

초음파를 이용한 마이크로 혼합기 제작

전용호^a, 최병주^a, 강승준^a, 김동권^a, 김현정^a, 이문구^{a*}

Development of Micro Mixing Device with Using Ultrasonic Wave

Yongho Jeon^a, Byung-Joo Choi^a, Seung-Joon Kang^a, Dong-Kwon Kim^a, Hyun-Jung Kim^a, Moon Gu Lee^{a*}^a Dept. of Mech., Eng. Ajou Univ., San 5, Woncheon, Yeongtong, Suwon, Gyeonggi, 443-749, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	20	March	2013
Revised	18	April	2013
Accepted	29	April	2013

Keywords:

Micro mixer
Micro endmilling
Ultrasonic assistance
Mixing index

ABSTRACT

The purpose of a micro-mixing device is to enhance the mixing by increasing the diffusion effect between different types of flows. There have been many attempts to actively or passively increase mixing. However, those studies were limited to lab-scale experiments because the production of devices requires a series of processes, time, cost, and the mixing quality itself. For this reason, this study attempted to develop a quick and simple process for micro-mixing device fabrication by using conventional machining and bonding processes and applying ultrasonic waves from the outside of the mixing device. The mixing quality was quantified by using the mixing index, and the results showed that the proposed system increases the mixing from ~33% to ~10% with respect to the flow rates.

1. 서론

마이크로 혼합기는 본질적으로 마이크로 스케일 채널에서 서로 다른 두 개 유체 사이의 확산 효과를 강화하는데 있다. 이는 극미량의 샘플이나 시료로 현상을 분석할 수 있도록 만든 마이크로 디바이스로 사용되므로 생의학 분야와 화학 산업에서 많은 관심을 받아왔다. Kang^[1]은 특히 생물의학에서 마이크로 혼합기는 차세대 진단 장치와 고부가 가치 산업으로 주목받고 있으며 상용화를 위한 다양한 연구가 추진 중이라고 언급하였다. 그러나 이를 위해서는 여전히 극복해야 할 많은 어려움이 존재하고 있다. 대표적인 예로, 미세유체를 흘려줄 수 있는 마이크로 채널의 가공이 어렵고 생산 단가가 높아 제작이 용이하지 않고, 마이크로 채널 내부에서는 낮은 레이놀즈 수($Re \ll 2,000$)의 유동 흐름이 발생하여 혼합하고자 하는 두 개 유체 사이에 확산을 용이하게 하는 난류가 형성되지

않아 원활한 유체 혼합 현상이 발생하지 않는다.

즉, 마이크로 유체가 채널 내부에서 각자 층을 이루어 흐르므로, 이들의 혼합을 위해서는 긴 채널이 필요하게 되어 전체적인 마이크로 디바이스의 면적 증가와 더불어 분석을 위해 필요로 하는 시료의 양이 증가하고, 현상을 분석하는 시간이 길어지는 것이다.

Chia^[2] 등은 이런 어려움을 해결하기 위해 현재까지 제안된 혼합기를 크게 수동형(Passive type)마이크로 혼합기와 능동형(Active type)마이크로 혼합기로 분류하고, 각각의 혼합 방법에 대하여 정리하였다. 최근 연구 동향으로는 효과적인 혼합을 위해 외부에서 채널 내부로 에너지를 부가하는 능동형 혼합기가 주로 연구되고 있으며, 특히 능동형 혼합기 중 채널 내부의 혼합 활성화를 위한 외부 에너지원으로 초음파 가진 장치가 많이 사용되고 있다. Monnier^[3] 등은 초음파에 의한 분자단위 마이크로 혼합에 대해 보고하였으며 음향 공동현상(Cavitation)과 음향 스트리밍(Streaming)

* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-2338

Fax: +82-31-219-1611

E-mail address: moongulee@ajou.ac.kr (Moon Gu Lee).

을 통해 마이크로 혼합은 낮은 대역 주파수가 높은 대역 주파수에 비해 중요하다고 제시하였다. Nyborg^[4] 등은 액체 스트리밍(Streaming)과 회오리(Eddy)가 초음파에 의해 발생됨을 보고하였다. Daniel^[5] 등은 PZT와 채널 사이에 버블(Bubble)을 형성하고 멤브레인(Membrane)을 배치하여 진동이 부가된 멤브레인의 변위를 이용하여 채널에 음향 진동파(Acoustic wave)를 부가하여 혼합을 촉진시키는 능동형 마이크로 혼합기를 제안하였다. 또한 Yang^[6] 등은 60 kHz에서 동작하는 능동형 마이크로 혼합기를 제안하였고, 그 성능은 형광물질을 사용하여 현미경으로 초음파 부가 전후의 상태를 나타내고, 출력단의 위치에 따라 형광물질의 강도(Intensity)를 환산하여 혼합 상태를 제시하였다. 이러한 연구에서는 마이크로 혼합기의 채널 제작에 반도체 소자의 미세화를 주도해 온 포토레지스트(Photoresist)를 이용한 식각(Lithography)기술이 적용되어 왔으나 이 공정은 긴 시간과 많은 비용이 발생하는 단점^[7]이 있어 대체 방안의 연구가 각광을 받고 있다.

본 연구에서는 마이크로 채널 내부의 혼합 효과를 향상시키기 위해 지속 사용 가능하며, 외부로부터 채널 내부에 집중적으로 초음파 에너지를 공급할 수 있는 능동형 마이크로 혼합기를 제작하였다. 제작 방법은 긴 공정시간과 고 비용의 반도체 Lithography 기술 대신 마이크로 엔드밀링을 이용하여 채널을 제작하고, 제작된 마이크로 혼합기의 성능을 측정하기 위하여, 충류를 형성한 유체의 혼합 과정의 이미지를 초고속 카메라를 이용하여 확보하고, 이를 혼합지표(Mixing Index) 분석 방법을 적용하여 혼합 정도를 정량화 하였다.

2. 이론

2.1 레이놀즈 수

레이놀즈 수는 일반적인 유체의 흐름에서 가장 중요한 지표로 사용되고 있으며, 두 개 이상의 유체가 동일한 방향으로 흐를 때 유체 사이의 경계면에서 확산이 얼마나 지배적인지를 이론적으로 알 수 있다. 이는 점성력에 대한 관성력의 상대적인 크기를 나타내 주는 숫자이다.

$$Re = \frac{\rho \nu L}{\mu} \quad (1)$$

여기서 ν 는 평균 유속을 나타내고, μ 와 ρ 는 유체의 점성과 밀도를 나타내고 있다. L 은 유로의 특성길이를 나타내고 있다.

$$L = \frac{4S}{W} \quad (2)$$

S 는 유로의 넓이 이고, W 는 윤변 즉, 유로의 횡단면에서 물과 접하는 부분의 길이를 말한다.

2.2 미세유체에서의 초음파 특성

진동자에 교류전압을 가하면 전류의 극성에 따라 팽창과 수축이 일어나는데, 이는 교류전압의 주파수에 비례하여 반복하게 된다. 이때 특정 주파수(1.6 MHz)의 초음파가 진동자로부터 발생하게 된다. 미시적 관점에서 초음파 진동은 유체에 전달되어 Fig. 1과 같은 공동현상(Cavitation)을 일으키게 된다. 첫 번째로 초음파의 감압 측의 반주기로 음의 압력이 발생하기 때문에 공동 핵(Cavitation core)을 생성 하게 되고, 다음으로 증압 측의 반주기에 밀려 일그러져 이때 발생하는 큰 압력에 의해 수축과 팽창을 반복적으로 동작하게 된다. 이와 같은 과정의 반복으로 인해 음압의 반복과정을 거친 공동이 충분히 성장과정을 거친 후 표면장력 이상의 압력에 의하여 공동의 수축 폭발이 발생하게 되며 이는 혼합 효과를 증가시키게 된다.

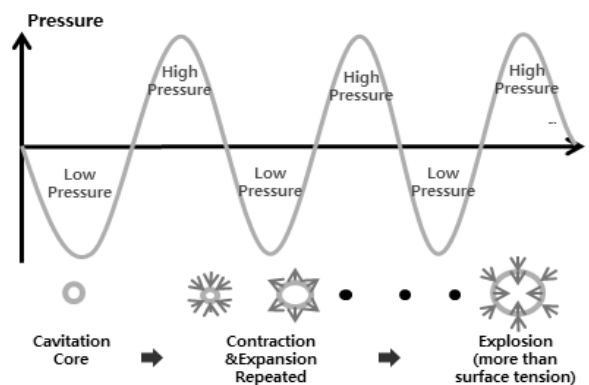


Fig. 1 Principle of Cavitation

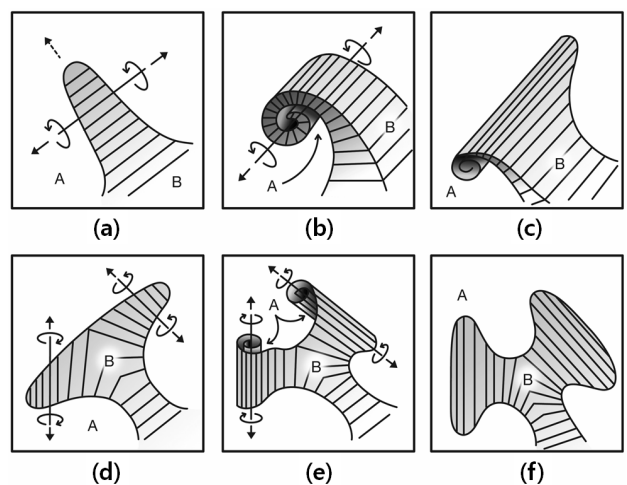


Fig. 2 Principle of Ultrasonic Wave in Laminar^[3]

거시적 관점에서는 초음파 진동의 주기적인 음압의 세기가 변화하며 Fig. 2와 같이 난류(Turbulence)를 생성하게 된다. 음압의 변화가 전방으로 전달되며(a), 전방부에서는 회전력에 의한 소용돌이 현상이 발생되며(b) 좌우로 펼쳐지게 되고(c), 이렇게 펼쳐진 파는(d), 앞의 과정과 같은 원리에 의해 반복되어 소용돌이 현상이(e) 다시 일어나며 유체의 접촉면적을 넓힌다. 이와 같은 과정의 반복으로 인해 층류 경계면에서 유체 사이의 확산이 발생하게 되어 혼합 효과가 증가 된다.

3. 실험장치

3.1 마이크로 혼합기 채널 제작

기존의 식각 공정을 이용한 제작 공정은 다양한 단계를 거쳐 제작되며, 제작에 소요되는 시간이 적게는 몇 시간에서 길게는 24시간에 이르기도 하였다. 이러한 마이크로 채널의 제작과정의 복잡성과 오랜 시간이 걸리는 문제를 해결하기 위해 마이크로 머시닝 공법 중 마이크로 엔드밀링을 이용하여 채널 제작을 실시하였다.

크기 100 × 50 × 5 mm의 폴리카보네이트(Polycarbonate) 평판 두 개를 이용하여 혼합 채널을 제작하였으며 전체적인 설계 개요는 Fig. 3과 같다. 상판 제작을 위해 설계 위치에 Y-배치로 직경 4.5 mm의 관통하는 구멍을 드릴날을 뚫고, 하판은 용액을 보관하기 위하여 동일한 위치에 같은 직경의 드릴을 이용하여 깊이 3 mm 만큼 가공하였다. 다음으로 하판에 직경 300 μm의 마이크로 엔드밀을 이용하여 Y-모양의 깊이 100 μm의 채널을 가공하였다.

마이크로 채널의 Y-배치는 Fig. 3의 아래 그림과 같이 두 팔이 이루는 각이 43°이고, 각각의 길이는 24 mm이고 두 유체가 만나 실질적인 혼합 효과가 일어나는 채널의 길이는 30 mm이다. 가공된 채널은 공초점 현미경을 활용하여 가공 깊이 및 표면 조도를 측정하였고, 채널 전체의 가공 깊이는 평균 89 μm, 표면 조도 Ra는 약 1.1 μm로 측정되었다. 채널의 표면 조도는 혼합 효과에 영향을 미치나 본 연구에서는 하나의 동일 혼합기로 전체 실험을 진행하였으므로 표면 조도에 의한 혼합 영향도는 고려하지 않았다.

완성된 상 하판을 접합하기 위해 열융착식필름(3 M, H225 u)을 사용하였다. 두 PC평판의 균일한 접합을 위해 고정용 클램프를 이용하여 상-하판의 네 방향을 고정하고 오븐에서 120°C로 약 1시간 30분 정도 가열한 후 상온에서 약 1시간 자연 냉각하여 실험을 진행 하였다.

마이크로 혼합기 제작을 위한 마이크로 엔드밀링은 기존의 식각 공정에 비해 매우 짧은 시간 안에 제작이 가능하다. 제작에는 CNC Machine (HAAS, OM-1A)을 사용하였다. 밀링 공정은 Table 1과 같이 약 15분의 시간이 소요 되며, 가공 후 일부 버(Burr) 제거를 제외하고는 후처리에 특별한 과정이 필요하지 않다는 점에서

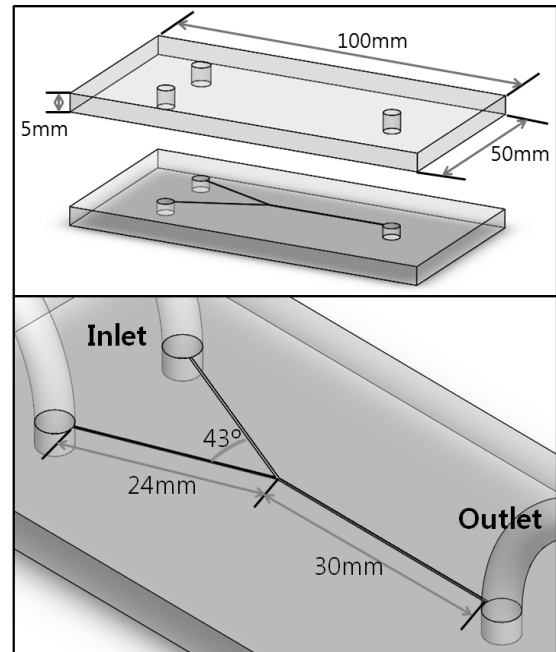


Fig. 3 Schematic of Micro Channel

Table 1 Processing time for micro endmilling

Process	RPM (rev/min)	Feed rate (mm/min)	Time (min)
Channeling	6,000	50	3
Drilling (3 mm)	600	10	3
Drilling (pierced)	600	10	5
Tool Changing			4

기존의 마이크로 혼합기 제작공정 대비 매우 유리한 장점을 지니고 있으며, 더불어 생산 비용 측면에서도 기존 공정 대비 제작의 용이성과 공정 수의 감소로 인한 비용 감소를 기대할 수 있다.

3.2 마이크로 혼합기

현미경을 이용하여 마이크로 혼합기의 채널 내 유체의 흐름을 관찰하기 위해 혼합기 고정부를 Fig. 4와 같이 제작하였고, 마이크로 채널 밑면에 초음파 진동자를 고정하기 위한 고정 지그를 제작하여 부착하였다. 초음파 진동자 끝단에서 초음파가 가장 강하게 발생하기 때문에 이를 마이크로 채널의 바닥면에 밀착되게 고정하였다. 진동이 채널로 전달되는 방향을 Z, 이에 수직인 평면에 X, Y축이라고 할 때, 진동자의 진동이 채널방향으로 잘 전달되도록 Z축 방향에 비해서 나머지 X, Y축을 방향은 강한 강성을 갖도록 고정하였다. 또한 진동자 끝단 홈에 물을 채워 진동자와 PC평판 사이에 공극이 존재하지 않게 밀착시켜, 초음파가 매질(물)을 통하여 효과적으로 전달되게 하였다. 사용된 초음파 부가 장치로는 최대 출력 전력 30 W, 주파수 1.6 MHz ±7%, 소비 전류 2A의

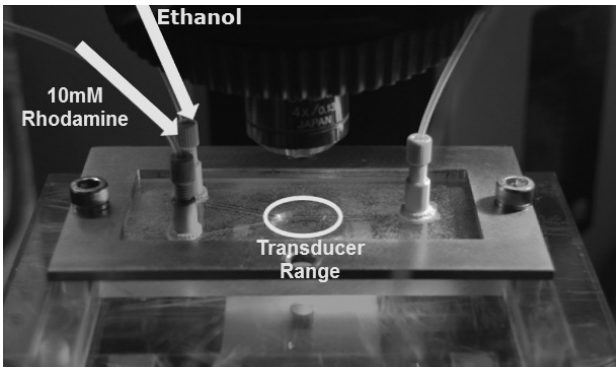


Fig. 4 Mixing Device with Micro Channel and Transducer

Generator (UI-tech, SS1603)와 Max power가 1~5 W/cm² Transducer (UI-tech, MS1603)를 사용하였다.

3.3 혼합 측정 장치

혼합 효과의 정확한 분석을 위해 Fig. 5와 같이 현미경(Olympus, BX51)을 이용하여 측정을 진행하였다. 광원으로는 백색광을 내는 수은램프(Mercury Lamp)를 사용하였고 영역별로 빛의 세기분포가 다른 것을 균일하게 보정하기 위한 목적으로 플러스트(Flost) 필터를 사용하였다. 혼합 현상을 가시화하기 위해 유체의 한 쪽에만 형광염료 Rh-B (Rhodamine B)를 용해 하였고, 형광 염료 흡수 파장대의 빛을 주사하기 위하여 그 파장대의 빛만 투과시키는 광학 여과기(Bandpass filter, 510~550 nm)를 수은램프 앞에 배치하였다. 조사된 빛과 시편내의 유체에서 방출하는 형광 빛의 경로를 구분하기 위하여 디크로마틱 미러(Dichromatic mirror)를 사용하였다. 데이터 획득은 시간에 따른 혼합 성능 변화를 측정하기 위해 1,024 × 1,024 pixels의 분해능에 최대 3,000 FPS (Frame per Second) 프레임 속도를 가지는 초고속카메라(Photon, APX-RS)를 이용하여 각 실험 유량에 대해 60 FPS의 속도로 4초간 촬영하였다.

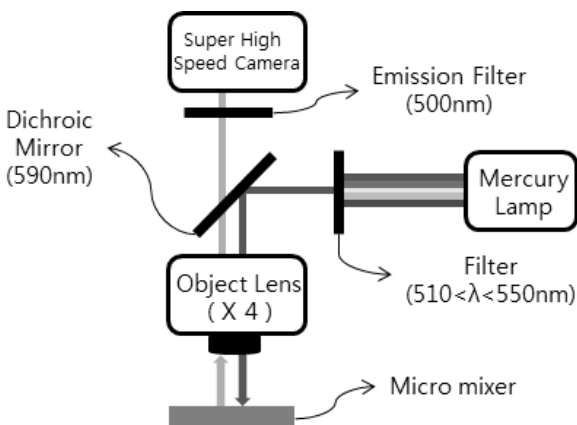


Fig. 5 Schematics of Fluorescence Filter System

Table 2 Experimental conditions

NO.	Flow rate (μl/min)	Velocity (m/s)	Re
1	30	0.0167	184
2	60	0.0333	367
3	90	0.05	551

4. 실험방법

지지대를 이용하여 마이크로 채널 내의 혼합이 발생하는 지점에 초점을 맞춰 현미경의 대물렌즈 하단에 위치시켰으며, 혼합기에 유체를 흘려주기 위해 투입구 부분에 시린지 펌프(Syringe Pump, KD Science, Legato 110)를 이용하여 10 mM/l의 Rh-B 용액과 에탄올 용액을 Table 2와 같이 30 μl/min, 60 μl/min, 90 μl/min의 일정한 유량으로 주입하였고, 각각의 유속과 레이놀즈 수(Re)를 계산하였다.

마이크로 혼합기 내부에서 생성되는 유동 및 혼합은 컴퓨터로 전송된 영상을 관측하여 채널 내 에탄올 용액과 Rh-B용액이 충분히 층류로 분리되어 흐르게 하여 혼합이 일어나지 않는 정상 상태에 도달하게 한 후 실험을 진행하였다. 유체가 충분히 정상 태로 흐르고 있을 때 초음파 가진장치 Generator의 출력 스위치를 켜주어 Transducer를 통해 1.6 MHz의 초음파가 유체에 수직방향으로 전달되도록 하였다.

혼합 효과는 Fig. 5와 같이 마이크로 채널 내 혼합 상태 가시화 및 혼합 성능의 측정을 위해 형광 측정 장치와 연결된 초고속 카메라를 통하여 컴퓨터로 영상 신호를 받은 후 획득한 데이터를 Image J 프로그램을 활용하여 형광 물질의 강도를 분석하여 데이터화 하였다.

5. 실험결과

Fig. 6은 마이크로 채널에 가진기가 접촉된 부분을 확대 하여 30 μl/min 유량의 혼합현상을 촬영하여 가시화한 이미지이다. (a)의 경우 초음파 가진기를 가동시키지 않고 유체가 순수하게 확산에 의해 혼합되는 경우를 촬영한 이미지 이고 (b)는 가진기를 통해 초음파 진동을 부과한 경우의 이미지이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 채널 끝단으로 갈수록 혼합이 진행됨을 알 수 있고 진동을 부과한 (b)의 경우가 혼합이 더 많이 됨을 확인 할 수 있다. 60 μl/min과 90 μl/min의 경우에도 동일하게 진동을 부과한 경우가 혼합이 더 많이 됨을 확인 할 수 있었다. 가시화 장치를 통해 혼합 효과를 정성적으로 확인 할 수 있었으며, 정량적인 결과를 확인하기 위해 혼합 지표(Mixing Index)를 이용한 분석을 진행하였다.

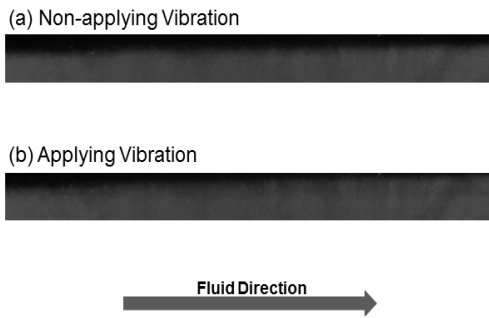


Fig. 6 Visualization of Mixing Process

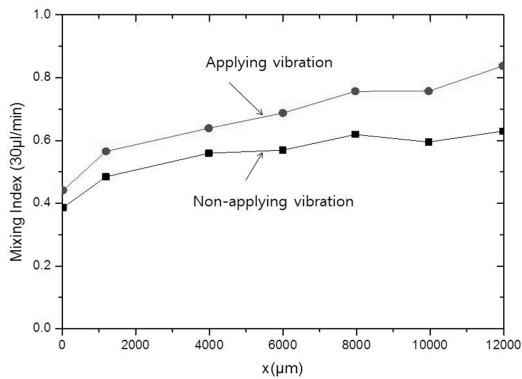


Fig. 7 Mixing Index for 30 μl/min

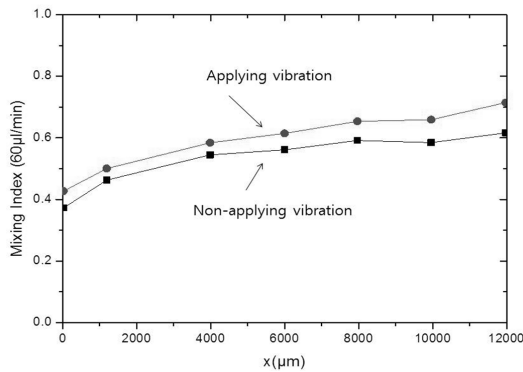


Fig. 8 Mixing Index for 60 μl/min

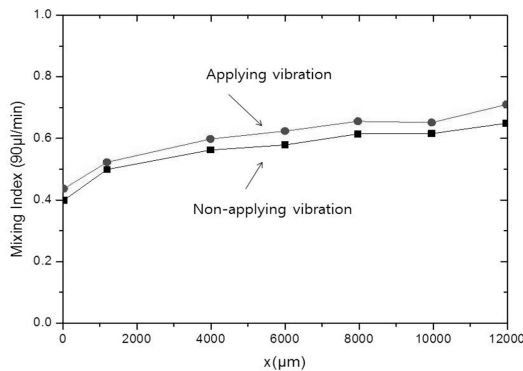


Fig. 9 Mixing Index for 90 μl/min

Fig. 7부터 9는 촬영된 이미지를 분석하여 확보한 혼합 지표의 분석 결과이다. 혼합 지표가 클수록 혼합이 잘 이루어진 것이며, 지표 값 1.0인 경우 완전 혼합, 0.0인 경우는 혼합이 전혀 일어나지 않았다는 것을 의미한다. Fig. 7부터 9의 분석 결과 가진 시 혼합의 효과가 향상 되었음을 확인 할 수 있고, Fig. 7의 30 μl/min 유량의 경우 32.99%의 혼합성능 향상을 나타내고 있다. Fig. 8의 60 μl/min 유량의 경우 혼합성능 향상이 16%, Fig. 9의 90 μl/min 유량의 경우 9.37%의 혼합성능 향상을 확인 할 수 있었다. 이와 같은 결과로부터 유량이 적을수록 초음파 가진에 의한 혼합성능 향상을 기대할 수 있다.

6. 결론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 마이크로 혼합기의 채널을 제작하기 위해 기존의 복잡한 공정 이 아닌 마이크로 엔드밀링을 이용한 단 시간, 저 비용 제작 방법을 제시하였다.
- (2) 제작된 마이크로 채널에 외부의 초음파 진동을 부가하고, 가시화 방법을 통해 혼합 성능 향상 여부를 정량적으로 분석한 결과, 30 μl/min 유량 조건에서 초음파 진동이 부가 될 경우 약 33%의 혼합 효과 향상이 있었다.
- (3) 유량에 따른 가진 효과는 유량이 적을수록 높은 혼합 효과를 발휘함을 확인하였다.

향후에는 진동 주파수, 가진 출력에 따른 혼합 효과에 대한 분석을 진행할 예정이며, 최적의 혼합 효과를 부가 할 수 있는 채널 형상에 대한 연구를 진행할 예정이다.

후기

본 연구는 2011학년도 아주대학교 일반연구비 지원에 의해 연구 되었습니다.

References

- [1] Kang, S. J., 2013, Experimental Study of Mixing Performance in Ultra Sonic Micromixer, Master Thesis, Ajou University, R. O. Korea.
- [2] Chia, Y. L., Chin, L. C., Yao, N. W., Lung, M. F., 2011, Microfluidic Mixing: A review, Molecular Sciences 12 3263-3287.
- [3] Monnier, H., Wilhem, A. M., Delmas, H., 1999, Influence of

- Ultrasound on Mixing on the Molecular Scale for Water and Viscous Liquids *Ultrasonics Sonochemistry* 6 67-74.
- [4] Nyborg, W. L. M., 1965, Acoustics Streaming, *Physical Acoustic* 2B 265-331.
- [5] Daniel, A., Xiaole, M. and Bala, K. J., 2009, A Fast Microfluidic Mixer Based on Acoustically Driven Sidewall-trapped Microbubbles, *Microfluid Nanofluid*, 7 727-731.
- [6] Yang, Z., Goto, H., Matsumoto, M., Maeda, R., 2000, Active Micro Mixer for Microfluidic Systems Using PZT Generated Ultrasonic Vibration, *Electrophoresis*, 21 116-119.
- [7] Ku, M. S., Kim, J. S., Kim, P. H., Park, J. H., Kang, I. S., 2011, An Evaluation of Machining Characteristics in Micro-scale Milling Processes by Finite Element Analysis and Machining Experiment, *Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 20:1 101-107.
- [6] Yang, Z., Goto, H., Matsumoto, M., Maeda, R., 2000, Active