

〈 논문 〉

사출 성형된 일회용 카오스 마이크로 믹서의 개발: 나선형 라미네이션 마이크로 믹서 (II)

- 제작 및 혼합 실험 -

김동성[†] · 이세환* · 권태현** · Chong H. Ahn*
(2005년 1월 22일 접수, 2005년 8월 3일 심사완료)

Development of an Injection Molded Disposable Chaotic Micromixer: Serpentine Laminating Micromixer (II)

- Fabrication and Mixing Experiment -

Dong Sung Kim, Se Hwan Lee, Tai Hun Kwon and Chong H. Ahn

Key Words : Chaotic Advection(카오스 이류), Chaotic Mixing(카오스 혼합), Injection Molding(사출 성형), Lamination(라미네이션), Microfluidics(미세유체공학), Micromixer(마이크로 믹서), Splitting and Recombination(분할 및 재결합)

Abstract

In this paper, Part II, we realized the *Serpentine Laminating Micromixer (SLM)* which was proposed in the accompanying paper, Part I⁽¹⁾, by means of the *injection molding* process in *mass production*. In the SLM, the higher level of chaotic mixing can be achieved by combining two general chaotic mixing mechanisms of *splitting/recombination* and *chaotic advection* by the successive arrangement of “F”-shape mixing units in two layers. Mold inserts for the injection molding process of the SLM were fabricated by SU-8 photolithography and nickel electroplating. The SLM was realized by injection molding of COC (cyclic olefin copolymer) with the fabricated mold inserts and thermal bonding of two injection molded COC substrates. To compare the mixing performance, a T-type micromixer was also fabricated. Mixing performances of micromixers were experimentally characterized in terms of an average mixing color intensity of a pH indicator, phenolphthalein. Experimental results show that the SLM has much better mixing performance than the T-type micromixer and chaotic mixing was successfully achieved from the SLM over the wide range of Reynolds number (*Re*). The chaotic micromixer, SLM proposed in this study, could be easily integrated in Micro-Total-Analysis-System, Lab-on-a-Chip and so on.

기호설명

\bar{I} : 믹서 구간의 표준 평균 강도
 I_{max} : 믹서 구간의 최대 강도
 I_n : 믹서 구간의 화소 n 에서의 강도
 \bar{I}_{ref} : 평균 기준 강도
 $I_{ref,n}$: 기준 화면 내의 화소 n 에서의 강도

N : 포착화면 믹서 구간 내의 총 화소 수
 N_{ref} : 포착 기준 화면 내의 총 화소 수
 z : 하류 방향 좌표
 λ : 혼합 소요 특성 길이

1. 서론

최근 들어 마이크로 토탈 분석 시스템(micro total analysis systems), 랩-온-어-칩(Lab-on-a-chip) 및 임상 진단(clinical diagnostics) 등의 여러 분야에서 미세 유체공학 시스템(microfluidic systems)의 많은

[†] 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
E-mail : thkwon@postech.ac.kr
TEL : (054)279-2175 FAX : (054)279-5899

* Microsystems and BioMEMS Lab, University of Cincinnati

** 회원, 포항공과대학교 기계공학과

적용 사례들이 보고되고 있다.⁽²⁾ 빠른 진단 결과를 얻기 위해서 이러한 마이크로 유체공학 시스템에서 시약의 효과적인 혼합은 필수적이거나, 진단 시스템의 마이크로 채널 내부 유동이 가지는 작은 Reynolds 수(Re)로 인해 일반적으로 두 유체의 난류(turbulent flow)를 이용한 혼합은 기대하기 어렵다. 이러한 관점에서 카오스 혼합을 비롯한 여러 가지 혼합 메커니즘들⁽³⁻¹¹⁾이 보고되었다. 이에 본 논문의 Part I 디자인 및 수치해석⁽¹⁾에서는 디자인 관점에서 이제까지 보고된 마이크로 믹서들의 혼합 메커니즘과 함께 개개 마이크로 믹서의 제작 방법들에 대해 자세하게 논의하였다. 이를 기초로 본 논문의 Part I⁽¹⁾에서는, 분할 및 재배열(splitting and recombination)의 카오스 혼합 메커니즘과 카오스 이류(chaotic advection)의 혼합 메커니즘을 결합하여, 새로운 형태의 카오스 마이크로 믹서인 나선형 라미네이션 마이크로 믹서(Serpentine Laminating Micromixer, SLM)를 제안하는 한편 수치해석을 통해 제안된 카오스 혼합 메커니즘을 검증하였다. 본 연구를 통해 새로이 제안된 SLM(Fig. 1)을 간단히 설명하면 다음과 같다: SLM은 두 기관 층에 F-자 형상 혼합 유닛들이 연속적으로 맞물린 디자인을 가지고 있다. 연속적으로 맞물려 배열되어 있는 F-자 형상 혼합 유닛들은 유체 유동의 연속적인 “분할 및 재결합”을 유도하며, 전체적으로 배열된 3 차원 나선형 유로는 “카오스 이류”를 야기하여, 두 카오스 혼합 메커니즘이 상호 보완적으로 결합되도록 디자인되어 있다. 특히 SLM의 결합된 카오스 혼합 메커니즘은, 채널 내부에 분리 벽이 존재하지 않는 간단한 형상으로, 유체 유동의 라미네이션을 향상시키는 특징을 가지고 있다.

본 논문의 Part I⁽¹⁾을 통해 새로운 카오스 마이크로 믹서인 SLM을 디자인하고 수치 해석을 통해 제안된 카오스 혼합 메커니즘을 검증하였다. 이에 본 Part II에서는 제안된 간단한 형상의 SLM의 특징을 살려 이제까지 보고된 다른 마이크로 믹서들⁽¹⁻¹¹⁾과는 달리 사출성형 공정의 대량 생산 방식을 통해 SLM을 구현함으로써, 가격 경쟁력을 가지는 일회용 카오스 마이크로 믹서를 제작해보고자 한다. 다음 장에서부터는 본 논문의 Part I⁽¹⁾에서 제안된 SLM의 사출 성형을 위한 금형 인서트 제작과 사출 성형 및 열 접합 공정을 통한 SLM의 제작 방법을 소개한다. 또한, 사출성형 공정을 통해 실제로 제작된 SLM의 혼합 성능을 평가하기 위해 pH 지시약을 이용하여 수행된 혼합 실험 및 실험 결과에 대해 논의하게 될 것이다.

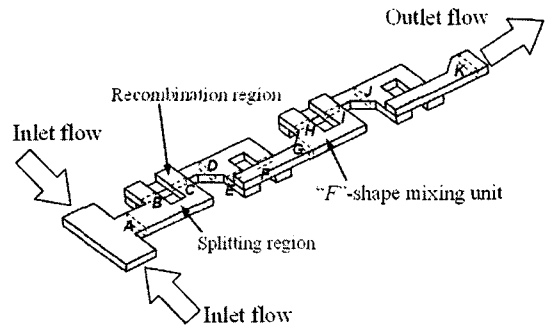


Fig. 1 Schematic diagram of the Serpentine Laminating Micromixer (SLM) proposed in the accompanying paper, Part I⁽¹⁾

2. 카오스 마이크로 믹서의 제작

2.1 사출 성형을 통한 SLM의 제작

이제까지 보고된 여러 가지 마이크로 믹서들⁽²⁾과는 달리, 제안된 카오스 마이크로 믹서인 SLM을 대량 생산 방식으로 제작하는 것은 본 연구의 중요한 목적 중의 하나이다. 이에 고분자 플라스틱의 대량 생산 방식 중 사출성형 공정을 통해 SLM을 제작하였다.

Fig. 2는 SLM 제작 공정의 개략도를 보여준다. 사출성형 공정에서 금형 인서트가 될, 지름 3인치, 두께 1.5mm의 두 장의 원형 니켈 기관을 감광재(photoresist) 도포(spin coating) 전에 깨끗이 세척하여 말린다. 니켈 기관 위에 감광재를 도포하기 전 두꺼운 음성 감광재(negative photoresist)인 SU-8과 니켈 사이의 접착력을 높이는 OmniCoat™를 니켈 기관 위에 도포한 후 가열 판(hot plate) 위에서 베이킹(baking)하였다. 그 후, SU-8 2075를 니켈 기관 위에 얇게 도포되어 있는 OmniCoat™층 위에 도포한 후, 강제 순환식 건조기(force convection oven) 안에서 소프트 베이킹(soft baking)을 수행하였다. 그리고, 마스크 얼라이너(mask aligner)를 이용하여 제작된 SLM의 마스크를 통해 니켈 기관 위의 SU-8과 OmniCoat™층에 UV 노광(UV exposure)를 수행한 후, 강제 순환식 건조기 안에서 노광 후 베이킹(post exposure baking, PEB) 공정을 수행하였다. 이제 현상(development) 용액 용기에서 UV에 노광되지 않은 SU-8과 OmniCoat™부분을 식각하면, Fig. 2(a)와 같은 전기 도금(electroplating)을 위한 마스터를 얻을 수 있다. 제작된 두 마스터를 전기 도금 용기에 넣어 Fig. 2(b)와 같이 니켈 전기 도금을 수행하였다. 마지막으로 마스터에 남아 있는 SU-8과 OmniCoat™층을 모두 제거하면, Fig.

2(c)와 같이 니켈 기판 위에 60 μm 높이의 니켈 마이크로 구조물이 전기 도금된 사출 성형을 위한 금형 인서트를 얻을 수 있다. 이 때 SLM 은 두 층의 F-자 형상 혼합 유닛이 서로 맞물려 배열되어야 하므로, 본 연구에서는 자기 조립 기법(self-assembly technique)을 적용하여 정렬도를 높였다.⁽¹²⁾ 즉 Fig. 2(c)에 표시된 것과 같이 자기 정렬 구조물(self-alignment microstructures)인 핀과 구멍(pin and hole)의 짝 구조물을 두 니켈 금형 인서트에 각각 전사하여, 사출 성형된 두 기판의 접합 시에 정렬도를 높였다.

제작된 니켈 금형 인서트를 사출성형기에 설치하여, Fig. 2(d)와 같이 SLM 의 상판과 하판이 될 두 플라스틱 기판을 성형하였다. 이 때, 고분자 플라스틱으로는 COC (cyclic olefin copolymer)를 사용하였다. 특히, 본 연구에서 수행된 사출성형 공정은 약 "1 분의 순환 시간(cycle time)"으로 두 COC 기판을 성형할 수 있다. 일반적으로 고분자 성형에 있어서, PDMS (polydimethylsiloxane)를 이용한

주조(casting) 방법은 몇 십분~몇 시간의 성형 순환 시간을 가지며, 핫 엠보싱(hot embossing) 공정을 통한 성형 방법은 몇 십분 가량의 성형 순환 시간을 가지기 때문에,⁽¹³⁾ 본 연구의 사출 성형을 통한 SLM 의 성형은 대량 생산 측면에서 큰 장점을 가진다. Fig. 3(a)는 실제로 금형 인서트가 금형 베이스에 장착되어 사출성형기에 설치된 사진을 보여준다.

성형된 COC 기판 중 상판에 드릴링 공정을 통해 외부 유체 장치들과의 연결을 위한 입구와 출구를 만들어주게 되며, 두 기판을 열 접합(thermal bonding) 공정을 통해 접합하여 Fig. 2(e)와 같이 SLM 을 제작할 수 있다. 열 접합 공정 중에는 언급했던 바와 같이, Fig. 2(e)에 표시된 자기 정렬 구조물에 의해 두 기판을 높은 정렬도를 유지한 상태로 접합할 수 있다. Fig. 3(b)는 실제 이렇게 제작된 SLM 을 보여준다. 또한, Fig. 3(c)는 제작된 SLM 내에 연속적으로 배열된 F-자 형상 혼합 유닛들의 확대 사진을 보여준다.

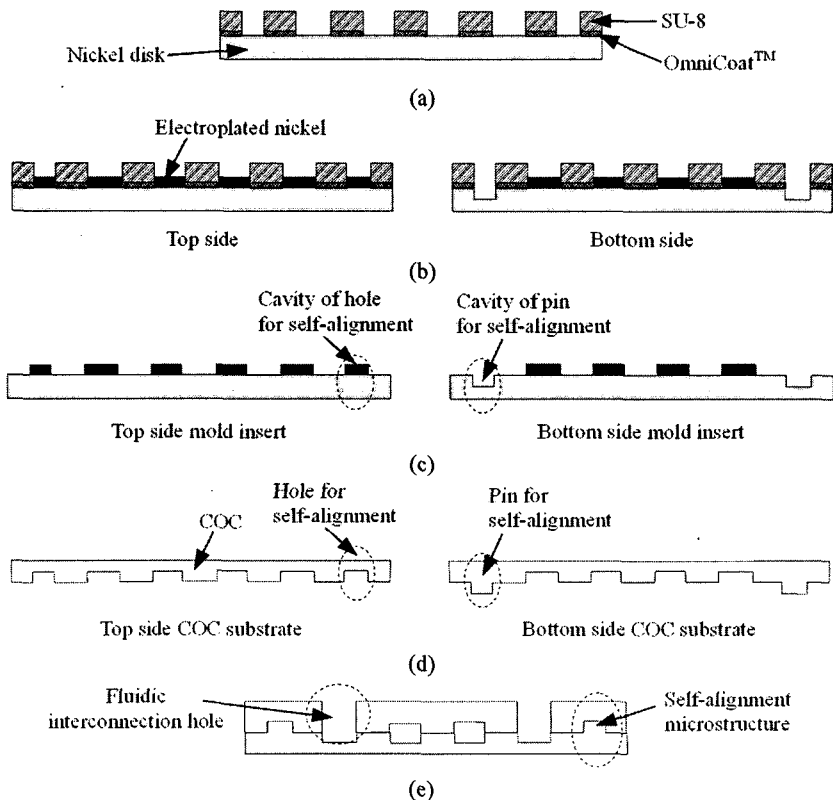


Fig. 2 Fabrication process of the SLM: (a) SU-8 and OmniCoat™ layers patterned on nickel disks as masters for electroplating, (b) electroplated nickel in the masters, (c) nickel mold inserts after removing SU-8 and OmniCoat™ layers, (d) injection molded COC (cyclic olefin copolymer) substrates and (e) SLM after thermal bonding

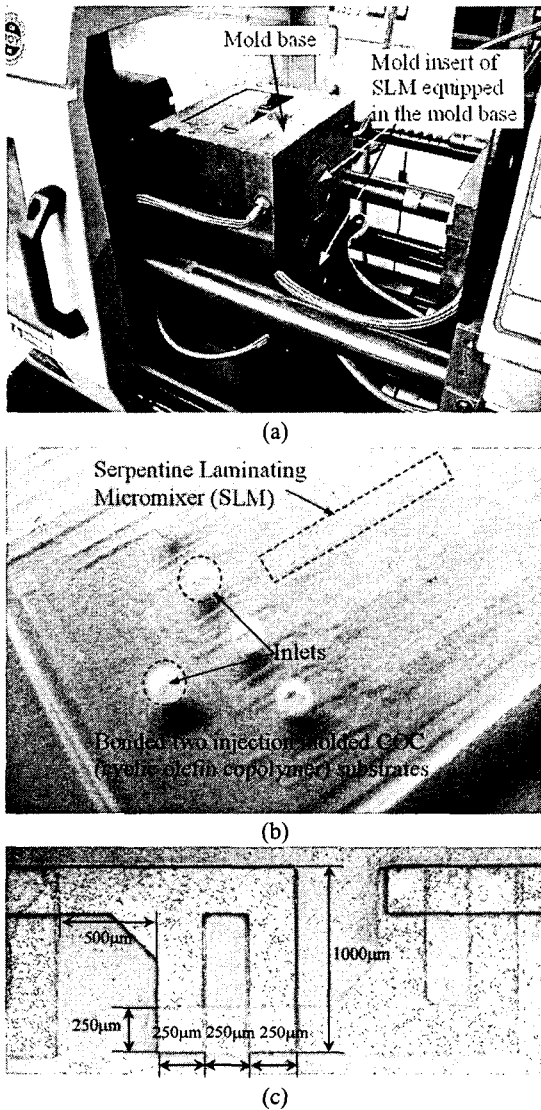


Fig. 3 Real photographs: (a) mold inserts installed in the mold base of the injection molding machine, (b) realized SLM after thermal bonding of two injection molded COC substrates and (c) enlarged microscope view of successive arrangement of *F*-shape mixing units in bonded two COC substrates with detailed dimensions (thickness of each *F*-shape mixing unit is 60µm)

본 연구에서 제작된 SLM 은 총 8 개의 *F*-자 형상 혼합 유닛들을 가지고 있으며, 각 유닛들의 길이는 2mm 에 해당하여, 전체 SLM 의 총 길이는 10mm 에 해당하였다. 또한 메인 마이크로 채널들의 너비와 높이는 각각 250µm 과 60µm 으로 본 논문의 Part I⁽¹⁾에서 수행된 수치 모사 모델과 동일하다.

2.2 T-타입 마이크로 믹서의 제작

SLM 의 혼합 성능을 실험적으로 평가하기 위해, T-타입 마이크로 믹서도 함께 제작되었다. 이 때, T-타입 마이크로 믹서는 일반적인 UV 사진식각 (UV photolithography)공정과 PDMS 의 주조 공정을 통해 제작되었다.

우선 유리 기판을 감광재 도포 전에 깨끗이 세척하여 말린다. 두꺼운 음성 감광재인 SU-8 50 을 유리 기판 위에 도포한 후에 강제 순환식 건조기 안에서 소프트 베이킹을 수행하였다. 그리고 마스크 얼라이너를 이용하여 제작된 T-타입 마이크로 믹서의 마스크를 통해 UV 노광을 수행한 후, 강제 순환식 건조기 안에서 노광 후 베이킹 공정을 수행하였다. 이제 현상 용기에서 노광되지 않은 SU-8 을 식각하면, PDMS 주조를 위한 마스터를 얻을 수 있다.

이렇게 제작된 마스터는 PDMS 의 주조 전에 실란처리(silanization)하여 경화된 PDMS 의 박리(peeling)를 용이하게 하였다. 경화제(curing agent)와 PDMS 의 예비중합체(prepolymer)를 1:10 의 비율로 섞어 기체제거(degassing)한 후, 실란처리된 마스터에 부어 다시 기체제거를 실시한 후에 강제 순환식 건조기 안에서 경화시켰다. 경화된 PDMS 를 마스터에서 박리하여 드릴링 공정으로 입구와 출구를 만든 후, 산소 플라즈마 처리하여 유리 기판에 접합시켰다.⁽¹⁴⁾

이렇게 제작된 T-타입 마이크로 믹서의 마이크로 채널 너비, 두께, 길이는 각각 240µm, 60µm, 2.1cm 이었다.

3. 혼합 실험 장치 및 실험 방법

Fig. 4(a)와 (b)는 각각 마이크로 믹서의 혼합 성능을 평가하기 위한 실험 장치 구성과 실험 장치에 설치된 SLM 의 모습을 보여준다. Fig. 4 에서 보듯이 압력 구동 유동의 혼합 실험을 위해, 서로 다른 두 유체가 주사기 펌프(syringe pump)를 통해 설정된 일정 유량으로 튜브와 연결된 마이크로 믹서의 두 입구를 통해 마이크로 믹서 내부로 주입된다. 본 연구에서는 제작된 마이크로 믹서들의 혼합 성능을 정량화하기 위해 pH 지시약인 페놀프탈레인(phenolphthalein)과 NaOH 용액을 사용하였다. 사용된 용액들은 99%의 에탄올에 각각 0.31mol/L 의 페놀프탈레인과 0.33mol/L 의 NaOH 를 녹여서 사용하였다.^(4,6,8) 이 때 0.33mol/L 의 NaOH 용액은 13 정도의 pH 값을 보였으며, 페놀프탈레인은 용액의 pH 가 8 보다 커질 때만 무색에서 붉은색으로 변하게 된다. 따라서 두 용액들

을 마이크로 믹서들로 주입할 경우, Fig. 4(b)와 같이 두 유체 간에 형성되는 경계 면에서만 반응된 페놀프탈레인이 붉은색을 나타내게 되므로, 결과적으로 붉은색의 강도를 측정함으로써 하류방향을 따라 혼합 성능을 측정하는 것이 가능하다.

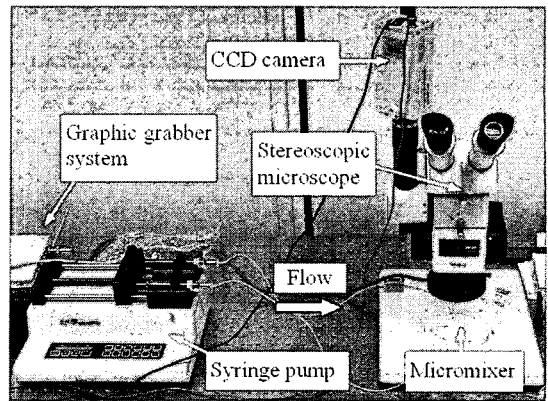
실제 실험에 있어서는 혼합 거동에 대한 유량, 즉 Re 의 영향을 알아보기 위해 각 마이크로 믹서들에 대해 유량을 변화시키며 실험을 수행하였다. 이 때, SLM에 대해 사용된 유량은 10, 20, 50, 80, 100, 150, 200, 240, 280 $\mu\text{L}/\text{min}$ 의 총 9 가지 유량이 선택되었으며, 각각의 유량에 대한 Re 는 각각 0.44, 0.88, 2.19, 3.51, 4.39, 6.58, 8.77, 10.53, 12.28이었다. 또한 T-타입 마이크로 믹서에 대해 사용된 유량은 10, 15, 20, 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ 의 총 4 가지 유량이 선택되었으며, 각각의 유량에 대한 Re 는 각각 0.457, 0.685, 0.914, 2.28이었다. 이 때, Re 의 계산에는, 작동 유체의 물성치로서 에탄올의 밀도와 점도로 각각 $789.3\text{kg}/\text{m}^3$ 와 $0.0012\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ 이 적용되었으며, 특성 길이는 마이크로 채널의 두께인 $60\mu\text{m}$ 이 적용되었다.

마이크로 믹서 내부의 혼합에 의해 형성되는 용액의 색 변화는 유동이 정상 상태에 도달한 후에 실제 현미경과 CCD 카메라를 통해 10 배 확대된 화면을 포착하여 측정하였다 (Fig. 4). 이 때 조명은 마이크로 믹서 바로 위에 설치된 낙사방식의 원형 백색 형광등이 사용되었다. 특히, T-타입 마이크로 믹서의 경우, SLM과의 직접적인 비교를 위해 T-합류점(T-junction)에서부터 10mm까지 구간을 결과만을 사용하였다.

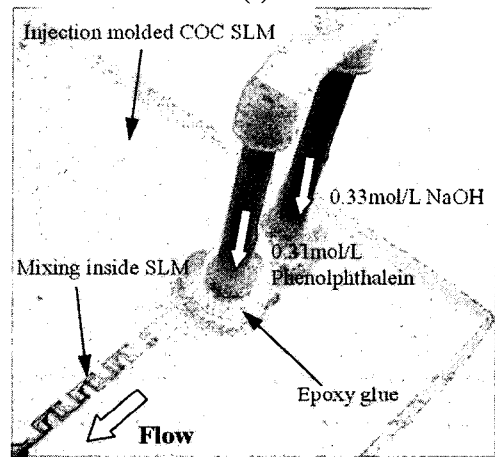
4. 실험 결과 및 고찰

4.1 마이크로 믹서들의 혼합 실험 결과

Fig. 5는 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ 의 동일한 유량을 사용하였을 경우, T-타입 마이크로 믹서(Fig. 5(a), $Re \approx 2.28$)와 SLM(Fig. 5(b), $Re \approx 2.19$)의 T-합류점으로부터 10mm 구간의 혼합 실험 결과를 보여준다. 언급한 바와 같이, 한 입구에서 들어온 유체에 포함된 페놀프탈레인이 반대쪽 입구에서 들어온 유체에 포함된 NaOH와 만나 반응하면 그 색이 무색에서 붉은색으로 변하기 때문에, 본 실험에서 붉은색의 존재로 마이크로 믹서의 입구에서 들어온 두 유체의 경계 면을 확인할 수 있다. Fig. 5(a)의 T-타입 마이크로 믹서의 혼합 실험 결과에서 볼 수 있듯이 입구에서 들어온 두 유체는 채널 내부에 다른 장애물이 없는 경우 T-합류점에서 서로 평행하게 흐르기 때문에 파이프의 중간 부분에 붉은색의 경계



(a)



(b)

Fig. 4 Experimental setup for characterizing mixing performance inside micromixers: (a) real overview and (b) enlarged view of the SLM equipped in the experimental setup. Dark red portion indicates the interface (mixed area) of phenolphthalein and NaOH streams

면이 형성되는 것을 알 수 있다. 특히 이 경우의 혼합은 오직 확산에 의해서만 이루어지기 때문에 붉은색 구간이 하류 방향으로 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

따라서 붉은색의 강도 변화는 혼합의 정도를 간접적으로 보여준다고 할 수 있다. 즉, 효과적인 혼합은 많은 층(layer)의 경계 면을 형성하게 되며, 이는 많은 수의 반응된 페놀프탈레인의 층을 낳는다. 결과적으로 마이크로 믹서 내의 혼합 정도를 마이크로 믹서 위에서 관찰하는 본 실험의 경우, 본 혼합 실험에서 조명으로 사용된 백색 형광등의 비간섭성(incoherence)으로 인해 많은 층의 반응 경계면은 보다 진한 붉은색을 나타내게 되며, 결국 보다 높은 붉은색의 강도를 받게 된다.^(4,6,8) 이러한 관점에서 Fig. 5(b)의 SLM을 이용한 혼합 실험 결

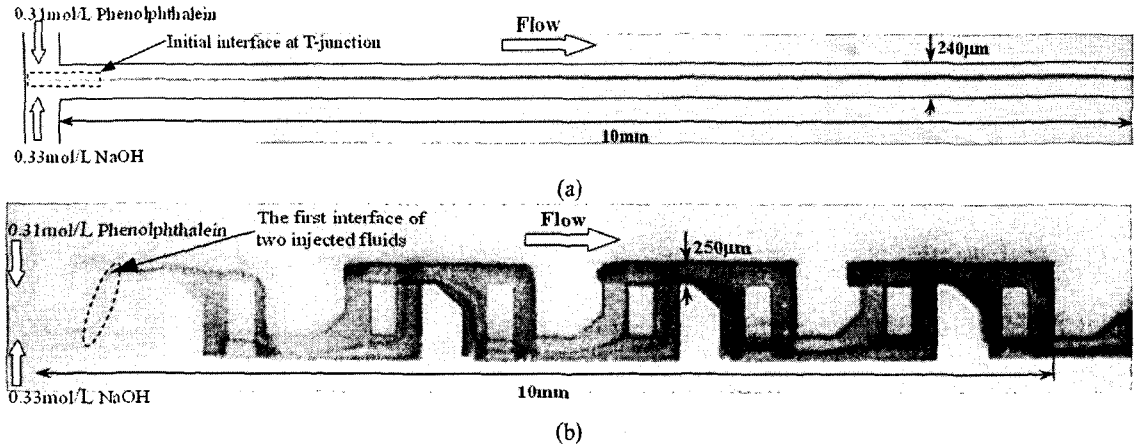


Fig. 5 Mixing experimental results of: (a) T-type micromixer ($Re \approx 2.28$) and (b) SLM ($Re \approx 2.19$), at the same flow rate of $50 \mu\text{l}/\text{min}$

과는, SLM의 채널 출구에서 거의 완전한 혼합을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서, Fig. 5(a)와 (b)의 T-타입 마이크로 믹서와 SLM의 실험 결과를 육안으로 확인해볼 때, Part I⁽¹⁾의 혼합 수치 모사에서 예측한 바와 마찬가지로 SLM이 T-타입 마이크로 믹서에 비해 탁월한 혼합 성능을 가지고 있음을 알 수 있다. 특히 SLM의 실험 결과인 Fig. 5(b)에서, Part I⁽¹⁾의 혼합 수치 모사 결과인 Fig. 3(b)와 마찬가지로, T-합류점에서 생성된 첫 번째 경계면이 F-자 형상 혼합 유닛의 첫 번째 분기 채널로 흐르고 있음을 알 수 있다.

4.2 마이크로 믹서들의 혼합 성능 비교

Fig. 5의 혼합 실험 결과를 통해 정성적인 혼합 성능을 비교할 수 있으나, 이를 통해 직접적인 마이크로 믹서들의 정량적인 혼합 성능 비교 혹은 Re 변화에 따른 혼합 거동 변화 파악이 힘들기 때문에 이를 위한 적절한 혼합 성능 척도가 필요하다. 앞서 설명한 바와 같이 붉은색의 강도 변화는 혼합 정도를 간접적으로 보여준다고 할 수 있으므로, 본 연구에서는 하류 방향의 붉은색 강도 변화를 혼합 성능 척도로 규정하였다.^(6,8) 이에 각 마이크로 믹서의 하류 방향을 따라 붉은색의 강도를 측정하였다. SLM의 경우, 총 8개의 F-자 형상 혼합 유닛에 의해 형성되는 8곳의 재결합 구간에서 재결합이 일어난 직후의 마이크로 채널 구간을 포착하여 화면 내의 모든 화소들의 붉은색 강도를 측정하였다. 또한 T-타입 마이크로 믹서의 경우 10mm 길이의 마이크로 채널을 5등분 하여 각 2mm 구간을 포착하여 화면 내의 모든 화소들의 붉은색 강도를 측정하였다. 이렇게 측정된 각 화면 내 붉은색의 강도는 다음의 식을 이용하여

표준화하였다.^(6,8)

$$\bar{I} = \frac{\sum_{n=1}^N I_n / N - \bar{I}_{ref}}{I_{max} - \bar{I}_{ref}} \quad (1)$$

이 때, \bar{I} , I_n , N 은 각각 포착하면 믹서 구간의 표준 평균 강도 (normalized average intensity), 화소 n 에서의 붉은색 강도, 포착하면 믹서 구간의 전체 화소 수를 의미한다. 또한 \bar{I}_{ref} 는 강도 보상을 위해 도입된 항으로서, 평균 기준 강도를 의미하며, I_{max} 는 표준화 목적을 위해 도입된 항으로서 각 실험에서의 마이크로 믹서의 출구 부분 포착 화면 내의 붉은색 최고 강도를 의미한다.

식 (1)에서 $\sum_{n=1}^N I_n / N$ 항은 포착된 화면 내의 혼합 구간의 평균 강도를 의미하며, 평균 강도의 변화는 하류방향으로의 혼합 수준의 변화를 보여준다. 이에 더하여 본 연구에서는 마이크로 믹서 내의 혼합 실험이 동일한 조건 하에서 수행되었다라도 화면 포착 CCD 카메라 혹은 조명 장치의 상태에 따라 일어날 수 있는 강도의 차이를 보상하기 위해 식 (1)에서 보다시피 \bar{I}_{ref} 항을 도입하였다. 이를 위해 각 실험마다 마이크로 믹서의 입구 부분에 혼합이 일어나지 않은 투명한 상태의 유체의 화면을 포착하여, 이를 기준 화면으로 정하고 다음과 같은 식을 이용하여 표준화하였다.

$$\bar{I}_{ref} = \sum_{n=1}^{N_{ref}} \frac{I_{ref,n}}{N_{ref}} \quad (2)$$

이 때, $I_{ref,n}$ 과 N_{ref} 는 각각 포착된 기준 화면 내의 화소 n 에서의 색 강도와 전체 화소 수를 의미한다.

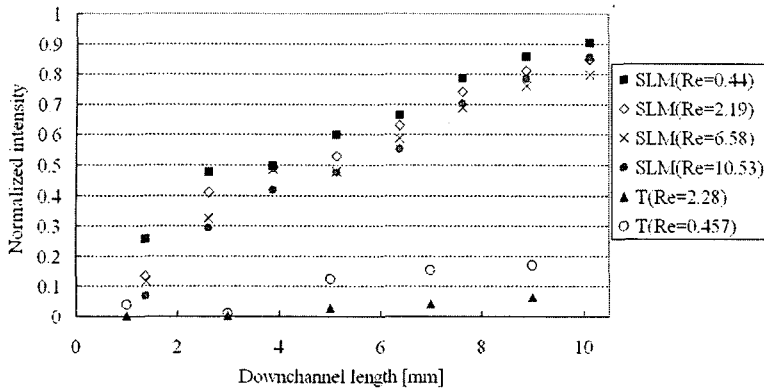


Fig. 6 Normalized average intensity changes along the downchannel direction of the SLM for Re of 0.44, 2.19, 6.58 and 10.53 (the corresponding flow rates are 10, 50, 150 and 240 $\mu\text{l}/\text{min}$, respectively) and the T-type micromixer for Re of 0.457 and 2.28 (flow rates are 10 and 50 $\mu\text{l}/\text{min}$, respectively)

결과적으로 식 (1)에 따르면, 표준 평균 강도는 완전히 혼합된 상태에서는 1, 혼합되지 않은 투명한 상태에서는 0의 값을 갖게 된다.

Fig. 6은 SLM과 T타입 마이크로 믹서에 대해 수행된 혼합 실험 결과에, 식 (1)에 근거하여 계산된 표준 평균 강도를 채널 하류 방향으로 따라 도시한 것이다. 이 때 Fig. 6에는, SLM에 대해서는 0.44, 2.19, 6.58, 10.53의 Re 에 대해서, 그리고 T타입 마이크로 믹서에 대해서는 0.457, 2.28의 Re 에 대한 결과만을 도시하였다. 또한 계산된 표준 평균 강도 값은 포착된 화면 가운데 위치에 해당하는 하류 방향 위치에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이, SLM 내부의 표준 평균 강도는 T타입 마이크로 믹서에 비해 급격히 빠른 속도로 완전한 혼합 상태인 1의 값에 다가가고 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 제안된 SLM 내부의 카오스 혼합 메커니즘이 낮은 Re 에서도 유체 유동의 두께 방향 라미네이션을 효과적으로 일으키고 있음을 시사한다.

특히, T타입 마이크로 믹서의 결과가 보여주듯이, 일반적인 마이크로 믹서의 경우 Re 가 증가할수록 혼합 성능은 떨어지게 된다. 이는 마이크로 믹서 내에 존재하는 혼합 메커니즘이 만들어내는 동일한 유동의 경계 면에 대해, Re 가 증가할 경우 유동의 속도가 증가하게 되고, 이는 마이크로 채널 내에 유체가 체류하게 되는 체류 시간(residence time)이 줄어드는 결과를 초래하여, 결과적으로 혼합을 위한 충분한 시간이 줄어들게 하여, Re 가 증가할수록 혼합 성능이 줄어드는 결과를 낳는다. 하지만 SLM의 경우, Fig. 6에서 볼 수 있듯이 출구에서의 표준 평균 강도가 주어진 Re 하에서 거의 일정하게 높은 값을 유지하고 있음을

알 수 있다. 이는 다음과 같이 설명할 수 있다. 본 논문의 Part I⁽¹⁾의 수치 모사 결과에서 설명하였듯이, SLM이 가지는 3차원 나선형 유로에 의해 생성되는 카오스 이류는 SLM의 재결합 구간에서 두께 방향 라미네이션을 향상시키는 효과를 낸다. 카오스 이류 효과는 Re 가 증가할수록 커지기 때문에, Re 가 증가할수록 카오스 이류에 의한 라미네이션 향상 효과는 커지게 되며, 이는 유체가 혼합되어야 하는 혼합 층 두께를 줄이는 효과를 낳는다. 따라서, Re 가 증가하면서 줄어드는 혼합 효과가 카오스 이류에 의해 보상되어, 높은 수준의 혼합 성능을 유지할 수 있게 된다. 즉, 본 연구에서 제안된 바와 같이, SLM내에 효과적으로 결합된 분할 및 재결합 그리고 카오스 이류의 두 가지 카오스 혼합 메커니즘이, Re 가 증가할수록 줄어드는 체류 시간에도 불구하고, 넓은 영역의 Re 에 대해 높은 수준의 혼합 성능을 유지할 수 있게 한다.

4.3 혼합 소요 특성 길이

본 논문에서는 보다 정량적인 혼합 성능 비교를 위해, 혼합 성능을 대표할 수 있는 특성 수(characteristic value)를 정의하여 혼합 성능을 평가하였다. 카오스 혼합의 경우 유동 간의 경계 면이 채널 하류 방향으로 기하 급수적으로 늘어난다고 알려져 있으며, 본 연구에서는 이러한 사실을 기반으로 카오스 혼합이 일어나는 경우 채널의 하류 방향을 따라 혼합에 의한 표준 평균 강도가 지수함수의 꼴로 증가한다고 가정하였다.^(6,8) 즉, 지수함수의 지수에 위치하여, Fig. 6의 실험 데이터에 최적 곡선 맞추기(optimal fitting)를 통해 결정할 수 있는 특성 수를 정의하여 이를 혼합 성능의 척도로 삼고자 하였다. 이에 Fig. 6의 표준 평균 강도,

$\bar{\Gamma}$ 가 다음과 같은 간단한 지수 함수 식으로 표현된다고 가정하였다:

$$\bar{\Gamma} = 1 - \exp\left(-\frac{z}{\lambda}\right) \quad (3)$$

이 때, z 는 하류 방향 좌표를 의미하며, λ 는 특성 길이를 표현한다. $\bar{\Gamma}$ 는 마이크로 믹서의 입구에서 혼합되지 않은 상태에서 0의 값을 가지며, 채널 하류를 따라 완전한 혼합 상태의 값인 1에 가까워지며, 식 (3)은 이를 잘 표현하고 있다. 특히 식 (3)에서 λ 는 $\bar{\Gamma}$ 가 0에서 시작하여 0.632의 값에 도달하기 위해 필요한 채널 길이를 의미하게 된다. 실제로 식 (3)은 Fig. 6의 혼합 실험 결과를 잘 맞추고 있음을 알 수 있었다. 이에 본 논문에서는 특성 길이 λ 를 “혼합 소요 특성 길이(characteristic required mixing length)”라 정의하였다.^(6,8)

실제로 Fig. 6의 실험 결과에 최적 곡선 맞추기를 통해, λ 를 식 (3)에 기초하여 각 Re 에 대해 계산하였다. T-타입 마이크로 믹서의 경우, 0.457, 0.685, 0.914, 2.28의 Re 에 대해 각각 61.4, 76.6, 91.8, 129.7mm의 λ 를 얻을 수 있었다. 실제로 Re 가 증가할수록 계속해서 증가하는 λ 를 볼 수 있으며, 이는 앞서 설명한 바와 같이 속도의 증가에 의한 체류 시간의 감소에 기인하는 것으로 설명할 수 있다.

SLM에 대해 각 Re 에 대해 계산된 λ 의 결과는 Fig. 7에 도시하였다. 낮은 Re 영역에서는 Re 가 증가할수록 λ 가 증가하였지만, Re 가 4보다 커지기 시작하면서 λ 가 7mm 근처의 일정한 값으로 유지되고 있음을 알 수 있다. 즉, 앞서 설명한 바와 같이, Re 가 4보다 커지는 구간부터는 카오스 이류가 유동의 라미네이션을 향상시켜 경계 면을

증가시킴으로써 높은 수준의 혼합 성능을 유지할 수 있게 도움을 주게 된다. 특히, Re 가 2 정도에서의 SLM($Re \approx 2.19$)과 T-타입 마이크로 믹서($Re \approx 2.28$)의 λ 를 비교하면, SLM의 λ 가 20배 가량 더 짧은 것을 알 수 있다. 이는 SLM 내부에서 야기되는 분할 및 재배열과 카오스 이류의 두 카오스 혼합 메커니즘이 효과적으로 결합되고 있음을 시사한다.

5. 결론

본 논문 Part II에서는, 본 논문의 ‘Part I 디자인 및 수치 해석’ 편에서 새로이 디자인되어 제안된 간단한 형상의 카오스 마이크로 믹서인 나선형 라미네이션 마이크로 믹서(Serpentine Laminating Micromixer, SLM)를 사출성형을 통해 대량으로 제작하였으며, 제작된 SLM을 이용하여 혼합 실험을 수행하여 혼합 성능을 평가하였다.

사출성형 공정을 위한 금형 인서트는 SU-8/OmniCoat™의 사진식각공정과 니켈 전기 도금 공정을 통해 제작되었다. 제작된 니켈 금형 인서트를 이용하여 사출성형을 통해 SLM의 상판과 하판이 될 COC 기판을 성형하였으며, 제작된 두 COC 기판을 열 접합 공정을 통해 접합하여 SLM을 구현하였다.

혼합 성능 평가를 위해, pH 지시약인 페놀프탈레인을 이용하여 수행한 실험 결과는 SLM이 T-타입 마이크로 믹서에 비해 월등히 높은 수준의 혼합 성능을 보이고 있음을 보여주었다. 또한 혼합된 표준 평균 강도를 통한 혼합 성능 정량화 결과는 SLM이 넓은 영역의 Re 에 대해 높은 수준의 혼합을 유도하고 있음을 보여주었다. 혼합 소요 특성 길이^(6,8)를 통한 혼합 성능 정량화 결과는, SLM이 Re 가 약 2의 값을 가질 때 T-타입 마이크로 믹서에 비해 약 20배의 성능 향상을 내고 있음을 보여주었으며, Re 가 커질수록 카오스 이류가 유동의 라미네이션을 향상시켜 높은 수준의 카오스 혼합을 유지할 수 있음을 보여주었다.

마지막으로 제안된 SLM에 기하학적 변형을 통해 얻을 수 있는 혼합 성능의 향상에 대해 논의하자면, F-자 형상 혼합 유닛 자체에 기하학적인 변형을 가해 재결합 구간에서의 종횡비(aspect ratio)를 변화시켜 보다 향상된 라미네이션을 얻을 수 있으리라 생각되며, 현재 2개의 분할 채널을 가지는 혼합 유닛에 보다 많은 분할 채널을 도입하여 혼합 성능을 향상시킬 수 있으리라 생각된다.

제안된 SLM은 마이크로 채널 내부에 분리 벽이 없이 F-자 형상 혼합 유닛이 배열된 간단한 형

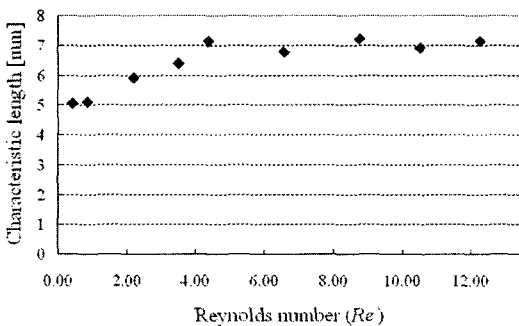


Fig. 7 Characteristic required mixing length of the SLM as a function of Re . The characteristic required mixing length of the T-type micromixer were 61.4, 76.6, 91.8 and 129.7mm for Re of 0.457, 0.685, 0.914 and 2.28, respectively (not shown here)

상으로 높은 수준의 카오스 혼합을 유도하기 때문에 사출 성형 등을 통한 대량 생산이 가능하며, 마이크로 토탈 분석 시스템 (micro total analysis systems), 랩-온-어-칩 (Lab-on-a-chip) 등의 미세 유체공학 시스템(microfluidic systems)에 쉽게 도입될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학기술부의 국가지정연구실사업(2000-N-NL-01-C-148)의 지원과 한국교육인적자원부의 BK21 program 의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사한다.

참고문헌

- (1) Kim, D.S., Lee, S.H., Kwon, T.H. and Ahn, C.H., 2005, "Development of an Injection Molded Disposable Chaotic Micromixer: Serpentine Laminating Micromixer (I) Design and Numerical Analysis," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 29, No. 10, pp. 1289~1297.
- (2) Aurox, P.-A., Iossifidis, D., Reyes, D.R. and Manz, A., 2002, "Micro Total Analysis Systems. 2. Analytical Standard Operations and Applications," *Anal. Chem.*, Vol. 74, pp. 2637~2652.
- (3) Hong, C.-C., Choi, J.-W. and Ahn, C.H., 2004, "A Novel In-Plane Passive Microfluidic Mixer with Modified Tesla Structures," *Lab Chip*, Vol. 4, pp. 109~113.
- (4) Liu, R.H., Stremmer, M.A., Sharp, K.V., Olsen, M.G., Santiago, J.G., Adrian, R.J., Aref, H. and Beebe, D.J., 2000, "Passive Mixing in a Three-Dimensional Serpentine Microchannel," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 9, pp. 190~197.
- (5) 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.
- (6) Kim, D.S., Lee, S.W., Kwon, T.H. and Lee, S.S., 2004, "A Barrier Embedded Chaotic Micromixer," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 14, pp. 798~805.
- (7) Bertsch, A., Heimagartner, S., Cousseau, P. and Renaud, P., 2001, "Static Micromixers Based on Large-Scale Industrial Mixer Geometry," *Lab Chip*, Vol. 1, pp. 56~60.
- (8) Kim, D.S., Lee, I.H., Kwon, T.H. and Cho, D.-W., 2004, "Barrier Embedded Kenics Micromixer," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 14, pp. 1294~1301.
- (9) Branebjerg, J., Gravesen, P. and Krog, J.P., 1996, "Fast Mixing by Lamination," *MEMS 96*, San Diego, CA, February 11-15, pp. 441~446.
- (10) Schwesinger, N., Frank, T. and Wurmus, H., 1996, "A Modular Microfluid System with an Integrated Micromixer," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 6, pp. 99~102.
- (11) Schönfeld, F., Hessel, V. and Hofmann, C., 2004, "An Optimized Split-and-Recombine Micro-mixer with Uniform 'Chaotic' Mixing," *Lab Chip*, Vol. 4, pp. 65~69.
- (12) Lee, S.H., Han, J., Kim, D.S., Kwon, T.H., Hwang, C.J., Heo, Y.M. and Ahn, C.H., 2004, "A High Precision Self-assembly Technique for Multilayer Polymer Lab-on-a-chip," *Proc. of μTAS 2004*, Sweden, September 2004, Vol. 2, pp. 413~415.
- (13) Becker, H. and Gärtner, C., 2000, "Polymer Microfabrication Methods for Microfluidic Analytical Applications," *Electrophoresis*, Vol. 21, pp. 12~26.
- (14) Xia, Y. and Whitesides, G.M., 1998, "Soft Lithography," *Angew. Chem. Int. Ed.*, Vol. 37, pp. 550~575.