

상하좌우 복합유동 유도를 통한 고효율 HVM 마이크로 믹서 설계에 관한 연구

A Study on Design of an Effective Micromixer using Horizontal and Vertical Multi-mixing (HVM) Flow Motion

유원설¹, 김성진¹, 강석훈¹, 김판근¹, 박상후^{2,✉}
 Won Sul Yoo¹, Sung Jin Kim¹, Seok Hoon Kang¹, Pan Guen Kim¹ and Sang Hu Park^{2,✉}

¹ 부산대학교 기계공학부 정밀가공시스템 전공 (Department of Precision Engineering, Pusan National Univ.)

² 부산대학교 기계공학부/ 정밀정형 및 금형가공연구소 (School of Mechanical Engineering, ERC/NSDM, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: sanghu@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-1011

Manuscript received: 2011.2.28 / Accepted: 2011.4.11

Subminiature devices such as Lab-on-a-chip and μ -TAS(Micro Total Analysis System) have been intensively studied in biotechnology and chemistry. In many cases, a micromixer was widely used to mix different solutions for synthesizing novel materials. However, in microfluidic system, there is generally a laminar flow under very small Reynolds number so it is difficult to mix each solution perfectly. To settle this problem, we propose a new mixing mechanism which generates a horizontal and vertical multi-mixing (HVM) flow for effective mixing within a short mixing section. We evaluated the proposed mechanism using CFD analysis, and the results showed that the HVM mechanism had a relative high-effectiveness comparing to the existing methods.

Key Words: Micromixer (마이크로믹서), Microchannel (마이크로채널), Mixing Ratio (혼합효율), Horizontal and Vertical Multi-mixing Flow (HVM; 상하 좌우 복합유동)

1. 서론

최근 하나의 칩 속에 실험실이라 불리는 랩-온-어칩(Lab-on-a-chip)이나 μ -TAS(Micro Total Analysis System)와 같은 초소형 디바이스들은 극소량의 시료를 이용하여 높은 처리속도로 분석 및 합성을 할 수 있어 바이오 및 의료분야, 화학 분야에서 많이 활용되고 있으며, 관련 심화연구가 진행되고 있다. 초소형 디바이스는 일반적으로 다양한 물질을 흘리거나 혼합하거나 분리하기 위한 마이크로 크기의 채널을 이용한다. 따라서 마이크로 채널 속에 흐르는 유체는 유속이 매우 낮고, 레이놀즈 수(Reynolds number)가 매우 낮은 층류(Laminar

flow)가 흐르기 때문에 마이크로 채널 속에서 다양한 물질을 혼합하는 경우에는 단순한 확산(diffusion)에 의한 혼합 메커니즘에 의존하여 균일한 혼합을 유도하기에는 문제점이 많다. 그래서 혼합 효율을 올리기 위하여 마이크로 믹서(micromixer)를 이용하여 짧은 혼합구간에서 다양한 유체끼리의 반응과 혼합을 일으키는 방법에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다.¹

일반적으로 마이크로 믹서는 능동형 방식(Active Type)과 수동형 방식(Passive Type)으로 크게 나누어진다. 능동형 방식으로는 초음파, 자기장 등과 같이 외부의 동력원을 이용하여 혼합을 직접적으로 유도하여 혼합 효율을 극대화시킬 수 있다.

그러나 단점으로 제작 시 어려움이 있고, 고비용이 요구되고 작동을 위한 부가장치들이 필요하다. 이와 반대로 수동형 방식은 채널 내부에 복잡한 형상을 만들어서 유동의 흐름을 변화시켜서 혼합을 유도하는 방식으로 간단하고 제작이 용이하며, 적은 비용이 드는 장점이 있다. 그러나 수동형 방식은 혼합 효율이 다소 낮기 때문에 이것을 개선해야 될 과제가 남아 있다. 현재까지 개발된 수동형 방식으로는 대표적인 사례로 A.D. Stroock의 카오스 믹서(chaotic mixer)와 SAR(Split and recombine) 믹서 등이 있다.^{4,5} 카오스 믹서는 마이크로 채널 내에서 유체를 카오스 유동을 유발하는 방식으로 채널 내부에 단순한 마이크로 패턴(pattern)을 이용하여 카오스 이류를 발생시켜 혼합효율을 올리게 한다. 그러나 원리와 제작은 간단하지만 완전한 혼합으로 도달하는 혼합거리가 최소 5 mm 정도로 길게 요구된다. SAR 믹서는 유체 흐름의 분할 및 재결합을 이용한 혼합방식으로 채널의 형상을 3차원적으로 변형을 하여서 분할과 결합을 반복하여 채널 내부의 유동의 흐름을 변형하여 분할과 재결합을 반복하여서 혼합을 일으킨다. 카오스 믹서에 비해 혼합거리는 짧아 혼합구간의 최적화가 가능한 장점이 있다. 본 연구에는 이러한 카오스 믹서와 SAR 믹서의 특성을 동시에 가지고 형상제작이 용이한 상하좌우 복합유동을 일으키는 새로운 방식의 믹서를 제안하고자 한다.

2. HVM 마이크로 믹서 설계 및 제작공정

마이크로 채널 내에서 상하좌우 복합 혼합유동(horizontal and vertical mixing, HVM) 유도를 위해서는 기본적으로 3 차원의 복잡한 구조가 요구된다. 그러나 그러한 형상은 실제 제작이 어렵거나 이광자 광중합(two-photon induced polymerization) 공정³을 이용하여 제작하여야 하기 때문에 고가의 제작 장비와 기술이 요구되고 제작시간이 많이 들게 된다. 본 연구에서는 3 차원 믹서의 제작을 쉽게 하기 위하여 2 차원으로 각각 제작된 형상을 접합하여 3 차원 믹서를 구성하도록 하였다. Fig. 1에 나타난 것처럼 마이크로 형상 복제에 많이 사용되는 PDMS(Polydimethylsiloxane)를 이용하여 제작할 상하로 구성된 2 차원 형태의 믹서를 각각 제작하고 이것을 서로 접합하여 3 차원 형태의 믹서구조를 완성한다. 접합방법으로는 접합면에 플라즈마 처리(plasma treatment) 등을 이용하여 표면개질 후 접

합하거나 접합 물질(bonding agent)을 사용하여 할 수도 있다. 그리고 마이크로 믹서 상판과 하판을 접합 후 원활한 분리를 위해서 자외선 조사 후 접착력을 잃게 되는 자외선 경화성 테이프(UV Tape)를 이용하여 완성된 마이크로 믹서와 유리판을 분리하여 최종 공정을 완료한다.

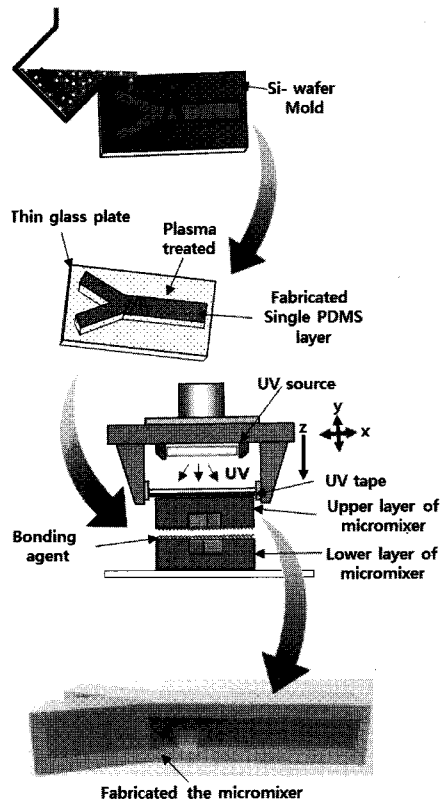


Fig. 1 Schematic diagram of manufacturing process of a micromixer; Fabrication of one-side PDMS mixer layer, alignment of both mixer layers, and then bonding two layers

본 연구에서 제안하는 마이크로 채널 및 믹서의 기본 형상은 Fig. 2에 나타난 것처럼 두 종류의 물질을 혼합할 수 있도록 Y-자형 구조를 가지고 있으며 기본 구조는 입구부, 혼합부, 출구부로 구성된다. 채널의 입구부(inlet)의 폭은 200 μm , 출구부(outlet)의 폭은 300 μm 로 하고 입구부와 출구부를 포함한 전체 길이는 1.2 mm로 하였다. 그리고 채널의 높이는 200 μm 로 두고 채널 중앙에 있는 혼합부(mixing part)는 격벽의 폭(w)은 250 μm , 높이(h)는 100 μm 로 두고 격벽의 기울기는 (a)는 30° ,

45°, 60° 로 각각 변화시켜서 혼합 효율을 해석적으로 비교하고자 하였다.

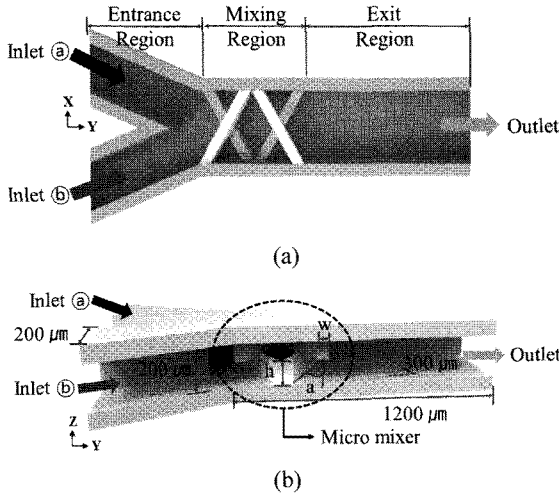


Fig. 2 Shape and dimension of the micromixer; (a) top view without cope, and (b) inclined side view without side-wall

2.1 상하좌우 복합유동 매커니즘

전술한 바와 같이 수동형 마이크로 믹서 중에서 복합유동을 유도하는 방식으로는 카오스 믹서와 SAR 믹서가 있다 이러한 마이크로 믹서는 충분한 혼합을 유도하기 위하여 충분한 혼합구간이 요구된다. 예를 들어 SAR 믹서의 경우 흐름을 나누는 단계, 흐름을 다시 재조합 하는 단계, 그리고 재배열하는 단계로 3 가지 단계로 구성된다. 따라서 비교적 긴 혼합구간으로 마이크로 믹서 크기를 줄이는 데에는 다소 한계가 있을 수 있다. 본 연구에서는 이러한 상하좌우 복합유동을 유도하면서 짧은 혼합구간에서 혼합이 될 수 있도록 제안하였다. Fig. 3(a-b)에는 본 연구에서 제안한 방법인 복합유동 발생 매커니즘을 나타내었다. Fig. 3(a)와 같이 믹서 내의 격벽으로 인하여 입구부를 통과한 두 물질이 서로 만나서 상,하 두 층으로 나누어져서 상부는 A-A' 선의 좌측으로 올라가고 하부는 A-A' 선의 우측 아래쪽으로 같이 흘러가게 된다. 그리고 이어서 B-B' 선에 나타난 것처럼 상부로 흘러간 혼합유체는 상부 격벽을 만나서 다시 하부로 흐르고 하부의 혼합유체는 다시 상부로 올라가게 되어 결국 3 차원적으로 상하좌우 복합유동이 발생하게 된다. Fig. 3(b)에는 구간별로 유체가 흐르

면서 유동형태를 각 구간별[Fig. 3(a)의 A-A', B-B', C-C']로 나누어서 비교한 것이다. 첫 번째 단계(A-A' → B-B')에서는, 시계 방향으로 유동이 회전이 되면서 흐름을 나누고, 나누어진 흐름을 다시 재조합한다. 두 번째 단계(B-B' → C-C')에서는, 나뉜 흐름에서 반시계 방향으로 유동이 회전이 되면서 재배열을 하며 다시 흐름을 나누고 다시 재조합을 한다.

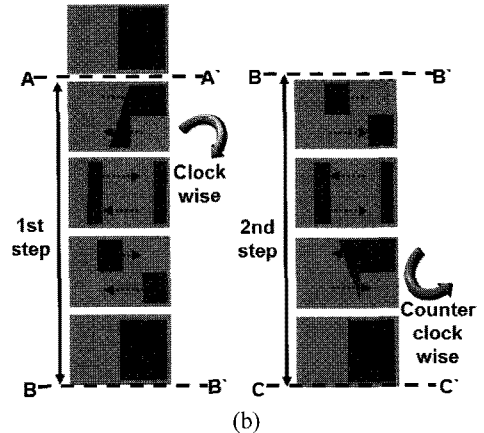
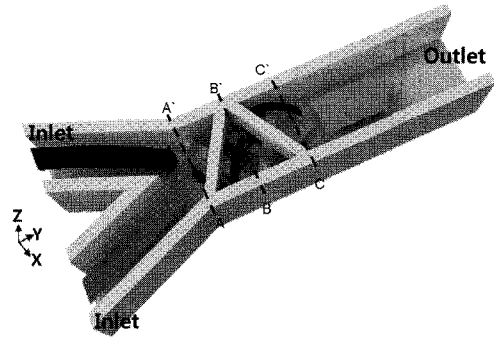


Fig. 3 Schematic view of the suggested micromixer; (a) horizontal and vertical multi-mixing flow mechanism, (b) cross-sectional view of the flow

3. CFD 해석을 이용한 특성평가

CFD 를 이용하여 믹서의 특성평가를 하기 위해서 ESI 사의 CFD-ACE+를 이용하여 해석하였다. Fig. 2(b)에 나타낸 믹서부의 격벽의 각도 (a)를 각각 30°, 45°, 60° 세가지 형상으로 달리하여 믹싱 효율에 미치는 영향을 비교해 보았다. 총 채널의 길이는 1.20 mm 로 설계하였고 총 매시의 개수

는 약 6 단계 수준이다. CFD-ACE 에서 해석을 위해 SAR 믹서⁵의 특성평가가 조건과 동일한 유량조건인 레이놀즈수(Re)가 5 로 하여 입구속도를 주고, 작동유체는 물과 에탄올을 사용하며 출구는 대기압으로 설정하였다. 작동 유체의 해석조건은 Table 1 에 자세하게 나타내었다.

Table 1 Properties of liquid used in numerical analysis

Fluid	Viscosity (Kg/m·s)	Diffusivity (m ² /s)	Density (kg/m ³)
Water	8.55e-04	1.2e-09	999.8
Ethanol	1.2e-03	1.2e-09	789

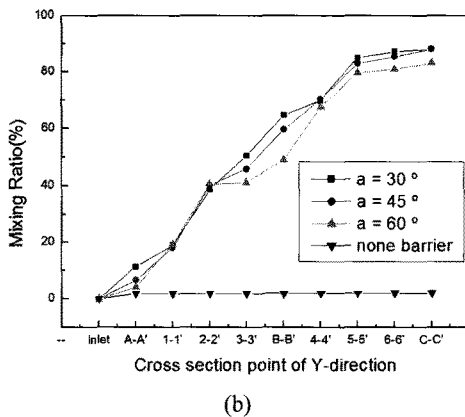
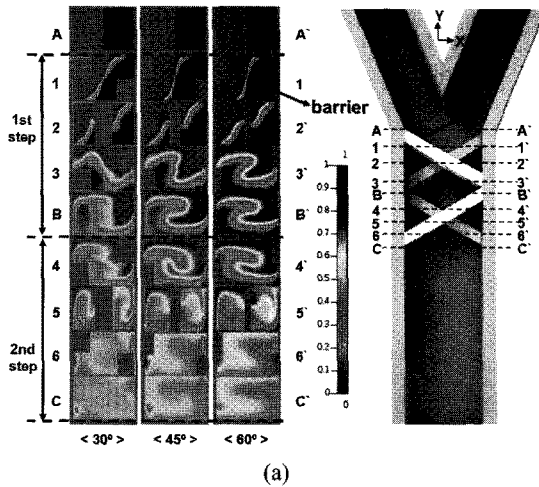


Fig. 4 Result of CFD analyses depending on the barrier angles; (a) variation of mixing effectiveness, (b) mixing ratio

작용유체인 물과 에탄올의 혼합효율을 구하기 위하여 혼합률(mixing ratio)을 구하는 식을 Jeon 등⁶에 의해 제안된 혼합률 식을 이용하였다. 혼합률 η 는 식 (1)과 같이 나타낸다. 여기서 C 는 출구에 서의 농도이고 C_0 는 초기 농도, C_∞ 는 완전 혼합이 일어난 후의 농도를 나타낸 것이다.

$$\eta = \left(1 - \frac{\int |C - C_\infty|}{\int C_0 - C_\infty} \right) \times 100\% \quad (1)$$

위의 해석조건에 따른 해석결과는 Fig. 4(a)와 같다. 본 연구에서 제안된 HVM 마이크로 믹서 내 격벽(barrier)의 각도(a)에 따른 혼합 농도 변화를 단면 A-A'에서 단면 C-C'를 9 개로 나누어서 나타냈다. 단면 격벽의 각도가 30° 의 경우 단면 A-A'에서 단면 C-C'의 거리는 346 μ m, 45° 의 경우는 600 μ m, 60° 의 경우는 1039 μ m 이다. 그에 따른 혼합률의 값은 Fig. 4(b)에 나타내었다. 본 연구에서 제안한 HVM 믹싱구조 없이 마이크로 채널로만 구성된 경우에는 1.20 mm 채널 길이에서 단순한 확산에 의한 혼합으로 혼합률이 2 %로 거의 일어나지 않았으며, HVM 믹싱구조의 각도가 각각 30° 와 45° 의 경우 믹싱 구간이 짧은 거리임에도 불구하고 88.15 % 수준의 높은 혼합률을 볼 수 있다. 또한 믹싱구조 각도가 60° 의 경우에도 83.32 %로 높은 혼합률을 볼 수가 있다.

Table 2 Requiring minimum mixing length in which the mixing efficiency reaches over 80% among the previous studies

Micromixer	Channel Size (Width : w, Height : h)	Re	Length at 80% mixing
Stroock ⁴	w : 200 μ m, h : 85 μ m	0.01	1.3 cm
Lee ⁵	w : 400 μ m, h : 100 μ m	5	4.8 mm
Wang ⁷	w : 200 μ m, h : 100 μ m	5	5.0 mm
HVM	30°	5	446 μ m
	45°		700 μ m
	60°		1.1 mm

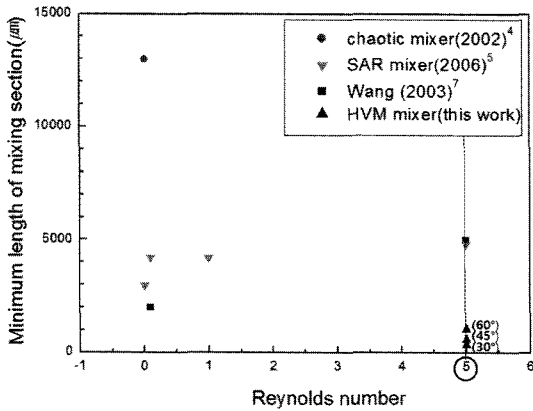


Fig. 5 Requiring minimum mixing length in which the mixing efficiency reaches over 80% among the existing case study

위의 결과에서 HVM 믹싱구조의 각도에 상관 없이 모두 80% 이상의 높은 믹싱효율이 나타남을 알 수 있었다. 따라서 믹싱구간이 짧은 30° 와 45° 의 경우가 더 효율적임을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 제안한 구조와 기존에 제안된 믹서 구조의 효율을 다른 연구사례(Stroock,⁴ Lee,⁵ Wang⁷) 와 비교해 보면 Table 2 와 Fig. 5 에 나타낸 바와 같이 동일한 레이놀즈 수(Re=5)에 대하여 80 % 이상의 혼합물을 나타내는 경우에 최소한 요구되는 혼합구간 길이를 비교해보면 기존의 연구결과보다 HVM 30° 인 경우에는 최대 29.15 %, 최소 10.76 % 짧은 혼합구간에서 가능함을 알 수 있다. 따라서 상하좌우 복합유동을 일으키는 HVM 믹싱구조가 다른 구조에 비하여 상대적으로 짧은 구간에서 효율적으로 혼합이 일어남을 알 수 있다.

4. HVM 구조의 기계적 안정성 평가

고효율의 마이크로 믹서를 설계를 위해서는 같은 효율에서도 더 짧은 혼합거리에서 혼합을 할 수 있는 것이 중요하다. 본 연구에서 제안한 믹서의 구조상 격벽의 각도가 작을수록 짧은 거리에서 혼합이 일어나며 효율이 높아지지만 격벽에 가해지는 압력은 상대적으로 높아진다. 따라서 그렇게 높아진 압력에 의해 마이크로 믹서의 변형이 발생할 수 있기 때문에 내구성 평가가 필요하다. 구조의 안정성을 평가하기 위해 격벽에 가해지는 압력 값은 레이놀즈 수가 0.1 조건에서 작동유체인 물과 에탄올이 입구부를 통하여 흘러갈 때 CFD 해석

을 통해서 격벽의 각도에 따른 격벽 측면에 가해지는 압력의 분포를 구하면 Fig. 6(a)-(c)와 같다. HVM 믹싱구조 각도가 작을수록 초기 격벽에 걸리는 압력이 급격하게 높아지는 것을 알 수 있다. 이러한 압력조건에서 HVM 믹싱구조에 걸리는 응력을 분석하여 기계적 구조 안정성을 평가하였다.

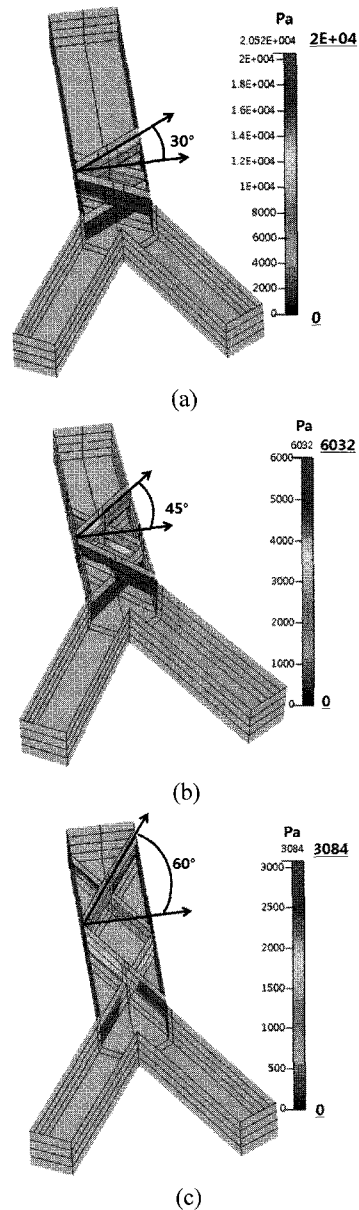


Fig. 6 Pressure distribution on the side of HVM mixing part depending on its angle from (a) 30° , (b) 45° , and (c) 60°

HVM 믹싱구조 각도가 30° 인 Fig. 6(a)의 경우 초기 격벽에 가해지는 평균압력 19.07 kPa 이 가해지고, 45° 인 Fig. 6(b)의 경우는 초기 격벽에 가해지는 평균압력 4.99 kPa 이 가해지고, 60° 인 Fig. 6(c)의 경우는 초기 격벽에 가해지는 평균압력 2.12 kPa 이 가해진다. 가장 높은 압력으로 가해지는 30° 의 경우를 가지고 구조의 안정성을 평가하여 상하 좌우 복합 혼합유동을 일으키는 마이크로 믹서의 구조해석을 하였다. 구조해석은 상용 툴인 ANSYS V11.0 을 사용하였다. 해석시간을 줄이기 위해서 입구부를 제외한 혼합구간으로부터 1.2 mm 구간으로 축소하여 해석을 수행하였다. Fig. 7 에는 유한요소 모델의 형태와 요소를 나타내고 있으며 총 요소 수는 101,402 개 이고 사면체 요소(solid 45)를 사용하였다.

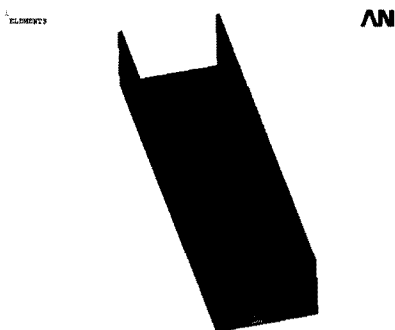


Fig. 7 Mesh on analysis model

구조해석에 사용된 경계조건으로 가장 큰 면압으로 나타난 19.07 kPa [Fig. 6(a) 참조]로 주었다. 해석에 사용된 재료는 PDMS 물성을 사용하였다.^{8,9} (아래 Table 3 참조)

Table 3 Properties of PDMS used in numerical analysis

Material Properties (unit)	Value
Young's modulus (kPa)	870
Poisson's Ratio	0.5
Density (g/m ³)	0.970
Tensile yield strength (MPa)	2.24

Fig. 8(a)-(b)에 나타난 것처럼 최대 변위 값은 약 32 μm 이며, 최대 응력 값은 약 0.386 MPa 이므로 일반적인 PDMS 파단강도로 알려진 2.24 MPa 에 훨씬 작은 값이기 때문에 주어진 하중조건에서 구조적으로 안전하다고 볼 수 있다.

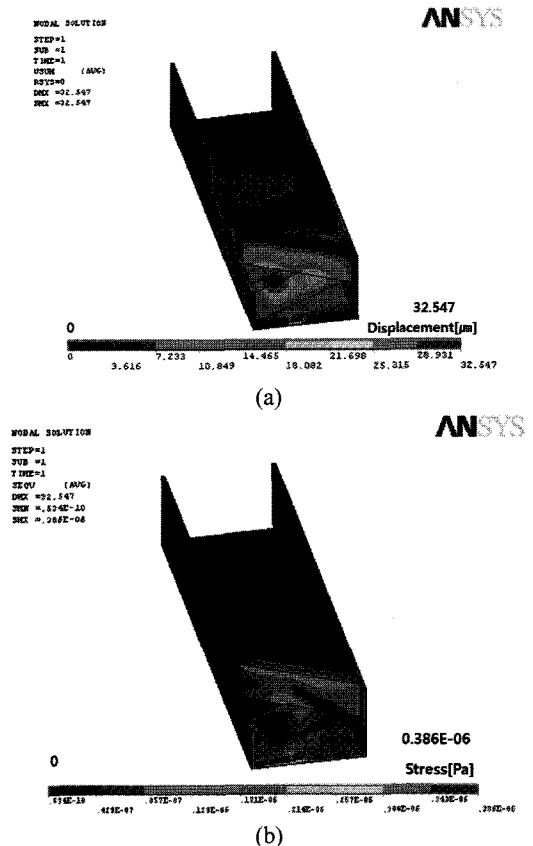


Fig. 8 Structural analysis results; (a) displacement distribution and (b) stress distribution

5. 결론

본 연구에서는 수동형 믹서의 혼합 효율을 증대시키기 위하여 카오스 믹서와 SAR 믹서의 특성을 보완하여 상하좌우 혼합 유동을 일으키는 HVM 마이크로 믹서를 제안하였다. 비교적 간단한 제작 방법으로 기존의 연구결과에 비하여 짧은 혼합구간에서 높은 혼합률을 보이는 것을 해석적으로 알아보았다. HVM 믹싱구조의 각도가 30° 인 경우 카오스 믹서와 SAR 믹서의 혼합거리보다도 약 1/2 또는 1/4 의 짧은 혼합거리에서도 88 % 의 높은 혼합률을 나타내었다. 따라서 미소구간에서 혼합률을 올려야 할 경우 본 연구에서 제안한 방식이 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 CFD 해석을 이용하여 주어진 압력조건에서 설계된 형상의 구조적 안정성을 확인하였다. 이와 같은 HVM 마이크로 믹서의 개념을 이용하여 다양한 분야 특히 바이오 및 화학 분야에서 고효율로 혼

합을 하는 용도로 사용이 가능할 것으로 사료되며 향후 실험적 방법을 통하여 본 연구에서 제시된 형상의 신뢰성을 검증하고자 한다.

후 기

본 연구는 한국연구재단(2010-0000588)과 한국 학술진흥재단 지원과제(2010-0016093)로 수행된 연구결과이며, 또한 한국연구재단의 국가핵심연구센터사업의 지원(2010-0008-276)과 한국연구재단의 해외우수연구센터유치사업(No. K20702001648-10E0100-07010) 지원을 받았음.

참고문헌

1. Chakraborty, S., "Microfluidics and Microfabrication," Springer, pp. 135-145, 2010.
2. Lim, T. W., Son, Y., Yang, D. Y., Lee, D. H., Lee, D. P. and Park, S. H., "Nano/micro combined process for the fabrication of 3D micro-channels," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 175-176, 2007.
3. Lim, T. W., Son, Y., Jeong, Y. J., Yang, D. Y., Kong, H. J., Lee, K. S., Park, S. J. and Kim, D. P., "Fabrication of a crossing manifold micro-mixer built-in a micro-channel," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 607-608, 2009.
4. Stroock, A. D., Dertinger, S. K. W., Ajdari, A., Mezi, I., Stone, H. A. and Whitesides, G. M., "Chaotic Mixer for Microchannels," Science, Vol. 295, pp. 647-651, 2002.
5. Lee, S. W., Kim, D. S., Lee, S. S. and Kwon, T. H., "A split and recombination micromixer fabricated in a PDMS three-dimensional structure," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 16, No. 5, pp. 1067-1072, 2006.
6. Jeon, N. L., Dertinger, S. K., Chiu, W. D. T., Choi, I. S., Stroock, A. D. and Whitesides, G. M., "Generation of solution and surface gradients using microfluidic systems," Langmuir, Vol. 16, No. 22, pp. 8311-8316, 2000.
7. Wang, H., Iovenitti, P., Harvey E. and Masood, S., "Numerical investigation of mixing in microchannels with patterned grooves," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 13, No. 6, pp. 801-808, 2003.
8. Fuard, D., Tzvetkova-Chevolleau, T., Decossas, S., Tracqui, P. and Schiavone, P., "Optimization of poly-di-methyl-siloxane (PDMS) substrates for studying cellular adhesion and motility," Microelectronic Engineering, Vol. 85, No. 5-6, pp. 1289-1293, 2008.
9. Mark, J. E., "Polymer Data Handbook," Oxford University Press, pp. 430-431, 1999.