

류를 가지는 마이크로 혼합기에서 접촉 면적의 증가와 확산 거리의 감소가 확산 혼합을 증가시키는 하지만 액체의 두 유체를 혼합하는 경우는 이 효과는 미비하게 된다. 이와 같은 이유로 마이크로 혼합기의 혼합 성능을 증가시키기 위한 다양한 혼합 방식들이 제시되고 있으며, 이들 혼합기들은 크게 능동형 혼합기와 수동형 혼합기로 구분할 수 있다.

능동형 혼합기는 혼합기의 성능 향상을 위하여 외부의 추가적인 에너지를 필요로 한다. 능동형 혼합기로는 마이크로 날개차를 삽입하는 방식, 초음파를 사용하는 방식, 주입 유량을 주기적으로 변화시키는 방식 등 다양한 방식들이 제시되고 있다.<sup>(6-7)</sup> 하지만 이와 같은 방식의 혼합기는 복잡한 구조를 가지게 되어 제작에도 어려움이 많고 다른 모듈과의 통합에 어려움이 있는 등 여러 단점들이 있다. 이에 반해 수동형 혼합기는 유동을 형성하기 위한 에너지만을 필요로 한다. 수동형 혼합기는 제작 및 조장이 용이하며 다른 모듈과도 통합이 쉽다. 이와 같은 장점으로 인하여 다양한 연구 그룹들에 의해 많은 연구가 진행되었다.

마이크로 수동형 혼합기에서 주로 사용되는 혼합 원리는 다적층을 이용한 혼합 방식, 분할 및 재결합을 이용하는 혼합 방식, 확산 거리를 감소시키는 방식, 와류를 형성하는 방식 그리고 혼돈 혼합을 이용하는 방식 등이 있다. Hessel 등은 다수의 입구 채널을 이용한 다적층 방식과 확산 거리를 감소시키는 방식을 이용한 마이크로 혼합기를 제시하였다.<sup>(8)</sup> 이 등은 분리 및 재결합 방식을 이용한 혼합기를 이용하여 접촉면적을 지수승으로 증가시키며 혼합 성능을 증가시키는 방식을 제안하였다.<sup>(9)</sup> Lin 등은 원형 챔버를 이용하여 와류를 발생시키는 방법을 제시하였으며,<sup>(10)</sup> Stroock 등은 엇갈린 헤링본 구조를 사용한 마이크로 혼합기를 제작하여 혼돈 혼합을 발생시키며 혼합 효율을 향상시켰다.<sup>(11)</sup>

하지만 앞서 언급한 대부분의 마이크로 혼합기들은 그 응용 대상이 마이크로 플랜트가 아닌 랩 온 어 칩(Lab-on-a-chip)으로서 혼합 유량이 레이놀즈 수가 10 이하의 매우 작은 유량이며, 혼합기의 재료 역시 PDMS 또는 SU-8과 같은 폴리머 계열인 경우가 많다. 이에 반해 마이크로 플랜트에서 사용되는 마이크로 혼합기의 경우 레이놀즈 수가 수백에서 천까지의 높은 유량을 혼합할 수 있어야 하며, 혼합물 또한 강산의 물질이 많이 사용되기 때문에 내산성이 우수한 재질이 혼합기의 재료로 사용되어야 한다. 이에 이 논문에서는 마이크로 플랜트에 적합한 마이크로 혼합기에 관한 연구 결

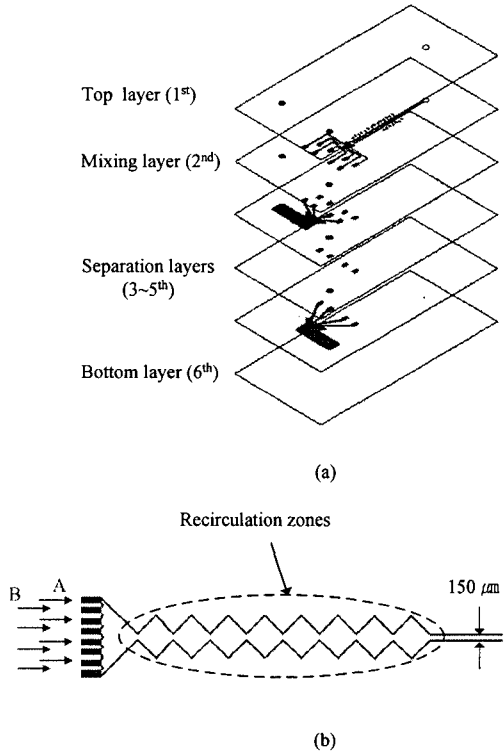


Fig. 1 (a) Schematic view of recirculation micro mixer (b) Detail view of mixing layer

과를 보고하겠다.

이 연구에서 제안한 마이크로 혼합기의 개략도는 Fig. 1에서 제시 되어있다. 사용된 혼합 방식은 다적층(multilamination) 방식으로 다수의 공급 채널에서 엇갈리게 두 유체를 공급한 후 이들을 하나의 채널로 수축시켜 유체의 확산 면적을 증가시키는 방법과 채널을 수축-확장하여 와류를 발생시키며 대류 혼합을 유도하는 방법이다. 혼합층은 2 × 4의 공급 채널을 가지며, 8개의 재순환 공간을 가지고 있다. 마이크로 채널의 폭은 150 μm이며, 높이는 500 μm이고, 수력 지름은 230 μm이다

마이크로 혼합기의 제작에 앞서 제시한 개념의 마이크로 혼합기의 성능 검증을 위해 수치 해석을 수행하였다. 또한 검증된 마이크로 혼합기를 감광 유리를 사용하여 제작하였으며, 실험을 통하여 혼합기의 성능을 확인하였다.

## 2. 수치 해석

### 2.1 수치 해석 방법

마이크로 혼합기의 제작과 실험에 앞서 수치 해석을 통하여 제안한 마이크로 혼합기의 성능을 검

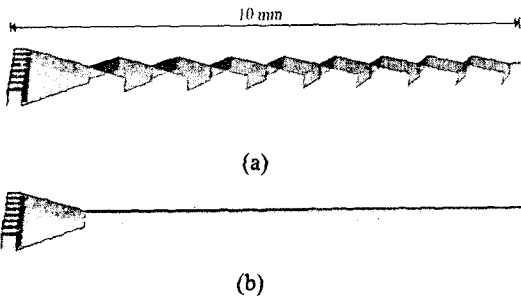


Fig. 2 Three dimensional model for (a) Recirculation micro mixer (b) Multilamination micro mixer

증하였다. 마이크로 채널의 유동장을 구하기 위하여 질량 보존식과 운동량 보존식을 계산하였으며, 혼합 정보를 얻기 위하여 종 보존 방정식을 계산하였다. 또한 수치 확산을 줄이기 위하여 QUICK 법을 사용하였다.<sup>(12)</sup> 본 해석을 위하여 보편적인 신뢰성이 입증된 상용코드인 Fluent를 사용하였다. Fig. 2의 (a)는 입구 채널이 2×4인 재순환 공간이 추가된 다적층 혼합기 해석 모델이며, (b)는 다적층 혼합기의 해석 모델이다.

혼합 성능을 평가하기 위하여서는 식 (1)과 같은 혼합 효율식을 사용하였다.<sup>(9,11)</sup>

$$\eta_N = \left( 1 - 2 \times \sqrt{\frac{1}{A} \sum (c_i - 0.5)^2 A_i} \right) \times 100\% \quad (1)$$

이 식에서  $\eta_N$ 는 계산된 혼합 효율이고,  $c_i$ 는  $i$  번째 요소의 질량 분율이며,  $A_i$ 는  $i$  번째 요소의 면적이고,  $A$ 는 혼합 성능을 평가하는 단면의 면적이다.

계산에 사용된 유체는 물이며, 확산 계수는  $10^{-9}$   $m^2/s$ 를 사용하였다. 체적 유량은 각각 5.85 ml/h에서 585 ml/h 사이의 유량 조건으로 계산을 수행했으며, 이 때 마이크로 채널에서의 레이놀즈 수는 10에서 1000이었다.

2.2 수치 해석 결과

재순환 공간의 추가로 인한 혼합 효율의 증가를 확인하기 위하여 다적층 혼합기와 재순환 공간이 추가된 혼합기를 레이놀즈 수가 100에서 입구 채널 수에 따라 성능을 비교해 보았다. Fig. 3에서는 입구 채널수에 따라 다적층 혼합기와 재순환 혼합기의 혼합 효율이 제시되어 있다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 다적층 혼합기의 채널 수를 2×2에서 2×4로 증가시키는 것보다 2×2의 혼합기에 재순환 공간을 추가하는 것이 보다 효율적인 방법임을 알 수 있다.

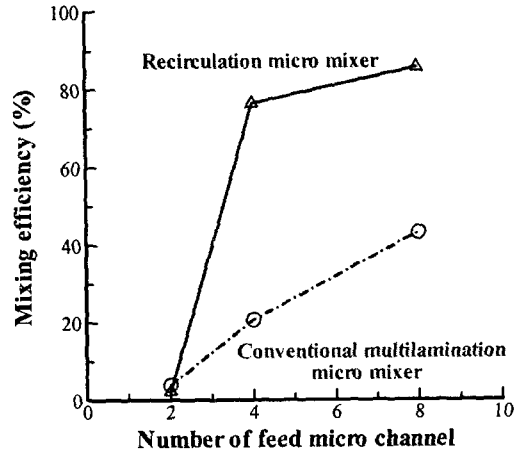


Fig. 3 Effects of the number of feed micro channels and the recirculation zones (Re : 100)

하지만 입구 채널 수가 2개인 경우에는 다수의 입구 채널을 가지는 결과와 상반된 결과를 가짐을 확인할 수 있다. 이는 재순환 공간으로 두 개의 서로 다른 유체가 유입되어야 발생되는 와류로 인하여 혼합 효율에 이득을 볼 수 있기 때문이다. 즉 입구 채널이 2개인 경우에는 재순환 공간으로 단일 유체만이 유입되기 때문에 발생되는 와류는 혼합에 기여할 수 없게 되며, 오히려 혼합 거리의 증가만을 유발하기 때문에 혼합 성능이 감소하게 된다.

Fig. 5와 Fig. 6에서는 입구 채널 수가 2×4인 경우 다적층 혼합기와 재순환 혼합기의 레이놀즈 수에 따른 결과를 나타낸 것이다. 기존의 다적층 혼합기의 경우 레이놀즈 수가 증가함에 따라 혼합 성능이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 유동 속도가 빨라져 확산 혼합 시간을 감소시키기 때문이다. 이에 반하여 재순환 혼합기의 경우는 재순환 공간에서 와류가 발생하는 레이놀즈 수 40을 기점으로 레이놀즈 수가 증가함에 따라 혼합 효율도 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 유동 속도의 증가로 인하여 재순환 공간에서 발생하는 와류의 강도가 증가되기 때문이다(Fig. 4). 하지만 레이놀즈 수가 400이 넘게 되면 다시 혼합 효율이 감소하는게 되는데, 이는 와류로 인한 혼합 효율의 증가보다 유동 속도의 증가로 인한 혼합 시간의 감소의 영향이 상대적으로 커지기 때문이다. 하지만 레이놀즈 수가 1000일 경우에도 혼합 효율은 90% 이상을 가지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6에서 제시된 압력 강하 결과에서는 레이놀즈 수가 400이하에서는 재순환 혼합기의 압력

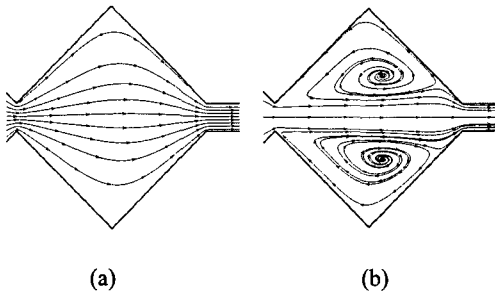


Fig. 4 Streamline at 8<sup>th</sup> recirculation zone (a) Re 10 (b) Re 100

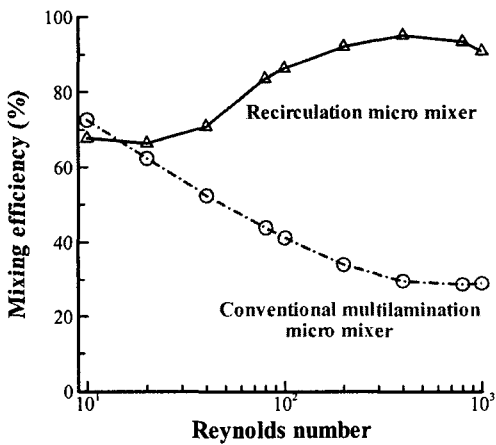


Fig. 5 Mixing efficiency as a function of Re(Number of feed micro channels: 2 × 4)

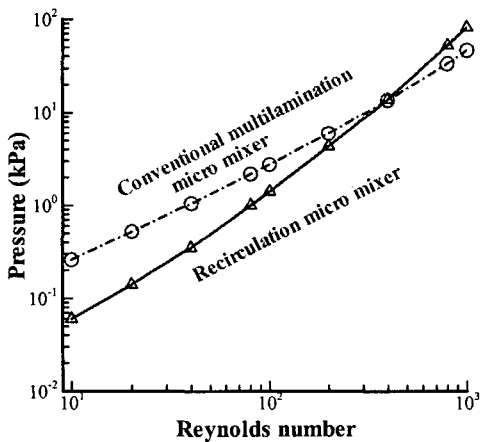


Fig. 6 Pressure drop as a function of Re(Number of feed micro channels: 2 × 4)

강도가 다적층 혼합기에 비해 작음을 알 수 있다. 이는 재순환 공간으로 인하여 채널 폭이 커지게 되었기 때문이다. 하지만 레이놀즈 수가 400 이상이 되면 재순환 공간내의 와류의 영향으로 재순환

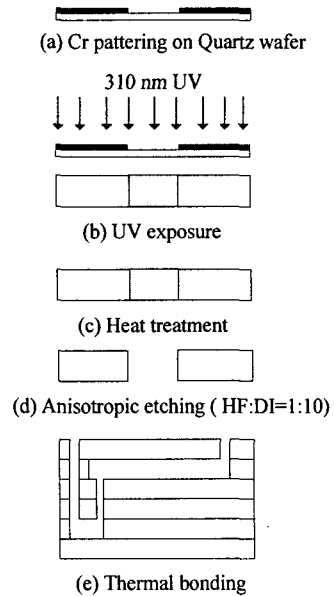


Fig. 7 Process sequences of the fabrication of photosensitive glass

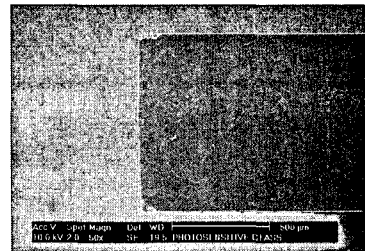


Fig. 8 SEM images of photosensitive glass after etching

혼합기의 압력 강하가 상대적으로 커지게 된다. 이와 같은 수치 해석의 결과로 이 연구에서 제안한 마이크로 혼합기가 적합한 성능을 가짐을 수치적으로 확인할 수 있었다.

### 3. 마이크로 혼합기의 제작

마이크로 혼합기의 재료로는 감광 유리(Photosensitive glass)를 선택하였다. 감광 유리는 내산성이 우수하기 때문에 앞서 언급한 것과 같이 강산성 물질이 많이 사용되는 마이크로 플랜트의 재료로 적합하다. 또한 비등방성 식각을 통하여 고 종횡비를 가지는 구조체의 구현이 가능하며 마이크로 시스템에서 많이 사용되고 있다.

감광 유리는 본래 비결정 구조를 가지고 있기 때문에 등방성 식각이 되어 고 종횡비의 정밀한 구조체를 가공할 수 없다. 하지만 감광 유리를

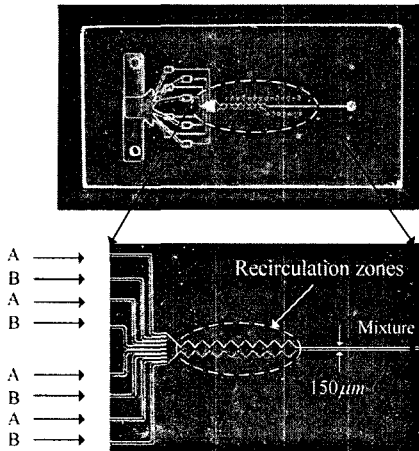


Fig. 9 Recirculation micro mixer made by etching and bonding processes of photosensitive glass

UV 에 노광하게 되면 이방성 성질을 가지게 되는 특성이 있고, 이를 이용하면 고 종횡비를 가지는 정밀한 마이크로 구조체를 가공할 수 있게 된다.

Fig. 7은 감광 유리의 공정도이며 자세한 공정 순서는 다음과 같다.

우선 퀴츠 웨이퍼에 크롬 마스크를 제작한 후 (a), 감광 유리를 310nm 파장의 UV에 노광을 한다. 이 때, 노광 에너지는 2.5 J/cm<sup>2</sup>을 사용하였으며, UV에 노광된 감광 유리는 내부에 은 원자가 형성되게 된다(b). 노광 공정 후, 감광 유리를 585 °C에서 열처리 하게되면 은 원자 주위로 결정화가 이뤄지며 유리-세라믹으로 물성이 변하게 된다(c). 이와 같은 공정을 거친 후 감광 유리를 불산 용액에 식각하게 되면 결정화가 이뤄진 부분으로 비등방성 식각이 이뤄지게 되어, 원하는 마이크로 구조체를 만들 수 있게 된다(d).<sup>(13,14)</sup> Fig. 8 은 감광 유리의 식각 단면의 SEM 사진이다. 마지막으로 각각 제작된 마이크로 구조체를 열 접합하여 마이크로 혼합기를 제작한다(e). Fig. 9는 제작된 재순환 마이크로 혼합기이다.

#### 4. 마이크로 혼합기의 성능 실험

##### 4.1 실험 장치 및 실험

제작된 마이크로 혼합기의 혼합 성능 평가를 위하여 이 연구에서는 검정색 잉크와 물을 이용한 혼합 성능 평가를 시도하였다. 혼합 유동 가시화 실험을 수행하기 위한 실험 장치의 구성은 Fig. 10 와 같다. 두 시료의 주입을 위하여 주사기 펌프 (KDS200, KD Scientific)가 사용되었으며 영상 획득

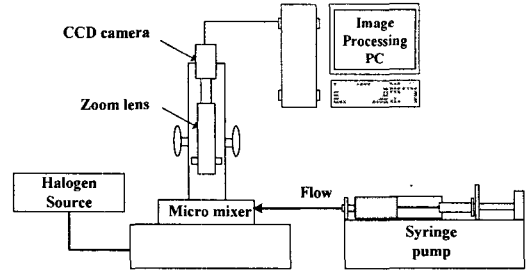


Fig. 10 Experimental setup

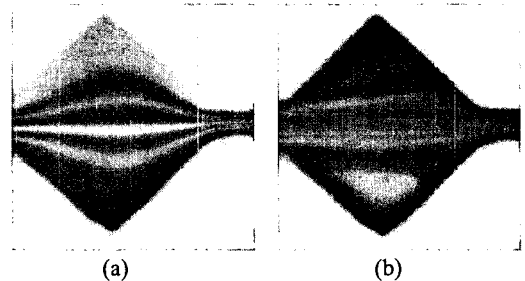


Fig. 11 Experimental flow pattern at 8<sup>th</sup> recirculation zone (a) Re 10 (b) Re 100

에는 CCD 카메라(MARLIN F-080C, ALLIED Vision Technologies) 및 줌 렌즈를 사용하였다. 획득된 영상은 NI vision assistance를 이용하여 영상의 색상 강도를 분석하였다. 영상의 획득은 마이크로 혼합기의 길이 방향으로 5곳에서 하였으며, 획득된 영상은 모든 화소에서 강도를 측정하였다.

혼합 효율의 계산은 측정된 강도들의 표준 편차를 이용하여 식 (2)와 같이 계산하였다.

$$\eta_E = \left( 1 - 2 \times \sqrt{\frac{1}{n} \sum (I_{nor,i} - I_{nor,avg})^2} \right) \times 100\% \quad (2)$$

이 식에서  $\eta_E$  는 혼합 효율이고,  $I_{nor,i}$  는 i번째 화소의 정규화된 강도이고,  $I_{nor,avg}$  정규화된 화소 강도의 평균값이며,  $n$  은 화소의 수이다.

Fig. 11은 레이놀즈 수가 10과 100인 경우 촬영된 혼합기의 유동 사진이다. 레이놀즈 수가 10인 경우 확산에 의한 혼합만이 존재하는 것을 확인할 수 있으며 레이놀즈 수가 100인 경우는 재순환 공간내에서 와류가 발생되어 혼합이 증진되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12(a)와 (b)는 레이놀즈 수가 10과 100에서 혼합기의 길이 방향으로의 혼합 효율을 수치 해석 결과와 실험 결과를 비교한 그래프이다. 해석 결과와 실험 결과가 유사한 경향을 가짐을 확인할 수 있다.

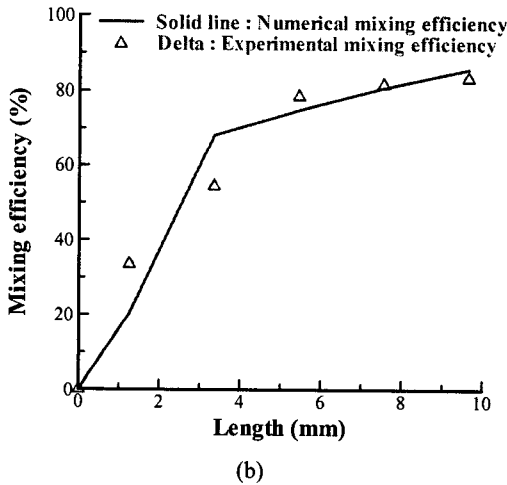
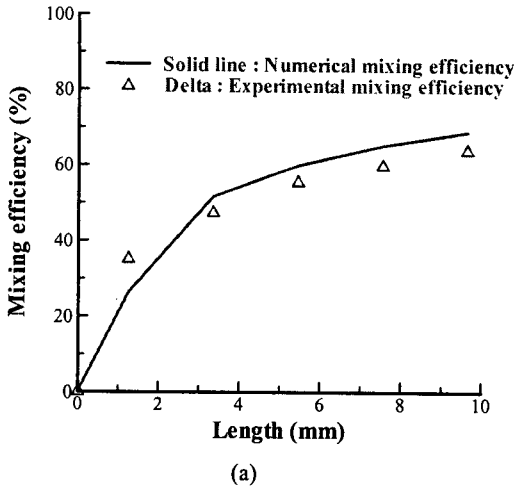


Fig. 12 Mixing efficiency changes along the down channel direction for (a) Re 10 and (b) Re 100

4.2 혼합 성능 실험 결과

Fig. 13은 레이놀즈 수에 따라 재순환 혼합기와 다적층 혼합기의 혼합 효율을 보여주고 있다. 레이놀즈 수가 40과 80사이에서 두 혼합기의 혼합 성능이 교차하는 것을 확인할 수 있다. 레이놀즈 수가 40미만에서는 재순환 혼합기 내에서 와류가 발생되지 않으며, 혼합은 확산에 의한 혼합이 지배적이다. 이 구간에서 재순환 공간은 오히려 확산 거리 증가를 초래하여 다적층 혼합기 보다도 낮은 혼합 효율을 가지게 된다. 하지만 레이놀즈 수가 증가할수록, 재순환 공간에서 와류 강도의 증가로 인하여 혼합 효율이 향상되는 것을 볼 수 있다. 또한 레이놀즈 수가 400이상으로 증가하면 혼합 효율이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 이 영역에서 혼돈 유동이 발생하는 것으로

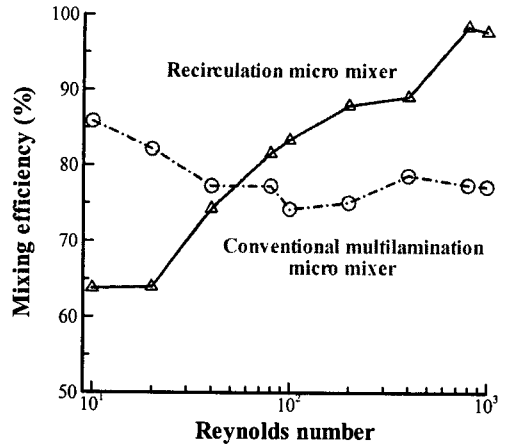


Fig. 13 Mixing efficiency as a function of Re

판단된다. Guzmán 등은 수축-확장 채널에서 레이놀즈 수가 600이 넘게되면 혼돈 유동이 발생하는 것을 수치적으로 제시한 바 있다.<sup>(15)</sup> 즉 재순환 공간내에서 발생하는 혼돈 유동으로 인하여 혼합 효율은 보다 증가하게 된다. 수치 해석 결과와는 달리 유동 속도의 증가로 인하여 혼합 효율이 감소하는 영역이 레이놀즈 수가 800 이상에서 측정되었다.

다적층 혼합기의 경우 레이놀즈 수가 200부터는 수치 해석을 통해 예측되는 혼합 성과는 다른 경향을 보이는데, 이는 마이크로 사각 채널의 유동 특성으로 판단된다. 이러한 결과는 Peng 등의 실험 결과로 확인할 수 있는데 Peng 등은 마이크로 사각 채널에서는 천이 영역 발생 구간이 레이놀즈 수가 200~700 사이에 발생한다는 연구 결과를 제시한 바 있다.<sup>(16)</sup> 즉 다적층 혼합기의 혼합 성능이 레이놀즈 수가 200이 넘어서며 변동하는 것은 유동장이 층류가 아닌 천이 영역으로 변화하여 일어나는 현상이라 판단된다.

5. 결론

이 연구에서는 마이크로 플랜트에 적합한 마이크로 혼합기로서 재순환 공간이 추가된 다적층 마이크로 혼합기를 제안하였다. 수치 해석을 통하여 제안된 혼합기가 적합한 성능을 가짐을 확인하였다. 마이크로 플랜트에 적합한 재료인 감광 유리를 사용하여 마이크로 재순환 혼합기를 실제 제작하였으며, 혼합 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 기존의 다적층 혼합기의 경우 마이크로 플랜트에서 주로 운용되는 레이놀즈 수 영역에서 레이놀즈 수가 증가함에 따라 오히려 혼합 성능이

감소하는 경향을 가지나, 이 연구에서 제안된 재순환 혼합기의 경우 재순환 공간내에서 발생하는 와류의 영향으로 인하여 혼합 성능이 증가함을 확인하였다.

(2) 재순환 혼합기 역시 특정 레이놀즈 수 이상부터는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 혼합 시간의 감소로 혼합 성능이 감소하는 것을 확인하였다. 하지만 마이크로 플랜트의 주 운용 범위에서는 높은 혼합 효율을 가짐을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하는 차세대 신기술 개발사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광·열유체 마이크로 부품 기술 개발 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Hessel, V. and Löwe, H., 2003, "Microchemical Engineering: Components, Plant Concepts User Acceptance - Part I," *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 26, pp. 13~24.
- (2) Jensen, K. F., 2001, "Microreaction Engineering - is Small Better?," *Chemical Engineering Science*, Vol. 56, pp. 293~303.
- (3) Ehrfeld, W., Hessel, V. and Löwe, H., 2000, *Microreactors*, WILEY-VCH, chapter 1-3.
- (4) Schönfeld, F., Hessel, V. and Hofmann, C., 2004, "An Optimized Split-and-Recombine Micro-Mixer with Uniform 'Chaotic' Mixing," *Lab on a Chip*, Vol. 4, pp. 65~69.
- (5) Ryu, K. S., Shaikh, K., Goluch, E., Fan, Z. and Liu, C., 2004 "Micro Magnetic Stir-Bar Mixer Integrated with Parylene Microfluidic Channels," *Lab on a Chip*, Vol. 4, pp. 608~613.
- (6) Yang, Z., Matsumoto, S., Goto, H., Matsumoto, M. and Maeda, R., 2001, "Ultrasonic Micromixer for Microfluidic Systems," *Sensors and Actuators A*, Vol. 93, pp. 266~272.
- (7) Glasgow, I. and Aubry, N., 2003, "Enhancement of Microfluidic Mixing Using Time Pulsing," *Lab on a chip*, Vol. 3, pp. 114~120.
- (8) Hessel, V., Hardt, S., Löwe, H. and Schönfeld, F., 2003, "Laminar Mixing in Different Interdigital Micromixers: I. Experimental Characterization," *AIChE Journal*, Vol. 49, pp. 566~577.
- (9) Lee, S. W., Kim, D. S., Lee, S. S. and Kwon, T. H., 2006, "A Split and Recombination Micromixer Fabricated in a PDMS Three-Dimensional Structure," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 16, pp. 1067~1072.
- (10) Lin, C. H., Tsai, C. H. and Fu, L. M., 2005, "A Rapid Three Dimensional Vortex Micromixer Utilizing Self-Rotation Effects Under Low Reynolds Number Conditions," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, pp. 935~943.
- (11) Stroock, A. D., Dertinger, S. K. W., Ajdari, A., Mezic, I., Stone, H. A. and Whitesides, G. M., 2002 "Chaotic Mixer for Microchannels," *Science*, Vol. 295, pp. 647~651.
- (12) Hardt, S. and Schönfeld, F., 2003, "Laminar Mixing in Different Interdigital Micromixers: I I. Numerical simulation," *AIChE Journal*, Vol. 49, pp. 578~584.
- (13) Dietrich, T. R., Ehrfeld, W., Lacher, M., Kramer, M. and Speit, B., 1996, "Fabrication Technologies for Microsystems Utilizing Photosensitive Glass," *Microelectronic Engineering*, Vol. 30, pp. 497~504.
- (14) Feindt, K., Harnisch, A., Zoppig, V., Hulsenberg, D. and Kallenbach, E., 1998, "3D-Structuring of Photosensitive Glasses," *MEMS'98*, pp 207~210.
- (15) Guzmán, A. M. and Amon, C. H., 1996, "Dynamical Flow Characterization of Transitional and Chaotic Regimes in Converging-Diverging Channels," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 321, pp. 25~57.
- (16) Peng, X. F., Peterson, G. P. and Wang, B. X., 1994, "Frictional Flow Characteristics of Water Flowing Through Rectangular Microchannels," *Experimental Heat Transfer*, Vol. 7, pp. 249~264.