

배리어가 포함된 카오스 마이크로 믹서의 개발

김동성[†] · 이석우* · 권태현* · 이승섭*

(2003년 5월 9일 접수, 2003년 10월 29일 심사완료)

Development of a Barrier Embedded Chaotic Micromixer

Dong Sung Kim, Seok Woo Lee, Tai Hun Kwon and Seung S. Lee

Key Words : Chaotic Mixing(카오스 혼합), Micromixer(마이크로 믹서), Barrier(배리어), Microfluidics(미세 유체공학)

Abstract

It is of great interest to enhance mixing performance in a microchannel in which the flow is usually characterized as a low Reynolds number (Re) so that good mixing is quite difficult to be achieved in this laminar flow regime. In this regard, we present a new chaotic passive micromixer, named Barrier Embedded Micromixer (BEM), of which the mixing mechanism is based on chaotic flows. In BEM, chaotic flow is induced by periodic perturbation of the velocity field due to periodically inserted barriers along the channel wall while a helical type of flow is obtained by slanted grooves on the bottom surface of the channel in the pressure driven flow. To experimentally compare the mixing performance, a T-microchannel and a microchannel with only slanted grooves were also fabricated. All microchannels were made of PDMS (Polydimethylsiloxane) from SU-8 masters that were fabricated by conventional photolithography. Mixing performance was experimentally characterized with respect to an average mixing intensity by means of color change of phenolphthalein as pH indicator. It was found that mixing efficiency decreases as Re increases for all three micromixers. Experimental results obviously indicate that BEM has better mixing performance than the other two. Chaotic mixing mechanism, suggested in this study, can be easily applied to integrated microfluidic systems, such as Micro-Total-Analysis-System, Lab-on-a-chip and so on.

기호설명

d : 유동 층 두께
 D : 확산계수
 \bar{I} : 표준 평균 강도
 I_{\max} : 최대 강도
 I_n : 화소 n 에서의 강도
 \bar{I}_{REF} : 평균 총괄 기준 강도
 \bar{I}_{ref} : 평균 국부 기준 강도
 N : 포착화면 내의 총 화소 수
 Q : 평균 유량

$\Delta S_{unmixed}$: 표준 비혼합 넓이
 t : 전체 혼합 소요 시간
 z : 하류 방향 좌표
 λ : 혼합 소요 특성 길이

1. 서론

최근 들어 마이크로 토탈 분석 시스템 (micro total analysis systems), Lab-on-a-chip 및 임상 진단 (clinical diagnostics) 등의 여러 분야에서 마이크로 유체공학 시스템(microfluidic systems)의 많은 적용 사례들이 보고되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 이 때 이러한 마이크로 유체공학 시스템에서 혼합은 중요한 역할을 하고 있다.⁽²⁾ 빠른 진단 결과를 얻기 위해서 시약의 효과적인 혼합은 필수적이나, 진단 시스템의 마이크로 채널 내부 유동이 가지는 작은 Reynolds 수

[†] 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
 E-mail : smkds@postech.ac.kr
 TEL : (054)279-2836 FAX : (054)279-5899
 * 포항공과대학교 기계공학과

(Re)로 인해 두 유체의 난류를 이용한 혼합은 거대하기 어렵다. 만약 확산 전달만을 이용하여 혼합을 일으킬 경우 Pick의 법칙을 재배열하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$t \sim d^2 / D \quad (1)$$

이 때 t , d , D 는 각각 전체 혼합 소요 시간, 유동층 두께, 확산계수에 해당한다. 일반적으로 D 는 약 $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 수준의 크기를 가지고 있기 때문에 약 $100\mu\text{m}$ 수준의 두께를 가지는 두 유동층이 혼합되기 위해서는 몇 분 정도의 시간이 소요된다. 이러한 관점에서 마이크로 채널 내부에서 효과적인 혼합 성능을 얻기 위해, 높은 압력 손실을 유발할 수 있지만 좋은 혼합 성능을 보이는 유체 유동의 적층(lamination) 방법,⁽⁵⁾ 다양한 카오스 혼합 메커니즘,⁽⁶⁻⁹⁾ 기울어진 구덩이(slanted well)를 통해 유체의 횡단 유동을 유발하는 방법⁽¹⁰⁾ 등의 여러 가지 혼합 메커니즘이 보고 되었다.

이 때 이들 여러 혼합 메커니즘들 중에서 마이크로 채널 내부의 Stoke 유동에 대해서 카오스 혼합 메커니즘이 상대적으로 작은 압력 손실에 대해서도 좋은 혼합 성능을 나타내는 것이 알려져 있다. 유체의 유동 외에 혼합을 위한 다른 구동원을 이용하는 능동 혼합 방식 중에서, 시간 주기적인 교란을 2차원 유동에 도입하여 비정상 유동을 유발함으로써 마이크로 채널 내에서 카오스 혼합을 얻을 수 있다. Lee 등⁽⁶⁾은 2차원 층류 유동에 주기적인 압력 교란을 도입하여 카오스 혼합을 얻은 바 있다. 하지만 이 경우 유동의 구동원 외에 혼합을 위한 다른 에너지원을 필요로 하는 단점이 있다. 반면에 3차원 유동에 공간 주기적인 교란을 도입하여 수동적으로 카오스 혼합을 유도하는 것이 가능하다. 공간 주기적인 교란은 유동 물질 요소(material element)의 재배열(reorientation)을 유발하여 유동장의 카오스를 유발하게 된다.⁽¹¹⁾ Liu 등⁽⁷⁾은 3차원 뱀(serpentine) 모양의 마이크로 채널을 제작하여 카오스 이류(chaotic advection)를 유발함으로써 카오스 혼합을 유도한 바 있다. 하지만 이 경우 관성력에 기반을 둔 카오스 이류 방법의 효과를 보기 위해 다소 큰 Re 를 요구하게 되는 단점이 있다. Bertsch 등⁽⁸⁾은 초소형광조형기술(microstereolithography technique)을 이용하여 분할 및 재배열(splitting and reorientation) 방식을 취하는 기존의 혼합기를 축소하여 마이크로 채널에서의 카오스 혼합을 얻었다. 이 방법은 기존의 완전 3차원 형상의 혼합기를 축소하였기 때문에 일반적인 MEMS(Microelectromechanical System) 구현 기술인 노광 공정(photolithography)을 통해 구현하기 어렵

다. Stroock 등⁽¹²⁾은 수치 및 실험적으로 경사진 용기 형상(oblique ridge)이 마이크로 채널에서 3차원의 나선형 유동을 유발하는 것을 보였다. 또한 Stroock 등⁽⁹⁾은 엇갈린 오니 구조(staggered herringbone structure)를 마이크로 채널 벽면에 도입하여 주기적으로 변하는 속도장을 통해 카오스 혼합을 유도하였다. 엇갈린 오니 구조는 서로 다른 위치에 존재하는 포물선형 점(parabolic point)으로 특징 지워지는 두 반대 방향 회전 유동(counter-rotating flows)을 유발하게 된다. 결과적으로 두 가지 다른 3차원 속도장의 주기적인 변화를 통해 마이크로 채널 내부에서 카오스 혼합을 일으키는 것이 가능하였다. 하지만 혼합 성능 면에 있어서는, 두 동일 방향 회전 유동(co-rotating flows)에 의해서 형성되는 쌍곡선형 점(hyperbolic point)이 작은 Re 영역에 대해서도 기하급수적인 접촉면의 증가를 유도하여 높은 수준의 카오스 혼합을 야기하므로, 쌍곡선형 점의 존재가 중요한 역할을 하게 된다.⁽¹¹⁾

Fig. 1은 Kim과 Kwon에 의해 제안되어 압출 성형에 있어 카오스 혼합의 실제적 적용 사례가 된 “카오스 스크류(Chaos screw)”를 보여준다.⁽¹³⁾ 이 카오스 스크류는 기존의 스크류 구조 내의 두 인접한 날개(flight) 사이에 주기적으로 도입된 배리어 구조를 통해 쌍곡선형 점을 성공적으로 생성하였다. 압출 성형에 있어서 Fig. 1(d)에서 보여지는 단면 유동장을 가지는 3차원 나선 유동은 배럴 내부의 스크류 운동에 의해 발생된다. 이 때 배리어 구조는 나선형 유동을 Fig. 1(e)의 단면 유동을 가지는 속도장으로 변화시키며, 주기적인 배리어 구조는 공간 주기적인 교란을 일으키게 되어,⁽¹³⁾

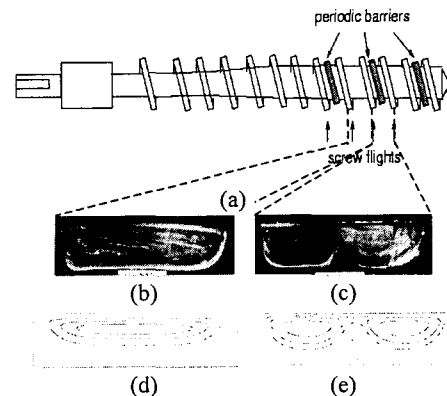


Fig. 1 Chaos screw proposed by Kim and Kwon⁽¹³⁾: (a) schematic of chaos screw, mixing experimental results at zones (b) without and (c) with barrier, and cross-sectional streamlines at zones (d) without and (e) with barrier

결과적으로 Fig. 1(d)와 1(e)의 주기적인 속도장 변화를 통한 카오스 혼합을 야기하게 된다(Fig. 1(c)).

다음 장에서부터는, 이러한 카오스 혼합 메커니즘을 기반으로 나선형 유동을 생성하여 주기적인 쌍곡선 형 점을 유발하는 새롭게 디자인된 마이크로 믹서를 제안하는 한편, 제안된 마이크로 믹서에 pH 지시약을 이용하여 수행된 혼합 실험 및 카오스 혼합의 실험 결과를 소개할 것이다.

2. 혼합 실험

2.1 카오스 마이크로 믹서의 디자인

본 논문에서 제안된 카오스 마이크로 믹서의 카오스 혼합 메커니즘은 위에서 설명한 바와 같이 카오스 스크류에 기반을 두고 있다. Fig. 2는 제안된 마이크로 믹서와 이에 따른 단면 유동장도 도식적으로 보여준다. 3 차원 나선형 유동은 마이크로 채널의 한 벽면에 설치된 경사진 홈들(slanted grooves)을 통해 유도되었으며, 이러한 나선형 유동의 단면 유동장은 Fig. 2(c)에서 표시된 바와 같이 하나의 타원형 점(elliptic point)을 가지게 된다. 이러한 나선형 유동의 단면 유동장은 벽면에 배리어가 설치될 경우 Fig. 2(b)에서 표시된 바와 같이 하나의 쌍곡선형 점과 두 개의 타원형 점을 가지는 두 동일 방향 회전 유동으로 변하게 된다. 주기적으로 설치된 배리어들은 경사진 홈들에 의해 유도된 나선형 유동에 공간 주기적인 교란을 일으키게 되며, 결과적으로 주기적인 속도장의 변화를 야기한다. 유동 물질 요소가 겪게 되는 Fig. 2(b)와 2(c) 속도장의 주기적 변화는 비교적 작은 압력 손실로도 높은 수준의 혼합 성능을 보이는 카오스 혼합을 유도하게 된다.⁽¹⁴⁾ 이러한 마이크로 믹서의

디자인을 바탕으로 본 논문에서는 제안된 카오스 마이크로 믹서를 배리어가 포함된 마이크로 믹서(Barrier Embedded Micromixer; BEM)라 명명한다.

여기서 앞서 설명한 Stroock 등⁽⁹⁾에 의해 제안된 Staggered Herringbone Mixer (SHM)와 본 연구에서 제안된 BEM의 혼합 메커니즘을 비교해 보고자 한다. BEM 내부의 유동장은 언급한 바와 같이 동일 방향 회전 유동에 의해 형성되는 쌍곡선형 점이 주기적으로 나타나는 형태를 띠고 있다. 쌍곡선형 점은 그 주위에서 극도의 신장(stretching)을 일으키게 되며,⁽¹¹⁾ 배리어의 주기적인 존재로 인해 신장과 접음(stretching and folding)의 혼합 메커니즘을 통해 효과적인 카오스 혼합이 유도된다.^(13,14) 이에 반해 SHM⁽⁹⁾ 내부의 유동장의 경우 언급한 바와 같이 반대 방향으로 회전하는 유동에 의해 형성되는 포물선형 점의 위치가 주기적으로 변하는 형태를 띠고 있다. 이 경우 포물선형 점 주위에서는 쌍곡선형 점에 비해 신장 효과는 떨어지게 되지만, SHM은 절단과 재배열(cutting and reorientation)의 혼합 메커니즘을 가지고 있어 효과적인 카오스 혼합을 유도하게 된다. 이러한 점에서 본 연구에서 제시된 BEM의 혼합 메커니즘은 SHM의 혼합 메커니즘과 분명하게 구분된다고 할 수 있다.

또한 앞서 설명된 BEM 내부의 경사진 홈들은 마이크로 채널의 위와 아래의 두 면에 모두 설치되는 것이 가능하다. 이러한 디자인은 보다 강한 나선형 유동을 유발할 수 있으며, 이는 보다 높은 수준의 카오스 혼합을 야기한다. 실제로 이러한 디자인을 가지는 BEM과 초기 카오스 혼합 확인 실험 결과들은 본 연구자들에 의해 μ TAS 2002, MEMS 2003에서 발표된 바 있다.^(15,16) 하지만 본 연구에서는 경사진 홈들이 마이크로 채널의 바닥면의 한 면에만 설치된 보다 간단한 디자인의 BEM을 이용하였다.

2.2 마이크로 믹서의 제작

BEM의 혼합 성능을 실험적으로 특성화하기 위해, T-채널, 경사진 홈들만을 가지는 마이크로 채널, BEM의 세 가지 종류의 마이크로 믹서를 제작하였다. Fig. 3은 본 연구에서 제작된 실제 BEM의 경사진 홈들을 가지는 채널과 배리어 구조를 보여주고 있다. 모든 마이크로 믹서들의 마이크로 채널 너비, 두께, 길이는 각각 240 μ m, 60 μ m, 2.1cm이며, 기울어진 홈들만을 가지는 마이크로 채널과 BEM의 홈들의 길이, 깊이는 각각 100 μ m과 9 μ m이며, 홈들은 45°로 기울어져 있다. 마지막으로 BEM의 배리어의 너비와 높이는 각각 30 μ m와

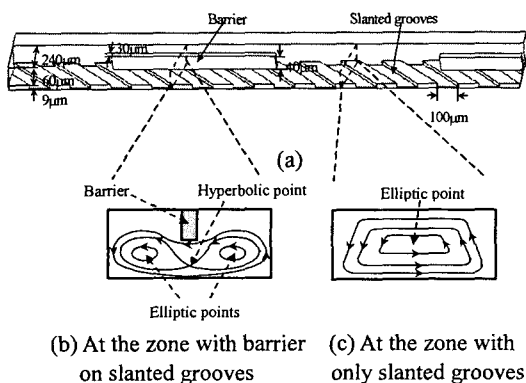


Fig. 2 Barrier Embedded Micromixer: (a) schematic view, (b) and (c) corresponding cross-sectional velocity fields

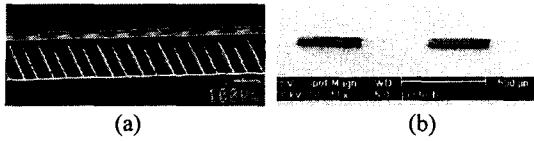


Fig. 3 Realized chaotic micromixer, BEM: SEM photographs of (a) slanted grooves and (b) barriers

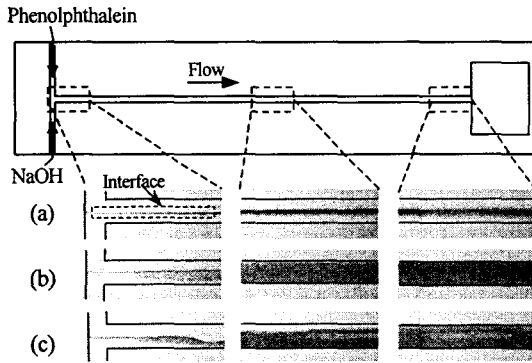


Fig. 4 Mixing experimental results of: (a) T-channel, (b) only slanted grooves and (c) BEM at the indicated positions at $Q = 10.0 \mu\text{l}/\text{min}$ ($Re \approx 0.457$)

$40 \mu\text{m}$ 이다 (Fig. 2(a)). 모든 세 마이크로 믹서들은 일반적인 노광 공정에 의해 제작된 SU-8 마스터(master)를 이용한 몰딩을 통해 PDMS (Polydimethylsiloxane)로 제작되었다. 이 때 BEM의 제작을 위한 SU-8 마스터들은 투스텝 노광 공정과 원스텝 노광 공정을 통해 제작되었다. 투스텝 노광 공정은 Fig. 3(a)에서 보여지는 기울어진 홈들을 포함한 마이크로 채널의 마스터를 제작하기 위한 공정에 해당한다: 첫번째 스텝은 마이크로 채널의 양각을 규정하며, 두 번째 스텝은 첫번째 스텝에서 제작된 마이크로 채널 양각 구조의 윗면에 기울어진 홈들의 양각을 규정하게 된다. 또한 Fig. 3(b)에서 보여지는 배리어를 포함한 BEM의 덮개를 정의하게 되는 마스터는 원스텝 공정을 통해 제작되게 된다. 제작된 SU-8 마스터들로부터 몰딩되어 제작된 기울어진 홈들을 포함하는 마이크로 채널 판(Fig. 3(a))과 배리어를 포함하는 덮개 판(Fig. 3(b))은 신중하게 정렬되어 접합되었다. 접합하는 시점에서는, PDMS 판들의 산소 플라즈마 처리 후 생길 수 있는 부적절한 접합을 방지하기 위해 메탄올을 계면 활성제로 사용하였다.⁽¹⁷⁾

2.3 실험 장치 및 실험 방법

압력 구동 유동의 혼합 실험을 위해, 주사기 펌프(syringe pump)를 이용하여 일정 유량으로 두 유체를 주입하였다. 제작된 마이크로 믹서들의 혼합

성능을 정량화하기 위해 pH 지시약인 페놀프탈레인(phenolphthalein)과 NaOH 용액을 이용하였다. 사용된 용액들은 99%의 에탄올에 각각 0.31 mol/L 의 페놀프탈레인과 0.33 mol/L 의 NaOH를 녹여서 사용하였다. 이 때 0.33 mol/L 의 NaOH 용액은 13 정도의 pH를 보였으며, 페놀프탈레인은 pH가 8보다 커질 때만 무색에서 붉은색으로 변하게 된다. 따라서 두 용액들을 마이크로 믹서들로 주입할 경우 두 유체 간에 형성되는 경계면에서만 붉은색을 나타내기 때문에 붉은색의 강도를 측정함으로써 하류방향을 따라 혼합 성능을 측정하는 것이 가능하다.⁽⁷⁾ 실제 실험에 있어서는 유량의 영향을 알아보기 위해 각 마이크로 믹서들에 대해 유량을 변화시키며 실험을 수행하였다. 마이크로 믹서 내부의 용액의 색 변화는 실제 현미경을 통해 40배 확대하여 화면을 포착하여 측정하였다. 이 때 조명은 마이크로 믹서 바로 위에 설치된 낙사방식의 원형 백색 형광등을 이용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 마이크로 믹서들의 혼합 성능 비교

Fig. 4는 마이크로 믹서의 하류 방향을 따라 측정된 표시된 부분에서의 실험 결과를 보여준다. 이 경우 BEM의 배리어는 5개의 기울어진 홈들마다 1개씩 설치되었다. 실제로 Fig. 4(a)에서 보여지는 것처럼 페놀프탈레인 용액 유동에서 NaOH 용액과의 경계면에서만 페놀프탈레인이 반응하여 붉은색을 나타내게 되며, 반응이 일어난 페놀프탈레인들이 겹쳐진 경우에는 조명 장치로 사용된 백색광의 비간섭성으로 인해 보다 강한 강도의 붉은색을 나타내게 된다.⁽⁷⁾ 따라서 붉은색의 강도는 간접적으로 마이크로 믹서 내부의 혼합 정도를 보여주는 것으로 가정하는 것이 가능하다. 실험 결과에서 혼합된 정도만을 고려할 경우, Fig. 4의 채널 말단에서 볼 수 있듯이 BEM의 혼합 성능이 뛰어나게 나타나고 있음을 알 수 있다. 하지만 마이크로 믹서들의 보다 정량적인 혼합 성능의 비교를 위해서 각 마이크로 믹서의 하류 방향을 따라 붉은색의 강도를 측정하였다. 마이크로 믹서 전체 길이 21 mm 를 총 11 구간으로 나누었으며, 초기 10 구간은 2 mm 의 길이를 가지게 하였으며, 마지막 11번째 구간은 1 mm 의 길이를 가지게 하였다. 측정된 붉은색의 강도는 다음과 같은 식을 이용하여 표준화하였다.

$$\bar{I} = \frac{I_{REF}}{I_{ref}} \frac{1}{I_{max}} \sum_{n=1}^N \frac{I_n}{N} \quad (2)$$

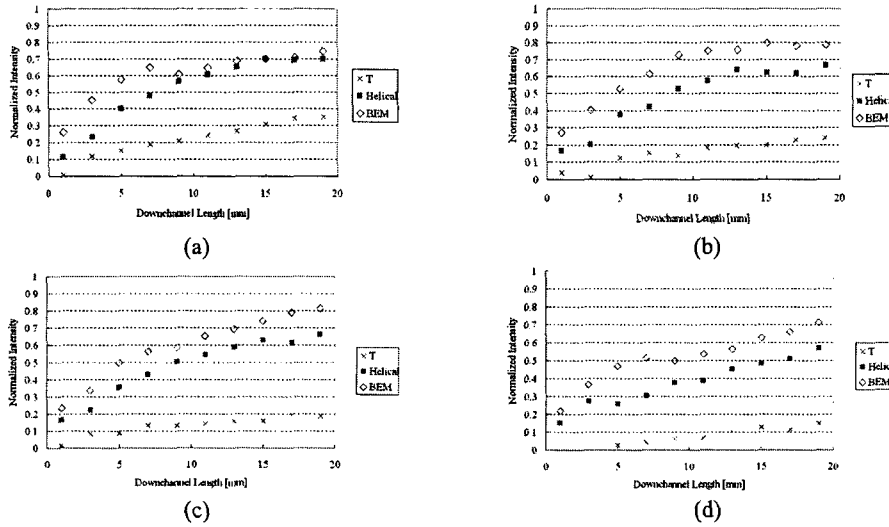


Fig. 5 Normalized average intensity changes along the downchannel direction of three micromixer, T-channel (denoted by “T”), microchannel having only slanted grooves (denoted by “Helical”), and BEM, for $Re \approx$ (a) 0.228, (b) 0.457, (c) 0.685 and (d) 2.28

이 때 \bar{I} , \bar{I}_{REF} , \bar{I}_{ref} , I_{max} , I_n , N 는 각각 표준 평균 강도, 평균 총괄 기준 강도, 평균 국부 기준 강도, 최대 강도, 화소 n 에서의 강도, 포착화면 내의 총 화소 수에 해당한다. 실험 시 혼합되는 영상을 일정길이로 포착하였기 때문에, 포착화면 내의 강도의 총합, $\sum_{n=1}^N I_n / N$ 을 이용하여 하류 방향의 혼합 성능 변화를 정량화하였다. 이 때 제작된 세가지 마이크로 믹서들의 혼합 성능을 비교하려 할 때 주어진 강도의 총합만으로는 정확한 비교가 어려울 수 있다. 이에 본 연구에서는 기존의 연구들^(7,10)과 마찬가지로 BEM의 출력 부분에서 붉은 색의 최대 강도, I_{max} 를 기준으로 삼아 표준화를 수행하였다. 이에 더하여 본 연구에서는 마이크로 믹서 내의 혼합 실험이 동일한 조건 하에서 수행되었다 하더라도 화면 포착 CCD 카메라 혹은 조명 장치의 상태에 따라 일어날 수 있는 강도의 차이를 보상하기 위해 $\bar{I}_{REF} / \bar{I}_{ref}$ 항을 도입하였다. \bar{I}_{REF} 값은 투명한 PDMS의 영상을 포착하여 화면 내 화소들의 강도를 평균하여 구하였으며, \bar{I}_{ref} 값은 각 혼합 실험 시의 PDMS 부분에 해당하는 영상 내의 화소들의 강도를 평균하여 구했다. 결과적으로 기준 강도들의 비인 $\bar{I}_{REF} / \bar{I}_{ref}$ 는 국부 기준 영상이 총괄 기준 영상보다 어렵게 포착된 경우 계산된 평균 표준 강도의 값을 낮추는 효과를 내며, 밝게 포착된 경우는 평균 표준 강도의 값을 높이는 효과를 낳게 되는 효과를 낸다.

Fig. 5는 식 (2)에 따라 여러 Re 값에 대해 계산

된 평균 표준 강도의 변화를 하류 방향을 따라 도시한 것이다. 이 때 Fig. 5의 범례에는 T-채널은 “T”로 기술어진 홈들만을 가지는 마이크로 채널은 “Helical”로 BEM은 “BEM”으로 표시하였으며, 각 표준 강도 값들은 포착된 영상의 중앙 지점에 해당하는 위치에 표시하였다. Fig. 5에 보여지는 것처럼, 모든 마이크로 믹서들의 혼합 성능은 Re 가 증가함에 따라 떨어지는 것을 알 수 있다. 일정 수준의 혼합을 위해 동일한 혼합 시간이 필요한 경우, 유체의 속도가 빠르면 보다 긴 혼합 길이가 요구된다. 즉 확산 계수, 유동 층 두께 등의 조건이 동일할 경우 식 (1)의 결과에 따라 동일한 수준의 혼합 성능을 얻기 위해서는 마이크로 믹서 내부의 유체의 속도가 빠른 경우 보다 긴 혼합 길이가 요구되어 결과적으로 Re 가 커질수록 혼합 성능이 떨어지게 되는 결과를 보이게 된다. 이는 Peclet 수가 증가함에 따라 혼합 요구 길이가 로그 수준으로 증가한다는 Stroock 등⁽⁹⁾의 결과와 일치한다. 마지막으로 BEM은 다른 두 가지 마이크로 믹서보다 모든 Re 에 대해 좋은 혼합 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

3.2 혼합 소요 특성 길이

본 논문에서는 보다 정량화된 혼합 성능의 비교를 위해서 혼합 성능을 가능할 수 있는 특성 수를 제안하였다. 우선 혼합이 일어나지 않은 영역을 고려하기 위해 이를 표현하는 표준 비혼합 길이, $\Delta S_{unmixed}$ 를 정의하고, $\Delta S_{unmixed}$ 가 식 (2)에서 구한 표준 평균 강도의 값에 역비례하며, 하류 방향

을 따라 지수적으로 감소한다고 가정하였다. 이러한 가정을 바탕으로 혼합 소요 특성 길이 (characteristic required mixing length), λ , 를 도입하여 $\Delta S_{unmixed}$ 를 다음과 같이 표현하였다.

$$\Delta S_{unmixed} \sim \exp\left[-\frac{z}{\lambda}\right] \quad (3)$$

이 때 z 는 하류 방향 좌표를 의미한다. 이 때 $\Delta S_{unmixed}$ 의 정의에 따라 $\Delta S_{unmixed} = 0, 1$ 은 각각 완전 혼합, 완전 비혼합을 의미함을 알 수 있다. Fig. 5 의 결과를 이용하여 $\Delta S_{unmixed}$ 를 각 마이크로 믹서의 하류 방향을 따라 도시하여, 식 (3)을 기반으로 최적 곡선 맞추기(optimal fitting)를 수행하여 각 Re 에 대한 λ 를 계산하였다. Fig. 6 는 이렇게 계산된 각 마이크로 믹서의 λ 를 유량에 대한 함수로 도시한 것이다. Fig. 6(a)에서 보듯이 유량이 증가할수록 모든 마이크로 믹서들에 대해 λ 가 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 Fig. 6 으로부터 BEM 의 혼합 성능은 T-채널에 비해서 낮은 유량의 경우 약 4 배, 높은 유량에 대해서 약 10 배 가량 높게 나타나며, 기울어진 홈들만을 가진 마이크로 채널에 대해서는 전 유량 영역에 대해 약 2 배 가량 높은 성능을 나타내고 있음을 알 수 있다.

이러한 결과는 본 논문에서 제안된 마이크로 믹서인 BEM 내부에서 일어나는 카오스를 반증한다. 즉 포물선형 점과 쌍곡선형 점으로 특징지어지는

Fig. 2(b)와 2(c)의 두 속도장의 주기적인 변화가 효과적인 신장과 접음(stretching and folding)을 낳게 되어 결국 카오스 유동을 유발하게 되는 것이다.⁽¹⁴⁾ 특히 쌍곡선형 점 근처의 물질 요소는 극도의 신장을 겪게 되는 특징이 있으며, 결과적으로 이러한 혼합 메커니즘은 기하급수적인 경계면의 증가를 낳게 되어 수동 마이크로 믹서인 BEM 내부에 효과적인 카오스 혼합을 유도한다.

4. 결론

본 논문에서는 마이크로 채널에 적용 가능한 카오스 혼합 메커니즘이 새로이 제안되었으며, 제안된 카오스 마이크로 믹서, BEM 을 실제로 제작하고 혼합 실험을 통해 카오스 혼합을 확인하였다. 본 연구에서 수행된 혼합 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다:

(1) 페놀프탈레인을 이용한 실험을 통해 모든 마이크로 믹서들에 대해 Re 가 커질수록 혼합 성능이 떨어지는 양상을 확인할 수 있지만, BEM 은 다른 마이크로 믹서들에 비해 좋은 혼합 성능을 보이는 것을 알 수 있었다.

(2) 제안된 혼합 소요 특성 길이의 계산을 통해 BEM 의 혼합 성능은 T-채널에 비해서 낮은 유량의 경우 약 4 배, 높은 유량에 대해서 약 10 배 가량 높게 나타나며, 기울어진 홈들만을 가진 마이크로 채널에 대해서는 전 유량 영역에 대해 약 2 배 가량 높은 성능을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

이러한 실험 결과들은 BEM 내부에 설치된 주기적 배리어 구조에 의해 형성된 카오스를 반증한다. 쌍곡선형 점 근처의 유체 물질 요소는 극도의 신장을 겪게 되며, 주기적으로 변화하는 속도장은 효과적인 신장과 접음을 일으켜 기하급수적인 경계면의 증가를 낳게 된다. 결과적으로 본 논문에서 제안된 BEM 을 통해 마이크로 채널 내부에서 상대적으로 큰 압력 손실 없이 효과적인 카오스 혼합을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

마지막으로 본 연구에서 제안된 카오스 혼합 메커니즘은 마이크로 토탈 분석 시스템 혹은 Lab-on-a-chip 등의 통합 마이크로 유체공학 시스템에 쉽게 적용될 수 있을 것이다.

후 기

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

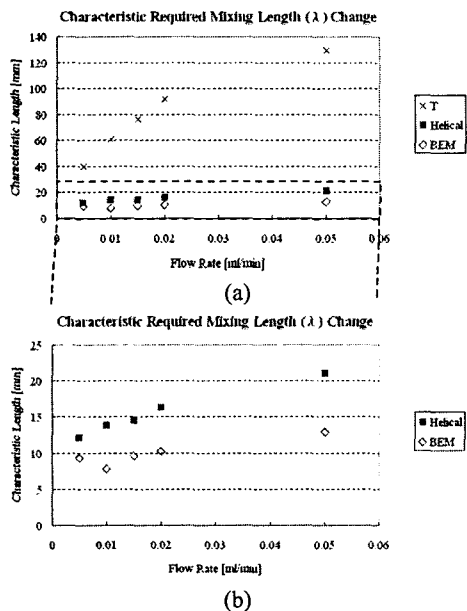


Fig. 6 Characteristic required mixing length of (a) all three micromixers and (b) only grooved channel and BEM, for several flow rates.

참고문헌

- (1) Reyes, D.R., Iossifidis, D., Auroux, P.-A. and Manz, A., 2002, "Micro Total Analysis Systems. 1. Introduction, Theory, and Technology," *Anal. Chem.*, Vol. 74, pp. 2623~2636.
- (2) Auroux, 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) Chow, A.W., 2002, "Lab-on-a-Chip: Opportunities for Chemical Engineering," *AIChE J.*, Vol. 48, pp. 1590~1595.
- (4) Verpoorte E., 2002, "Microfluidic Chips for Clinical and Forensic Analysis," *Electrophoresis*, Vol. 23, pp. 677~712.
- (5) Branebjerg, J., Gravesen, P. and Krog, J.P., 1996, "Fast Mixing by Lamination," *MEMS 96*, San Diego, CA, February 11-15, pp. 441~446.
- (6) Lee, Y.-K., Deval, J., Tabeling, P. and Ho, C.-M., 2001, "Chaotic Mixing in Electrokinetically and Pressure Driven Micro Flows," *MEMS 2001*, Interlaken, Switzerland, January 21-25, pp. 483~486.
- (7) Liu, R.H., Stremler, 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.
- (8) Bertsch, A., Heimgartner, S., Cousseau, P. and Renaud, P., 2001, "Static Micromixers Based on Large-Scale Industrial Mixer Geometry," *Lab Chip*, Vol. 1, pp. 56~60.
- (9) 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.
- (10) Johnson, T.J., Ross D. and Locascio, L.E., 2002 "Rapid Microfluidic Mixing," *Anal. Chem.*, Vol. 74, pp. 45~51.
- (11) Ottino, J.M., 1989, *The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos, and Transport*, Cambridge Univ. Press, New York.
- (12) Stroock, A.D., Dertinger, S.K.W., Whitesides, G.M. and Ajdari, A., 2002, "Patterning Grooves Using Grooved Surfaces," *Anal. Chem.*, Vol. 295, pp. 5306~5312.
- (13) Kim, S.J. and Kwon, T.H., 1996, "Enhancement of mixing performance of single screw extrusion processes via chaotic flows," *Adv. Polym. Tech.*, Vol. 15, pp. 41~69.
- (14) Hwang, W.R. and Kwon, T.H., 2000, "Dynamical Modeling of Chaos Single-Screw Extruder and Its Three-Dimensional Numerical Analysis," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 40, pp. 702~714.
- (15) Kim, D.S., Lee, S.W., Kwon, T.H. and Lee, S.S., 2002, "Barrier Embedded Chaotic Micromixer," *Proc. Micro Total Analysis Systems 2002*, Kluwer Academic Publishers, Nara, Japan, pp. 757~759.
- (16) Kim, D.S., Lee, S.W., Kwon, T.H. and Lee, S.S., 2003, "Barrier Embedded Chaotic Micromixer," *MEMS 2003*, Kyoto, Japan, January 19-23, pp. 339~342.
- (17) Jo, B.-H., Van Lerberghe, L.M., Motsegood, K.M. and Beebe, D.J., 2000, "Three-Dimensional Micro-Channel Fabrication in Polydimethylsiloxane (PDMS) Elastomer," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 9, pp. 76~81.