

LOC적용을 위한 새로운 마이크로믹서의 연구

최범규[#], 이승현^{*}, 강호진^{*}

A Study on the Novel Micro Mixer for the Application of LOC

Bum-kyoo Choi[#], Seung-Hyeon Lee^{*} and Ho-jin Kang^{*}

ABSTRACT

This paper presents the results of the study on the novel micro mixer. Existing micro mixer is classified as active mixing and passive mixing by the mixing principles. Both mixing principles have problems. For solving these problems, this research has developed the novel micro mixers based on a totally different principle compared with former mixers. They not only have a simpler structure than former ones but also are able to achieve high mixing efficiency in spite of low power consumption due to using Lorentz Force. In addition, they are designed to increase the efficiency of mixing by changing the rotating direction of fluid with a polar switching circuit. Driving forces of the mixer are Lorentz force and a moving force of fluid due to electrophoresis. Because the efficiency of mixer is affected by electrode shape, several models have been made. The computer simulation has been made to estimate the efficiency of each mixer.

Key Words : CFD (전산유체해석), Lorentz Force (로렌츠힘), MEMS (미소기전), Micromixer (마이크로믹서)

기호설명

B : 자기장
 q : 전하량
 v : 속도
 \times : 벡터의 외적

1. 서론

Manz 교수가 1990년에 처음 μ TAS (Micro total analysis system)라는 개념을 제안한 이래로 생화학

생명공학분야에서 미세 유체 기계 시스템을 이용한 생화학 분석시스템이 개발되었다.

최근에는 생화학 분석 시스템에 필요한 샘플의 준비 및 화학반응, 분리, 측정 등 일련의 과정들을 하나의 집적 마이크로 시스템 상에 이루어 질수 있도록 제작한 것이 LOC (Lab-On-a-Chip)이다. 이러한 마이크로 시스템에서 시약이나 샘플을 효과적으로 혼합시키는 Mixer는 필수적이다. Macro 영역에서는 난류생성을 통해 혼합을 증진시키는 것이 효과적인 방법이나 LOC와 같은 마이크로 단위에서는 매우 작은 특성 길이와 유동 속도로 인해 난류를

접수일: 2007년 9월 14일; 게재승인일: 2008년 3월 5일

교신저자: 서강대학교 기계공학과

E-mail: bkchoi@sogang.ac.kr Tel. (02) 705-8639

* 서강대학교 기계공학과

생성하는 것이 불가능하게 된다. 또한 혼합이 대부분 확산을 통해 이루어지므로 마이크로 채널에서 확산을 통한 혼합을 한다고 할지라도 상당히 긴 시간이 걸릴 것이다.

게다가 마이크로 구조물 안에 stirrer와 같은 움직이는 요소(moving component)를 넣는 방법은 실현 불가능하다.

그리하여 많은 연구자들이 믹서의 효율을 증가시키기 위해 다양한 방법을 개발하였다. 이 방법들을 혼합 방법에 따라 크게 두개로 나누면 동적인 방식(dynamic type)과 정적인 방식(static type)으로 나누어진다. 동적 방식은 유체를 휘젓기 위해 외부동력을 이용한다. 이러한 방식은 초음파를 이용한 혼합¹ 그리고 유체제트를 이용한 방법²이 사용되고 있다. 한편 정적 방식의 믹서는 혼합경로를 변화시켜서 혼합을 증대시키는 방법을 택하고 있다. 그 예로는 유로의 분할 및 통합을 이용한 혼합,^{3,6} 유동방향의 수직변환을 이용한 혼합^{7,8} 등이 있다.

지금까지 매크로 영역에서는 난류생성을 통해 혼합을 증진시키는 것이 가장 효과적인 방법으로 여겨왔다. 그러나 마이크로 크기의 유체기구에서는 매우 작은 유로길이와 유동속도로 인해 난류를 생성시키는 것이 불가능하다. 나아가 혼합은 대부분 확산에 의해 일어나므로 매우 느리게 진행되게 된다. 따라서 효과적인 혼합을 위해서는 복잡한 형상을 적용하거나 아주 긴 마이크로 채널을 이용하여야 한다. 이는 큰 압력강하를 수반하게 될 가능성이 있으며, 설계와 제조 공정상의 어려움을 유발시킬 수 있다. 이를 극복하기 위해서 단순한 형상을 가지며, 혼합되는 경로를 줄이면서 면적을 크게 하는 효과적인 믹서설계가 필요하다. 그래서 현재 사용하는 마이크로 믹서는 거의 정적방식을 많이 이용하고 있다. 이는 LOC의 목적상 마이크로 단위의 믹서를 필요로 하기 때문에 채널의 구조를 변경함으로써 혼합효율을 높이려는 의도이다. 하지만, 이러한 방법은 확산에 의한 혼합효율과 비교하여도 큰 차이가 없다.

따라서, 본 연구에서는 마이크로 믹서가 MHD force로 chaotic flow를 발생시켜 기존에 확산에 의한 혼합이 이루어지는 믹서에 비하여 높은 혼합 효율을 가지는 마이크로 믹서를 설계하였다. 또한 정확한 유동 해석을 위하여 전산 유체 해석프로그램을 통하여 유동을 예측하였다. 최종적으로 실험을 통하여 얻은 결과와 해석된 결과를 비교 분석하였다.

2. 동작원리

2.1 원리

이 새로운 마이크로 믹서는 크게 두개의 힘, Lorentz Force와 전기장 내에서의 전하의 이동력에 의해 작동한다. Lorentz Force와 전기장 내에서 전하의 이동을 이용하는 이유는 믹서 내부에서 stirrer와 같이 저어주는 요소를 만들어 단시간 내에 혼합이 이루어지기 위해서이다. 흔히 LOC에 들어가는 buffer 용액은 전해질 용액으로 앞에서 말한 두 힘의 영향을 받아 stirrer와 같은 역할을 한다.

2.2 전기장에서의 전하의 이동

전기장 선은 양전하로부터 멀어지는 쪽으로 나가고 음전하 쪽으로 모여든다. 이러한 전기장 선에 전하를 놓아두게 되면 그 전하는 전기장에 의해 + 전하는 -전하 쪽으로, -전하는 +전하 쪽으로 움직이게 된다. 이러한 원리를 이용하여 고정된 전극에 전압을 걸어주면 전해질 용액을 움직일 수 있다. 하지만 전기장 내에서의 전하의 이동력에 의해서는 연구의 목표인 회전력을 얻을 수 없다. 회전력을 얻기 위해서는 또 다른 힘인 로렌츠 힘이 필요하다.

2.3 Lorentz force

마이크로 믹서에서 회전력을 얻기 위해서 전하의 이동력과 더불어 로렌츠 힘(Lorentz force)이 필요하다.

Fig. 1은 로렌츠 힘을 그림으로 나타낸 것이다. z축 방향으로 전기장과 y축 방향으로 자기장을 걸어주면 x축 방향으로 힘(F)이 발생한다는 것을 알 수 있다.

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

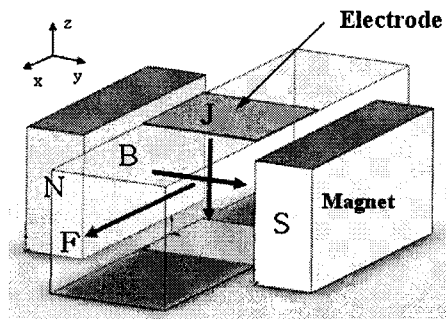


Fig. 1 Schematic of Lorentz Force

Fig. 2는 로렌츠 힘(Lorentz force)과 전기장 내에서의 전하의 이동력을 벡터 합으로 나타낸 것이다. 이러한 구동원리를 이용하여 마이크로믹서에 필요한 회전력을 얻을 수 있다.

3. 시뮬레이션

앞 절에서 설명한 구동원리가 실제로 작동하는지 알아보기 위하여 두 개의 전극을 이용하여 유체의 흐름을 시뮬레이션 하여 보았다. 또한 이 실험 결과를 바탕으로 네 개의 전극을 2개씩 2열로 배열하여 유체의 흐름도 시뮬레이션 해 보았다.

3.1 두 개의 전극을 이용한 마이크로 믹서의 설계

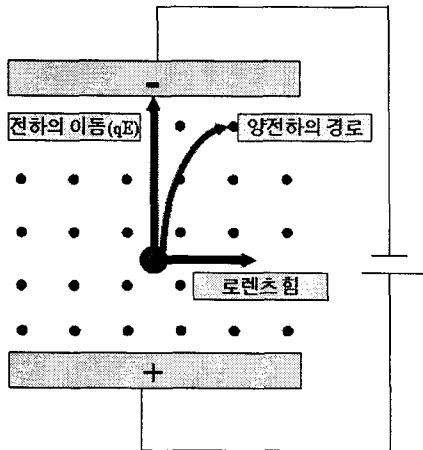


Fig. 2 Resultant vector from Lorentz force and the moving force of electric charges

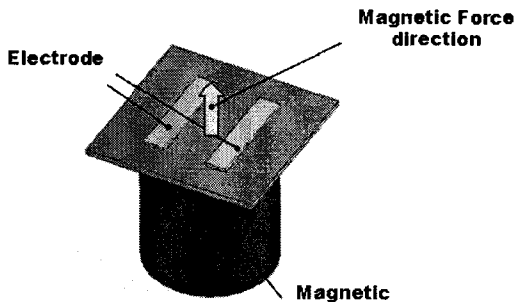


Fig. 3 Schematic for the micromixer with two electrodes

마이크로 믹서의 혼합 효율을 높이기 위해서는 유체를 회전시켜야한다. 이를 위해 로렌츠 힘(Lorentz force)과 전하의 이동력의 벡터 합으로 회전력을 얻을 수 있다는 것을 검증하기 위하여 Fig. 3과 같은 설계를 해보았다. Fig. 3에서 보듯이 자기장을 위쪽으로 주기 위하여 영구자석을 이용하였고, 전류를 흘려주기 위하여 기판위에 전극을 증착하였다.

양쪽 전극에 +와 - 전극을 걸어주면 마이크로 믹서에서 필요로 하는 유체의 회전력을 얻을 수 있다고 가정하였다. Fig. 4는 전압(V)을 걸어주었을 경우, 예상되는 유로의 경로를 화살표로 나타내었다. 로렌츠 힘(Lorentz force)과 전하의 이동력의 벡터 합에 의해서 +전하는 시계방향으로 회전을 할 것이고, -전하는 반시계 방향으로 회전을 할 것이다. +전하와 -전하의 질량 차이로 인해 실제로 +전하가 더 큰 회전반경을 가질 것이다.

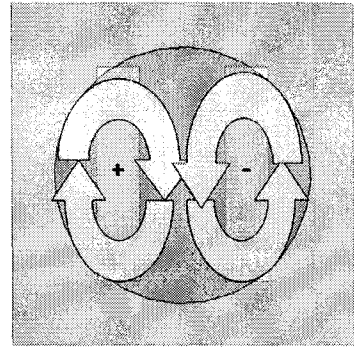


Fig. 4 Expected fluid paths with the applied voltage

Table 1 Physical property of PBS solution

	PBS solution
Density ρ (kg/m^3)	1000
Conductivity σ (S/m)	1.5
Viscosity μ (Pa/s)	6×10^{-4}
Relative permeability	1
Relative permittivity	72

실제로 Fig. 4와 같이 유체가 회전을 하는지를 정확히 예측하기 위하여 CFD-ACE라는 CFD해석 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 해보았다. Table 1은 시뮬레이션을 하기 위한 PBS(Phosphate Buffered Saline) solution의 물성치이고, Table 2는 마이크로 믹서의 설계 값이다. CFD-ACE를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. Fig 5의 왼쪽 그림은 +4V를 인가하였을 때의 유체의 경로를 나타내는 해석결과이고, 오른쪽 그림은 -4V를 인가하였을 때의 유체의 경로를 나타낸 해석결과이다.

마이크로 믹서의 혼합 효율을 높이기 위해서는 유체경로가 회전해야할 뿐만 아니라, 회전과 역회전이 일어나야한다. 이 해석 결과로 보았을 때, +전압과 -전압을 인가하였을 때, 유체의 회전방향이 반대로 나타난 것을 알 수 있다.

Table 2 Parameter of novel mixer

parameter	value
width, w(mm)	10
length, L(mm)	10
electrode width(mm)	1.5
Magnetic flux density, B(Gauss)	5000
Input voltage(V)	4

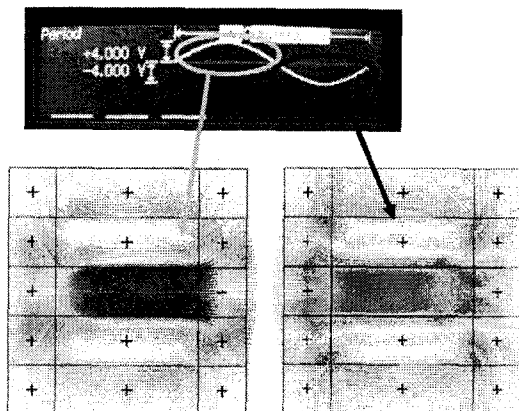


Fig. 5 Results of the numerical simulation for the mixer with two electrodes

이는 교류전압 주었을 때, 충분히 회전과 역회전 운동을 발생시킬 수 있음을 보여준다. 이 시뮬레이션 결과를 이용하여 보다 다양한 모양의 전극을 증착시켜 실제로 마이크로 믹서에 적용될 모델을 찾는 것이 필요하다.

3.2 네 개의 전극을 이용한 마이크로 믹서의 설계

두 개의 전극을 이용한 믹서의 시뮬레이션 결과, 양쪽 방향으로 유체가 회전한다는 사실을 알았다. 이러한 사실을 바탕으로 보다 다양한 유체의 흐름을 알기 위하여 네 개의 전극을 2열로 나열시킨 마이크로 믹서를 설계하고자 한다. 이번 설계에서는 혼합효율을 높이기 위하여 각각의 전극에 +전압과 -전압을 마주보게 인가하였다.

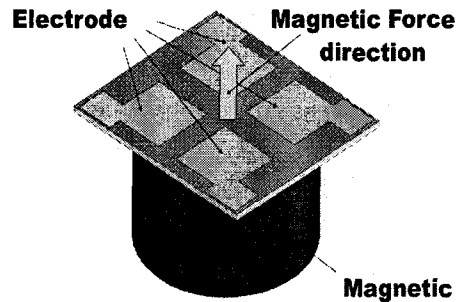


Fig. 6 Schematic for the micromixer with four electrodes

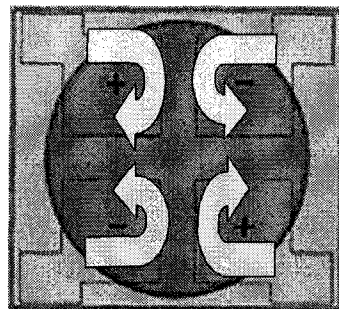


Fig. 7 Expected fluid paths with the applied voltage

Fig. 7은 예상되는 유로의 경로를 화살표로 나타낸 그림이다. 4개의 전극에 전압을 인가하였을 때에는 네 개의 회전반경이 생기는 것을 예상할 수 있다.

네 개의 전극을 이용하여 설계한 마이크로 믹서도 Fig. 7과 같이 흐르는지를 보다 정확히 알아보기 위하여 시뮬레이션 해보았다. PBS 용액의 물성치는 Table 1과 같고, Table 3은 네 개의 전극을 이용한 마이크로 믹서의 설계 값이다.

믹서의 전체 크기는 10mm*10mm로 하였고, 믹서내 전극의 크기는 4mm*4mm로 정하였다. 전극간의 간격은 1mm로 하였다. 해석 결과는 Fig 8과 같다. 예상대로 네 곳에서 유체가 회전하는 것을 볼 수 있었다. 또한 두 개의 전극에서처럼 전극을 바꾸어주었을 때에는 반대방향으로 유체가 흐름을 확인할 수 있었다.

Table 3 Parameter of novel mixer

parameter	value
width, w(mm)	10
length, L(mm)	10
electrode width(mm)	4.4
Magnetic flux density, B(Gauss)	5000
Input voltage(V)	4

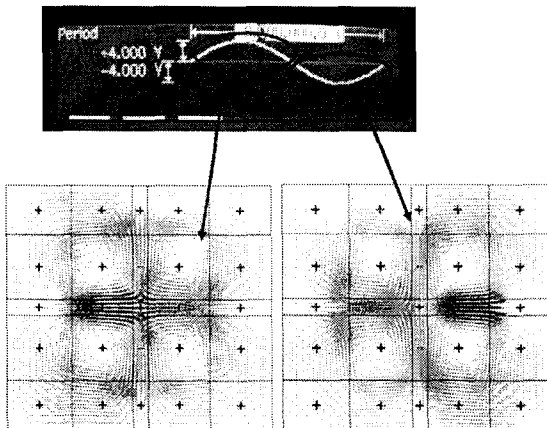


Fig. 8 Numerical simulation at AC voltage

4. 마이크로 믹서의 제작 및 실험

4.1 마이크로 믹서의 제작

앞선 시뮬레이션 결과를 바탕으로 마이크로 믹서를 제작하였다.

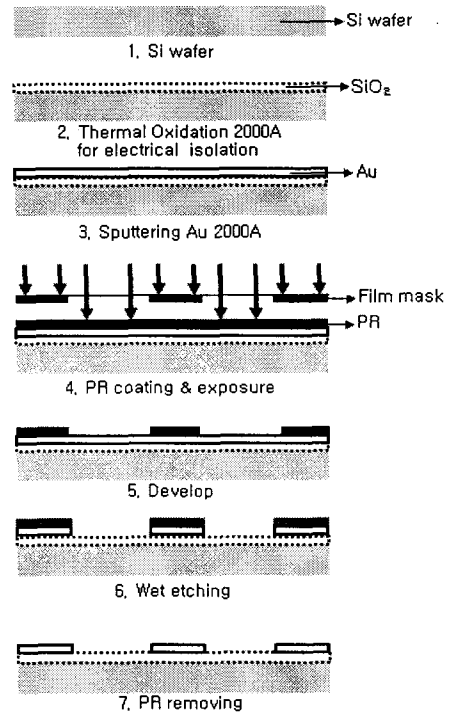


Fig. 9 Processing sequences for the novel micromixer

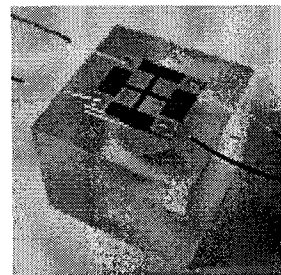


Fig. 10 Fabricated novel micromixer

기판으로 사용된 부분은 Si wafer이고, 전극부분은 금(Au)를 사용하였다. 또한 Si wafer와 전극부분을 절연하기 위하여 Si wafer 위에 SiO₂를 2000Å 증착하였다. Fig. 9와 같은 공정도에 의해 제작하였다. Fig. 10은 최종 제작된 마이크로 믹서이며, 다음 절에서 이 장치를 이용하여 혼합실험과 그 결과에 대해서 설명할 것이다.

4.2 마이크로 믹서의 혼합 실험결과

두 개의 전극 나란히 배열한 모델은 간단하고 시뮬레이션 결과와 동일하게 작동하였다. 그러나 두 개의 전극을 이용한 마이크로 믹서는 혼합효율을 높이는데 한계가 있다. +전하와 -전하가 양쪽으로 갈라지면서 회전을 하기 때문에 그 이동경로가 일정하다. 일정한 이동경로를 따라 움직이는 믹서는 실제로 다른 물질과는 섞이지 않는다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 네 개의 전극을 2열로 나열한 마이크로 믹서의 제작이 필요하다.

이는 보다 복잡한 유체의 이동경로가 발생할 것이며, 실험 결과 혼돈흐름(chaotic flow)이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이 흐름을 정밀하게 촬영을 위하여 접사 촬영 가능하고 초당 1024프레임을 찍을 수 있는 고속카메라를 사용 하였다.

4.2.1 네 개 전극 모델의 실험결과

앞 절에서 설명하였듯이, 네 개의 전극을 2열로 나열하였을 때 믹서를 작동시켰을 경우에는 총 네 곳에서 유체가 회전한다는 것을 시뮬레이션 결과로 알았다. 실험 결과 예상한 경로로 유체가 회전을 하였지만, +전하와 -전하의 질량차이로 인한 회전반경의 차이로 예상과는 조금 다른 새로운 경로로 유체가 이동한다는 사실을 알았다.

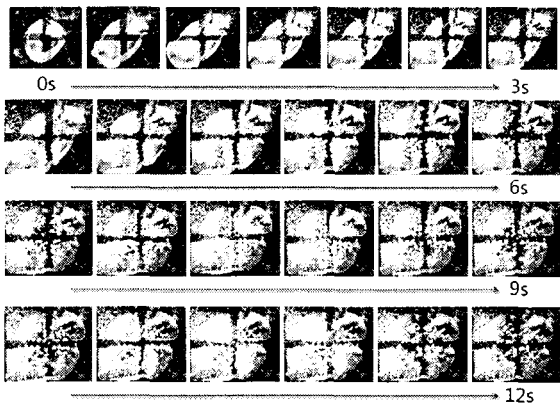
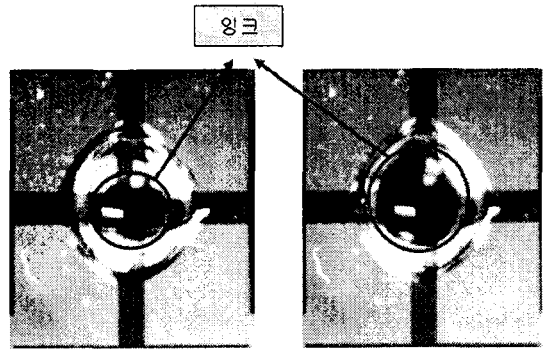


Fig. 11 Captured images of the fluid movement for 12 sec of a period

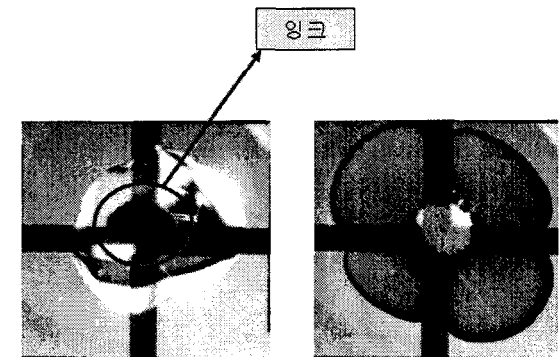
Fig 11은 총 12초 동안 촬영한 사진이다. 함수발생기(function generator)를 이용하여 전극들에 Fig. 8의 위에 나타난 사진과 같은 형태의 주기가 6초이고 amplitude가 4V인 sine파 전압을 인가하였다. Fig.

11에서 보듯이 3초마다 유체의 회전이 활발히 일어나는 부분이 바뀌는 것을 확인 할 수 있다. 처음 3초간은 오른쪽 상단과 왼쪽 하단의 회전 반경이 왼쪽 상단과 오른쪽 상단에 비하여 커집니다. 3초에서 6초 사이에는 이와 반대로 왼쪽 상단의 회전반경이 점차적으로 커지는 것을 확인할 수 있다. 자세히 관찰해 보면 마주 보는 두 전극의 한쪽 회전 반경이 다른 한쪽의 회전 반경보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 이는 +전하의 크기와 질량이 -전하의 것보다 크기 때문에 발생하는 현상이다. 이러한 현상으로 인해 큰 원의 두 개는 서로 합쳐져서 새로운 경로로 유체가 흐르는 것을 관찰 할 수 있다.



<잉크를 떨어뜨린 직후의 사진> <15초 후의 사진>

Fig. 12 Image of dropping a ink into an PBS solution



<잉크를 떨어뜨린 직후의 사진> <15초 후의 사진>

Fig. 13 Image of mixing an ink by a novel mixer

일반적인 정적인 믹서가 확산에 의한 혼합이 이루어지므로 확산에 의한 혼합과 이밖에 제작한 믹서를 이용한 혼합을 비교하는 실험을 진행하였다.

Fig. 12는 PBS 용액위에 잉크를 떨어뜨린 후 확산에 의한 혼합 이루어지도록 setting하고 촬영한 사진이다. Fig. 13은 PBS 용액위에 잉크를 떨어뜨린 후 제작한 믹서를 통하여 혼합 이루어지도록 setting하고 촬영한 사진이다. 두 사진을 비교하면 정성적으로나마 현재 널리 사용되는 정적인 마이크로 믹서와 이번에 제작한 마이크로 믹서의 혼합 율의 차이를 알 수 있다.

5. 결론

본 논문은 LOC(Lab On a Chip)에 반드시 필요한 component 중 하나인 마이크로 믹서에 대하여 연구를 수행하였다. 기존의 정적인 방식의 마이크로 믹서는 확산으로 인한 혼합이 이루어져야 함으로 접촉 면적을 넓히기 위하여 복잡한 형상으로 제작하여야 하는 단점이 있었다. 이번에 개발된 믹서는 chaotic flow를 발생시켜 혼합 효율을 높인 기존에 정적인 마이크로 믹서에 비해 높은 혼합 효율을 보여주었다. 또한 이전에 포항공대에서 연구한 chaotic flow를 가지는 마이크로 믹서의 경우 barrier를 삽입하여야만 chaotic flow가 발생하였다.⁹ 현재 연구된 chaotic flow를 가지는 믹서들도 barrier를 삽입하여야만 chaotic flow를 가짐으로써 geometry가 복잡해지고 결국 공정 과정이 증가하는 단점을 지니고 있었다. 그러나 이번에 연구하여 제작한 마이크로 믹서는 barrier와 같은 삽입물을 포함하지 않고도 Lorentz force만을 이용하여 삽입물을 포함 한 것과 같은 chaotic flow를 발생하였다. 이로 인해 단순한 구조에서도 chaotic flow가 발생할 수 있고 기존에 비해 공정 과정도 줄일 수 있었다. 또한 기존의 동적인 마이크로 믹서는 높은 전압을 사용하는 것이 단점 이었다. 이번에 제작한 믹서는 4V라는 낮은 교류 전압을 사용하면서도 충분한 혼합 효과를 보여주었다. 본 연구에서 제작한 마이크로 믹서를 이용한다면, LOC 부분에서 보다 짧은 시간에 항원, 항체를 반응시킬 수 있다. 또한 4V의 저전압으로 구동되기 때문에 휴대용으로 사용이 가능하다.

후 기

본 연구는 2007년 서강대학교 교내연구비의 지원을 받아 이루어진 연구로서 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

1. Yang, Z., Goto, H., Matsumoto, M. and Maeda, R., "Active micromixer for microfluidic system using lead-zirconate-titanate (PZT)- generated ultrasonic vibration," *Electrophoresis*, Vol. 21, Issue 1, pp. 116-119, 2000.
2. Knight, J. B., Vishwanath, A., Brody, J. P. and Austin, R. H., "Hydrodynamic focusing on a silicon chip: mixing nanoliters in microseconds," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 80, No. 17, pp. 3863-3866, 1998.
3. Wolfgang, E., Volker, H. and Holger, L., "Microreactors : New Technology for Modern Chemistry," Wiley, pp. 41-85, 2000.
4. Schwesinger, N., Frank, T. and Wurmus, H., "A modular microfluid system with an integrated micromixer," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 6, No. 1, pp. 99-102, 1996.
5. Koch, M., Chatelain, D., Evans, A. G. R. and Brunnschweiler, A., "Two simple micromixers based on silicon," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 8, No. 2, pp. 123-126, 1998.
6. Koch, M., Witt, H., Evans, A. G. R. and Brunnschweiler, A., "Improved characterization technique for micromixers," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 9, No 2, pp. 156-158, 1999.
7. Liu, R. H., Stremmer, M. A., Sharp, K. V., Olsen, M. G., Santiago, J. G., Adrian, R. J., Aref, H. and Beebe, D. J., "Passive mixing in a three-dimensional serpentine microchannel," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 9, Issue 2, pp. 190-197, 2000.
8. He, B., Burke, B. J., Zhang, X., Zhang, R. and Regnier, F. E., "A picoliter-volume mixer for microfluidic analytical systems," *Anal. Chem.*, Vol. 73, No. 9, pp. 1942-1947, 2001.
9. Kim, D., Lee, S., Kwon, T. and Lee, S., "A barrier embedded chaotic micromixer," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 14, No. 6, pp. 798-805, 2004.