

# 미소블록에 의한 교차 회전유동과 미소유로에 의한 박층유동을 이용한 정적 혼돈 미소유체 혼합기에 관한 연구

장 성 환\* · 조 영 호†

(2004년 6월 4일 접수, 2004년 10월 21일 심사완료)

## Static Chaos Microfluid Mixers Using Alternating Whirls and Laminations

Sunghwan Chang and Young-Ho Cho

**Key Words :** Alternating Whirl(교차 회전), Lamination(유동박층화), Microblock(미소블록), Micromixer(미소혼합기), Static Mixer(정적 혼합기), Chaos Flow(혼돈유동)

### Abstract

We have deigned, fabricated and compared four different types of static chaos microfluid mixers, including the mixers using straight channel flow, microblock-induced alternating whirl flow, microchannel-induced lamination flow, and combined alternating whirl-lamination flow. Among them, the alternating whirl-lamination (AWL-type) mixer, composed of 3-D rotationally arranged microblocks and dividing microchannels fabricated by conventional planar lithography process, is effective to reduce the mixing length over wide flow rate ranges. We characterize the performance of the fabricated mixers, through the flow visualization technique using phenolphthalein solution. We verify that the AWL-type microfluid mixer shows the shortest fluid mixing length of 2.8mm~5.8mm for the flow rate range of  $Re=0.26\sim 26$  with the pressure drop lower than 5kPa. Compared to the previous mixers, requiring the mixing lengths of 7~17mm, the AWL-type microfluid mixer results in the 60% reduction of the mixing lengths. Due to the reduced mixing lengths within reasonable pressure drop ranges, the present micromixers have potentials for use in the miniaturized Micro-Total-Analysis-Systems ( $\mu$ TAS).

### 1. 서 론

최근 멤스(MEMS) 기술에 의해 소형화된 미소생화학분석시스템( $\mu$ TAS: Micro Total Analysis Systems)은 적은 양의 시료로 생화학 검출이 가능하고, 분석시간 단축이 가능하다는 장점을 지니고 있다. 이러한 미소생화학분석시스템의 성능 향상과 소형화를 위해서는 시료의 혼합에 필요한 시간과 혼합기의 크기를 줄이는 것이 매우 중요한 기술적인 문제로 부각되고 있다.

특히 미소유로 내부 에서의 유동은 대부분 층

류의 성격을 나타내므로 자연적인 난류발생에 의한 유체 혼합<sup>(1)</sup>은 거의 불가능하다. 또한 확산에 의한 물질 혼합의 경우, 유로의 크기가 100 $\mu$ m 정도만 되어도 확산에 의한 질량전달 속도<sup>(2)</sup>가 현저히 떨어지게 된다. 이러한 이유로 인해 미소유체의 혼합 효율성 감소는 물론 혼합에 필요한 유로의 길이가 미소 생화학분석기 전체 크기의 상당부분을 차지하게 되는 문제가 되고 있다.

최근 미소혼합기의 효율성 증대와 크기 축소를 위하여 외부 에너지를 이용하여 인위적으로 난류에 가까운 교란을 주는 능동형 혼합기(active mixer)<sup>(3)</sup>와 미소유로의 형성 변화를 통한 정적 혼합기(static mixer)<sup>(1,4,5)</sup>에 관한 연구가 진행되고 있다. 능동형 혼합기는 혼합 길이를 줄일 수 있는 장점이 있으나, 공정이 비교적 복잡하고

† 책임자, 회원, 한국과학기술원 바이오시스템학과 및 기계공학과, 디지털나노구동연구단

E-mail : nanosys@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-8691 FAX : (042)869-8690

\* 한국과학기술원 바이오시스템학과, 디지털나노구동연구단

다른 소자들과의 집적성이 떨어지며, 혼합을 위해 별도의 외부 에너지를 필요로 하는 단점이 있다. 한편 정적 혼합기에 관한 연구로는 분기 유로를 이용한 유동 박층화(lamination)<sup>(5)</sup> 및 확산 효과를 증가시키는 방식과 회전 유로를 이용한 유동의 교란 증대 및 혼돈유동(chaotic flow)<sup>(1,4)</sup>을 이용하는 방식 등이 제안되었다. 정적 혼합기는 능동형 혼합기에 비해 공정이 비교적 간단하고, 다른 소자들과의 집적성이 좋다는 장점이 있는 반면, 혼합에 필요한 유량 조건이 넓은 영역에 걸쳐 검증되지 않았거나,<sup>(5)</sup> 혼합 길이가 비교적 긴 단점<sup>(4)</sup>이 있다. 특히 회전 유로에 의해 혼돈 유동을 만들어내는 기존의 연구<sup>(4)</sup>는 바닥면의 배치된 경사진 홈에 의해서만 회전 유동이 유도되기 때문에 회전에 의한 혼돈 유동이 일어나는데 필요한 유로의 길이가 길고, 유속이 빨라질수록 혼합 길이가 7~17mm 정도로 길어지는 단점이 있다.

본 연구에서는 바닥면의 경사진 홈에 의해 회전 유동을 만들어 내는 기존의 정적 혼합기와는 달리, 미소블록을 이용하여 교차적인 회전 유동을 만들어 내는 새로운 회전 유동 생성 방법을 제시한다. 또한 미소블록에 의해 유체의 회전 방향이 반시계-시계방향으로 교차적으로 형성되는 혼돈 유동<sup>(6)</sup>을 만드는 방식(AW-type)과 AW-type과 유동 박층화를 함께 교차적으로 이용하는 방식(AWL-type)을 응용하여 비교적 넓은 유량조건에서 혼합에 필요한 유로의 길이를 감소시킬 수 있는 새로운 형태의 정적 유체혼합기를 개발하였으며, 미소펌프에 의해 가해질 수 있는 유량범위 10 $\mu$ l/min~100 $\mu$ l/min ( $-1 < Re < 10$ )내에서 제작된 미소혼합기의 성능을 실험적으로 검증하였다.

## 2. 구조 및 동작원리

본 연구에서 제안한 미소혼합기의 특징 중 하나는 유동의 방향을 따라 미소유로내 미소블록을 회전방향에 따라 번갈아 배치한 구조에 있다. 따라서 AW-type은 반시계-시계방향의 회전 유동을 일으키는 회전 유로들의 교차적인 조합으로 구성되고, AWL-type은 반시계-시계방향의 교차 회전 유로 사이에 기존연구<sup>(5)</sup>에서 제안된 유동의 박층화를 피하는 분기 유로들을 삽입하여 반시계방향의 회전 유동, 수평방향의 유동 박층화, 시계방향의 회전 유동, 수직방향의 유동 박층화가 순차적으로 일어나게 한 것이다.

Fig. 1은 미소블록에 의해 유체의 진행방향에

대해 반시계 방향의 회전유동이 일어나도록 설계된 회전유로이다. Fig. 2는 Fig. 1의 유로를 상, 하판 구조로 만들어 단면을 도시한 것이다. 미소유로내의 미소블록들은 Fig. 2에 도시한 바와 같이 유체의 진행방향에 따라 단면 a'-a, b'-b, c'-c, d'-d 에서 각각 유로 단면이 반시계 방향으로 번갈아 어긋난 구조를 가지게 설계하였다. 또한 유로의 단면적을 일정하게 유지하기 위해 미소블록에 의해 유로가 작아진 만큼, 수평방향으로 추가적인 빈 공간을 형성함으로써 유로의 단면적을 일정하게 유지하면서 반시계 방향의 회전 유동이 일어날 수 있게 하였다. 한편 Fig. 3은 유체의 진행방향에 대해 시계방향으로 회전 유동이 일어나도록 설계한 회전 유로이며, 유동 방향에 따른 단면의 변화는 Fig. 4에 도시한 바와 같다.

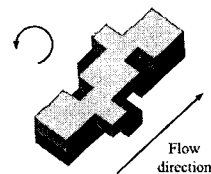


Fig. 1 Mixing channel for CCW-direction whirls, where the brighter color indicates the upper plate structure and the darker color indicates the lower plate structure

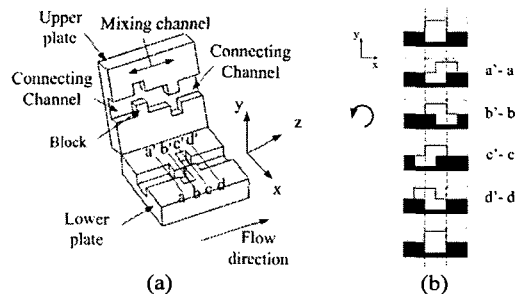


Fig. 2 Cross sections of the CCW mixing channel of Fig. 1: (a) Horizontal cross section; (b) Vertical cross section across the locations at a'-a, b'-b, c'-c, and d'-d. The brighter parts are the upper plates and the darker parts are the lower plates

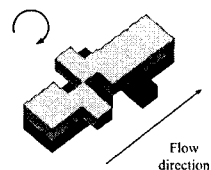
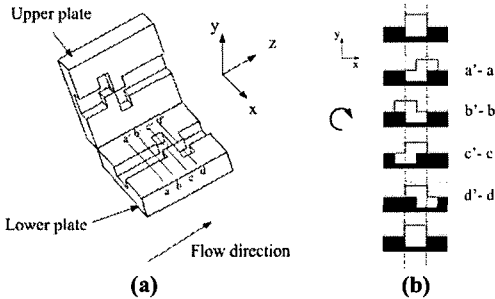
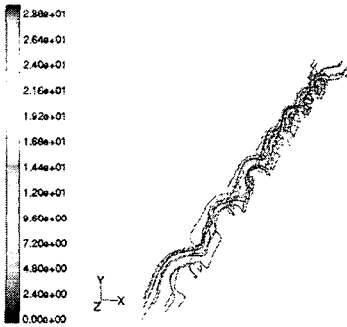


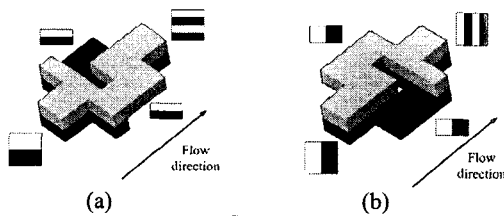
Fig. 3 Mixing channel for CW-direction whirls, where the brighter color indicates the upper plate structure and the darker color indicates the lower plate structure



**Fig. 4** Cross sections of the CW mixing channel of Fig.3: (a) Horizontal cross section; (b) Vertical cross section across the locations at a'-a, b'-b, c'-c, and d'-d, where the brighter parts are the upper plates and the darker parts are the lower plates



**Fig. 5** Streamline simulation in CW mixing channel, showing particle trajectory for laminar and steady-state condition



**Fig. 6** Dividing channels<sup>(5)</sup>, where the brighter color indicates the upper plate structure and the darker color denotes the lower plate structure with the black and white indication of two different fluids: (a) Horizontal dividing channel; (b) Vertical dividing channel

미소블록에 의한 회전유동의 발생은 Fig. 5와 같이 시뮬레이션을 통해 검증하였다. Fig. 5는 회전유로 내에서 유체입자의 궤적을 상용프로그램인 Fluent를 통해 시뮬레이션 한 결과로서, 미소블록에 의해 서로 다른 유체 입자들이 유로를 따라 시계 방향으로 회전하고 있음을 확인할 수 있다.

**Table 1** Test structures\*

|          | Schematic view | Mixing mechanism                         |
|----------|----------------|--|
| S-type   |                | Diffusion                                |
| L-type   |                | Diffusion, Lamination                    |
| AW-type  |                | Diffusion, Alternating whirl             |
| AWL-type |                | Diffusion, Alternating whirl, Lamination |

\*Total length of 6.2mm

Fig. 6은 수평방향 또는 수직방향으로 유동의 박층화<sup>(5)</sup>를 일으키게 하는 분기 유로를 나타낸다. 유로가 상, 하로 나누어져 유로를 따라 유체가 쪼개진 후 다시 만나므로 서로 다른 유체끼리 맞닿는 면적이 늘어나게 된다. 검은 색과 흰색은 서로 다른 유체를 의미하는 데 유동의 방향에 따라 Fig. 6(a)에서는 유동의 박층화가 수평으로 일어나고, Fig. 6(b)에서는 유동의 박층화가 수직으로 일어나게 된다.

### 3. 설계 및 제작

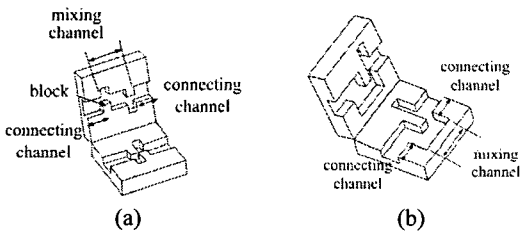
본 논문에서 제안하는 AW-type과 AWL-type의 미소혼합기 성능을 검증하기 위해 곧은 유로로 구성된 S-type, 수직 방향의 유동박층화를 일으키는 L-type의 혼합기를 추가적으로 설계하였으며, 설계된 혼합기의 종류 및 구조는 Table 1에 정리하였다. 먼저 S-type의 경우 유체의 혼합은 오직 확산에 의해서만 일어나며, L-type은 유동의 박층화와 확산이 주된 혼합 메커니즘이다. 반면 AW-type은 미소블록에 의한 교차 회전 유동과 확산에 의해 혼합이 일어나고, AWL-type은 미소블록에 의한 교차 회전유동, 분기 유로에 의한 유동의 박층화 그리고 확산에 의해 혼합이 일어난다.

미소유체 혼합기를 구성하는 단위요소의 구조와 세부 치수는 Fig. 7과 Table 2에 정리한 바와 같다.

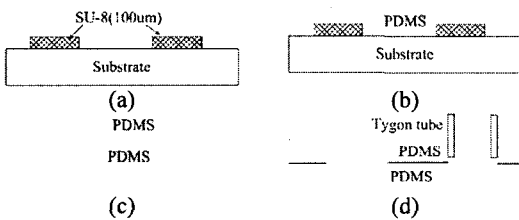
미소유체 혼합기를 제작함에 있어서 본 논문의 3차원 회전유로 구조는 통상적인 평면 리소그래피<sup>(6,7)</sup>를 이용한 상판과 하판 몰드로 형성할 수 있도록 고안되었다. 상판과 하판의 구조들은 Fig. 8에 도시한 바와 같이 SU-8을 몰드로 한 PDMS 몰딩 프로세스를 통해 제작하였으며, 이들의 접합을 통해 3차원 유로를 가진 미소유체 혼합기를 제작하였다.

**Table 2** Measured dimensions of the micromixers

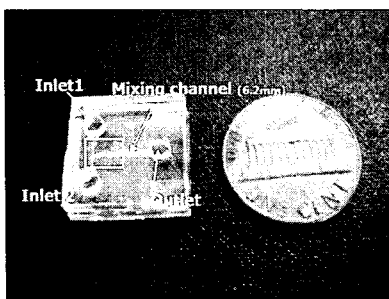
|   |  |
|---|--|
| Channel cross-section, (width × height)     | $(205 \pm 5.2) \mu\text{m} \times (196 \pm 9.0) \mu\text{m}$                               |
| Whirl block size, (width × height × length) | $(95 \pm 5.2) \mu\text{m} \times (98 \pm 4.5) \mu\text{m} \times (95 \pm 5.4) \mu\text{m}$ |
| Mixing channel length                       | $395 \pm 5.3 \mu\text{m}$  |
| Connecting channel length                   | $195 \pm 5.2 \mu\text{m}$  |
| Total channel length                        | 6.2 mm   |



**Fig. 7** Elements of (a) the whirl channel and (b) the vertical lamination channel



**Fig. 8** Microfabrication process



**Fig. 9** Overview of fabricated device

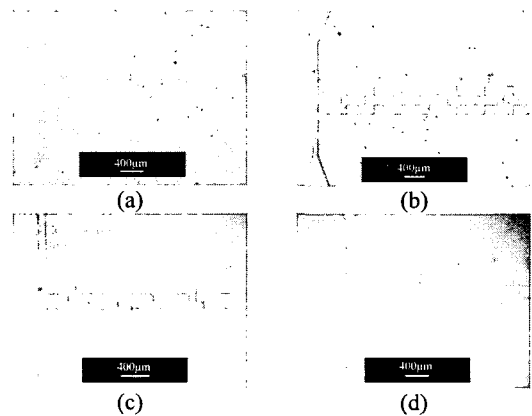
Fig. 9는 제작된 미소유체 혼합기를 나타낸다. 두 개의 입력단에 연결된 각각의 튜브를 통해서로 다른 유체가 주입되면, 혼합유로를 통과하면서 유체가 혼합되어 출력단에 연결된 튜브를 통해 혼합된 유체가 빠져 나온다.

Fig. 10은 Fig. 9의 사각부분을 확대한 것으로 총 4종의 미소유체 혼합기 각각의 구성요소를 나타낸다. Fig. 10의 사진 내의 숫자는 각 혼합기를 구성하고 있는 단위요소들의 개수를 나타내는 일련번호이며, 이는 단위요소에서의 혼합정도를 관찰하고 혼합길이를 측정하는 기준점으로 활용하기 위해 기재한 것이다.

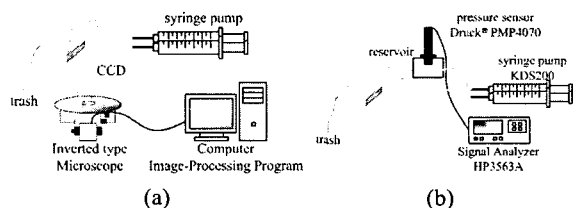
#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 실험장치 및 유체 혼합 가시화

Fig. 11은 제작된 미소유체 혼합기의 성능을 시험하기 위한 실험 장치 구성을 나타낸다. 주사기 펌프를 통해 미소유체 혼합기의 두 입력단에 서로 다른 유체를 주입하며, 입력단과 주사기 펌프는 튜브로 연결하였다.



**Fig. 10** Photographs of the fabricated devices: (a) S-type; (b) L-type; (c) AW-type; (d) AWL-type



**Fig. 11** Experimental setup: (a) Color intensity measuring apparatus; (b) Pressure drop measuring apparatus

할로젠 광원이 내장된 inverted microscope와 CCD 카메라를 통해서 유체의 혼합 정도를 촬영한 후, Fig. 11(a)에서와 같이 컴퓨터에서 촬영된 영상을 화상처리 하였다. Fig. 11(b)는 압력센서를 이용하여 연결 튜브에서의 압력손실이 포함된 입력단과 출력단의 압력차를 측정하는 장치를 나타낸 것이다.

유체의 혼합 정도를 가시화하기 위해 페놀프탈레인 pH 지시약<sup>(1)</sup> 을 사용하였다. 페놀프탈레인 용액은 pH가 8이 넘게 되면 색깔이 투명하다가 붉은 색으로 바뀌는 특징이 있다. 이러한 성질을 이용하여 각 입력단에 페놀프탈레인이 0.1mol/l 녹아 있는 에탄올 용액과 NaOH이 0.3mol/l 녹아 있는 에탄올 용액(pH≃13)을 주입하여 각각의 미소유체 혼합기 안에서의 혼합 정도를 촬영한다.

Fig. 12는 각 입력단에서 240μl/min의 유량(미소유체 혼합기 내부의 유량은 480μl/min, 즉 두 입력단에서 각 혼합기로 유체가 들어가는 부분에서 Re=26)으로 페놀프탈레인 용액과 NaOH 용액을 주입했을 때, 각 미소유체 혼합기에서의 혼합 결과이다. 각 미소유체 혼합기에 대해 동일한 길이를 가지는 단위혼합요소(유로위에 적혀있는 숫자 참조)를 지났을 때의 혼합의 정도에 따라 붉은색의 정도가 다르게 나타난다. S-type의 경우, 두 유체가 만난 부분만이 붉은색 띠로 나타나 유체 혼합이 거의 일어나지 않았으며, L-type과 AW-type, AWL-type의 경우 붉은 색이 각 혼합기 내부에서 전반적으로 나타나 유체 혼합이 일어난 것으로 보이지만 눈으로 구분하기는 힘든 수준이며, 정량적으로 혼합정도를 평가할 필요가 있다.

4.2 Mixing index

본 연구에서는 유체의 혼합정도를 정량화하기 위하여 완전히 혼합이 일어난 상태의 붉은색 강도로부터의 표준화된 편차를 mixing index로 사용하였다. 먼저 조명의 밝기에 따른 색 강도의 차이를 없애기 위하여 각 혼합기에서 측정된 붉은색의 강도를 아래 식 (1)을 이용하여 표준화 하였다.

$$I_{ni} = \frac{I_i - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad (1)$$

상기 식 (1)에서  $I_{min}$  은 붉은색의 최소 강도,  $I_{max}$  는 붉은색의 최대 강도,  $I_i$  는 화소의 붉은색의 강도,  $I_{ni}$  는 표준화된 붉은색의 강도를 뜻한

다.  $I_{min}$  은 NaOH 용액과 페놀프탈레인용액이 섞이지 않은 미혼합 용액의 붉은색 강도,  $I_{max}$  는 미리 NaOH 용액과 페놀프탈레인용액이 잘 혼합된 표준용액의 붉은 강도를 각각 측정하는 것이다. 표준화된 붉은색 강도는 0 에서 1 까지를 나타내며, 표준화된 값이 1 일때, 완전한 유체 혼합이 일어난 것을 의미한다. 식 (1)의 표준화된 측정 강도와 완전히 혼합이 일어난 붉은색의 강도간의 표준화된 편차는 식 (2)와 같이 나타난다.

$$D_n = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{ni} - 1)^2} \quad (2)$$

식 (2)에서  $D_n$ 은 완전히 혼합이 일어난 붉은색 강도로부터의 표준화된 편차,  $N$ 은 화소의 수,  $I_{ni}$  는 표준화된 붉은색의 강도를 말한다. 실험을 통해 촬영한 사진의  $N$ 은 적어도 9,000 이상이 되게 하였다.

Fig. 13은 미소유체 혼합기 내부의 유량이 각각 4.8μl/min, 24μl/min, 48μl/min, 240μl/min, 480μl/min, 즉, Re가 각각 0.26, 1.3, 2.6, 13, 26일 때의  $D_n$ 이다.

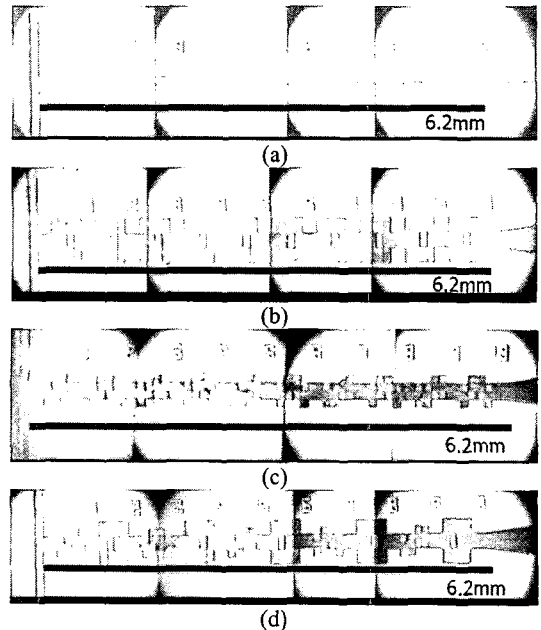


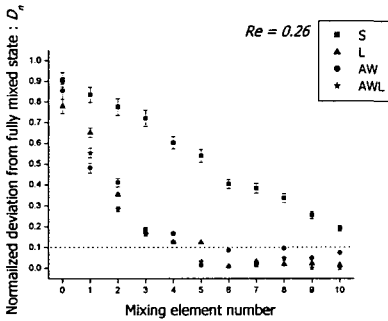
Fig. 12 Experimental mixing results at the input flow rate of 240μl/min (Re=26): Phenolphthalein visualization experiments of (a) S-type; (b) L-type; (c) AW-type; (d) AWL-type

Fig. 13에서 x축은 Fig. 10, Fig. 12에 나타난 혼합 단위요소 수를 나타내고, y축은 표준화된 붉은색 강도를 의미한다. Fig. 13의 x축 값을 단위 요소의 길이를 이용하여 환산하면 유로의 길이가 된다. Fig. 13에서 각각의 미소유체 혼합기의 특성이 유량조건에 따라 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 각 미소유체 혼합기별로 유량에 따른 혼합길이를 알 수 있다.

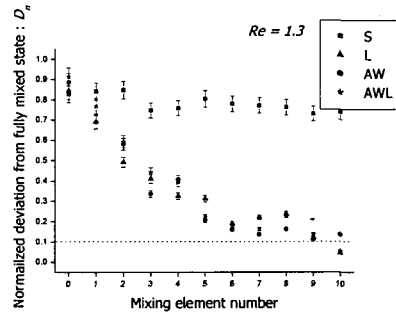
**Table 3** Experimental mixing lengths\* of micromixers, based on the criteria of the normalized color deviation from the fully mixed state

|           | S-type      | L-type       | AW-type      | AWL-type |
|-----------|-------------|--------------|--------------|----------|
| $Re=0.26$ | $>6.2mm$    | $2.8mm$      | $2.8mm$      | $2.8mm$  |
| $Re=1.3$  | $\gg 6.2mm$ | $5.8mm$      | $\sim 6.2mm$ | $5.8mm$  |
| $Re=2.6$  | $\gg 6.2mm$ | $5.2mm$      | $\sim 6.2mm$ | $5.2mm$  |
| $Re=13$   | $\gg 6.2mm$ | $\sim 6.2mm$ | $4.6mm$      | $5.8mm$  |
| $Re=26$   | $\gg 6.2mm$ | $>6.2mm$     | $4.6mm$      | $4.6mm$  |

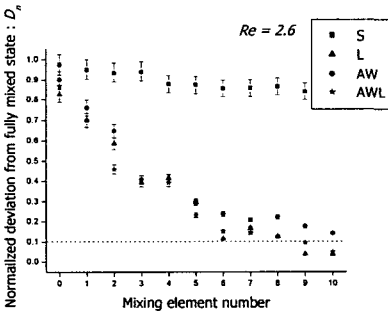
\* Measurement uncertainty =  $\pm 0.4mm$



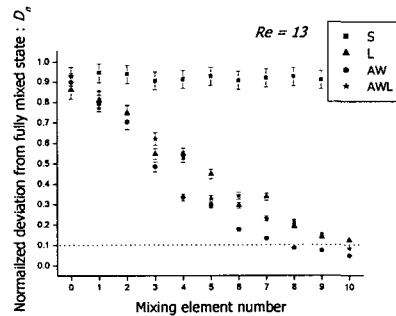
(a)  $Re=0.26$



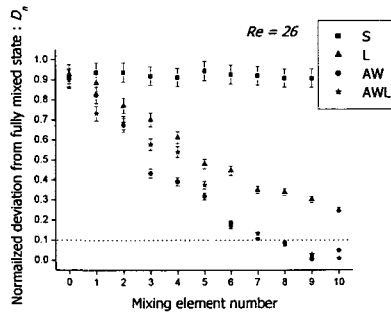
(b)  $Re=1.3$



(c)  $Re=2.6$



(d)  $Re=13$



(e)  $Re=26$

**Fig. 13** Normalized deviation of the mixed states from the fully mixed state, measured from four different mixer types at five different Reynolds numbers of 0.26, 1.3, 2.6, 13 and 26

4.3 Mixing length

Fig. 13에서 측정된 표준화된 편차  $D_n$ 을 근거로 하여 혼합 길이(mixing length)를 구하고, 이를 통해 각 미소유체 혼합기들의 혼합 길이와 유량 범위에 관한 성능을 평가해 보았다. 혼합 길이는 90% 이상이 혼합이 일어나는 데 필요한 유로의 길이로 정의하였다. 따라서 표준화된 편차  $D_n$ 이 0.1 보다 작아지는 지점까지의 유로길이를 혼합 길이로 하였다.

각 미소유체 혼합기의  $Re$  조건에 따른 혼합 길이를 Table 3에 정리하였다.  $Re < 0.26$ 의 낮은  $Re$  영역에서는 L-, AW-, AWL-type의 세 경우 모두, 미소유체 혼합기의 내부 구조에 상관 없이 확산에 의한 영향으로 유체 혼합이 잘 되었으며,  $Re$ 가 증가함에 따라 각 미소유체 혼합기의 혼합 길이도 길어지는 경향을 나타내었다. 각 혼합기 종류별 혼합길이 및 특성은 다음과 같다.

S-type의 경우 오직 확산에 의한 혼합만 일어나는데, 실험한  $Re$  범위에서는 혼합길이가 6.2 mm 이내로 나타나지 않아 확산에 의한 혼합만으로는 한계가 있음을 알 수 있다. L-type의 경우  $Re < 2.6$ 에서는 유동의 박층화로 인해 확산의 효과를 증가되어 혼합길이가 2.8mm~5.8mm으로 나타났으나,  $Re > 13$  이상에서는 유동이 박층화 될지라도 확산이 잘 되지 않아, 혼합 길이가 6.2mm 이내로 나타나지 않았다. AW-type의 경우, 반대로  $\sim 1.3 < Re < 13$ 에서 혼합 길이가 대략 6.2mm으로 혼합 길이가 다소 길어졌으나,  $Re > 13$ 에서는 4.6mm로 다시 혼합 길이가 짧아지는 것을 발견할 수 있다. 이는 실험한  $Re$  범위에서 L-type에서는 유속의 증가와 함께 확산의 영향이 줄어들므로 유체 혼합이 줄어들지만, AW-type에서는 확산의 영향이 줄어들어도 혼돈유동에 의한 혼합이 L-type에 비해 빨리 활성화되기 때문으로 보인다. 즉 S-, L-type에 비해 AW-type은 확산의 영향을 덜 받는다. 한편 AWL-type은 L-type과 AW-type의 혼합 방법을 반씩 이용한 방법으로, 두 혼합기의 장점을 실험한 전체  $Re$  범위에서 고루 갖추는 것으로 나타났고, 혼합길이가 2.8mm~ 5.8mm로 넓은  $Re$  조건에서 혼합이 유효했다. AW-type과 마찬가지로 확산의 영향을 S-, L-type에 비해 적게 받음을 알 수 있다.

혼합 길이는 다음과 같이 대류에 의한 물질전달과 확산에 의한 물질전달의 비율인  $Pe^{(4)}$ 를 통해서도 고찰할 수 있다.

$$Pe = \frac{Ul}{D} \tag{3}$$

식 (3)에서  $Pe$ 는 Peclet 수,  $U$ 는 유체의 속도,  $l$ 은 유로의 특징을 나타내는 길이,  $D$ 는 확산 계수를 의미한다. 일반적인 화학 약품의 경우 확산 계수가 대략  $10^{-9} m^2/s$  정도 되기 때문에  $Pe$ 는 대략  $\sim 10^2 < Pe < \sim 10^4$  정도이다. 그러나 혼합하는 유체가 생물학적인 입자들을 가지고 있는 경우는 확산 계수가 대략  $10^{-12} m^2/s$  정도로 작아지게 되며, 따라서  $Pe$ 은  $10^3$  가량 커지게 된다.

같은  $Re$ 수에서도, 확산 계수가 낮은 경우는  $Pe$ 가 커지게 되고, 확산에 의한 유체 혼합은 작아진다. 따라서 이상적인 미소유체 혼합기는 확산이 잘 안 되는 높은  $Re$ ,  $Pe$ 영역에서도 혼합이 잘 일어나야 할 것이다.

이런 관점에서 본 연구에서 제안하는 AW-, AWL-type은 확산의 영향을 덜 받기 때문에 S-, L-type에 비해 낮은  $Re$ ,  $Pe$  뿐 아니라 높은  $Re$ ,  $Pe$ 에서도 혼합이 잘 일어나며, 기존의 혼돈유동을 이용한 혼합기의 혼합 길이인 7~17mm<sup>(4)</sup>에 비해 혼합 길이를 60%이상 줄일 수 있는 장점이 있다.

4.4 Pressure drop

Fig. 14는 제작된 4종의 미소유체 혼합기들에서 유량에 따른 압력손실을 측정된 결과이다. Fig. 14에서 S-type, L-type, AW-type, AWL-type 각 미소유체 혼합기들은 본 실험에서 사용한 최대 유량 조건인  $Re=26$  (480 $\mu$ l/min, 각 입력단의 유량: 240 $\mu$ l/min)에서 1.3kPa, 3kPa, 7kPa, 5kPa 미만의 압력손실이 나타났다. AWL-type은 L-type과 AW-type을 반씩 섞어 놓은 형태이므로 두 혼합기 각각의 압력손실의 평균값에 해당하는 압력손실을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 제안한 AW-type과 AWL-type 미소유체 혼합기는 기존의 방법인 S-type과 L-type에 비해 혼합 길이가 짧아진 반면 압력손실은 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

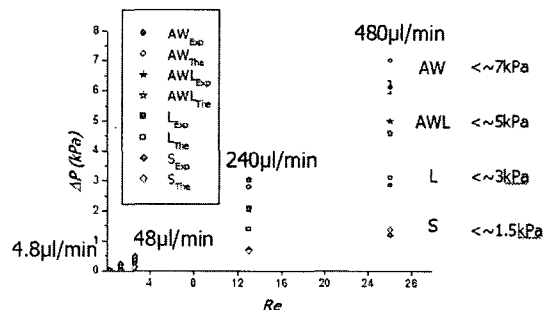


Fig. 14 Pressure drops of test structures: numerical and experimental results

하지만, 미소유체 혼합기의 소형화 측면에서 압력 손실 보다 혼합 길이의 축소가 더 중요함을 의미하고, AW-type과 AWL-type 미소유체 혼합기가 보이고 있는  $480\mu\text{l}/\text{min}$ 의 유량조건에서  $7\text{kPa}$ 의 압력 손실은 기존의 미소펌프<sup>(8)</sup>를 압력원으로 사용하기에 무리가 없는 수준이다.

## 5. 결론

본 논문에서는 미소블록에 의한 회전 유동을 이용하여 새로운 미소유체 혼합 방법을 제시하고, 통상적인 평면 리소그래피 공정과 PDMS 몰딩으로 제작이 가능한 3차원 구조의 정적 혼돈 미소유체 혼합기를 설계, 제작하여 그 성능을 실험적으로 측정하였다. 제안한 미소유체 혼합기인 AW- 및 AWL-type의 성능 검증을 위하여 기존의 미소유체 혼합기인 S- 및 L-type과 함께 총 4종의 미소유체 혼합기를 설계, 제작하고 각각의 혼합길이와 압력 손실을 측정하여 상호 비교하였다. 그 중 AW-type은 상대적으로 유량이 큰 영역( $Re > 13$ )에서 혼합이 잘 일어났으며, AWL-type은 비교적 넓은 유량 영역( $0.26 < Re < 26$ )에서  $2.8\sim 5.8\text{mm}$ 의 최소 혼합 길이와  $5\text{kPa}$ 의 최대 압력손실을 보였다. AW-type과 AWL-type 모두 기존 혼합기에 비해 낮은 확산계수를 가지는 생물학적 입자가 포함된 유체 혼합에서도 효과적이며, 기존 혼합기들이 필요로 하는  $7\sim 17\text{mm}$ 의 혼합길이<sup>(4)</sup>를 60%이상 줄일 수 있다. 따라서 제안한 미소유체 혼합기는 실용적 압력 손실 내에서 혼합 길이의 감소로  $\mu\text{TAS}$ 의 크기를 줄이는데 효과적임을 실험적으로 입증하였다.

## 후기

본 연구는 과학기술부의 창의적연구진흥사업의 일환인 "생체모사기법을 응용한 디지털나노구동기관의 구현에 관한 연구" 과제의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Liu, R.H., Stremler, M.A., Sharp, K.V., Olsen, M.G., Santiago, J.G. and Adrian, R.J., 2000, "Passive Mixing in a Three-Dimensional Serpentine Microchannel," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 9, pp. 190~196.
- (2) Brody, J.P. and Yager, P., 1997, "Diffusion-Based Extraction in a Microfabricated Device," *Sensors and Actuators*, Vol. A58, pp. 13~18.
- (3) Deval, J., Tabeling, P. and Ho, C.-M., 2002, "A Dielectrophoretic Chaotic Mixer," *Proc. of IEEE Inter. Conf. Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 36~39.
- (4) Stroock, A.D., Dertinger, S.K.W., Ajdari, A., Mezic, I., Stone, H.A. and Whitesides, G.M., 2002, "Chaotic Mixer for Microchannels," *Science*, Vol. 295, pp. 647~651.
- (5) Kim, J.-H., Kim, B.-G., Nam, H., Park, D.-E., Yun, K.-S., Yoon, J.-B., You, J. and Yoon, E., 2002, "A Disposable DNA Sample Preparation Microfluidic Chip for Nucleic Acid Probe Assay," *Proc. of IEEE Inter. Conf. Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 133~136.
- (6) Ottino, J.M., 1989, *The Kinetics of Mixing: Stretching, Chaos, and Transport*, Cambridge University press.
- (7) Jo, B.-H., Van Lerberghe, L. M., Motsegood, K. M. and Beebe, D.J., 2000, "Three-Dimensional Microchannel Fabrication in Polydimethylsiloxane (PDMS) Elastomer," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 9, pp. 76~81.
- (8) Kovacs, G.T.A., 1998, *Micromachined Transducers: Sourcebook*, WCB/McGraw-Hill, pp. 839~853.