

< 논문 >

마이크로 광 조형기술을 이용한 3 차원의 배리어가 포함된 케닉스 마이크로 믹서의 개발

김동성[†] · 이인환* · 권태현** · 조동우**
(2004 년 12 월 23 일 접수, 2005 년 4 월 13 일 심사완료)

Development of a Three-Dimensional Barrier Embedded Kenics Micromixer by Means of a Micro-Stereolithography Technology

Dong Sung Kim, In Hwan Lee, Tai Hun Kwon and Dong-Woo Cho

Key Words : Barrier(배리어), Chaotic Mixing(카오스 혼합), Microfluidics (미세 유체공학), Micromixer (마이크로 믹서), Micro-Stereolithography Technology(마이크로 광 조형기술)

Abstract

The flow in a microchannel is usually characterized as a low Reynolds number (Re) so that good mixing is quite difficult to be achieved. In this regard, we developed a novel chaotic micromixer, named Barrier Embedded Kenics Micromixer (BEKM). In the BEKM, the higher level of chaotic mixing can be achieved by combining two general chaotic mixing mechanisms: (i) *splitting/reorientation* by helical elements inside the microchannel and (ii) *stretching/folding* via periodically located barriers on the channel wall. The fully three-dimensional geometry of BEKM was realized by a *micro-stereolithography* technology, in this study, along with a Kenics micromixer and a circular T-pipe. Mixing performances of three micromixers were experimentally characterized in terms of an average mixing color intensity of phenolphthalein. Experimental results show that BEKM has better mixing performance than other two micromixers. Chaotic mixing mechanism, proposed in this study, could be integrated as a mixing component with Micro-Total-Analysis-System, Lab-on-a-chip and so on.

기호설명

- d : 유동 층 두께
- D : 확산계수
- \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
- t : 전체 혼합 소요 시간

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 적용 사례들이 보고되고 있다.^(1,2) 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 두 유체의 난류를 이용한

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

* 충북대학교 공과대학 기계공학부

** 회원, 포항공과대학교 기계공학과,
포항공과대학교 초소형기계기술연구소

혼합은 기대하기 어렵다. 만약 확산 전달만을 이용하여 혼합이 일어난다고 가정하면, Fick 의 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 100 초 정도 크기의 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,⁽³⁾ 다양한 카오스 혼합 메커니즘⁽⁴⁻⁷⁾ 등의 여러 가지 혼합 메커니즘이 보고 되었다.

이들 여러 혼합 메커니즘들 중에서 마이크로 채널 내부의 층류 유동 (Laminar flow)에 대해서 카오스 혼합 메커니즘은 상대적으로 작은 압력 손실에 대해서도 좋은 혼합 성능을 나타내는 것으로 알려져 있다. 유체의 유동 외에 혼합을 위한 다른 구동원을 이용하는 능동 혼합 방식 중에서, 시간 주기적인 교란(time periodic perturbation)을 2 차원 유동에 도입하여 비정상 유동을 유발함으로써 마이크로 채널 내에서 카오스 혼합을 얻을 수 있다. Lee 등⁽⁴⁾ 은 2 차원 층류 유동에 주기적인 압력 교란을 도입하여 카오스 혼합을 얻은 바 있다. 하지만 이 경우 유동의 구동원 외에 혼합을 위한 다른 에너지를 필요로 하는 단점이 있다. 반면에 3 차원 유동에 공간 주기적인 교란(spatially periodic perturbation)을 도입하여 수동적으로 카오스 혼합을 유도하는 것이 가능하다. 공간 주기적인 교란은 유동 물질 요소(material element)의 재배열(reorientation)을 유발하여 유동장의 카오스를 유발할 수 있게 된다.⁽⁸⁻¹²⁾ Liu 등⁽⁵⁾ 은 3 차원 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. Stroock 등⁽⁶⁾ 은 경사진 용기 형상(oblique ridge)이 마이크로 채널에서 3 차원의 나선형 유동을 유발하는 것을 보였으며, 또한 엇갈린 오늬 구조(staggered herring-bone structure)를 마이크로 채널 벽면에 도입하여 주기적으로 변하는 속도장을 통해 카오스 혼합을 유도하였다.

이 때 혼합 성능 면에 있어서, 두 동일 방향 단면 회전 유동(co-rotating cross-sectional flows)에 의

해서 형성되는 쌍곡선형 점(hyperbolic point)은 작은 Re 영역에 대해서도 기하급수적인 접촉면의 증가를 유도하여 높은 수준의 카오스 혼합을 야기한다.⁽⁸⁻¹²⁾ Kim 등^(9,10) 은 마이크로 채널의 바닥 면에 기울어진 홈들에 의해 생성되는 마이크로 채널 내부의 나선 형태의 유동을 기반으로, 벽면에 주기적으로 도입된 배리어 구조를 이용하여 주기적인 속도장의 교란을 유도함으로써 카오스 혼합을 일으키는 배리어가 포함된 카오스 마이크로 믹서 (Barrier Embedded Micromixer, BEM)를 제작하였다. BEM 내부에 주기적으로 도입된 배리어들은 단면 속도장 내에 쌍곡선형 점을 주기적으로 생성, 소멸시킴으로써 효과적인 카오스 혼합을 야기한다. 이와 반면에 Bertsch 등⁽⁷⁾ 은 마이크로 광 조형기술 (micro-stereolithography technology)을 이용하여 고분자 성형에서 실제로 사용되고 있는 기존의 케닉스 (KenicsTM) 믹서 및 SMXTM 믹서를 소형화하여 카오스 마이크로 믹서를 제작하였다. 이들 두 믹서들은 모두 채널 내 유동의 분할(splitting) 및 재배열(reorientation)의 카오스 혼합 메커니즘을 기반으로 하고 있다. 케닉스 믹서는 원형 파이프 내에 나선형 구조의 분할 벽이 분할 및 재배열을 유도하며, SMX 믹서는 원형 파이프 내에 많은 수의 엇갈린 막대 구조들이 분할 및 재배열을 유도한다. Bertsch 등⁽⁷⁾ 은 혼합 실험을 통해 SMX 마이크로 믹서가 케닉스 마이크로 믹서에 비해 혼합 성능 면에서 좋다고 결론지었으나, SMX 믹서는 파이프 내의 많은 수의 막대 구조가 높은 압력 손실을 유발하게 되는 큰 단점을 가지고 있다. 또한 복잡한 형태의 엇갈린 막대 구조는 어느 정도 높은 유량에서 사용할 경우 손상을 받을 수 있는 단점을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 작은 압력 손실을 유발하면서도 케닉스 마이크로 믹서의 혼합 성능을 향상시킬 수 있는 카오스 마이크로 믹서를 새로이 제시하고자 한다. 이에 다음 장에는 기존의 케닉스 믹서가 가진 “분열 및 재배열 (splitting and reorientation)” 및 주기적인 배리어에 의해 유도되는 “신장 및 접음 (stretching and folding)”의 두 카오스 혼합 메커니즘을 결합한 새로운 형태의 마이크로 믹서를 제시할 것이다. 제시된 완전 3 차원 형상의 마이크로 믹서를 구현하기 위해 본 연구진에 의해 개발된 마이크로 광 조형기술이 소개될 것이며, 제시된 마이크로 믹서와 함께 케닉스 마이크로 믹서 및 T-마이크로 파이프도 마이크로 광 조형기술에 의해 제작되어 소개된다. 마지막으로 pH 지시약을 통해 제작된 마이크로 믹서들의 혼합 성능을 평가하게 될 것이다.

2. 마이크로 광 조형기술을 이용한 마이크로 믹서들의 제작

2.1 카오스 마이크로 믹서의 디자인

Fig. 1(a)는 케닉스 마이크로 믹서의 개략도와 그 구체적인 치수를 보여준다. 본 연구에서 디자인된 케닉스 마이크로 믹서는 크게 (i) 주입구, (ii) 배출구, (iii) 믹서의 세 부분으로 구성되어 있다: 믹서 파트는 여섯 개의 케닉스 셀로 이루어져 있으며, 각 케닉스 셀은 원형 마이크로 파이프 내에 분할 벽으로서 180°로 꼬인 나선형 구조물을 가지고 있다. 두 가지 종류의 시계 방향 및 시계 반대 방향으로 꼬인 이 나선형 구조물은 서로 교대로 배열되어 원형 파이프 벽에 붙어 있으며, 특히 나선형 구조물의 꼬리 부분에는 다음 나선형 구조물의 머리 부분이 90°로 교차되어 연결되어 있다. 이러한 교대 구조에 의해 채널 내부의 유동의 분할 및 재배열이 유도되어 카오스 혼합을 얻을 수 있다.

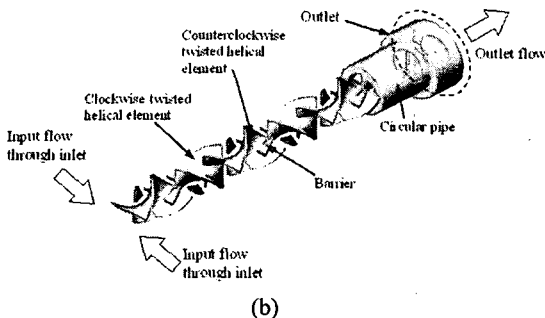
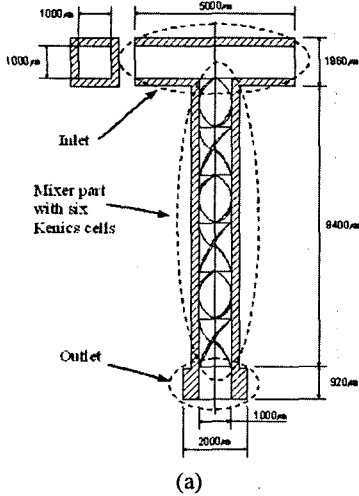


Fig. 1 Schematic diagrams of (a) Kenics micromixer with detailed dimensions and (b) Barrier Embedded Kenics Micromixer (BEKM) proposed in this study

특히 본 연구에서 제작된 카오스 마이크로 믹서 내의 180°로 꼬인 나선형 구조물은 Bertsch 등⁽⁷⁾에 의해 제작된 카오스 마이크로 믹서의 90° 나선형 구조물과는 구분된다.

Fig. 1(b)는 본 연구에서 제안된 새로운 카오스 마이크로 믹서인 배리어가 포함된 케닉스 마이크로 믹서(Barrier Embedded Kenics Micromixer, BEKM)의 개략도를 보여준다. BEKM 내에는 케닉스 마이크로 믹서와 달리 각각의 믹서 셀에 나선형 구조물 외에도 4 개의 배리어가 파이프의 벽면에 도입되어 있다. 즉, Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이 2 개의 배리어가 나선형 구조물을 사이에 두고 각각 반대쪽에 주기적으로 도입되어 있다.

케닉스 마이크로 믹서 내에 삽입된 나선형 구조물은, 압력 구동 유동(pressure driven flow)에 대해 벽면에서의 안미끄러짐 조건(no-slip condition)에 따라 하류 방향의 축 유동 외에도 횡단 유동(transversal flow)을 야기하게 되어, 결과적으로 나선형 구조물에 대한 상대 회전 유동(rotational flow)을 유발하게 된다. 따라서 BEKM 내에 배리어가 없는 구간에서는, 나선형 유동의 회전 운동에 대해 Fig. 2(a)에서 보여주는 바와 같이 하나의 타원형 점(elliptic point)을 가지는 회전 단면 속도장이 형성된다. 이와 달리, BEKM 내의 배리어가 존재하는 구간에서는, 나선형 구조물의 회전 운동에 대해 Fig. 2(b)와 같이 하나의 쌍곡선형 점과 두 개의 타원형 점으로 특징지어지는 두 개의 회전 유동을 가지는 단면 속도장이 형성된다. 앞선 연구 결과⁽⁹⁻¹²⁾가 보여주듯이, Fig. 2(a)와 2(b)의 두 속도장의 주기적인 변화는 신장과 접음의 카오스 메커니즘을 유도하며, 이는 케닉스 믹서가 가진 분할 및 재배열의 혼합 메커니즘과 결합되어 BEKM 내에서 보다 효과적인 카오스 혼합을 야기하게 된다. 특히 주기적으로 도입된 배리어들은 본 연구진에 의해 수행된 연구 결과^(11,12)에 의하면 비교적 작은 압력 손실에도 불구하고 높은 수준의 카오스 혼합을 유도함을 알 수 있다.

2.2 마이크로 광 조형기술

본 연구에서는 완전한 3 차원 형태의 케닉스 마이크로 믹서와 BEKM 을 마이크로 광 조형기술을 이용하여 제작하였다.^(13,14) 한편, 제작된 마이크로 믹서들과의 실험적인 비교를 위하여 동일한 크기를 갖는 원형의 T-pipe 도 또한 마이크로 광 조형기술을 이용하여 제작하였다. 이 때, T-pipe 는 마이크로 믹서와 동일한 지름을 갖는 튜브 등을 이용하는 것도 가능할 것이다. 하지만, 관내의 표면 거칠기는 마이크로 채널의 마찰 인자(friction

factor) 및 미끄럼(slip) 현상 등에 영향을 줄 수 있음이 발표되었다.^(15,16) 이에 본 연구에서는, 마이크로 광 조형기술로 제작되는 마이크로 채널의 내부에 존재하는 표면 거칠기가 마이크로 믹서의 혼합 성능에 미칠 수 있는 영향을 배제하기 위해, 동일한 조건 하에 제작된 T-pipe 를 통해 BEKM 및 케닉스 마이크로 믹서와의 혼합 성능을 비교하였다.

마이크로 광 조형 기술(micro-stereolithography technology)은 기본 원리가 기존의 광 조형 기술과 유사하다. 즉, CAD 로 만들어진 제품의 형상데이터를 일정한 층 두께를 가진 단면으로 나누고, 레이저 빛의 경로를 제어하여 단면 층들을 성형시킨다. 이를 계속 적층하여 Fig. 3 과 같이 3 차원 형상의 제품을 제작하는 방식이다. 하지만 마이크로 단위의 제품에는 “scale effect”가 존재하며, 이는 매크로 크기의 제품을 제작하는 기존의 광 조형 기술과 비교하여 수지 점성에 의한 영향이 더욱 중요시되며, x-y-z 스테이지(stage)의 정밀도에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 마이크로 광 조형 장치의 설계를 위해서는 자외선 빛에 의한 광 경화성 수지의 반응 현상, 정밀한 x-y-z 스테이지의 제어 그리고 수 μm 의 크기를 갖는 자외선 빛의 초점 제어 등을 반드시 고려해야 한다.^(13,14)

Fig. 4 은 본 연구에서 개발된 마이크로 광 조형 장치의 개념도를 보여준다. 광원으로는 CW 알콘 이온(Ar+) 레이저를 이용하였다. 이 레이저는 파장이 351.1nm 에서 약 460mW 의 최대출력을 가지며, 가우스 반경이 0.85mm 이다.

레이저에서 나온 자외선 빛은 렌즈로 입사되어 광 경화성 수지(photopolymer) 위에 초점이 맺히게 된다. 이때 원하는 작은 초점반경을 갖는 동시에 상대적으로 긴 초점거리(초점거리 50.8mm)를 갖는 대물렌즈(objective lens)를 이용하기 위하여 빔 익스펜더(beam expander)를 이용하여 빛의 지름을 확대하였다. 상대적으로 큰 출력인 레이저 파워를 적절히 조절하기 위하여 ND (neutral density) 필터를 사용하였다. 그리고 레이저 빛의 방향을 원하는 방향으로 조정하기 위하여 빔 스피리터(beam splitter)와 자외선용 거울(mirror)을 이용하였다. 이러한 빔 스피리터 또한 레이저 빛의 에너지를 일정한 비율로 투과/반사 시키기 때문에 레이저 빛의 출력을 줄이는 역할도 하고 있다.

자외선 레이저 빛을 광 경화성 수지에 주사하여 원하는 형상을 성형하기 위해서는, 성형되는 3 차원 구조물이 부착되는 기저판(substrate)이 광경화성 수지가 담긴 용기 내에서 단면 형상의 성형을 하며 x-y-z 의 3 방향으로 움직일 수 있도록 하

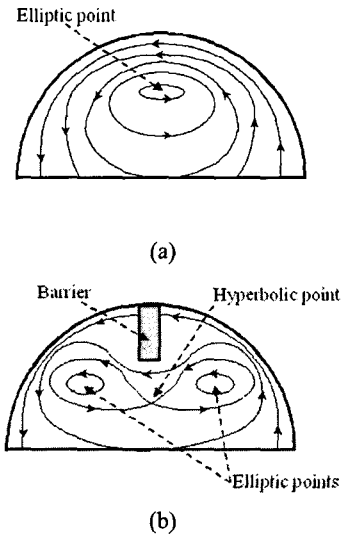


Fig. 2 Cross-sectional velocity fields of flows relative to the rotational motion of the helical element at two representative cross-sections: (a) with one elliptic point at the no-barrier zone and (b) with two elliptic points and one hyperbolic point at the barrier zone

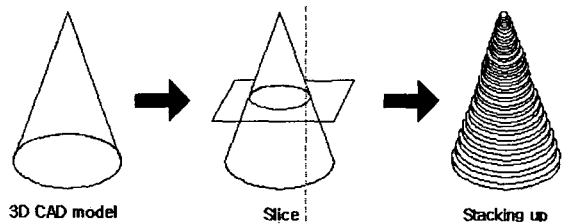


Fig. 3 Schematic diagram of the fabrication process of micro-stereolithography by stacking up the sliced cross-sections

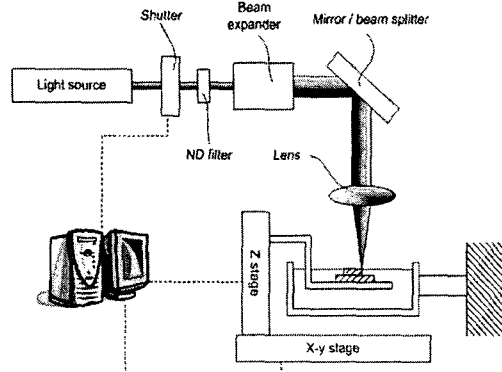


Fig. 4 Schematic diagram of the apparatus for the micro-stereolithography technology developed in this study

Table 1 Fabrication conditions for micromixers

	Inlet	Mixer part	Outlet
Laser power (μW)	4	2	4
Scanning speed of the laser beam (mm/min)	120	120	120
Layer thickness (μm)	80	40	80

기 위한 x-y-z 스테이지와 엘리베이터(elevator)가 필요하다. 한 층의 성형은 x-y 스테이지의 구동으로 이루어지며 다음 층의 성형을 위해서 z 축 스테이지를 구동하여 일정한 층 두께를 가진 폴리머 층을 만들어주게 된다. 이때, 셔터의 ON/OFF 제어를 통하여 레이저 빛을 차단시킨다. 이는 한 층 성형 후 다른 층으로 이동할 경우와 성형을 하지 않고 경로를 변경할 경우에 사용된다.

2.3 마이크로 믹서의 제작

Fig. 5는 마이크로 광 조형기술을 이용하여 본 연구를 통해 제작된 케닉스 마이크로 믹서와 BEKM의 사진을 보여준다. Fig. 1(a)에서 보여진 것처럼 본 연구에서 제작된 T-파이프, 케닉스 마이크로 믹서, BEKM의 모든 마이크로 믹서들은 믹서 파트의 한 말단에 $1000\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m}$ 의 사각 단면을 갖는 두 개의 유체 주입구를 가지고 있다. 또한 믹서 파트의 반대쪽 말단에는 출구 파트가 위치하며, 출구 파트의 내경은 믹서 파트와 동일한 $1000\mu\text{m}$ 에 해당하며, 외경이 $2000\mu\text{m}$ 으로 외부 실험 장치의 배수 튜브와 연결이 용이하게 되어있다. 믹서 파트의 내경과 총 길이는 각각 $1000\mu\text{m}$ 과 $9400\mu\text{m}$ 에 해당한다. 케닉스 마이크로 믹서와 BEKM의 한 믹서 셀 내의 분리벽으로 작용하는 나선형 구조물은 두께 $100\mu\text{m}$ 으로 길이는 $1640\mu\text{m}$ 에 해당한다. 또한 BEKM의 한 개의 셀의 파이프 벽면에 설치된 네 개의 배리어들은 각각 셀의 $1/8\sim 3/8$ 과 $5/8\sim 7/8$ 부분에 나선형 구조물을 중심으로 반대편에 위치하고 있다. 이렇게 설치된 배리어의 두께, 높이, 길이는 각각 $100\mu\text{m}$, $150\mu\text{m}$, $413\mu\text{m}$ 에 해당한다.

모든 마이크로 믹서들은 3D systems사의 광경화성 고분자 수지인 SL-5410으로 마이크로 광 조형 기술장치를 통해 동일한 조건 하에 제작되었다. Table 1은 본 연구에서 적용한 제작 조건을 보여준다. 제작된 마이크로 믹서는 272개의 층으로 구성되어 있으며, 전체 제작시간은 약 24시간이다. Table 1에서 보인 것과 같이 마이크로 믹서의 입

구 부분과 출구 부분의 층 두께는 모두 $80\mu\text{m}$ 이다. 한편, 믹서 파트의 층 두께는 $40\mu\text{m}$ 이며, 이는 믹서 부분의 기하학적 형상이 복잡하기 때문이다.

Fig. 5(b)와 5(c)는 각각 이렇게 제작된 원형 파이프 내의 나선형 구조물을 보여주는 케닉스 셀의 단면 사진과 원형 파이프 내의 나선형 구조물 및 배리어들을 보여주는 BEKM의 사진이다. 그림에서 보여지듯이 본 연구의 마이크로 광 조형기술 장치를 통해 완전 3차원 형상의 마이크로 믹서를 성공적으로 구현하였음을 알 수 있다.

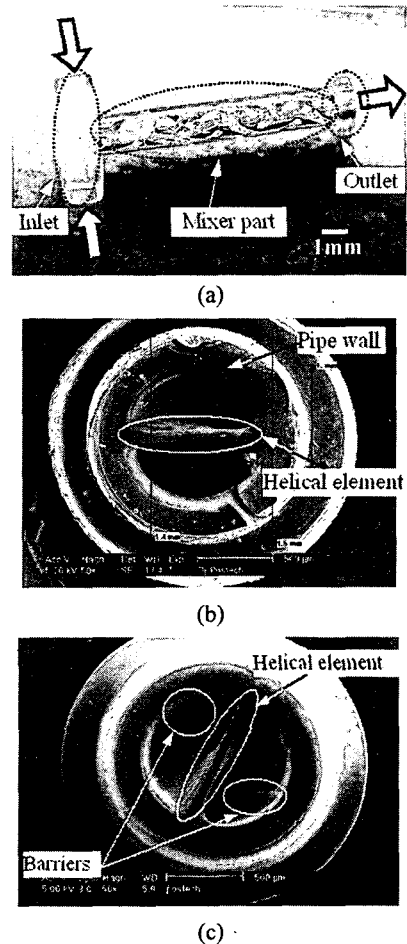


Fig. 5 The Kenics micromixer and the BEKM fabricated by micro-stereolithography technology: (a) real overview of the BEKM, and SEM pictures of cross-sectional shape of (b) only helical element in the Kenics cell and (c) helical element with barriers in the BEKM

3. 혼합 실험 장치 및 실험 방법

Fig. 6는 혼합 실험을 위한 전체 실험장치 구성을 보여준다. Fig. 6에서 보듯이 혼합 실험을 위해 서로 다른 두 유체가 주사기 펌프(syringe pump)를 통해 설정된 일정 유량으로 튜브를 통해 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 이용하였다. 사용된 용액들은 99%의 에탄올에 각각 0.31mol/L의 페놀프탈레인과 0.33mol/L의 NaOH를 녹여서 사용하였다. 이 때 0.33mol/L의 NaOH 용액은 13 정도의 pH 값을 보였으며, 페놀프탈레인은 용액의 pH가 8보다 커질 때만 무색에서 붉은색으로 변하게 된다. 따라서 두 용액들을 마이크로 믹서들로 주입할 경우 두 유체 간에 형성되는 경계면에서만 반응된 페놀프탈레인이 붉은색을 나타내게 되며, 결과적으로 붉은색의 강도를 측정함으로써 하류방향을 따라 혼합 성능을 측정하는 것이 가능하다.^(5,10) 실제 실험에 있어서는 유량의 영향을 알아보기 위해 각 마이크로 믹서들에 대해 유량을 변화시키며 실험을 수행하였다. 이 때 사용된 유량은 각각 0.5, 1.0, 1.5, 2.0ml/min의 네 가지 양을 사용하였으며, 이와 대응하는 Re 는 각각 6.98, 13.96, 20.94, 27.92에 해당하였다. 마이크로 믹서 내부의 혼합에 의해 형성되는 용액의 색 변화는 유동이 정상 상태에 도달한 후에 실체 현미경과 CCD 카메라를 통해 20 배 확대된 화면을 포착하여 측정하였다(Fig. 6). 이 때 조명으로는 마이크로 믹서 바로 위에 설치된 낙사방식의 원형 백색 형광등을 이용하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 마이크로 믹서들의 혼합 실험 결과

Fig. 7은 2.0ml/min의 유량을 ($Re \approx 27.92$) 사용한 경우, T-파이프, 케닉스 마이크로 믹서, BEKM에 대해 수행된 혼합 실험 결과를 보여준다. 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 경계면을 확인할 수 있다.

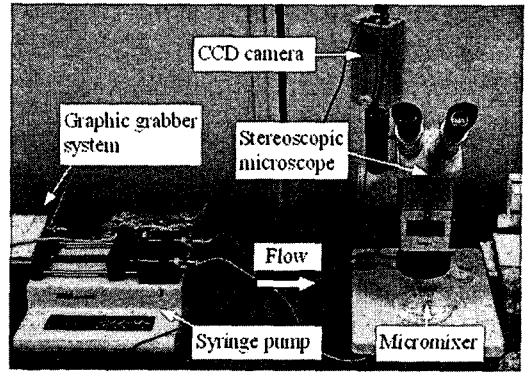


Fig. 6 Mixing experimental setup for micromixers

Fig. 7(a)의 T-파이프 혼합 실험 결과에서 볼 수 있듯이 입구에서 들어온 두 유체는 채널 내부에 다른 장애물이 없는 경우 T-분기점에서 서로 평행하게 흐르기 때문에 파이프의 중간부분에 붉은색의 경계면이 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 경계면을 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 높은 수준의 붉은색의 강도를 낳게 된다.^(5,10)

이러한 관점에서 케닉스 마이크로 믹서와 BEKM의 혼합 실험 결과인 Fig. 7(b)와 7(c)를 통해 두 믹서를 이용하여 믹서의 출구부분에서 충분히 좋은 혼합을 얻고 있음을 알 수 있다. Fig. 7(b)와 7(c)를 육안으로 확인해볼 때 케닉스 마이크로 믹서에 비해 BEKM을 통해 채널의 입구 부분부터 보다 빠른 속도로 높은 수준의 혼합을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 케닉스 마이크로 믹서와 BEKM의 실험 결과에서 파이프 내에 제작된 나선형 구조물들(Fig. 7(b)와 7(c))을 확인할 수 있으며, BEKM의 경우 도입된 배리어들(Fig. 7(c))도 확인할 수 있다.

4.2 마이크로 믹서들의 혼합 성능 비교

Fig. 7의 혼합 실험 결과를 통해 정성적인 혼합 성능을 비교할 수 있으나, 이를 통해 직접적인 마이크로 믹서들의 정량적인 혼합 성능 비교는 힘들기 때문에 이를 위한 적절한 혼합 성능 척도가 필

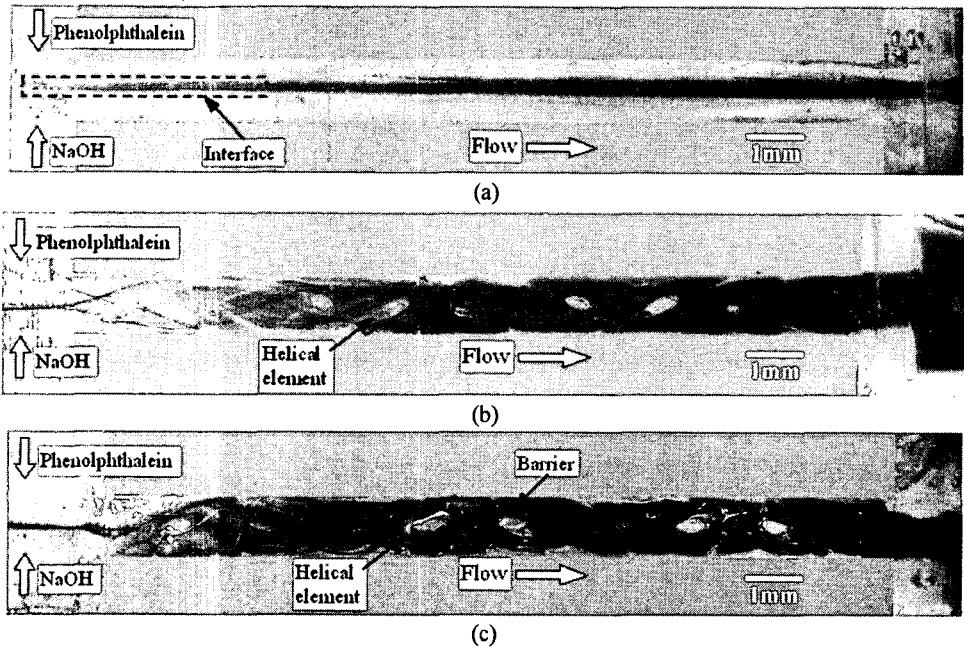


Fig. 7 Mixing experimental results of: (a) T-pipe, (b) Kenics micromixer and (c) BEKM at $Re \approx 27.92$ (flow rate of 2.0ml/min)

요하다. 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.⁽¹⁰⁾ 이에 각 마이크로 믹서의 하류 방향을 따라 붉은 색의 강도를 측정하였다. 이 때 케닉스 마이크로 믹서와 BEKM의 나선형 구조물과 배리어가 붉은색 강도의 인위적인 저하를 낳기 때문에, 혼합 실험 결과 화면에서 각 믹서 셀들의 입구와 출구 부분을 포착하여 화면 내의 모든 화소들의 붉은색 강도를 측정하였다. 이렇게 측정된 각 화면 내 붉은색의 강도는 다음의 식을 이용하여 표준화하였다.

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

이 때, \bar{I} , I_n , N 은 각각 포착화면 믹서 구간의 표준 평균 강도 (normalized average intensity), 화소 n 에서의 붉은색 강도, 포착화면 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 (2)에서 $\sum_{n=1}^N I_n / N$ 항은 포착된 화면 내의 혼합 구간의 평균 강도를 의미하며, 평균 강도의

변화는 하류방향으로의 혼합 수준의 변화를 보여 준다. 이에 더하여 본 연구에서는 마이크로 믹서 내의 혼합 실험이 동일한 조건 하에서 수행되었다 라도 화면 포착 CCD 카메라 혹은 조명 장치의 상태에 따라 일어날 수 있는 강도의 차이를 보상하기 위해 식 (2)에서 보다시피 \bar{I}_{ref} 항이 도입되었다. 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.

$$\bar{I}_{ref} = \sum_{n=1}^{N_{ref}} \frac{I_{ref,n}}{N_{ref}} \quad (3)$$

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

결과적으로 식 (2)에 따르면, 표준 평균 강도는 완전히 혼합된 상태에서는 1, 혼합되지 않은 투명한 상태에서는 0의 값을 갖게 된다.

Fig. 8은 4가지 다른 Reynolds 수를 가지고 수행된 T-파이프, 케닉스 마이크로 믹서, BEKM의 혼합 실험 결과를, 식 (2)에 근거하여 계산된 표준 평균 강도를 채널 하류 방향에 따라 도시한 것이다. 이 때 Fig. 8의 범례에는 T-파이프는 “T-pipe”로, 케닉스 마이크로 믹서는 “Kenics”로, BEKM은

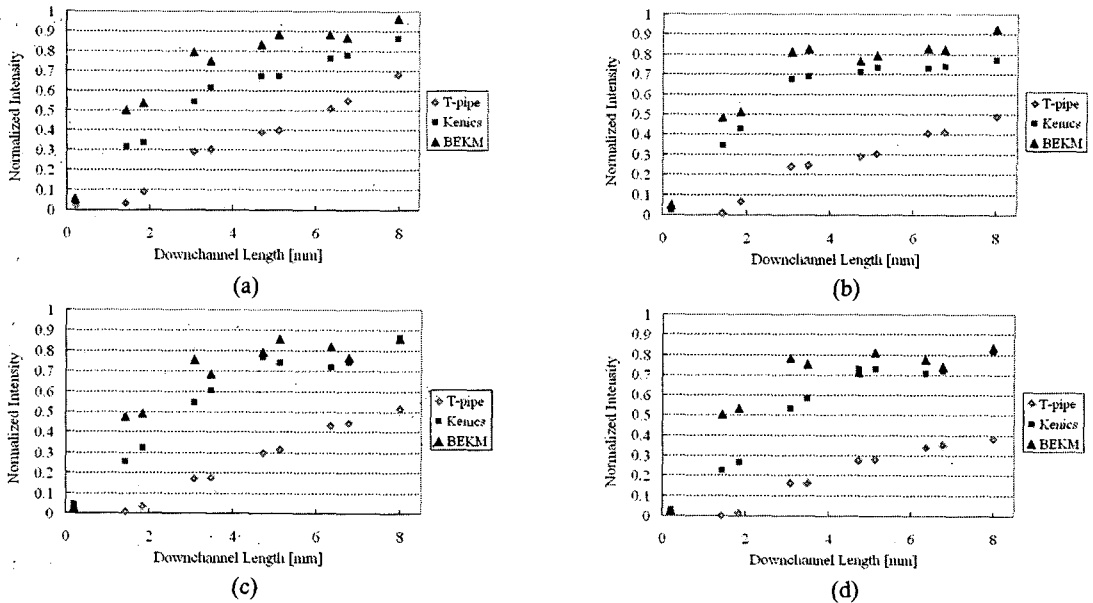


Fig. 8 Normalized average intensity changes of T-pipe, Kenics micromixer and BEKM, for the Reynolds number (Re) of (a) 6.98, (b) 13.96, (c) 20.94 and (d) 27.92

“BEKM”으로 표시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, BEKM 내의 표준 평균 강도는 T-파이프 및 케닉스 마이크로 믹서에 비해 보다 빠른 속도로 완전 혼합 상태인 1의 값에 다가가고 있음을 알 수 있다. BEKM의 혼합성능은 T-파이프에 비해 확연히 좋은 성능을 보여주고 있으며, 케닉스 마이크로 믹서에 비해서는 입구 근처에서 보다 빠르게 혼합이 일어나지만 하류로 갈수록 비슷한 혼합 강도를 보여주고 있다. 이는 초기에는 분할 및 재배열의 혼합 메커니즘보다 신장 및 접음의 혼합 메커니즘이 혼합에 보다 중요한 역할을 하여 두 유체간의 경계면을 증가시키지만, 마이크로 믹서의 하류로 갈수록 분할 및 재배열 메커니즘이 중요한 역할을 하기 때문으로 보여진다. 쌍곡선형 점 근처의 유동 물질 요소는 극도의 신장을 경험하게 되며, 주기적인 배리어 도입에 의한 Fig. 2(a)와 2(b)의 주기적인 속도장 변화는 효과적인 신장과 접음을 야기하게 된다⁽⁹⁻¹²⁾. 따라서 분할 및 재배열 메커니즘의 역할이 상대적으로 작은 마이크로 믹서의 입구 부분에서는 신장 및 접음에 의한 효과에 의해 BEKM의 혼합강도가 빠르게 증가하게 되며, 하류 방향으로 갈수록 케닉스 마이크로 믹서가 본래 가지고 있던 분할 및 재배열의 혼합 메커니즘이 중요한 역할을 하게 되어 케닉스 마이크로 믹서의 혼합 강도가 BEKM과 비슷한 수준에 도달하게 된다.

마지막으로 Fig. 8에서 보여지듯이, 파이프의 출

구 부분에서의 혼합 강도는 Re 가 증가할수록 작아지는 경향이 나타남을 알 수 있다. 즉 Re 가 증가할수록 완전한 혼합을 얻기 위한 소요거리가 더 늘어나고 있음을 보여주며, 주어진 채널 길이에 대해 보다 높은 혼합을 얻으려면 작은 Re 를 적용하는 것이 좋다는 것을 보여준다. 이와 반대로 시간 개념을 혼합 강도에 적용하면, Fig. 8(d)는 Fig. 8(a)에 비해 10배 높은 Re 를 가지고 있기 때문에 채널의 출구에 10배 빨리 도달한다. 이 때 Fig. 8(d)의 출구에서의 혼합 강도가 Fig. 8(a)의 0.9배 가량에 해당하므로, 채널 길이에 상관없이 주어진 시간 내에 보다 높은 수준의 혼합을 얻기 위해서는 큰 Re 를 적용해야 함을 보여준다.

5. 결론

본 논문에서는 새로운 형태의 카오스 마이크로 믹서인 배리어가 포함된 케닉스 마이크로 믹서 (Barrier Embedded Kenics Micromixer (BEKM))를 제안하였다. BEKM은 기존의 케닉스 믹서(Kenics mixer)가 가진 분할 및 재배열(splitting and reorientation)의 카오스 혼합 메커니즘과 함께, 주기적으로 도입된 배리어에 의해 야기되는 주기적인 속도장 변화를 통해 유도되는 신장 및 접음(stretching and folding)의 또 하나의 주요한 카오스 혼합 메커니즘을 결합한 혼합 방식을 취하고 있다. 본 연구에서 제안된 BEKM 및 기존의 케닉스 마이

크로 믹서는 완전 3 차원 형태의 모양을 가지고 있으며, 이들 마이크로 믹서는 본 연구진에 의해 개발된 마이크로 광 조형기술 장치(Micro-stereolithography technology)를 이용하여 실제로 제작되었다. 실제 제작된 마이크로 믹서들은 본 연구에서 구성된 페놀 프탈레인 용액 및 NaOH 용액을 이용한 혼합 실험 장치를 통해 여러 가지 Reynolds 수에 대해 혼합 실험이 이루어졌다. 혼합 실험 결과는 BEKM의 혼합 성능이 T-파이프 및 케닉스 마이크로 믹서보다 높은 수준의 혼합을 얻을 수 있음을 보여주었다. 또한 동일한 길이 안에서 높은 수준의 혼합을 얻기 위해서는 작은 Re 를 적용해야 하며, 길이와 상관없이 동일한 시간 내에 높은 수준의 혼합을 얻기 위해서는 큰 Re 를 적용해야 함을 보여주었다.

특히 마이크로 믹서의 입구 부분에서 BEKM의 혼합 성능이 다른 마이크로 믹서들에 비해 크게 증진된 것을 알 수 있었다. 이는 초기에 혼합에 큰 영향을 주지 못하는 분할 및 접음의 혼합 방식에 비해 원형 파이프의 벽면에 주기적으로 도입된 배리어들에 의해 유도되는 신장 및 접음의 혼합 메커니즘이 중요한 역할을 하고 있음을 보여주는 것으로, 본 연구에서 제안된 BEKM이 분할/재배열 및 신장/접음의 두 가지 카오스 혼합 메커니즘을 효과적으로 접목시키고 있음을 보여준다고 할 수 있다.

마지막으로 본 연구에서 제안된 카오스 마이크로 믹서, BEKM은 마이크로 토탈 분석 시스템(Micro-Total-Analysis-System) 및 랩-온-어-칩(Lab-on-a-chip) 등의 미세 유체공학 분석 시스템에 혼합을 위한 구성 장치로 쉽게 적용될 수 있으리라 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술부의 국가지정연구실사업(2000-N-NL-01-C-148)의 지원과 21세기 프론티어 연구개발사업인 나노메카트로닉스 기술개발사업(M012KN010001-03K1401-00211)의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사한다.

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) Branebjerg, J., Gravesen, P. and Krog, J.P., 1996, "Fast Mixing by Lamination," *MEMS 96*, San Diego, CA, February 11-15, pp. 441-446.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) Ottino, J.M., 1989, *The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos, and Transport*, Cambridge Univ. Press, New York.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) Lee, I.H. and Cho, D.-W., 2003, "Micro-stereolithography Photopolymer Solidification Patterns for Various Laser Beam Exposure Conditions," *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, Vol. 22, pp. 410-416.
- (14) Lee, I.H. and Cho, D.-W., 2004, "An Investigation on Photopolymer Solidification considering Laser Irradiation Energy in Micro-stereolithography," *Microsyst. Technol.*, Vol. 10, pp. 592-598.
- (15) Papautsky, I., Ameel, T. and Frazier, A.B., 2001, "A Review of Laminar Single-Phase Flow in Microchannels," *Proc. 2001 ASME Int. Mech. Eng. Cong. & Exp.*, New York, USA, pp. 1-9.
- (16) Ou, J., Perot, B. and Rothstein, J.P., 2004, "Laminar Drag Reduction in Microchannels Using Ultrahydrophobic Surfaces," *Phys. Fluids*, Vol. 16, pp. 4635-4643.