

PZT를 이용한 계면 교차 방향 방사형 마이크로믹서

허필우* · 김덕종* · 김재윤* · 박상진* · 윤의수* · 고광식**

Cross-sectional radiation type micromixer to mixed interface using PZT

Pil-Woo Heo*, Deok-Jong Kim*, Jae-Yun Kim*, Sang-Jin Park*, Eui-Soo Yun*, Kwang-Sik Koh**

Key Words : Mmicromixer(마이크로 믹서), PZT, Bio-MEMS, μ -TAS

ABSTRACT

Micromixer plays an important role in Bio-MEMS or μ -TAS. Mixing is generally generated by turbulence and interdiffusion of two fluids. Because of low Reynolds number($Re \ll 2000$) in μ -channel, it is difficult to generate turbulence, so mixing mainly depends on interdiffusion. Thus long channel distance is required to mix two different fluids. To reduce the channel length required for mixing, we propose the a new active μ -mixer that two fluids are effectively mixed in μ -channel by the ultrasonic wave which is generated by PZT. The ultrasonic wave is radiated into a chamber in the cross-section directional direction to interface with the two fluids. The two fluids are positioned one on top of the other. Mixing state is measured by the changing of color due to the reaction of NaOH and phenolphthalein.

1. 서 론

MEMS기술의 발달과 이의 생명공학기술에의 응용 기술이 개발되면서 휴대가 간편하고, 소형화, 집적화된 Bio-MEMS-Fluidic 시스템의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 시스템의 장점은 샘플과 시료가 적게 소요되어 비용을 줄일 수 있고, 주위 노이즈가 저감되므로 보다 우수한 정확성을 갖는다는 점이다.

소형화된 Bio-MEMS-Fluidic 시스템을 구현하기 위해서는 시료채취, 전처리, 혼합, 분리, 후처리와 검출을 위한 각 요소들을 집적화해야 하며, 현재의 기술개발은 샘플의 이송, 혼합과 분리에 많은 관심을 기울이고 있는 실정이다.

마이크로유체시스템은 μ l와 p l 단위의 액상을 취급하는 시스템으로 정의되며, 마이크로유체시스템에 사

용되는 마이크로믹서는 기존의 macro한 방법과는 개념이 다른 새로운 접근법이 요구된다.

즉, 마이크로유체는 아주 낮은 유속(레이놀즈수 $\ll 2000$)을 갖기 때문에 와류가 발생되기 어렵고 유체의 흐름이 lamina 하므로, 혼합을 위해서는 비교적 긴 시간이 소요된다. 따라서 길이가 긴 채널이 요구되므로, 마이크로 디바이스가 차지하는 면적을 증가시켜 소형화, 집적화를 지향하는 최근의 기술개발 방향에 저촉된다.

이를 해결하기 위해 마이크로믹서의 연구가 진행되고 있으며, 마이크로믹서는 수동 마이크로믹서와 능동 마이크로믹서로 분류된다.

능동 마이크로믹서는 외부에서 어떤 에너지도 믹서에 공급되지 않는 믹서로서, 구조가 간단하고 제작비용과 소형화 측면에서 장점을 갖고 있다. 주로 믹서의 구조적인 개선을 통해 접촉면적을 증가시켜서 확산이 잘 발생되도록 하는 경우가 많다.

Miyake⁽¹⁾ 등이 2종의 액체를 혼합하기 위해 2중 구조를 사용한 마이크로믹서를 처음으로 보고하였으며,

* 한국기계연구원

** 경북대학교

E-mail : pwheo@kimm.re.kr

400개의 마이크로 노즐이($15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$) 중간 분리막에 만들어져 하나의 유체가 이러한 마이크로 노즐을 통해 2번째 단으로 분사될 수 있게 만들어졌다. Branebjerg⁽²⁾ 등은 미니와 마이크로 크기의 직선과 지그재그 채널에서 혼합효과의 결과를 제시하였다. Strook⁽³⁾ 등은 마이크로 채널 내에 독특한 형상을 한 장애물을 만들어 유체가 와류를 발생하는 구조를 제안하여 혼합효과를 개선하였다.

수동 마이크로믹서는 혼합 시간이 유속과 흐르는 액체의 비율에 크게 영향을 받고, 유로를 통한 압력감소, 특히 마이크로어레이 구조가 동질성에 영향을 준다. 또한 수동 마이크로믹서는 시료를 주입하기 어렵고 가스버블에 민감한 점 등의 문제점이 있다. 따라서 좀 더 안정되고 신뢰성 있는 성능을 갖는 능동 마이크로믹서가 요구된다.

능동 마이크로믹서는 혼합의 효과를 증가하기 위해 외부에서 에너지를 가해주는 믹서로 정의되며 초음파가 유체에 조사되어 chamber 내에 와류를 발생시켜 시료의 혼합을 용이하게 한다. 능동 마이크로믹서는 가스버블에 둔감하고 혼합 효과가 입력에너지 레벨에 따라 조절이 가능한 장점이 있다.

Monnier⁽⁴⁾ 등은 초음파에 의한 분자단위의 마이크로 혼합에 대해 보고하였다. 음향 cavitation과 음향 steaming을 통한 마이크로 혼합은 저주파수가 고주파수에 비해 더 중요함을 제시하였다. 음향에너지 세기가 마이크로 혼합에 미치는 영향은 실험범위에서 비례관계로 나타났다. 또한 점성이 있는 유체의 혼합은 일반적인 예상대로 같은 음향에너지를 공급할 때 혼합에 불리하게 작용함을 나타냈다.

Yang⁽⁵⁾ 등은 마이크로 유체의 혼합을 향상하기 위해 와류를 이용하는 첫 번째 능동 믹서를 보고하였다. Nyborg⁽⁶⁾ 등은 액체 streaming과 eddying이 초음파에 의해 발생됨을 보고하였다. Zhu⁽⁷⁾ 등은 느슨하게 초점이 잡힌 초음파렌즈를 갖춘 마이크로믹서를 보고하였으며, 이 방법은 압력구배를 생성하기 위해 초음파가 유체와 공기 경계면에서 느슨하게 초점이 잡히게 하는 방법이다. PZT로 구동되는 초음파진동을 사용한 믹서는 Yang⁽⁸⁾ 등이 처음 보고하였다. 이 능동 믹서는 48 kHz에서 동작하고 혼합을 위한 매질의 비율은 적용되는 압력을 조절함으로써 자유롭게 설정될 수 있었다. Yang⁽⁹⁾ 등은 또한 60 kHz에서 동작하는 능동 마이크로믹서를 보고하였고, 그 성능은 형광물질을 사용하여 현미경으로 초음파 방사(radiation) 전후의 상태를 나

타내었고, 특히 출력단에서 위치에 따른 형광물질의 강도(intensity)를 환산하여 혼합 상태를 제시하였다.

본 논문에서는 두 유체가 교차되는 경계면에 수직으로 초음파가 방사되는 능동 마이크로믹서를 제안하였다. 즉 PZT를 이용하여 초음파를 발생시키고, 발생된 초음파를 두 유체의 경계면과 교차되는 방향으로 방사시켜 마이크로 chamber내에서의 혼합을 가속화한다. 제작된 능동 마이크로믹서의 혼합 상태는 phenolphthalein과 NaOH를 사용하여 확인하였다.

2. 초음파 특성

초음파에 의한 마이크로 혼합의 메커니즘은 Fig. 1과 같다. PZT에 의해 발생된 초음파가 유체에 조사되면 주기적으로 음압의 세기가 변화하면서 전방으로 전달되며(t1), 전방부에서는 회절력에 의한 소용돌이 현상이 발생되면서(t2) 좌우로 펼쳐지게 되고(t3), 이렇게 펼쳐진 파는(t4) 앞에서와 같은 원리에 의해 소용돌이 현상이(t5) 다시 일어나면서 유체의 접촉면을 넓힌다. 이로 인해 혼합 효과가 증가된다.

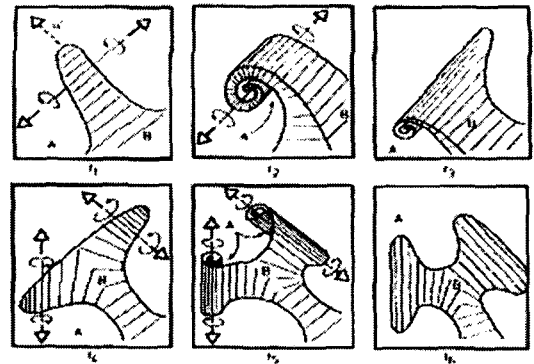


Fig. 1 Micromixing process by ultrasonic wave

3. 능동 마이크로믹서 설계

능동 마이크로믹서의 단면 구조는 Fig. 2와 같다. 초음파 발생을 위해 사용된 PZT는 두께가 0.15 mm로서 임피던스 특성은 Fig. 3과 같다. 압전소자는 주파수에 따라 임피던스가 달라지며 그 특성은 임피던스 특성 곡선을 통해 알 수 있다. Fig. 3에서와 같이 임피던스는 100 kHz와 500 kHz 범위에서 주파수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내며, 공진주파수는 MHz 대역에서 나타난다. 본 연구에서는 300 kHz 주파수를

사용하였으며, 이때의 임피던스는 약 233 Ω을 나타내었다. 임피던스가 낮으면 같은 전기에너지가 공급될 때 압전소자에서 소비되는 전력을 증가시켜 전기-음향 에너지변환효율을 증가시킬 수 있다.

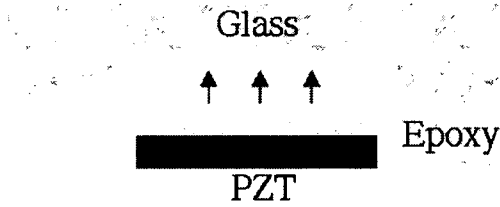


Fig. 2 Active Micromixer Cross-section

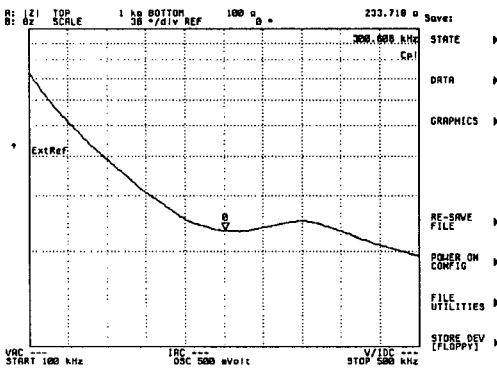


Fig. 3 Impedance characteristics

제안된 능동 마이크로믹서의 전체구조는 Fig. 4와 같다. 투명한 아크릴 재질의 상하에 2개의 채널을 만들고 이를 통해 시료가 주입된다. 입구쪽의 각 채널의 높이는 $60\ \mu\text{m}$ 이고 폭은 5mm이며, 혼합 chamber는 가로 5mm, 세로 8mm, 높이 1mm의 크기를 갖는다. 입구1을 통해 유입되는 유체는 아래 채널을 통해 혼합 chamber의 아래쪽으로 유입되고, 입구2를 통해 유입되는 유체는 위 채널을 통해 혼합 chamber의 위쪽으로 유입된다. 따라서 혼합 chamber에서 두 유체는 가운데 경계면을 기준으로 상하로 위치한다. Chamber의 아래쪽에 Fig. 4와 같이 PZT가 부착되어 두 유체의 경계면과 수직으로 초음파가 방사된다.

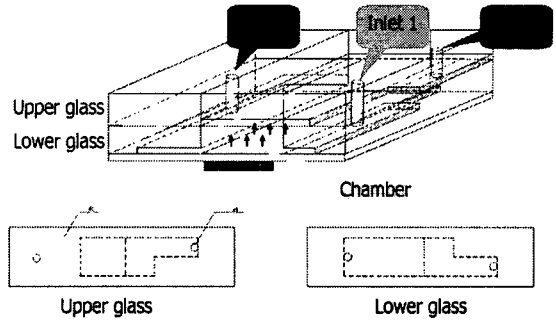


Fig. 4 Proposed active micromixer

4. 능동 마이크로믹서의 구조해석

능동 믹서를 Coventor를 이용하여 구조해석을 하기 위해 Fig. 5와 같이 3차원적인 마이크로 chamber부분의 구조를 2차원으로 단순화시켰다.

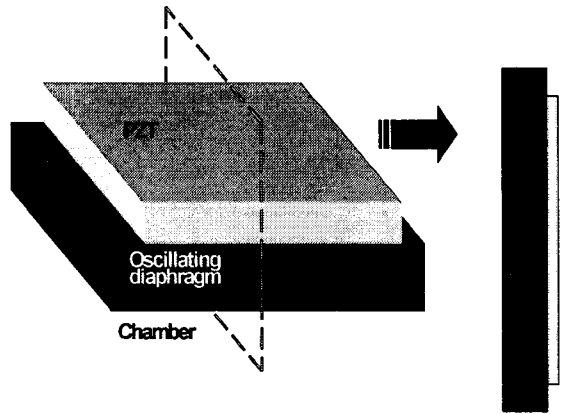


Fig. 5 Active micromixer modeling

구조 해석결과를 살펴보면 Fig. 6(a)와 같이 진동판 재료로 Si을 사용할 경우 $50\ \text{V}_{\text{p-p}}$ 정현파를 인가할 때 $0.81\ \mu\text{m}$ 의 최대 진폭을 얻을 수 있으며, PZT의 중심부에서 최대진폭이 나타남을 알 수 있다. Si대신에 epoxy를 사용하면 Fig. 6(b)와 같이 최대 변위진폭이 $1.51\ \mu\text{m}$ 로 증가함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 Si대신에 epoxy를 사용하였다. Epoxy는 또한 접착성이 좋으므로 능동 마이크로믹서의 안정성을 향상시켰다.

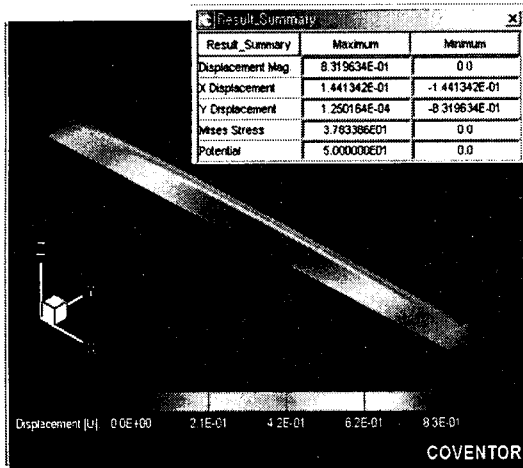


Fig. 6 (a) Structural analysis for the active micromixer with Si oscillating diaphragm

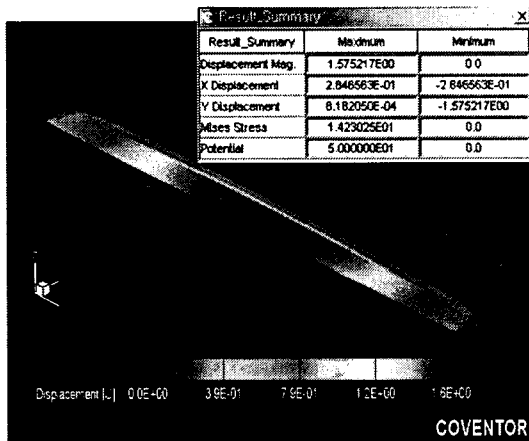


Fig. 6 (b) Structural analysis for the active micromixer with epoxy oscillating diaphragm

5. 실험장치

능동 마이크로믹서의 성능을 시험하기 위한 실험장치의 구성은 Fig. 7과 같으며, 신호발생기, 전력증폭기, 오실로스코프와 마이크로믹서 실험장치로 구성된다. 신호발생기는 300 kHz, 10 Vp-p 전압을 갖는 정현파를 발생하고, 전력증폭기는 신호발생기에서 발생한 전기신호를 PZT에 공급하기에 적합한 50 Vp-p로 증폭한다. 그리고 마이크로믹서 실험장치는 syringe 펌프, purge valve, μ -adapter, 마이크로믹서로 구성된다. 여기서 purge valve는 측면에 주사위를 삽입하여 시료에 함유

된 bubble을 제거하기 위해 사용된다. 시료는 10 μ l/min로 공급된다.

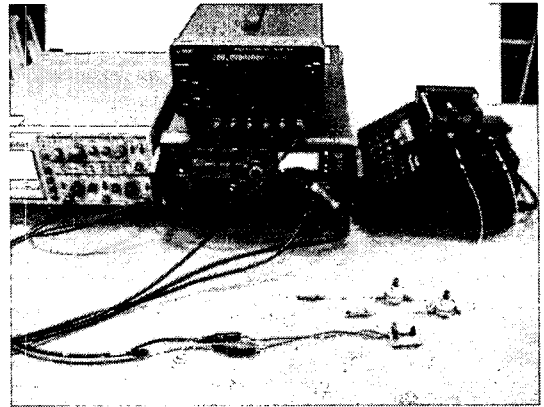


Fig. 7 Performance test system

6. 실험결과

Phenolphthalein은 pH 표시물질로서 초기에 투명한 물질이 pH값이 8보다 크게 되면 붉은 색으로 변화하는 성질을 이용하여 혼합의 상태를 파악할 수 있다. 이 방법을 응용하여 0.3 mol/L의 NaOH와 0.1 mol/L의 phenolphthalein을 섞으면 Fig. 8(a)와 같이 혼합이 진행되면 붉은 색으로 변한다. Fig. 8(a)에서 좌측의 상하 연결 포트가 2개의 입구를 나타내며 가운데 부분이 마이크로 chamber를 나타내고 오른쪽이 출구를 나타낸다. Fig. 8(a)과 같이 초음파를 방사하지 않아도 제안된 방법의 구조적인 특징에 의해 접촉 면적이 상승되어 혼합이 발생됨을 알 수 있다. 이 상태에서 초음파를 가해주면 Fig. 8(b)와 같이 더 진한 붉은 색을 나타내고 이것은 혼합이 더욱 진행됨을 나타내는 것으로 분석된다. 여기서 마이크로 chamber 부분의 둥근 원으로 보이는 부분은 bubble을 나타낸다.

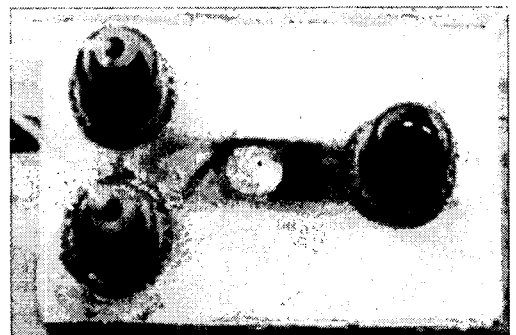


Fig. 8 (a) Without ultrasonic wave

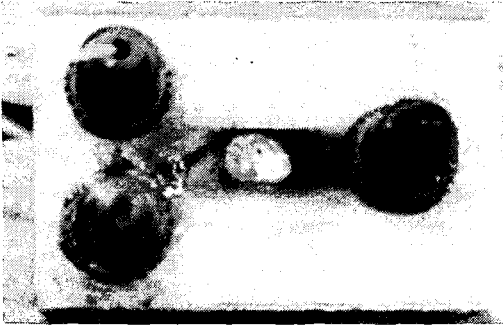


Fig. 8 (b) With ultrasonic wave

7. 결 론

마이크로 채널의 유체는 레이놀즈수가 낮기 때문에 와류가 발생되기 어려우므로 주로 확산에 의해 혼합이 된다. 마이크로채널에서 확산에 의한 혼합은 비교적 긴 시간이 소요되므로 능동 믹서와 수동 믹서를 포함하는 마이크로 믹서에 대해 많은 연구가 수행되고 있다.

본 논문에서는 두 유체의 경계면에 수직으로 초음파가 방사되는 능동 마이크로믹서를 제안하였으며, 실험을 통해 혼합 효과를 확인하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 제안된 방법은 두 유체가 만나는 경계면의 접촉 면적을 증가시킨다.
2. 초음파가 두 유체의 경계면과 수직으로 방사되어 혼합에 유리하게 작용한다.
3. 진동판으로 epoxy를 사용함으로써 변위 진폭을 증가시키고, 접착성을 향상시킨다.
4. 제안한 능동 마이크로믹서를 이용한 혼합 실험을 통해 두 유체가 혼합됨을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) R. Miyake, T.S.J. Lammerink, M. Elwenspoek, J.H.J. Fluitman, 1993, "Micromixer with fast diffusion", MEMS'93, Florida, pp.248-253.
- (2) Branebjerg, B. Fabius, P. Gravesen, 1995, "Application of miniature analyzers: from microfluidic components to μ TAS", Micro Total Analysis Systems '94, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 141-151.
- (3) A. D. Strook, S. K. W. Dertinger, A. Ajdari, I. Mezic, H. A. Stone, G. M. Whitesides, 2002, "Chaotic mixer for microchannels", Science, vol. 295, pp. 647-651.
- (4) H. Monnier, A. -M, Wilhem, H. Delmas, 1999, "Influence of ultrasound on mixing on the molecular scale for water and viscous liquids", Ultrasonics Sonochemistry 6, pp. 67-74.
- (5) Z. Yang, H. Goto, M. Matsumoto, T. Yada, 1998, "Micromixer incorporated with piezoelectrically driven valveless micropump", Micro Total Analysis Systems '98, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 177-180.
- (6) W. L. M. Nyborg, 1965, Acoustic streaming, in: W.P. Mason (Ed.), Physical Acoustics, vol. 2B, Academic Press, New York, pp. 265-331.
- (7) X. Zhu, E.S. Kim, 1998, "Microfluidic motion generation with acoustic waves", Sens. Actuators A 66, pp. 355-360.
- (8) Z. Yang, H. Goto, M. Matsumoto, R. Maeda, 2000, "Active micro mixer for microfluidic systems using PZT generated ultrasonic vibration", Electrophoresis 21, pp. 116-119.
- (9) Z. Yang, S. Matsumoto, H. Goto, M. Matsumoto, R. Maeda, 2001, "Ultrasonic micromixer for microfluidic systems", Sens. Actuators A 93, pp. 266-272.
- (1) R. Miyake, T.S.J. Lammerink, M. Elwenspoek,