

〈 논문 〉

LIF 공초점 현미경을 이용한 Y-채널 마이크로믹서의 혼합 효율 평가

김경목* · 신용수* · 이도형† · 안유민**
(2006년 8월 22일 접수, 2006년 11월 21일 심사완료)

Mixing Efficiency Evaluation in Y-channel Micromixer Using LIF Confocal Microscope

Kyoung-mok Kim, Yong-su Shin, Dohyung Lee and Yoo-min Ahn

Key Words : Confocal Fluorescence Image(공초점 형광 이미지), LIF Confocal Microscope(공초점 레이저유발 형광 현미경), Micromixer(마이크로믹서)

Abstract

Mixing between two or more reagents is one of important processes in biochemical microfluidics. In efficient micromixer design, it is essential to analyze flow pattern and evaluate mixing efficiency with good precision. In this work, mixing efficiency for Y-channel micromixer is measured by fluorescence intensity using LIF(Laser Induced Fluorescence) Confocal Microscope. The Y-channel micromixers are fabricated with polydimethylsiloxane(PDMS) and those are bonded to glass plate through Plasma bonding. Nile Blue A is injected into the micromixer as a fluorescence dye for measuring of fluorescence intensity by He/Ne laser. For visualization of the flow pattern, dynamic image capturing is carried out using CAM scope. For the comparison with computer simulation, modified SIMPLE algorithm for incompressible flow equation is solved for the same geometry as in the experiment. Throughout the experiments and computer simulation, accurate mixing efficiency evaluation process for a PDMS Y-channel micromixer is established.

기호설명

C^* : 표준화된 질량농도
 D : 확산계수
 η : 혼합효율
 I^* : 표준화된 형광 강도
 I_n : n 지점에서 측정된 형광 강도
 I_{\min} : 두 유체 모두 형광 염료를 넣지 않았을 경우 측정된 형광 강도

I_{\min} : 두 유체 모두 형광 염료를 넣었을 때 측정된 형광 강도
 l : 특성길이
 m : 측정된 총 지점의 개수
 Pe : Peclet 수
 \bar{u} : 채널내의 평균 유속
 y^* : 표준화된 채널의 수직거리

1. 서론

최근 생화학(biochemical applications) 및 생명공학(biomedical engineering)분야에 관한 연구들과 마이크로 단위 제작기술들에 관한 연구가 점차 늘어나고 있다. 이러한 연구들은 대부분 lab-on-a-chip

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계정보공학부
 E-mail : dohyung@hanyang.ac.kr
 TEL : (031)400-5289 FAX : (031)406-5550

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한양대학교 기계정보공학부

과 마이크로 토탈 분석 시스템(micro total analysis system, μ -TAS)등에 관한 것들이며, 샘플의 정리, 혼합, 반응, 분리 등의 역할을 담당하는 미세유체 기계 시스템(microfluidic system)을 포함하고 있다. 이러한 시스템에서 중요한 시료나 시약 등의 원활한 혼합과 반응에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.⁽¹⁾

미세유체기계 시스템 중에서 마이크로믹서(micromixer)는 두 가지 혹은 그 이상의 시약이나 샘플을 효과적으로 혼합시키는 역할을 한다. 마이크로 단위의 유동은 작은 특성 길이와 낮은 유동 속도로 인하여 Reynolds 수가 매우 작게($Re < 1$) 된다. 따라서, 매크로 영역의 일반적인 혼합 방식인 난류에 의한 혼합은 이루어 질 수 없고, 유동이 아주 느린 속도로 진행되기 때문에 주로 확산에 의해서만 혼합이 이루어져서 충분한 혼합효율과 빠른 진단시간을 기대하기가 어렵다. 그렇기 때문에 빠른 진단 시간과 충분한 혼합을 얻기 위해서는 혼합 시간과 장치 면적을 고려하여야 한다. 혼합되는 면적은 최대한 넓게 하면서 혼합되는 길이는 짧게하는 효과적인 마이크로믹서의 설계가 필요하다.⁽²⁾

마이크로믹서의 혼합 방식에는 여러 가지가 있으나 크게 동적 방식(dynamic type)^(3,4)과 정적 방식(static type)⁽⁵⁻⁷⁾으로 나뉘어진다. 동적 방식은 여러 가지 외부 입력을 이용하여 강제적인 대류 효과를 생성시키는 방법이다. 이 때문에 혼합정도를 증가시킬 수는 있으나 제작이 어렵고 추가적인 외부입력의 사용으로 비경제적이라 할 수 있다. 이와는 달리 정적 방식은 외부 입력 없이 혼합 경로의 다양한 형상 변화를 통하여 혼합을 증대시키는 방식이다. 이에 따라, 동적 방식에 비해 혼합량은 상대적으로 적으나, 외부 입력을 사용하지 않으며 대량생산이 가능하다. 따라서 높은 혼합효율을 가지는 정적 믹서를 개발, 사용하는 것이 바람직하다 할 수 있다.

이러한 정적 방식의 마이크로믹서들 중에서 마이크로 채널 내부에 장애물을 배열시켜 혼합효율을 증대시키는 Y-채널 마이크로믹서가 Wang 등⁽⁸⁾에 의해 제안되었다. 단지 장애물의 배열구조만을 가지고 혼합 효율을 높일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한, Y-채널 마이크로 믹서는 일반적으로 혼합 연구에 많이 사용되고 있는 나선형믹서, 3차원 효과를 이용한 비틀린 믹서, 채널 바닥면에 꺾여진 가시무늬가 있는 믹서들에 비해 형상이 간단하여 제작이 용이하다.⁽¹³⁾ Y-채널 마이크로믹서와

같이 형상인 간단한 T-채널 마이크로믹서와 비교했을 시 유동의 꺾임 각도 변화가 적고, 압력강하가 작게 발생한다는 장점을 가지고 있다.

이전 연구^(9,10)에서는 수치해석을 통하여 Y-채널 내부의 유동 특성 및 혼합 패턴을 해석하고, 신경망 이론을 이용한 근사 최적화 기법으로 장애물의 위치와 크기를 최적화하였다.

본 연구에서는 최적화된 장애물의 위치와 크기를 이용하여 Y-채널 마이크로믹서를 제작하고 혼합효율을 측정하여 최적설계 결과와 비교 분석하였다. 이를 위해 먼저, 탄성중합체(polydimethylsiloxane, PDMS)를 이용하여 일반적인 MEMS 제작 과정⁽¹¹⁾에 따라 PDMS Y-채널 마이크로 믹서를 제작 하였다. 두 유체의 혼합 정도를 측정하기 위하여 먼저 CAM Scope 을 이용하여 유동의 형상을 가시화하였고 다음으로 형광 강도를 이용하여 혼합 효율을 구하기 위하여 LIF(laser induced fluorescence) 공초점 현미경(confocal microscope)이 사용되었다. 이때, 사용된 스캐너는 He-Ne 레이저이고, Nile blue A 를 형광염료로 사용하였다. 수치계산 시 사용된 두 작동유체와 같이, 3 차 증류수(DI water)와 에탄올이 실험에 사용되었다. 실험 결과와 수치계산 결과를 통하여 수치적으로 최적화된 Y-채널 마이크로믹서의 결과를 평가할 수 있었다.

2. Y-채널 마이크로믹서

2.1 설계

이전 연구^(9,10)에서는 비압축성 Navier-Stokes 방정식과 고착경계조건(no-slip wall condition)을 이용하여 장애물이 혼합에 미치는 영향을 수치해석 하였다. 그리고 최고의 혼합효율을 얻기 위하여 신경망(neural network)을 이용한 SQP(sequential quadratic programming)법으로 장애물의 크기와 위치에 대한 근사최적화를 수행하였다. 그 결과로 장애물의 반지름의 크기가 클수록, Fig. 1(b)의 y 좌표가 벽면에 가까울수록 혼합효율이 향상 되는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 이 결과를 바탕으로 Y-채널 마이크로믹서를 제작하고 LIF 공초점 현미경을 이용하여 형광 염료의 형광 강도를 측정하였다. 이로써 두 유체의 혼합효율을 계산하여 수치기법으로 최적화된 결과값들을 검증해 내하고자 한다.

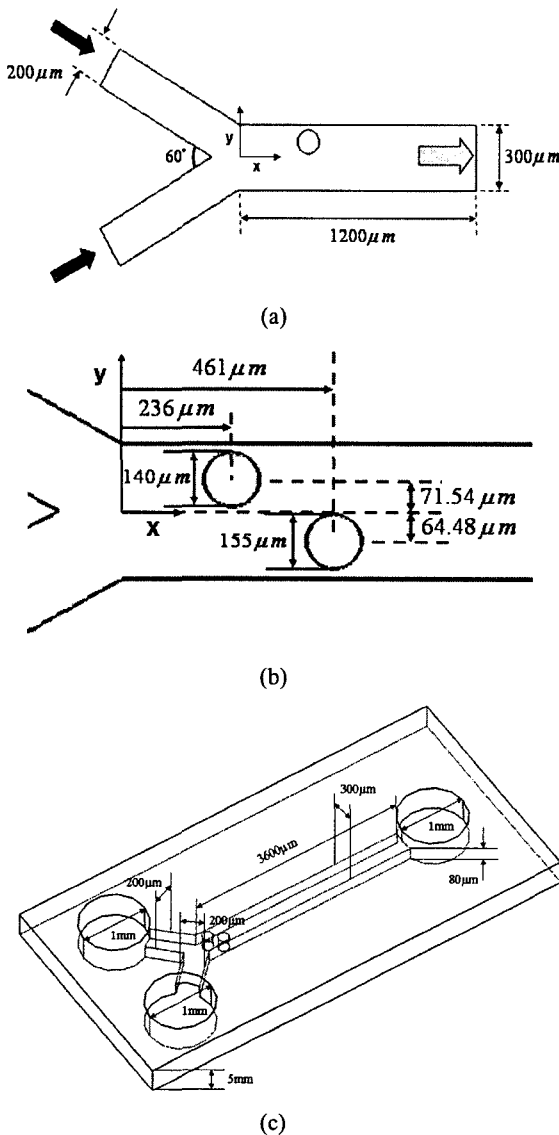


Fig. 1 Schematic of the optimized Y-channel micro-mixer (a) 2D model for simulation (b) configurations of obstacles (c) 3D model for fabrication

본 연구에서 대상으로 하는 마이크로믹서의 형상은 Fig. 1(a)와 같다. 이는 장애물을 이용하여 혼합경로를 늘임으로써 혼합효율을 높이는 정적 혼합 방식의 Y형 마이크로 채널 믹서이다. 60°의 각으로 벌어진 두 입구로부터 각각의 작동유체인 물과 에탄올(Table 1)이 유입된다. 서로 만난 두 유체는 장애물이 설치되어 있는 혼합부를 거쳐 출구로 빠져 나가게 된다. 제작에 사용된 장애물의 위치와 크기는 Fig. 1(b)와 같다. 채널의 깊이는 최대한

Table 1 Properties of the two working fluids at 20 °C

Fluid	Viscosity ($\text{kg } \mu\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$)	Diffusivity ($\mu\text{m}^2\text{s}^{-1}$)	Density ($\text{kg } \mu\text{m}^{-3}$)
Water	9.0E-10	1.2E+3	9.998E-16
Ethanol	1.2E-9	1.2E+3	7.89E-16

3 차원 형상의 영향을 줄이고자 80 μm 로 하였다. 이전 연구^(9,10)의 수치해석 결과는 채널의 깊이에 대한 영향을 충분히 고려한 혼합효율이다. 채널의 깊이는 미소채널 내에서의 2 차 유동을 발생시킬 수 있는 중요요소이다. 따라서 채널의 깊이가 깊을수록 2 차 유동에 의한 선회류(swirl)나 와류(vortices)의 영향이 증가하여 혼합효율 또한 증가하게 된다.⁽¹³⁾ 이를 위해 실험에서도 채널의 깊이를 충분하게 해야 하지만 제작 시 채널의 깊이가 커질수록 장애물의 반지름이 축소되어 장애물의 효과가 감소한다. 이런 이유로 제작상 채널의 깊이를 장애물의 반지름을 축소하지 않는 최대한의 깊이인 80 μm 로 잡아 깊이에 따른 영향을 최대한 수치해석 조건과 일치하게 하였다.

Fig. 1(c)는 실제로 제작될 믹서의 3 차원 형상을 보여준다.

2.2 제작

Fig. 2는 Y-채널 마이크로믹서의 제작 과정의 개략도를 보여준다. 믹서의 제작을 위해서 먼저 실리콘 웨이퍼를 SPM(sulfuric acid-hydrogen peroxide mixture) 용액으로 청결화(cleaning)하고 회전건조(spin dry) 한 후 가열판(hotplate)에서 200 °C, 5분간 베이킹(baking) 하였다. 이렇게 준비된 웨이퍼에 음성 감광재(negative photoresist)인 SU-8을 도포(spin coating) 한 후, 순환식 건조기(convection oven)에서 65 °C, 15분간 소프트 베이킹(soft baking)을 수행하였다. 그리고 공기 중에 10분간 안정화(relaxation)를 시키고 제작된 마스크 통해 SU-8층에 UV노광(UV exposure)을 한 후, 순환식 건조기에서 노광 후 베이킹(post exposure baking, PEB)공정을 수행하였다. 이를 다시 공기 중에 10분간 안정화 시킨 다음 현상(development) 용액(SU-8 developer, micro chem.) 용기에서 마스크에 가려져서 UV에 노광되지 않은 SU-8부분을 식각한 후, 이소프로필 알코올(isopropyl alcohol, IPA)을 이용하여 린스(rinse) 하였다. 그리고 노광으로 인한 크랙(crack)의 감소와 SU-8의 접착력의 증대를 위하여 순환식 건조기에서 150 °C, 5분간 하드 베이킹(hard baking) 하였다. Fig. 3(a)는 이렇게 제작된 실제 SU-8 몰드를 보여준다.

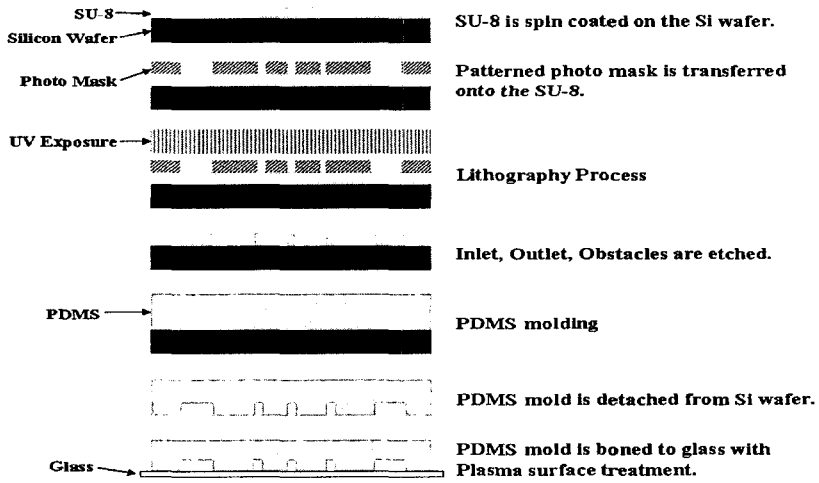


Fig. 2 Fabrication process of the Y-channel micromixer used in this study

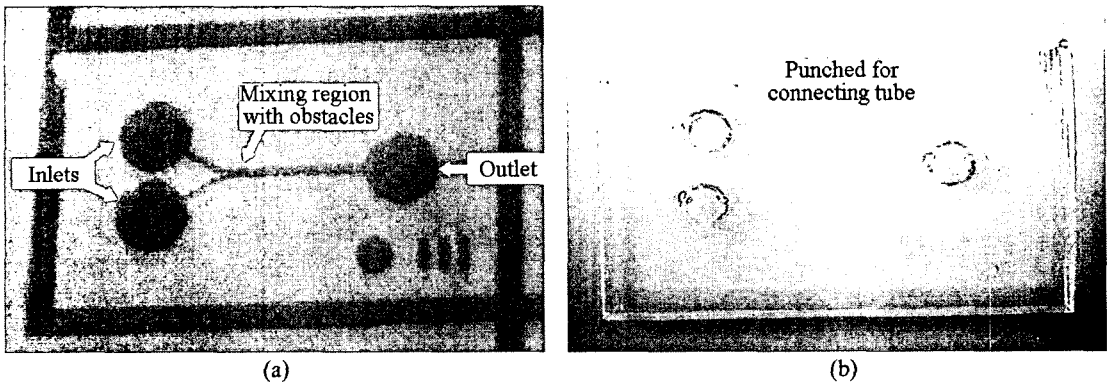


Fig. 3 Photographs of a Y-channel micromixer (a) SU-8 mold (b) PDMS mold

다음으로 PDMS sylgard184 kit(Dow coming corp.)와 경화제를 10:1의 비율로 혼합한 PDMS를 진공 제거기(vacuum decigator)에서 30 분간 기포를 제거한 후 SU-8 몰드 위에 도포하였다. PDMS가 도포된 몰드를 순환식 건조기에서 65°C, 3 시간 30 분 정도 베이킹 한 후, 몰드와 PDMS를 분리하였다. 분리된 PDMS와 슬라이드 글래스(slide glass)를 산소 플라즈마(O_2 plasma)에서 1 분 30 초간 처리한 후, PDMS-glass plasma 접합(bonding)을 통해 Y-채널 마이크로믹서 제작을 완성하였다. Fig. 3(b)는 위의 모든 공정을 거쳐서 완성된 믹서의 실제 모습이다. 실험 시 주사기(syringe)에서 연결되어져 나오는 튜브를 바로 믹서에 연결하기 위하여 PDMS 몰드의 전체 두께는 5mm로 제작하였다.

3. 공초점 형광 이미지 측정

3.1 실험장치

제작된 마이크로믹서의 혼합효율을 정량적으로 계산해 내기 위한 공초점 형광 이미지 측정을 위하여 Leica Microsystems사의 TCS SL 현미경을 사용하였다. 공초점 현미경의 가장 큰 특징은 광검출기 앞에 핀홀을 위치시켜서 시편의 초점 평면상의 데이터만을 검출기에서 받아들이고 그 외의 평면에서 들어오는 불필요한 잡광을 제거할 수 있다는 것이다.⁽¹⁴⁾ 또한 레이저 빛의 강도에 따라 유동장을 분석하므로 기존의 측정방법이 정성적인 것에 비해 정량적인 측정이 가능하다. 하지만 측정도구로서 빛을 사용하기 때문에 회절한계로 인한 분해능의 한계를 갖기도 한다.⁽¹⁵⁾

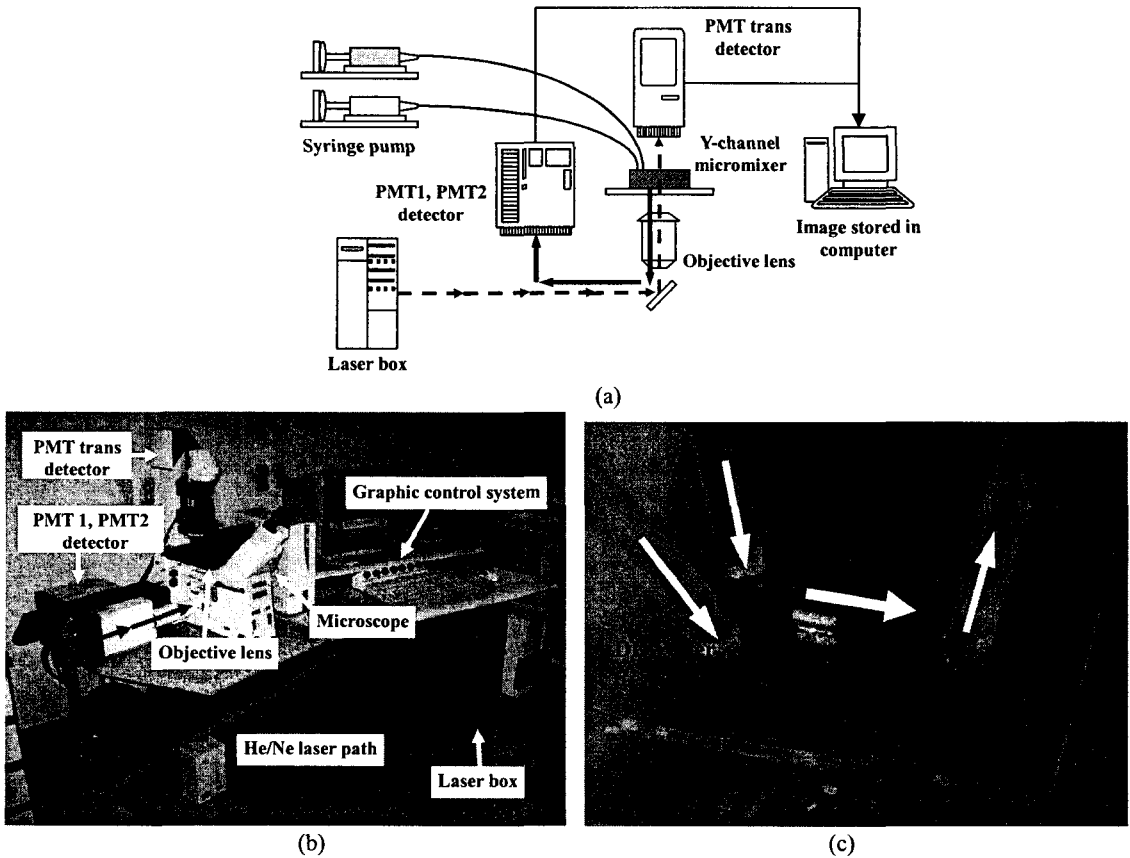


Fig. 4 Experimental setup (a) schematic diagram (b) overview of Leica TCS SL confocal fluorescence microscope (c) enlarged view of scanning the part of mixing region by He-Ne laser scanner

Fig. 4(b)는 공초점 형광 이미지 측정 장치의 전체 모습을 보여준다. 광원(laser box)로부터 나온 He-Ne 레이저는 대물렌즈(objective lens)를 통하여 혼합부에 조사된다. 혼합부에서 형광 염료에 반사되는 형광은 PMT1, PMT2 탐색기(detector)로 들어가 강도가 측정 된다. 혼합부를 투과한 레이저는 PMTtrans 탐색기로 들어가 투과 이미지를 보여준다. 이러한 정보들은 모니터를 통해 Fig. 5(c), (d)와 같이 구현된다. 이번 실험에서는 10 배율의 대물렌즈를 통해서 $1\mu\text{m}$ 의 수직 선명도를 가지는 채널 형상의 광학 이미지를 얻었다. 또한 여기(excitation)파장이 633 nm 인 He-Ne 레이저를 이용하여 633 ~ 658 nm 범위의 방출(emission)파장을 조사하여 형광 강도를 구해낸다. 조사된 이미지의 크기는 512×512 픽셀이고, 각 픽셀의 크기는 $0.49\mu\text{m}$ 이다.

우선 시뮬레이션과 동일한 조건을 갖추기 위하여 작동유체는 각각 3 차 증류수와 에탄올을 사용하였다. 여기에 혼합 정도를 알아보기 위해 에탄올에

만 형광 염료(Nile blue A, SIGMA-ALDRICH Inc.)를 섞는다. 두 작동 유체 중 에탄올에만 형광 염료를 섞은 이유는 물보다 에탄올에 섞었을 때 형광 강도가 현저히 증가되기 때문이다.⁽¹²⁾ 또한 형광 염료로 Nile blue A를 선택한 이유는 bio 및 재료 분야에서 일반적으로 널리 사용되고 있는 염료로, 최대 여기 파장이 약 635 nm이다. 이는 본 실험에서 사용한 He-Ne 레이저 스캐너의 조사 파장과 일치한다. 형광 염료의 농도는 $136\mu\text{M}$ 으로 유체의 유동특성에 미치는 영향은 없다고 하겠다.⁽¹⁷⁾

3.2 측정 및 혼합성능 계산

두 유체는 Fig. 4(c)에서 보이는 바와 같이 각각의 주사기에서 실린지 펌프에 의해 채널로 주입된다. 형상이 최적화된 채널의 수치해석은 $Pe=100$ 에서 실시되었다. 따라서 실험에서 역시 $Pe=100$ 을 이용하여 유량을 구해 수치해석의 조건과 일치시켰다.

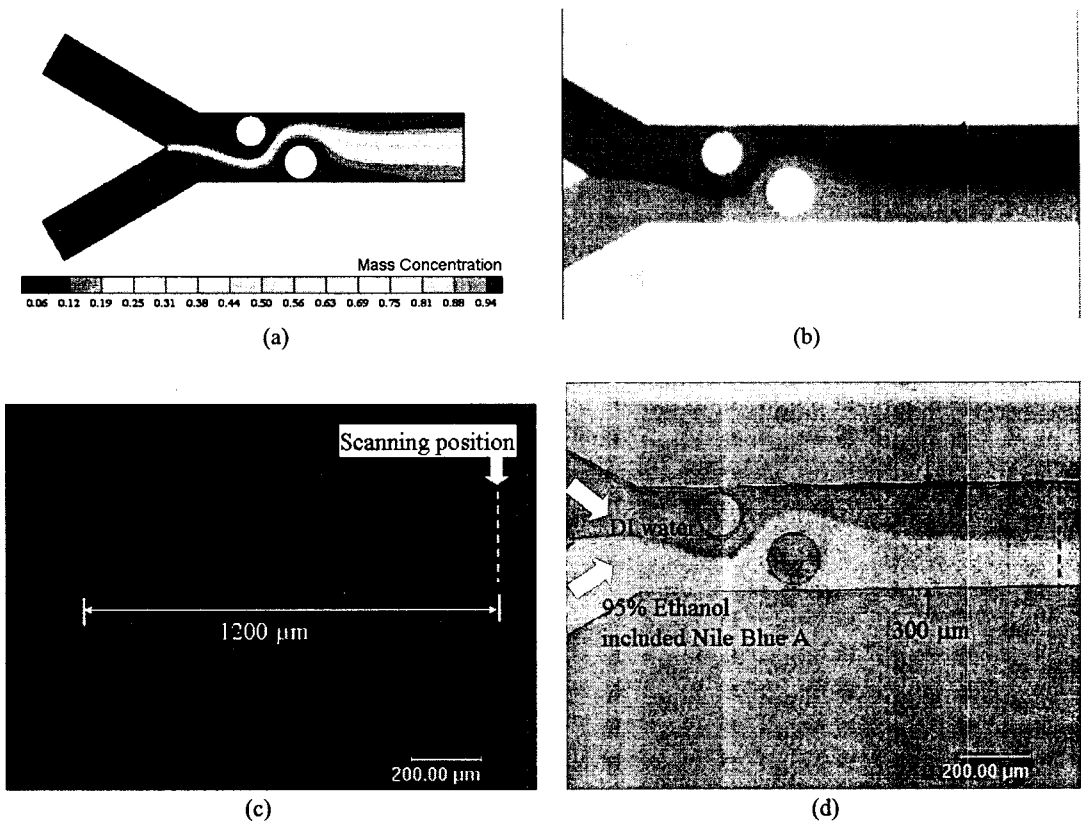


Fig. 5 Mixing results (a) mass concentration contour (b) observed by CAM scope with red and blue dye (c) fluorescence distribution of Nile Blue A by LIF confocal microscope (d) overlaid picture with Y-channel micromixer and fluorescence distribution

확산을 포함하는 비압축성 유동에서 중요한 무차원 수인 Reynolds 수와 Peclet 수는 다음과 같이 정의 된다.

$$Re = \frac{\rho \bar{u} l}{\mu} = \frac{\bar{u} l}{\nu} \quad (1)$$

$$Pe = \frac{\bar{u} l}{D} \quad (2)$$

여기에서, ρ 는 유체 밀도, \bar{u} 는 평균속도, μ 는 점성계수, l 은 특성길이, ν 는 동점성계수, 그리고 D 는 작동 유체의 평균확산계수이다. 또한 $Re=0.1061$ 로 매우 느린 저속유동이므로 비압축성 유동에 해당된다. 수치해석과 동일한 실험조건을 위하여 유량은 $0.576 \mu\text{l}/\text{min}$ 으로 입력하였다. 입구를 통해 들어온 유체는 혼합 부를 거쳐 출구로 빠져 나간다. 이 때, Fig. 4(c)에서와 같이 He-Ne 레이저가 혼합 부를 조사한다. 수치해석에서 출구가 된, 즉 채널길이 $1200 \mu\text{m}$ 지점에서 채널의 수

직방향으로 500 개 지점의 형광 강도를 측정하였다. 이 측정값을 이용하여 다음과 같이 혼합효율을 계산할 수 있다.

$$\eta = \left(1 - \frac{\sum_1^m |I_n - (I_{\max} + I_{\min})/2|}{\sum_1^m |I_{\min} - (I_{\max} + I_{\min})/2|} \right) \times 100 \% \quad (3)$$

여기서, I_n 은 n 번째 측정 지점에서의 형광 강도이고, I_{\min} , I_{\max} 는 각각 형광 염료를 넣지 않았을 때와 모두 넣었을 때의 형광 강도이다. m 은 측정된 지점의 총 개수이다.

식 (3)은 일반적으로 사용되는 혼합효율 식 (4)와 일치한다.⁽¹⁶⁾

$$\eta = \left(1 - \frac{\int_0^{2l} |c - c_{\infty}| dx}{\int_0^{2l} |c_0 - c_{\infty}| dx} \right) \times 100 \% \quad (4)$$

두 식을 비교해 보면 완전히 혼합 되었을 때의 농도 c_{∞} 는 $(I_{\max} + I_{\min})/2$ 로, 유체가 혼합되기 전의 초기농도 c_0 는 I_{\min} 으로, 출구 농도 c 는 I_n 으로 나타낼 수 있다. 따라서 식 (3)를 이용하여 이전 연구^(9,10)의 혼합효율을 평가 할 수 있다.

4. 결과

혼합 효율에 관한 측정 결과가 Fig. 5 에 정리 되었다. 우선, 시뮬레이션 결과인 Fig. 5(a)와 CAM scope 으로 촬영한 Fig. 5(b)를 비교해보면 두 입구로부터 유입되어 처음 만나는 부분부터 혼합이 되기 시작한다. 혼합부로 들어온 두 유체는 두 번째 장애물을 지나면서 혼합량이 커지는 모습을 관찰 할 수 있다. 이는 장애물이 지그재그로 비대칭적으로 위치할 때 더 높은 혼합 효율을 보인다는 수치해석 결과^(9,10)를 잘 설명한다.

다음으로 Fig. 5(c)는 He-Ne 레이저 스캐너로 조사된 모습을 보이고 있다. 위쪽 형광 염료가 섞이지 않은 3 차 증류수는 나타나지 않고, 아래쪽 형광 염료가 섞인 에탄올 부분만 붉게 나타난다. 장애물을 지난 출구 쪽을 보면 형광 염료가 없는 유체와 혼합이 되어 형광 강도가 흐려지는 모습을 볼 수 있다. 채널 벽면 위쪽에 흐린 형광물질들은 채널에 묻어있는 미소한 이물질들이다.

Fig. 5(d)는 채널의 형상과 형광 염료의 분포를 겹쳐 표현한 그림이다. 선명한 채널 형상을 보이기 위하여 빛의 양을 조절하는 과정에서 3 차 증류수 쪽에 분포된 형광 염료들이 나타나지 않게 되었다. Fig. 5(c)와는 달리 육안상 으로 혼합 분포를 확인하기 어렵다. 혼합 정도를 나타내기 위하여 입구에서 $1200\mu\text{m}$ 떨어진 곳의 형광 강도 분포를 측정하였다. 그 결과를 수치해석 결과와 비교하여 Fig. 6 에 나타내었다.

여기서, 형광 강도는 다음과 같이 표준화 되었다.

$$I^* = \frac{I_n - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (5)$$

I^* 는 표준화된 형광 강도이고, I_{\max} 는 두 유체에 모두 형광 염료를 넣었을 때 측정된 형광 강도이고, I_{\min} 은 두 유체에 모두 형광 염료를 넣지 않았을 때 측정된 형광 강도이다.

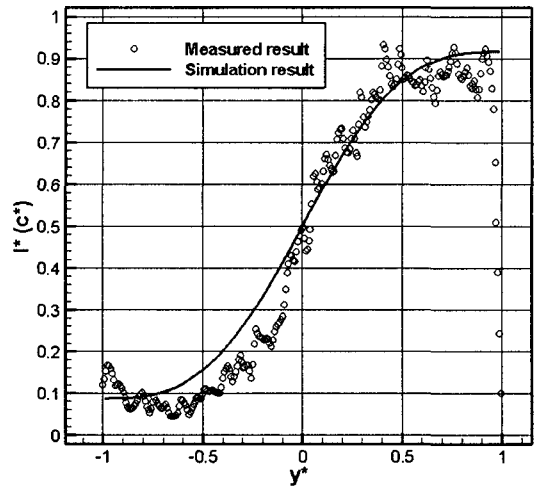


Fig. 6 Distributions cross the Y-channel (I^* : normalized value of measured fluorescence intensity, C^* : normalized value of simulated mass concentration, y^* : normalized y coordinate)

따라서, 혼합된 분포가 채널의 중심인 $y^* = 0$ 을 중심으로 그 분포가 대칭적으로 나타난다. 우선 형광염료가 섞인 에탄올 부분($y^* > 0.5$)은 수치해석 결과와 실험 결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 그러나 형광 염료가 섞이지 않은 3 차 증류수 부분($y^* < 0.5$)은 차이가 남을 알 수 있다. 이는 3 차원 효과를 고려하지 못한 수치해석 결과와의 차이에서 오는 것으로 사료된다.⁽¹³⁾ 또한 SU-8 몰드 및 PDMS 몰드 제작 과정에서 발생한 오차들이 수치해석 결과와 실제 실험결과의 차이를 더하고 있다. 결국 혼합 효율은 수치해석 결과 40.42%인 것에 반해 실험 결과 36.29%로 차이가 나게 되었다. 이를 극복하기 위해서 3 차원 효과와 장애물의 크기 및 정확한 위치에 대한 고정밀도의 채널 제작 기술이 요구된다.

5. 결론

본 연구에서는 PDMS Y-채널 마이크로믹서를 제작하고 LIF 공초점 현미경을 이용하여 두 유체의 혼합효율을 정량적으로 계산하였다. 먼저 SU-8 몰드에 PDMS 용액을 이용하여 채널을 형성시키고 이를 유리 웨이퍼에 플라즈마 접착 과정을 통하여 제작 하였다. 형광 염료가 첨가된 작동 유체를 채널 내에 주입하고 He-Ne 레이저로 혼합부를 조사하여 형광 강도를 측정하였다. 이를 바탕으로 계

산된 혼합 효율과 최적화 된 형상의 수치해석 결과와 비교/검증하였다.

추가적으로 CAM scope 을 이용하여 유동을 가시화 하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, CAM scope 을 이용하여 가시화된 유동 패턴을 수치해석의 결과인 질량 농도 분포와 비교해 봄으로써 질량 농도 수송방정식⁽⁹⁾을 이용한 수치적인 유체거동의 예측이 타당함을 실험적으로 확인할 수 있었다.

둘째, LIF 공초점 현미경을 이용하여 형광 염료의 혼합된 정도를 형광 이미지 측정으로 알아내었고, 이를 통하여 혼합 효율을 계산하여 마이크로믹서의 혼합 성능을 정량적으로 얻어낼 수 있었다.

셋째, 마이크로믹서의 제작과 실험을 통하여 수치적 기법으로 최적화 된 형상의 혼합 성능을 실험적으로 평가해 낼 수 있었다. 한편 더욱 정밀한 마이크로 채널 평가를 위해서는 3 차원 효과를 충분히 고려한 보다 정밀한 제작이 요구된다.

후 기

이 논문을 위하여 믹서 제작에 도움을 주신 한양대학교 대학원 정밀기계공학과 MEMS 연구실의 박사과정 최대진 연구원에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Stroock, A. D., Dertinger, S. K. W., Ajdari, A., Mezic, I., Stone, H. A. and Whitesides, G. M., 2002, "Chaotic Mixer for Microchannel," *Science*, Vol. 295, pp. 647~651.
- (2) Nguyen, N. T. and Wereley, S. T., 2002, "Fundamentals and Applications of Microfluidics," *Artech House*, Boston, pp. 386~401.
- (3) Yang, Z., Goto, H., Matsumoto, M. and Maeda, R., 2002, "Active Micromixer for Microfluidic Systems Using Lead-Zirconate-Titanate(PZT)-Generated Ultrasonic Vibration," *Electrophoresis*, Vol. 21, Issue 1, pp. 116~119.
- (4) Knight, J. B., Vishwanath, A., Brody, J. P. and Austin, R. H., 1998, "Hydrodynamic Focusing on a Silicon Chip: Mixing Nanoliters in Microseconds," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 80, No. 17, pp. 3863~3866.
- (5) Wolfgang, E., Volker, H. and Holger, L., 2002, "Microreactors," *Wiley*, Newyork, pp. 41~85.
- (6) Schwesinger, N., Frank, T. and Wurmus, H., 1996, "A Modular Microfluid System with an integrated Micromixer," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 6, pp. 99~102.
- (7) Koch, M., Chatelain, D., Evans, A. G. R. and Brunnschweiler, A., 1998, "Two Simple Micromixers Based on Silicon," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 8, pp. 123~126.
- (8) Wang, H., Iovenitti, P., Harvey, E. and Masood, S., 2002, "Optimizing Layout of Obstacles for Enhanced Mixing in Microchannels," *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, pp. 662~667.
- (9) Choi, J. W., Choi, H. I., Lee, D. H. and Lee, D., 2005, "Study on Mixing Enhancement of a Y-channel Micromixer with Obstacles," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 12, pp. 1369~1376.
- (10) Shin, Y. S., Choi, H. I., Lee, D. H. and Lee, D., 2006, "Optimum Design of a Y-channel Micromixer for Enhanced Mixing," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 30, No. 3, pp. 302~309.
- (11) Ryu, K. S. and Liu, C., 2002, "Precision Patterning of PDMS Thin Films : A New Fabrication Method and Its Applications," *Micro Total Analysis Systems*, Vol. 1, pp. 112~114.
- (12) Yoon, S. Y. and Kim, K. C., 2006, "Signal Intensity Enhancement of μ -LIF by Using Ultra-thin Laser Sheet Illumination and Aqueous Mixture with Ethanol /Methanol for Micro-channel Application," *Optics and Lasers in Eng.*, Vol. 44, pp. 224~239.
- (13) Wong, S. H., Ward, M. C. L. and Wharton, C. W., 2004, "Micro T-mixer as a Rapid Mixing Micromixer," *Sensors and Actuators B*, Vol. 100, pp. 359~379.
- (14) Jeremy, E. M., Camille A. Boulet, and Charles A. Lucy., 2001, "Indirect Laser-Induced Fluorescence Detection for Capillary Electrophoresis Using a Violet Diode Laser," *Anal. Chem*, Vol. 73, pp. 1809~1813.
- (15) Julius, C. F., Stephen C. Jacobson and J. Michael Ramsey., 1999, "Ultrasensitive Cross-Correlation Electrophoresis on Microchip Devices," *Anal. Chem*, Vol. 71, pp. 4460~4464.
- (16) Jeon, N. L., Dertinger, S. K. W., Chiu, D. T., Choi, I. S., Stroock, A. D. and Whitesides, G. M., 2000, "Generation of Solution and Surface Gradients Using Microfluidic Systems," *Langmuir*, Vol. 16, pp. 8311~8316.
- (17) Norbert, k., Thomas, k. and peter, w., 2004, "Numerical and Experimental Investigation on Liquid Mixing in Static Micromixers," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 101, pp. 315~322.