

## 상하좌우 복합유동 HVM 마이크로 믹서 제작 및 성능평가

### Fabrication and Performance Evaluation of the HVM Micromixer using Horizontal and Vertical Multi-mixing (HVM) Flow Motion

유원설<sup>1</sup>, 김성진<sup>1</sup>, 강석훈<sup>1</sup>, 이동규<sup>1</sup>, 고정상<sup>2</sup>, 박상후<sup>3,✉</sup>  
Won Sul Yoo<sup>1</sup>, Seong Jin Kim<sup>1</sup>, Seok Hoon Kang<sup>1</sup>, Dong Kyu Lee<sup>1</sup>, Jung sang Go<sup>2</sup> and Sang Hu Park<sup>3,✉</sup>

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

2 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

3 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: 2011.6.9 / Revised: 2011.9.13 / Accepted: 2011.11.3

*Recently, the biochip which is a prime representation of NT, IT, BT, as an example of convergence technology, has been frequently mentioned. With the recent rapid advance in biotechnology, these compact devices, such as lab-on-a-chip or u-TAS, have been developed, and more research is needed. These compact devices typically use the micro-channel in order to shed or detach and mix a variety of materials. Specially, in micro-fluidic systems, a mixer is necessary to produce a mixture because only laminar flow occurs at a low-Reynolds number. To solve this problem, HVM a micromixer that induces a horizontal and vertical multi-mixing flow motion, is proposed. The mixing performance was analyzed and verified by optimizing the shape through the CFD analysis and evaluating the structural analysis and the soundness with material properties that are obtained through the basic experiment.*

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

#### 1. 서론

NT, IT, BT의 대표적 융합기술의 한 예로 유전자칩(DNA-Chip)이나 단백질칩(Protein-Chip), 세포칩(Cell-Chip) 등과 같은 다양한 종류의 바이오칩(Biochip)이 거론되고 있다. 이러한 바이오칩은 최근 생명공학의 급속한 발전과 더불어 앞으로 질병 진단의학에 큰 발전을 가져올 것으로 예견되고 있다.<sup>1</sup> 그 중의 최근 마이크로 크기 칩 속의 실험실이라 불리는 랩온어칩(Lab-on-a-chip)이나 마이크로 종합분석시스템(Micro-Total Analysis System,  $\mu$ -TAS)과 같은 바이오칩이나 초소형 디바이스들은 극소

량의 시료를 이용하여 높은 처리속도로 분석 및 합성을 할 수 있고, 사용시약의 절감 및 에너지 감소 등으로 많은 이점이 있어서 바이오분야 뿐만 아니라 화학 분야에서도 많이 활용되며, 활발한 관련 연구가 진행되고 있다.<sup>1</sup> 초소형 디바이스는 일반적으로 다양한 물질을 흘리거나 혼합하거나 분리하기 위한 마이크로 크기의 채널을 이용한다. 그러나 마이크로 채널 속에 흐르는 유체는 유속이 매우 낮고, 레이놀즈 수(Reynolds number)가 낮은 층류(Laminar flow)가 흐르기 때문에 마이크로 채널 속에서 다양한 물질을 혼합하는 경우 일반적으로 높은 혼합률을 위하여 혼합거리가 길어지게 된다.

그래서 혼합효율을 향상시키기 위한 마이크로 믹서 구조에 대하여 다양한 연구가 진행되어 왔다.<sup>2,4</sup>

본 연구에서는 상하좌우 복합유동을 유도하는 마이크로 믹서구조를 제작하여 혼합특성에 대한 평가를 실험적으로 실시하였다.

## 2. HVM 마이크로 믹서 설계 및 제작

이전 연구에서는 상하 분리된 격벽의 적층으로 상하좌우 복합 유동(horizontal and vertical mixing, HVM)을 일으키는 구조를 제안하고 유한요소해석으로 성능을 평가해 왔다.<sup>5</sup> 해석결과 격벽이 30°를 가지는 경우가 가장 혼합효율이 우수한 것으로 평가되었다. 따라서 본 연구에서는 이 결과를 바탕으로 격벽이 30°각도를 가지면서 마이크로 믹서가 내제된 마이크로 채널 형상을 제작이 용이하도록 Fig. 1 과 같이 형상을 기존 연구에서 제시한 것보다 크게 설계하였다.

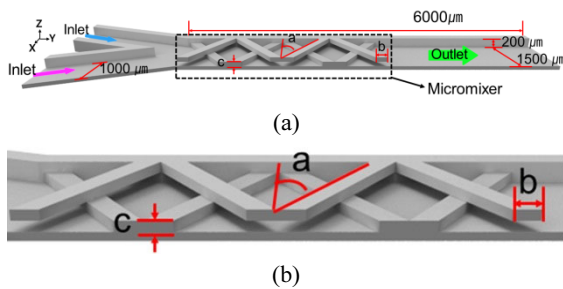


Fig. 1 Shape and dimension of the micromixer that inclined side view without side-wall and cope; (a) Full view of the micromixer, (b) Enlarged view of the mixing region and design parameters: a=30°, b=250 μm, c=100 μm

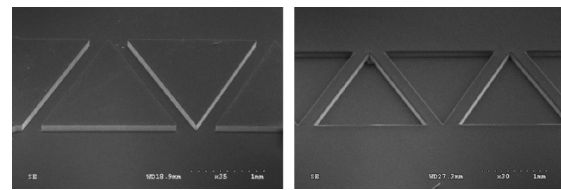
본 연구의 마이크로 채널 및 믹서의 형상은 Y-자형 구조를 가지고 있으며, 입구부(Inlet)의 폭을 1000 μm 로, 출구부 (Outlet)의 폭은 1500 μm 로 하였고 혼합되는 거리는 6000 μm 로 하였다. 그리고 채널의 높이는 200 μm 로 두고 마이크로 믹서의 격벽이 이루는 각도(a)는 30°, 격벽의 폭(b)은 250 μm 로 두고 격벽의 높이(c)는 100 μm 로 하였다.

마이크로 믹서 주요 제작과정은 실리콘 웨이퍼로 몰드 (mold)를 제작한 후 많이 사용되는 PDMS (Polydimethylsiloxane)로 단층의 마이크로 믹서를 제작하여 상층과 하층을 접합하는 방식으로 제작

하였다.

본 연구에서 사용된 복제 캐스팅용 몰드(replica casting mold)는 실리콘 웨이퍼에 포토리소그래피 공정을 이용하여 Fig. 2(a)와 같이 제작하였다.

PDMS 를 이용하여 캐스팅으로 주재(Sylgard 184A)와 경화제(Sylgard 184B)를 10:1 의 체적비율로 경화를 하여 제작된 단층의 마이크로 믹서의 SEM 사진은 Fig. 2(b)와 같다. 그리고 제작된 단층의 마이크로 믹서를 플라즈마로 표면처리를 하여서 접합을 하며 Fig. 3 과 같은 방법으로 제작 및 접합을 한다.



(a) Si mold (b) PDMS replica  
Fig. 2 SEM images for the micromixer single layer

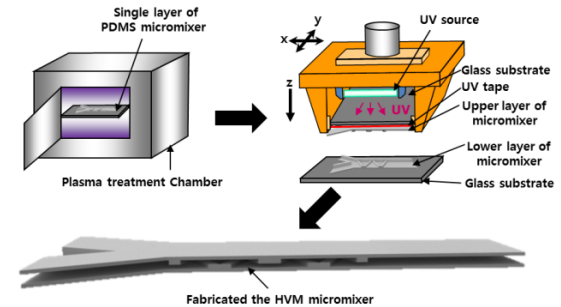


Fig. 3 Schematic diagram of manufacturing process of a micromixer; Fabrication of one-side PDMS mixer layer, plasma treatment, alignment of both mixer layers, and then bonding two layers

## 3. 기초실험

### 3.1 표면처리

PDMS 로 제작된 단층의 마이크로 믹서를 접합을 하여 HVM 믹서를 제작 하기 위해서는 접합부 표면이 소수성을 띄는 PDMS 를 표면처리 하여서 친수성으로 표면특성을 변질하여 O<sub>2</sub> 플라즈마 접합을 한다. 본 연구에서는 표면처리를 하기 위해서 플라즈마 에서(Plasma-finish, GmbH)를 사용하였다. 본 장비는 마이크로웨이브(Microwave, MW)로

플라즈마를 생성하여 PDMS 의 표면에 강한 소수성을 갖는 말단기의 -CH<sub>3</sub> 를 -O, -OH 기로 되도록 표면처리를 한다. 표면처리 및 O<sub>2</sub> 플라즈마접합을 위한 공정 조건으로 마이크로웨이브세기(MW-power)와 노광시간(exposure time), 그리고 산소유량(gas flow oxygen)이 있다.

높은 접합력을 가지는 조건을 찾기 위해서 다구짜 기법을 이용하여 플라즈마 표면처리 조건에 따른 요인효과를 분석하였다. 접합력은 물질의 표면에너지와 접촉각과 관계가 있으며 계면접합 에너지(Work of adhesion,  $W_a$ )는 접합된 두 물질을 분리하기 위해 필요한 일을 나타내는데 표면에너지 ( $\gamma_{LV}$ )와 접촉각 ( $\theta$ )관계는 다음 식(1)과 같이 주어진다.<sup>6</sup>

$$W_a = \gamma_{LV}(1 + \cos \theta) \quad (1)$$

이와 같이, 높은 접착력은 높은 표면에너지를 가지거나 낮은 접촉각을 가지는 방법으로 평가할 수 있다. 다구짜 기법을 이용하기 위하여 공정 조건인 마이크로웨이브세기, 노광시간, 산소유량을 인자로 선정하였으며, 각 인자에 대한 수준은 3 수준을 선택하여 실험을 설계하였다. Table 1 은 인자에 대한 각각의 수준값을 보여주고 있다.

실험의 설계는 실험의 횟수를 줄이기 위하여 직교배열표 (tables of orthogonal arrays)를 이용하였

Table 1 Experimental parameters and levels

Condition	1	2	3
Microwave power (w), (A)	50	100	200
Exposure time (sec), (B)	50	100	200
Gas flow oxygen (ml/min), (C)	50	100	200

Table 2 Orthogonal array table for L9

No	Control factor			Value
	A	B	C	Contact angle (°)
1	1	1	1	90.10
2	1	2	2	50.74
3	1	3	3	54.29
4	2	1	2	58.28
5	2	2	3	81.88
6	2	3	1	94.92
7	3	1	3	90.63
8	3	2	1	100.11
9	3	3	2	95.58

다. 총 9 번의 실험수를 갖도록 하였다. Table 2 는 3 수준계 3 인자 실험을 실시하기 위하여 L9 의 직교배열표를 이용한 플라즈마 처리 조건에 따른 접촉각을 보여주고 있다. 본 실험에서는 실험의 오차를 줄이기 위하여 각 조건마다 3 개의 시편을 만들어 반복 실험을 하였고, 접촉각 측정은 각 시편마다 5 번 측정을 하여 평균값으로 구하였다. 낮은 접촉각을 가지기 위하여 접촉각에 영향을 많이 주는 주요변수를 찾기 위하여 요인효과 분석에 따른 그래프는 아래 Fig. 4 와 같다.

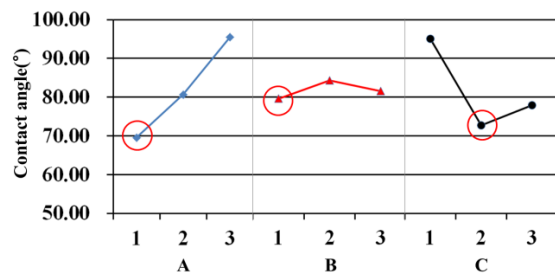


Fig. 4 Graph of the contact angle according to the surface treatment conditions. (A : Microwave power, B : Exposure time, C : Gas flow oxygen)

위의 결과에서 보듯이 접촉각 변화는 노광시간에는 큰 영향이 없지만, 마이크로웨이브세기와 산소유량에 대한 영향이 큼을 알 수 있다. 산소유량이 많으면 진공 챔버 내에 플라즈마의 밀도가 떨어지게 되어 친수처리가 잘 되지 않으며, 산소유량이 너무 적게 되면 -OH 기가 생성이 잘 되지 않는다. 그래서 가장 영향이 큰 마이크로웨이브세기의 변화에 따른 접촉각의 변화를 다시 확인하였다.

위에서 얻어진 노광시간 50 sec, 산소유량 100 ml/min 의 조건으로 고정을 하여 마이크로웨이브세기의 변화에 따른 값을 확인하였다. 세기를 50 W, 100 W, 150 W, 200 W 로 변화를 준 접촉각의 변화값은 Fig. 5 와 같다.

마이크로웨이브세기가 너무 낮은 경우 표면개질의 효과가 없고, 너무 세기가 강할 경우엔 플라즈마가 표면에 약한 식각공정을 일으킨다.<sup>7</sup> 표면에 마이크로 딥플(dimple)을 만들게 되어 오히려 접촉각이 높아진 것으로 사료된다. 딥플로 인한 표면의 변화를 확인하기 위해 AFM (Park system, XE70)을 이용하여 가장 높은 접촉각을 가지는 200 W 의 시편 표면을 Fig. 6 에서 확인하였다.

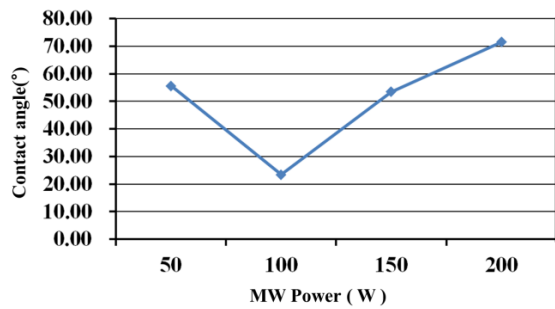


Fig. 5 Graph of the contact angle depending on the MW power with fixed exposure time and gas flow oxygen

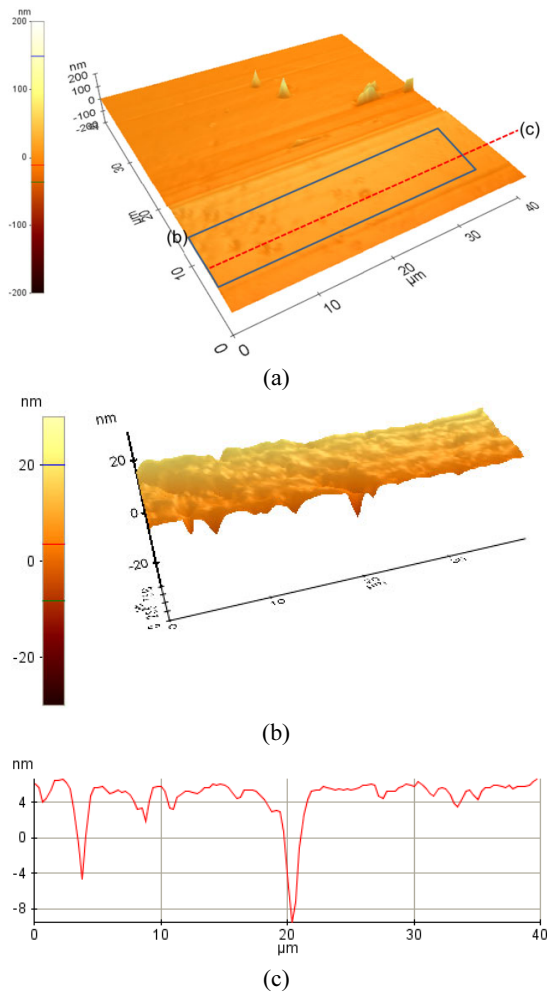


Fig. 6 AFM image of the PDMS surface having plasma treatment in 200 W microwave power condition; (a) large view of the PDMS surface, (b) trimmed the partial PDMS surface, and (c) surface profile

위에서 얻어진 최적의 조건으로 표면처리가 되기 전의 PDMS 의 접촉각(114°)과 최적 조건으로 접착강도가 가장 높은 조건의 접촉각(24°)으로 Fig. 7에서 볼 수 있다.

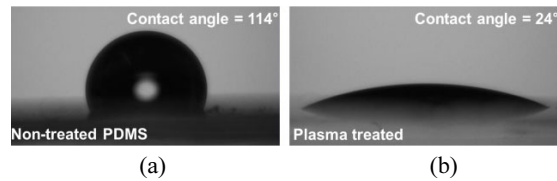


Fig. 7 Image of the contact angle; (a) Non-treated PDMS (114°), and (b) plasma treated PDMS (24°)

### 3.2 표면접합강도 측정

위에 실험에서 얻어진 낮은 접촉각을 가지는 친수처리 조건의 접착강도를 측정 하기 위해 인장 실험을 하였다. 인장실험을 하기 위한 개념도를 Fig. 8 에 나타내었다. 슬라이드글라스에 PDMS 를 스핀코터로 1000 rpm 에 20 초로 코팅하여 약 80 μm 코팅 후 경화하여 위의 조건으로 플라즈마 처리를 한 후에 인장실험 할 시편을 Park<sup>8</sup> 이 제안한 방법으로 준비하여 마이크로 인장시험기 (KST 500)를 이용하여 실험을 하였다.

Fig. 9 는 O<sub>2</sub> 플라즈마로 접합 된 PDMS 간의 접착력을 알기 위하여 실험한 인장실험의 결과곡선을 그린 결과이며, 이에 따라 접착력(Adhesion force)은 1.25 kN 으로 알 수 있다. 접착력에서 접착면적을 나누어서 구해진 접착강도는 2000 kPa 로 나타났다.

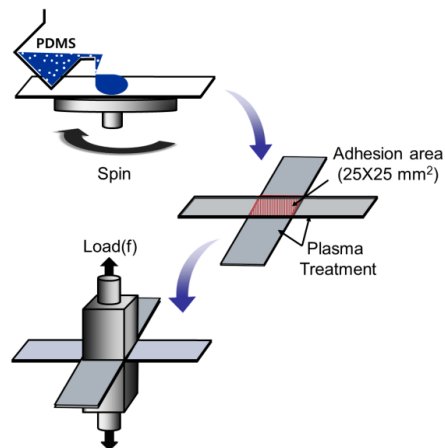


Fig. 8 Schematic diagram of the tensile test for plasma treatment on the PDMS specimen; Fabrication of one-side PDMS mixer layer, alignment of both mixer layers, and then bonding two layers

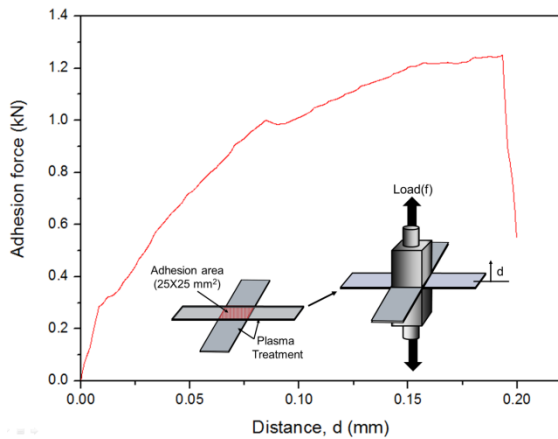


Fig. 9 Graph of the O<sub>2</sub> plasma treated PDMS tensile test result

4. HVM 마이크로믹서 구조강도 건전성 평가

본 연구의 HVM 마이크로 믹서는 단층의 PDMS 를 적층하여 제작하여야 하기 때문에 혼합할 유체를 유입 시 접합된 격벽에 측면으로 압력이 걸리므로 O<sub>2</sub> 플라즈마접합을 하여 제작된 마이크로 믹서의 접합력의 안정성 확인이 필요하다. 그래서 기초 실험을 통해 얻어진 접착강도의 결과를 가지고 본 마이크로 믹서의 구조해석을 하였다.

우선 구조해석에 앞서 CFD-ACE+로 본 HVM 마이크로 믹서에서의 격벽에 걸리는 압력을 Fig. 10 에서 볼 수 있다. 맨 처음 격벽(1st barrier)에 걸리는 압력은 12.78 kPa, 그 다음은 격벽(2nd barrier)은 9.20 kPa, 그 다음(3rd barrier)은 6.03 kPa, 마지막 (4th barrier)은 2.82 kPa 이 걸린다. 해석조건으로는 두 유입구(Inlet)에서 레이놀즈 수(Re) 10 으로 0.1779 m/s 의 조건으로 유입을 하였다. 출구(Outlet)은 대기압 조건으로 주어졌다. 작동유체는 물을 사용하였다.

위의 CFD 에서 얻어진 압력조건을 가지고 상용 툴인 ANSYS V11.0 을 사용하여 구조해석을 하였다. 해석시간을 줄이기 위해서 유입구를 제외한 혼합구간으로부터 6,000 μm 구간으로 축소하여 해석을 수행하였고, 접합 되는 부분으로 실제 유동장 측면으로 5 mm 씩 실제 제작될 형상과 동일하게 모델링 하여 접착조건으로 조건을 주고 해석을 하였다.

실제 사용된 PDMS 로 사용된 PDMS 의 물성치는 Table 3 과 같다.<sup>9,10</sup>

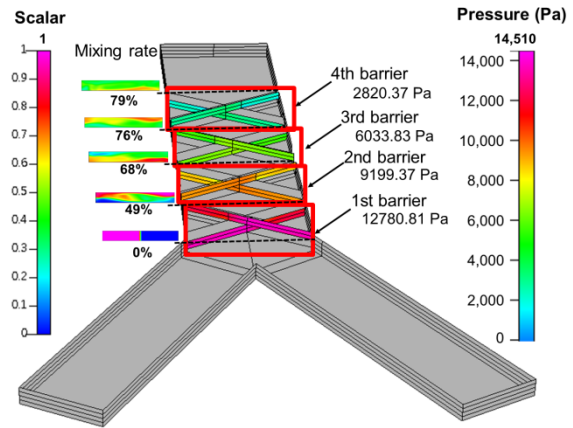
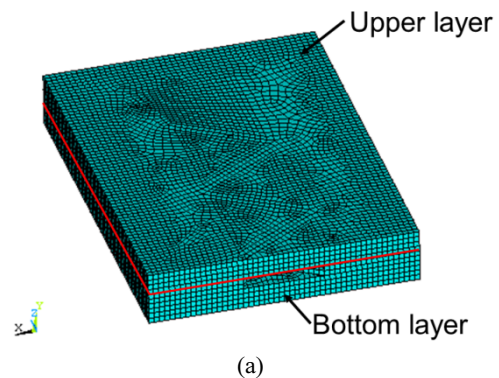


Fig. 10 Pressure distribution and mixing rate on the side of HVM mixing part

Table 3 Properties of PDMS used in numerical analysis

Material Properties (unit)	Value
Young's modulus (kPa)	750
Poisson's Ratio	0.5
Density (g/m <sup>3</sup> )	0.970
Coefficient of friction	0.83
Tensile yield strength (MPa)	2.24

Fig. 11(a,b)에는 상판과 하판의 접합 조건과 유한요소 전체 모델의 형태와 요소를 나타내고 있으며 총 요소 수는 38,930 개 이고 사면체 요소(solid 45)를 사용하였다. 그에 따른 해석결과는 유동방향으로 변위는 최대 13 μm가 되며 최대응력으로 8.93 kPa 이 걸리게 됨을 Fig. 12(a,b) 에서 볼 수가 있다. PDMS 자체의 항복강도보다도 인장실험으로 얻어진 접착강도에 못 미치는 값으로 구조적으로 안전함을 알 수 있다.



(a)



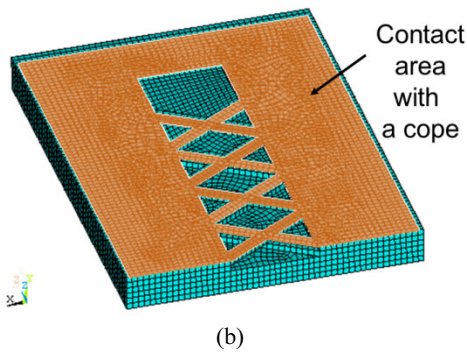


Fig. 11 Mesh on analysis model; (a) Full model an boundary condition, and (b) full model of a bottom layer without a cope

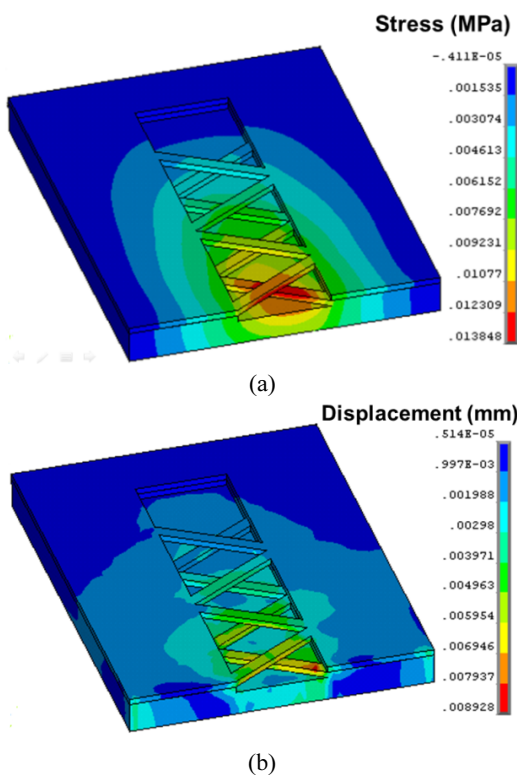


Fig. 12 Structural analysis results; (a) Stress distribution and (b) displacement distribution of flow direction

## 5. HVM 마이크로 믹서 평가

### 5.1 실험장비

제작된 마이크로믹서의 성능을 평가하기 위하여 Fig. 13(a)와 같이 실험장치를 구성하였다. 전체

시스템 구성은 고속카메라, CCD 가 장착된 현미경과 시린지 펌프로 구성되었다. 실험유체로 물과 로다민 비(Rhodamine B) 염료를 혼합한 물을 사용하였고 시린지 펌프(Harvard, PHD 2000)를 이용해 각 유입구(Inlet) 에 동시에 주입하였다. 두 유체는 Fig. 13(b)에서 보이는 바와 같이 각각 주사기(Syringe)에서 시린지 펌프에 의해 채널로 주입이 된다.

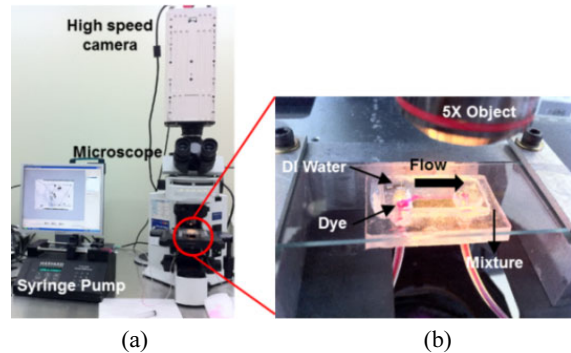


Fig. 13 Experimental setup; (a) the evaluation system, (b) enlarged view of scanning the part of mixing region

### 5.2 측정 및 혼합성능 계산

혼합 효율을 계산하기 위해서는 촬영한 사진의 명암도(intensity)를 필요로 한다. 사진에서 명암도의 표준값을 구하기 위해서는 촬영한 사진 파일을 pgm(portable gray map)로 변환하였다. 변환된 pgm 파일에서는 검은색을 0 의 값으로 흰색을 255 의 값을 가지며 측정된 명암도 값은 그 범위 안에 있다. 혼합이 일어나지 않은 물과 염료의 명암도 값을 측정하여 기준값으로 정하고 혼합효율을 구할 단면에 일정한 간격의 픽셀(pixel)로 나누어 각 픽셀에서 명암도 값을 측정하였다.<sup>4</sup>

측정된 명암도 값은 마이크로 믹서 내의 혼합 실험이 동일한 조건 하에서 수행되었더라도 화면 포착 CCD 카메라 혹은 조명 장치의 상태에 따라 일어날 수 있는 강도의 차이를 보정하기 위해 식 (2)를 사용하여 계산되었다.

$$CI = \frac{(OI - DF)}{(FF - DF)} \quad (2)$$

CI 는 수정된 이미지 (Corrected image)이며, OI 는 원래 이미지 (Original image)의 명암도를 나타내

고, DF 는 어두운 영역 (Dark field) 의 명암도, 그리고 FF 는 밝은 영역 (Flat field)의 명암도를 나타낸다.<sup>11</sup> CI 의 값을 가지고 표준편차를 이용하여 식(3) 과 같이 계산을 한다.

$$\sigma = [ < CI - (CI) >^2 ]^{1/2} \quad (3)$$

그리고 혼합성능은 아래 식(4)와 같다.<sup>12</sup>

$$\text{Mixing rate} = (1 - 2\sigma) \times 100 \quad (4)$$

### 5.3 혼합결과

Fig. 14(a) 는 HVM 마이크로 믹서의 혼합 결과를 현미경으로 촬영한 결과이다. 유입구에서 물과 염료가 섞인 물이 각각 유입이 되어 적층된 격벽의 구조를 지나면서 혼합이 일어남을 보여준다. 각각의 적층된 격벽을 지날 때의 해석적으로 구해낸 Fig. 14(b)에서의 혼합률과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 Fig. 14(a)의 혼합 결과에서 조금씩 생기는 빈 공간(void)은 Fig. 15(a)에서 보듯이 구조적으로 격벽의 적층 시 접합이 일어나는 부분 (Bonding area) 바로 뒤로 유체가 유속이 낮게 나타나는 정체 구간(Zero-flow zone) 이 발생하게 되고 그로 인해 정체(Stagnation)가 생기는 것을 해석적으로 속도 변화장을 상판과 하판으로 나누어 Fig. 15(b)와 15(c)에서 볼 수가 있다. 하지만 최종 혼합을 하는데 큰 영향이 없음을 알 수 있었다.

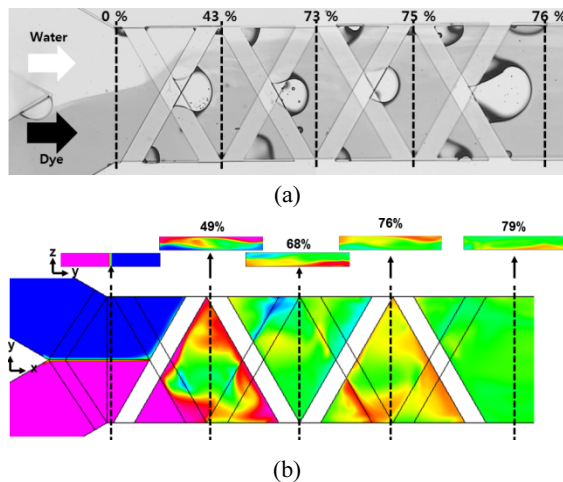
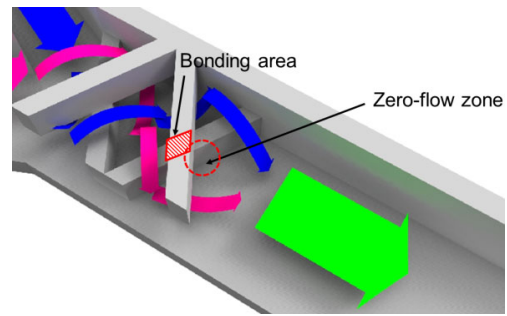
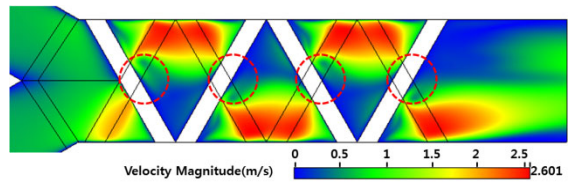


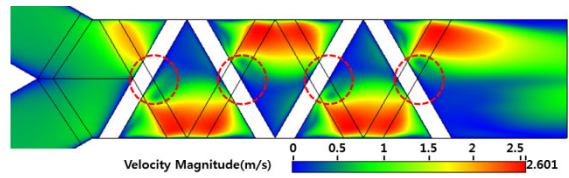
Fig. 14 Mixing result; (a) Experimental result, (b) CFD mixing result (middle layer)



(a)



(b)



(c)

Fig. 15 Define the reason of stagnation by structural problem (a) schematic diagram, (b) Contour of the velocity magnitude the bottom layer(z = 50 μm), (c) Contour of the velocity magnitude the upper layer(z = 150 μm)

### 6. 결론

본 연구에서는 선행 연구로 상하좌우 혼합유동을 일으키는 마이크로 믹서의 설계개념을 가지고 PDMS 를 이용하며 격벽의 적층으로 상하좌우 혼합유동을 일으키는 마이크로 믹서를 제작하였다. 이전 연구<sup>5</sup>에서 평가된 마이크로 믹서와 크기가 다소 차이가 나지만 혼합률은 마이크로 믹서의 격벽이 끝나는 시점에서 실험결과 약 76%로 우수하게 나타났다. 그러나 이것은 실제 제작된 마이크로 채널 형상의 크기가 증가됨에 따라 혼합되어야 할 유량이 같이 증가되고 또한 정체부분에 기공이 발생하여 HVM 믹서의 성능에도 영향을 주어서 이전 연구에서의 88% 수준의 혼합률이 실제 구현되지 않은 것으로 사료된다. 제작된 PDMS 에 최대의 접합강도를 가지는 O<sub>2</sub> 플라즈마친수처리 조건

으로 100 W 의 마이크로웨이브세기와 100 ml/min 의 산소유량과 50 초의 노광시간으로 1.25 kN 의 접착력을 얻을 수 있었다. 그에 따른 CFD 와 구조 해석으로 평가를 통해 O<sub>2</sub> 플라즈마 접합의 구조적 안정성을 평가하였으며 CFD 와 같은 조건으로 혼합 평가를 하여 실험적으로 해석적 검증을 할 수 있었다. 향후 혼합유체의 다른 유입 조건을 가지고 혼합을 일으키는 혼합특성을 평가하여 더 높은 혼합효율을 가지며 유체의 정체가 일어나지 않는 조건을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 지원과제(2011-0002692)로 수행된 연구결과이며, 또한 국가핵심연구센터사업의 지원(2010-0008-276)과 한국연구재단의 해외우수연구센터유치사업(No. K20702001648-10E0100-07010) 지원을 받았다.

## 참고문헌

1. Kang, S. H., "Application of Lab-on-a-chip for single-molecule detection," *News & Information For Chemical Engineers*, Vol. 23, No. 3, pp. 280-284, 2005.
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. 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, No. 5555, pp. 647-651, 2002.
4. 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.
5. Yoo, W. S., Kim, S. J., Kang, S. H., Kim, P. G. and Park, S. H., "A Study on design of an effective micromixer using horizontal and vertical multi-mixing (HVM) flow motion," *Journal of the KSPE*, Vol. 28, No. 6, pp. 751-757, 2011.
6. Hong, J. W., Chang, J. H. and Park, J. H., "Experimental Results of O<sub>2</sub> Plasma Time and Power Treated on PDMS Surface for Improvement of Adhesion between Silicon and PDMS," *Proc. of KIEE Summer Conference*, pp. 1462-1463, 2008.
7. Yoo, K. P., Kang, M. S., Pyo, S. Y., Hong, S. I. and Kim, N. K., "The bonding properties of PDMS - substrate by oxygen plasma treatment," *Proc. of KIEE Summer Conference*, pp. 1914-1916, 2003.
8. Park, S. H., Jeong, J. H., Choi, D. G., Kim, K. D., Altun, A. O., Lee, E. S., Yang, D. Y. and Lee, K. S., "Adaptive bonding technique for precise assembly of three-dimensional microstructures," *Applied Physics Letters*, Vol. 90, No. 23, Paper No. 233109, 2007.
9. Lotters, J. C., Olthuis, W., Veltink, P. H. and Bergveld, P., "The mechanical properties of the rubber elastic polymer polydimethylsiloxane for sensor applications," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 7, No. 3, pp. 145-147, 1997.
10. Mark, J. E., "Polymer Data Handbook," Oxford University Press, pp. 411-431, 1999.
11. Oddy, M. H., Santiago, J. G. and Mikkelsen, J. C., "Electrokinetic Instability Micromixing," *Anal. Chem.*, Vol. 73, No. 24, pp. 5822-5832, 2001.
12. Baek, S. and Song, S., "Fabrication of a staggered herringbone mixer using inclined UV lithography," *Proceeding of The 12<sup>th</sup> Korea MEMS Conference*, pp. 75-76, 2010.