

# 준능동형 로터를 이용한 마이크로 혼합기의 혼합 특성 Mixing Characteristics of Micro-Mixer with Quasi-Active Rotor

\*김용대<sup>1</sup>, 이종광<sup>1</sup>, #권세진<sup>1</sup>

\*Y. D. Kim<sup>1</sup>, J. K. Lee<sup>1</sup>, #S. J. Kwon<sup>1</sup> (trumpet@kaist.ac.kr)

<sup>1</sup> 한국과학기술원

Key words : Micro-mixer, Micro-rotor, Photosensitive glass

## 1. 서론

80년대 후반부터 MEMS 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. MEMS 기술은 반도체공정에서 파생된 기술임에도 불구하고 기존의 기계가공법에 비해 쉽게 소형화, 집적화를 할 수 있고 저전력에서 운용되며 낮은 가격으로 대량생산이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 각 분야별로 이를 접목한 연구가 활발히 진행 중이다. 특히, 상업적 이용과 관련하여 생화학 분야에서 그 응용이 활발한데 그 대표적인 응용 시스템이 마이크로 화학 플랜트이다 [1].

마이크로 화학 플랜트는 내부 공간의 크기가 작아 비표면적이 크다. 따라서 같은 유량에서 반응물의 접촉면적이 넓어지게 되고, 반응물들간의 반응률이 향상되어 생산물의 수율이 증가하게 된다. 이는 원료의 손실을 줄여주어 경제적인 면에서 기존의 거대 화학 공장보다 유리하다. 그리고 넓은 비표면적 덕분에 열 및 물질 전달이 잘 일어나 보다 균일한 상태에서 반응이 일어날 수 있도록 해준다[2].

마이크로 플랜트의 구성요소로 마이크로 반응기, 마이크로 열교환기, 마이크로 혼합기 등이 있다. 이들 시스템에서 시료나 반응물들을 균일하게 혼합하는 과정이 반드시 필요하다. 기존의 대규모 시스템에서 사용하던 혼합기의 경우 프로펠러나 자기 막대 등의 움직이는 요소에 의해 발생된 난류유동을 이용하여 혼합을 하였다. 하지만 마이크로 혼합기는 그 특성길이가 짧기 때문에 내부유동의 레이놀즈 수가 매우 낮아 난류유동이 유발되지 않게 된다. 결국 확산에 의한 혼합만 기대할 수 있는데 이 경우 혼합성능이 상대적으로 떨어지게 된다.

일반적으로 마이크로 혼합기는 크게 능동형 혼합기와 수동형 혼합기로 나눌 수 있다. 수동형 혼합기는 마이크로 유로, 마이크로 챔버 같은 미세 공간에 정적인 미세구조물을 배치시켜 혼합을 유도하는 혼합기이다. 이 경우 다른 마이크로 장치들과 통합이 용이하고 제조가 쉬우며, 무엇보다도 외부 에너지를 사용하지 않는다는 장점이 있다. 반면에 능동형 혼합기는 외부의 추가적인 에너지에 의해 발생한 강한 교란을 이용하는 혼합기로 비교적 혼합성능이 좋다는 장점이 있다. 하지만 외부 에너지를 이용하기 위한 추가적인 공정이 들어가거나 내부에 움직이는 부분이 있기 때문에 제작이 어렵고, 다른 마이크로 장치와의 통합성이 떨어진다. 게다가 마이크로 혼합기 내부에 강한 전기장이나 자기장이 형성되거나, 발열하는 부분이 포함될 수 있기 때문에 생명과학분야나 미세화학공정에서 사용하기가 어렵다.

본 연구에서는 기본적인 형태는 수동형 혼합기를 취하고, 능동형 혼합기의 움직이는 요소를 도입하여 혼합기의 혼합성능을 향상시키고자 한다. 이를 위해 수동형 혼합기의 내부에 입력 유동에 의해 회전하는 마이크로 로터를 삽입하는 형태로 설계하였다 (Fig. 1). 즉, 주입되는 유동이 마이크로 로터를 회전시키게 되고, 이 로터에 의해 유동이 교란되어 혼합성능이 향상된다. 이 경우 능동형 혼합기에서와 마찬가지로 움직이는 요소에 의해 혼합성능이 향상되지만 외부 에너지를 사용하지 않아 능동형 혼합기의 장점과 수동형 혼합기의 장점을 취한 형태가 된다.

## 2. 마이크로 혼합기의 제작 및 실험

본 연구에서는 이방성식각이 가능한 감광유리를 이용하여 마이크로 혼합기를 제작하였다. 일반적으로 마이크로 혼합기를 제작하기 위해 실리콘, PDMS, PMMA, SU8 등과 같이 다양한 물질들이 사용된다. 그러나 마이크로 화학 플랜트에서 생산하는 화학제품은 산을 포함한 물질이 많기 때문에 실리콘, PDMS, PMMA, SU8 과 같이 내화학성이 없는 물질로 마이크로 혼합기를 제작하게 되면 구조체가 견디지 못하게 된다. 하지만 감광유리는 내화학성이 있기 때문에 화학 플랜트용으로 적합한 재료이다. 또한 감광유리는 투명하기 때문에 내부 유동을 가시화 할 수 있다는 장점이 있다.

제작 순서는 Fig. 2 와 같다. 먼저 크롬 마스크를 이용해 310nm 파장의 자외선에 노광을 한다. 퀴즈는 310nm 파장의 자외선 투과율이 높기 때문에 크롬 마스크는 퀴즈로 제작을 하였다. 자외선의 노광된 감광유리를 고온에서 열처리를 하게 되면 노광된 부분이 결정화가 된다. 결정화된 영역은 유리질 영역에 비해 10% 불산 용액에서 식각률이 높기 때문에 높은 중형비의 구조물을 제작할 수 있다. 이렇게 식각된 각 층들을 열 분당 함으로써 3 차원 구조물을 제작할 수 있다 [3].

제작된 마이크로 혼합기는 Fig. 3 과 같다. 로터의 지름은 3.9 mm, 높이는 500 μm 이며, 로터 챔버의 지름은 4 mm, 높이는 700 μm 이다. 로터 챔버를 빠져나온 유동은 혼합 챔버에서 혼합이 이루어지는데 혼합 챔버의 지름은 2.2 mm, 높이는 700 μm 이다. 혼합챔버를 빠져나온 유동은 수축 챔버에서 다시 한 번 혼합이 이루어진다. 수축 챔버의 지름은 600 μm, 높이는 500 μm 이다.

본 연구에서는 검은색 잉크와 물을 혼합한 후 혼합 영상의 색상 강도를 분석함으로써 혼합 성능을 정량화 할 수 있었다. 실험 장치 개략도는 Fig. 4 와 같다. 두 유동을 실린지 펌프(KDS200, KD Science)를 이용해 혼합기에 주입한 다음 CCD 카메라(MARLIN F-080C, ALLIED Vision Technologies)와 영상 획득 소프트웨어(AVT SmartView, ALLIED Vision Technologies)를 이용해 혼합 영상을 획득하였다. 혼합 영상의 색상 강도는 영상 분석 소프트웨어(NI vision assistance, National Instruments)를 이용해 분석되었다. 혼합 효율은 식 (1), (2)를 통해 계산되었다.

$$I_{nor,i} = \frac{I_{max} - I_i}{I_{max} - I_{min}} \quad (1)$$

$$\eta = \left[ 1 - 2 \times \sqrt{\frac{1}{N} \left\{ \sum (I_{nor,i} - I_{nor,avg})^2 \right\}} \right] \times 100 \quad (2)$$

$I_{nor,i}$ ,  $I_{max}$ ,  $I_{min}$  은 각각 정규화된 색상강도, 최대 색상 강도, 최소 색상 강도를 나타낸다.  $I_i$  는 i번째 화소의 색상 강도를 나타내며 최대 색상강도와 최소 색상강도 사이에서 그 값이 결정된다.  $N$  은 총 화소 수이다.

### 3. 실험 결과

실험 결과는 Fig. 5 와 같다. 두 가지의 경우에 대해 실험을 하였는데 첫 번째 경우는 로터가 정지해 있는 상태에서 유동을 주입한 경우이고 두 번째 경우는 높은 유량에서 로터를 회전 시킨 후 유량을 낮춘 경우이다. 로터가 회전을 시작하면 로터가 정지되어 있는 상태에서 로터를 회전시키기 위해 필요한 최소 유량보다 낮은 유량에서 로터가 회전을 한다. 첫 번째 경우 Re 20 까지 혼합 성능이 감소한다. 이것은 Re 수가 증가함에 따라 확산 시간이 감소되기 때문이다. Re 40 부터는 Re 수가 증가함에 따라 혼합 성능이 증가하는데 이것은 Re 80 부터 내부에 와류가 발생하기 때문이다. Re 수가 증가함에 따라 와류 강도가 강해져 혼합 성능이 향상된다. Re 400 부터 로터가 회전을 하기 시작하는데, 이 때부터 혼합 성능이 급격히 향상된다.

로터가 정지되어 있는 상태에서는 Re 200 에서 로터가 회전을 하지 않았다. 하지만 로터를 회전 시킨 후 Re 200 까지 유량을 낮추어도 로터가 회전을 하였다. Fig. 5 에서 삼각형 심볼은 Re 200 에서 로터가 회전할 경우 혼합 성능을 나타낸다. 로터가 회전하지 않을 때보다 혼합 성능이 향상되는 것을 볼 수 있다.

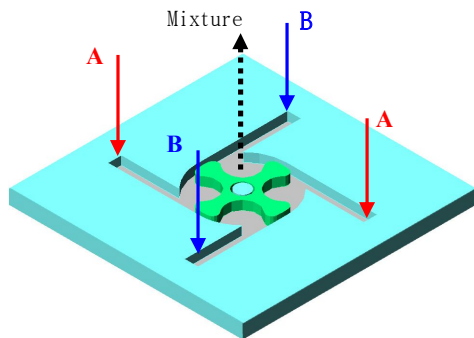


Fig. 1 Schematic of micro-rotor mixer

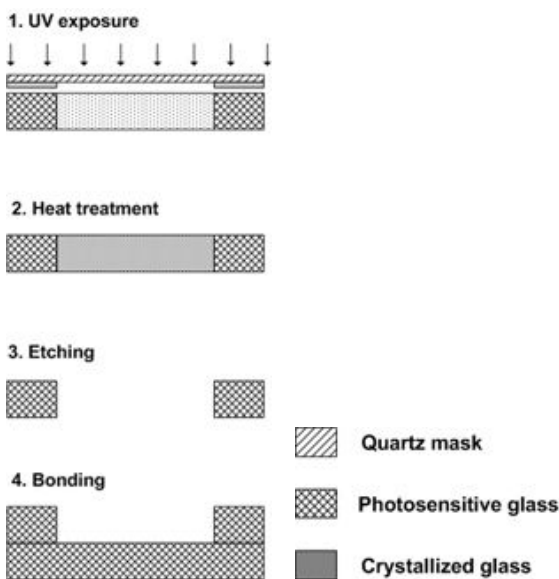


Fig. 2 Fabrication process employed for the proposed micro-mixer

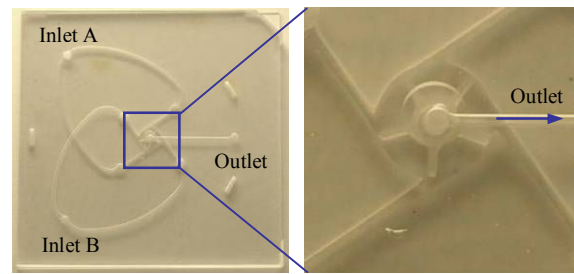


Fig. 3 Micro-rotor mixer; Fluid A and B enter the micro-mixer and are mixed together

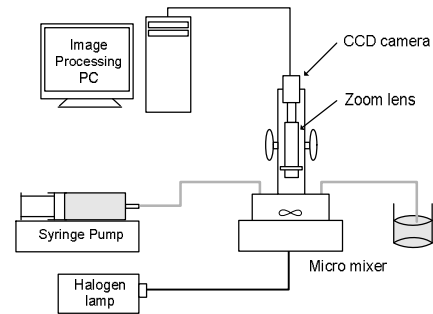


Fig. 4 Experimental set-up

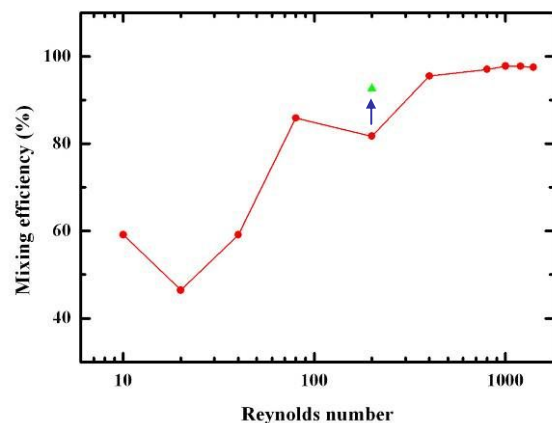


Fig. 5 Mixing efficiency of the rotor mixer as a function of Reynolds number. Triangle mark represents mixing efficiency when the rotor rotates at Re 200

### 후기

본 연구는 산업자원부가 지원하는 차세대 신기술 개발 사업 중 고기능 초미세 광·열유체 마이크로 부품 기술 개발 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. W. Ehrfeld, "Electrochemistry and Microsystems," *Electrochimica Acta*, 48, 2857-2868, 2003.
2. Shinji Hasebe, "Design and operation of micro-chemical plants - bridging the gap between nano, micro and macro technologies," *Computers & Chemical Eng.*, 29, 57-64, 2004.
3. T. G. Kim and S. J. Kwon, "Design, fabrication and testing of a catalytic microreactor for hydrogen catalytic microreactor for hydrogen production," *J. Micromech. Microeng.*, 16, 1752-1760, 2006.