

3 차원 매니폴드형 믹서를 가지는 마이크로 채널의 제작 및 평가 Fabrication of a crossing manifold micro-mixer built-in a micro-channel

*임태우¹, 손용¹, 정유진¹, 양동열¹, 공홍진², 이광섭³, 박성준⁴, 김동표^{4,5}
*T. W. Lim¹, Y. Son¹, Y. J. Jeong¹, D. Y. Yang(dyyang@kaist.ac.kr)¹, H. J. Kong², K. S. Lee³,
S. J. Park⁴, D. P. Kim^{4,5}

¹ 카이스트 기계공학과, ² 카이스트 물리학과, ³ 한남대학교 신소재학과,
⁴ 충남대학교 바이오응용화학부, ⁵ 충남대학교 분석과학대학원

Key words : Two-photon stereolithography, Three-dimensional microstructures, Micro-mixer, Micro-channel

1. 서론

최근 마이크로 채널을 이용한 마이크로 통합분석 시스템 (Micro total analysis system; μ TAS), 바이오 칩 (Bio-chip)에 관심이 높아지고 있으며, 마이크로 채널의 고효율, 집적화를 위한 다양한 소자 개발을 위한 연구가 증대되고 있다. 그 중 마이크로 믹서는 유동이 대부분 층류를 이루고 있는 특징을 가진 마이크로 채널에서 혼합/반응을 위한 필수적 소자로 인식되고 있다.

마이크로 믹서는 혼합을 위한 외부동력의 필요 유무에 따라 능동형 (Active) 과 수동형 (Passive)으로 나뉜다. 능동형 믹서는 마이크로 채널 내에 마이크로 자력교반기, 마이크로 음파공동장치 등의 내부 구조물을 제작하여 구동하는 방식으로서 매우 우수한 수행능력을 가지며 고집적화에 유리하지만 외부 동력 공급이 가능한 구조 설계가 함께 이루어져야 한다는 어려움이 있다[1]. 반면 수동형 믹서는 채널 내부 패터닝에 의한 난류생성 (Chaotic passive mixer)[2], 유체를 분할 후 재결합하는 라미네이션 (Lamination) 방법[3] 등 채널 내부의 구조에 의한 유체를 혼합하는 방법으로서, 외부 동력 없이 간단한 채널 설계만으로 작동할 수 있지만 고집적화에 불리한 단점이 있다. 이러한 능동형/수동형 유체소자들은 대부분의 경우 2 차원 패터닝 공정의 반복을 통한 형상제작 공정으로서 고 효율의 복잡한 형상을 제작하기 위해서는 많은 공정을 거쳐야하는 단점이 있고, 완전한 3 차원 구조를 제작하는 데는 한계가 있다. 이로 인해 90%이상의 완전한 혼합을 이루기 위해서는 아직 수 mm 이상의 긴 혼합 길이가 요구되므로, 보다 짧은 거리에서 고효율의 혼합을 이루기 위한 믹서의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 짧은 거리에서 유체를 효율적으로 혼합하기 위한 마이크로 믹서로서 3 차원 매니폴드형 마이크로 믹서를 제안하였다. CFD-ACE+ 를 통하여 그 효율성을 수치해석적으로 예측하였으며, 효과적인 구조를 설계하였다. 채널 패터닝은 포토리소그래피 공정을 통하여 제작하고 내부 3 차원 믹서구조는 대면적 극미세 이광자 흡수 광조형 공정을 통하여 제작하였다. 대면적 극미세 이광자 흡수 광조형 공정은 나노급 정밀도로 수백 μ m의 완전한 3 차원 입체 구조물을 제작할 수 있는 장점이 있다[4]. 공초점 현미경을 이용하여 물과 에탄올에 대하여 제작된 믹서의 혼합경향을 평가하였다..

2. 3 차원 매니폴드형 믹서

3 차원 교차 매니폴드형 마이크로 믹서 구조는 Fig. 1(a)와 같이 좌에서 우로 향하는 튜브형 매니폴드와 우에서 좌로 향하는 튜브형 매니폴드를 상하로 교번하여 반복되는 구조 (Horizontally crossing manifold mixer; H-CMM)로 이루어져 있다. 층 수가 많아질수록 혼합효과는 높아지게 된다. 즉, 층 수를 증가시키기에 따라 기존의 믹서구조인 분리 후 재결합 (split and recombine; SAR)의 믹서구조를 여러번 반복하는 효과를 줄 수 있게 되므로 짧은 영역에서 높은 혼합 효율을 기대할 수 있으며, 긴 채널을 통과함에 따라 발생하는 압력 강하를 줄일 수 있게 된다. 또한 두 CMM 을 통

과하면서 발생하는 유체의 모멘텀에 의해 통과 후에도 일정거리를 지나는 동안 혼합효과가 지속되게 된다.

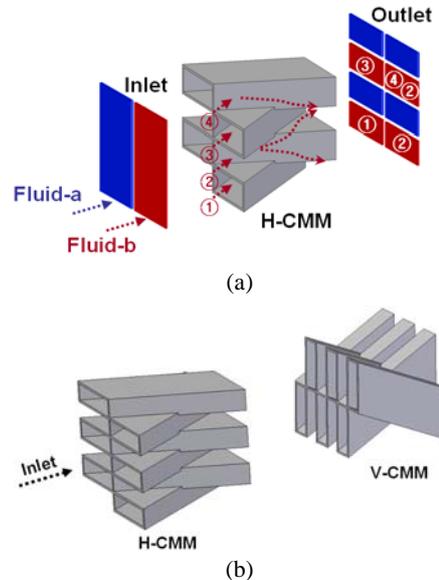


Figure 1. Schematic diagram of (a) the mixing mechanism for horizontally crossing manifold micromixer (H-CMM), and (b) sequentially aligned H-CMM and vertically crossing manifold micromixer (V-CMM).

한편 CMM 을 통과한 유체는 매니폴드가 적층된 방향으로 두 유체가 반복되어 배치되는 효과가 있다. 따라서, Fig. 1(b)과 같이 수평방향의 CMM 구조 뒤에 수직 방향의 CMM 구조 (Vertically crossing manifold mixer; V-CMM)를 배치한 이 단계의 CMM 구조의 경우 혼합 효과를 더욱 높일 수 있게 된다. H-CMM 을 통과한 유체는 일정구간 높은 혼합율의 증가를 가지게 되는데 이 거리를 도출하여 H-CMM 과 V-CMM 간의 간격으로 두었다.

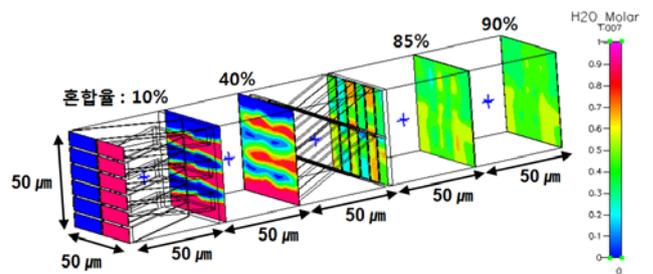


Figure 2. Simulation result of the CMM mixer of 6 layers. The distance between of the H-CMM and V-CMM is 50 μ m, water and ethanol is almost completely mixed in 250 μ m which is five times of the channel width

수치해석을 위해 CFD-ACE+를 이용하였다. 본 연구에서는 폭과 높이가 50 μ m인 채널에 대하여 6 층의 CMM 에 대

하여 설계하였다. Figure 2 는 Reynolds 수 0.1 에 대하여 CMM 을 통과한 후 혼합율의 해석결과를 나타낸다. 채널 폭의 5 배의 거리에서 약 90%의 높은 혼합율을 가짐을 예측할 수 있다.

3. 제작 및 평가

Figure 3 은 CMM 구조를 가지는 마이크로 채널의 제작 순서를 나타낸다. 우선 대면적의 2 차원 채널패턴은 대면적 패턴링에 유리한 포토리소그래피(photolithography) 공정을 이용하였다. 채널 패턴의 형상은 두개의 입구부와 한 개의 출구부를 가진 형상이며 채널의 폭과 높이는 50 μm 로 설계하였다. 이때 기판은 이후 연계되는 대면적 이광자 흡수 광조형 공정을 고려해 두께 150 μm 의 커버글라스를 사용하였다.

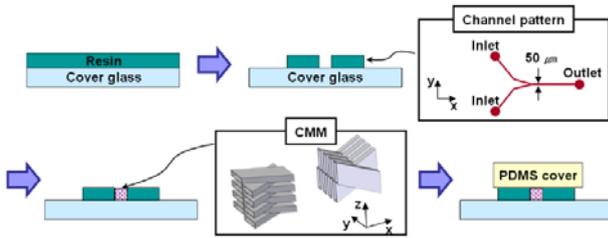


Figure 3. Fabrication process of the channel with crossing manifold micro-mixer (CMM). A channel pattern is fabricated by photolithography. 3D micro-mixer of CMM is then fabricated in the micro-channel. Finally, the channel is sealed by a polydimethylsiloxane (PDMS) plate with holes for inlets and an outlet.

Figure 4 는 포토리소그래피 공정을 통해 제작된 채널 내부에 대면적 이광자 흡수 광조형 공정을 통해 제작된 6 층의 CMM 믹서가 제작된 채널 형상을 나타낸다. 레진에서 방출되는 빛을 이용하여 채널의 바닥면 및 좌우경계의 위치를 확인함으로써 제안한 CMM 믹서를 채널 내부의 정확한 위치에 제작할 수 있었다. 유체의 혼합시 유동에 의한 형상의 변형을 고려하여 대표적인 이광자 흡수 광조형 레진인 SU8 을 사용하였다. 본 연구에서 제안한 구조물의 경우 채널 패턴과 접하여 일체형을 이루고 있어야 하므로 채널 패턴에 사용한 재료역시 같은 재료인 SU8 을 이용하였다. SU8 은 바이오 응용 재료로서도 적합한 재료로서 마이크로 채널 제작에 많이 이용되어오고 있다.

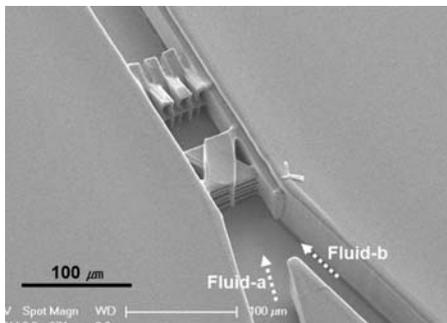


Figure 4. SEM image of the CMM built-in a micro-channel.

제작된 믹서의 혼합 특성을 알아보기 위하여 공초점 현미경을 이용하여 관찰하였다. 혼합할 유체로는 물과 에탄올을 사용하였으며, 에탄올에 색소 Rhodamine B 를 혼합하였다. 제작된 믹서의 혼합효과를 최소 10 $\mu\text{l/hr}$ 의 유량으로 주입할 수 있는 실린지 펌프에 연결하여 공초점 현미경을 이용하여 평가하였다.

4. 결론

본 연구에서는 높은 혼합율을 가지는 믹서구조로서 3 차원 매니폴드형 구조를 제안하였다. 수치해석을 통하여 채널 폭의 5 배의 채널 길이 내에서 약 90%의 높은 혼합율을 가짐을 알 수 있었다. 이러한 3 차원 믹서구조를 가지는 마이크로 채널은 포토리소그래피 공정과 대면적 이광자 흡수 광조형 공정을 통하여 제작하였으며, 공초점 현미경을 이용하여 혼합경향을 평가 하였다. 완전한 혼합을 위해 수 mm 이상의 채널길이가 필요한 기존의 수동형 마이크로 믹서들에 비해 보다 효과적인 믹서로서의 응용이 가능할 것으로 사료된다.

후기

This work is supported by Nano R&D program through the National Research Foundation of Korea funded by the Ministry of Education, Science and Technology (20090082831)

참고문헌

1. Lu, L.H., Ryu, K.S. and Liu, C., "A Magnetic Microstirrer and Array for Microfluidic Mixing," J. of MEMS, **11**, 5, 462~469, 2002.
2. Stroock, A.D., Dertinger, S.K.W., Ajdari, A., Mezic, I., Stone, H.A., Whitesides, G.M., "Chaotic Mixer for Microchannels," Science, **295**, 25, 647~651, 2002.
3. Branebjerg, J., Gravesen, P., Krog, J.P., Nielsen, C.R., "Fast Mixing by Lamination," IEEE, 441~ 446, 1996.
4. Lim, T.W., Son, Y., Yang, D.Y., Kong, H.J., Lee, K.S. and Park, S.H., "Highly Effective Three-dimensional Large-scale Microfabrication using a Continuous Scanning Method," Applied Physics A, **92**, 541~545, 2008.