

< 논문 >

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

- 디자인 및 수치 해석 -

김동성[†] · 이세환* · 권태현** · Chong H. Ahn*
(2005년 1월 22일 접수, 2005년 8월 15일 심사완료)

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

- Design and Numerical Analysis -

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

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

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 *Serpentine Laminating Micromixer (SLM)* in the present study, Part I. In the SLM, the higher level of chaotic mixing can be achieved by combining two general chaotic mixing mechanisms: *splitting/recombination* and *chaotic advection*. The splitting and recombination (in other term, *lamination*) mechanism is obtained by the successive arrangement of "F"-shape mixing units in two layers. The chaotic advection is induced by the overall three-dimensional serpentine path of the microchannel. Chaotic mixing performance of the SLM was fully characterized numerically. To compare the mixing performance, a T-type micromixer which has the same width, height and length of the SLM was also designed. The three-dimensional numerical mixing simulations show the superiority of the SLM over the T-type micromixer. From the cross-sectional simulation results of mixing patterns, the chaotic advection effect from the serpentine channel path design acts favorably to realize the ideal lamination of fluid flow as Re increases. Chaotic mixing mechanism, proposed in this study, could be easily integrated in Micro-Total-Analysis-System, Lab-on-a-Chip and so on.

기호설명

C : 입자(species)의 농도
 d/dt : 물질 미분(material derivative)
 D : 확산계수
 l : 유동 층 두께
 p : 압력
 \mathbf{v} : 유동 속도 벡터

t : 시간
 t_m : 전체 혼합 소요 시간
 ρ : 유체의 밀도
 μ : 유체의 동적 점도

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) 이러한 마이크로

[†] 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

유체공학 시스템에서 빠른 진단 결과를 얻기 위해서 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. 만약 확산 전달만을 이용하여 혼합이 일어난다고 가정하면, Fick의 법칙을 재배열하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$t_m \sim l^2 / D \quad (1)$$

이 때 t_m , l , D 는 각각 전체 혼합 소요 시간, 유동층 두께, 확산계수에 해당한다. 일반적으로 D 는 약 10^{-10} m²/s 수준의 크기를 가지고 있기 때문에 약 100 μ m 수준의 두께를 가지는 두 유동층이 혼합되기 위해서는 100 초 정도 크기의 시간이 소요된다. 하지만 재미있는 사실은, 식 (1)에 의하면 혼합 소요 시간은 유동층 두께의 제곱에 비례하기 때문에, 만약 유동층의 두께가 10 μ m 그리고 1 μ m 수준으로 줄어들면 혼합 소요시간은 각각 1초, 0.01 초로 줄어들게 된다. 즉 유동 혼합층의 두께가 10 μ m 수준 이하로 떨어지면 확산만으로도 효과적인 혼합을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 하지만 미세 유체공학 시스템에서 사용되는 마이크로 채널은 일반적으로 100 μ m 수준의 특성 길이(characteristic length)를 가지기 때문에 확산만으로는 효과적인 혼합을 기대하기 어렵게 된다. 이러한 관점에서 마이크로 채널 내부에서 효과적인 혼합 성능을 얻기 위해, 변형된 Tesla 구조의 연속적인 배열을 통해 Coanda 효과를 유발하는 방법,⁽³⁾ 기울어진 구덩이(slanted well)를 통해 유체의 횡단 유동을 유발하는 방법,⁽⁴⁾ 다양한 카오스 혼합 메커니즘⁽⁵⁻¹⁵⁾ 등의 여러 가지 혼합 메커니즘들이 보고되었다.

이들 보고된 여러 혼합 메커니즘들 중 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 유동을 위한 구동원 외에 혼합을 위해 또 다른 구동원을 이용하는 능동 혼합(active mixing) 방식 중에서, 시간 주기적인 교란(time periodic perturbation)을 2차원 유동에 도입하여 비정상 유동을 유발함으로써 마이크로 채널 내에서 카오스 혼합을 얻을 수 있다. Lee 등⁽⁵⁾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 교란(spatially periodic perturbation)을 도입하여 수동 혼합(passive mixing) 방식으로 카오스 혼합을 유도하는 것이 가능하다. 공간 주기적인 교란은 유동물질 요소(material element)의 재배열(reorientation)을 유발하여 유동장의 카오스를 유발할 수 있게 된다.⁽¹⁶⁻¹⁸⁾ Liu 등⁽⁶⁾은 3차원 나선형(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⁽⁷⁾은 경사진 용기 형상(oblique ridge)이 마이크로 채널에서 3차원의 나선형 유동을 유발하는 것을 보였다. 또한 엇갈린 오니 구조(staggered herringbone structure)를 마이크로 채널 벽면에 도입하여, 두 반대 방향 단면 회전 유동(counter rotating cross-sectional flows)에 의해 형성되는 포물선형 점을 주기적으로 변화시킴으로써, 주기적으로 변하는 3차원 속도장을 통해 카오스 혼합을 유도하였다⁽⁷⁾. 또한 Kim 등^(8,9)은 마이크로 채널의 바닥면에 기울어진 홈(slanted groove)들에 의해 생성되는 마이크로 채널 내부의 나선 형태의 유동을 기반으로, 벽면에 주기적으로 도입된 배리어 구조를 이용하여 주기적인 속도장의 교란을 유도함으로써 카오스 혼합을 일으키는 배리어가 포함된 마이크로 믹서(Barrier Embedded Micromixer, BEM)를 제작하였다. BEM 내부에 주기적으로 도입된 배리어들은 두 동일 방향 단면 회전 유동(co-rotating cross-sectional flows)에 의해 형성되는 쌍곡선형 점(hyperbolic point)을 주기적으로 생성, 소멸시킴으로써, 주기적으로 변하는 3차원 속도장을 유도하여 효과적인 카오스 혼합을 야기한다.

또한 Bertsch 등⁽¹⁰⁾은 마이크로 광 조형기술(microstereolithography technology)을 이용하여, 채널 내 유동의 분할(splitting) 및 재배열(reorientation)의 카오스 혼합 메커니즘을 기반으로 하여 고분자 성형에서 실제로 사용되고 있는 기존의 케닉스(Kenics™) 믹서 및 SMX™ 믹서를 소형화하여 카오스 마이크로 믹서들을 제작하였다. 이에, Kim 등⁽¹¹⁾은 마이크로 광 조형기술을 이용하여 기존의 케닉스 믹서의 디자인에 채널 벽면에 주기적인 배리어를 도입한 새로운 형태의 카오스 마이크로 믹서인 배리어가 포함된 케닉스 마이크로 믹서(Barrier Embedded Kenics Micromixer, BEKM)를 제작하였다. BEKM 내부에는 기존의 케닉스 믹서의 분할 및 재배열의 카오스 혼합 메커니즘에 주기적으로 채

널 벽면에 도입된 배리어에 의해 유발되는 신장 및 접음(stretching and folding)의 카오스 혼합 메커니즘이 효과적으로 결합되어 보다 높은 수준의 카오스 혼합이 야기된다.

이와 반면에, 카오스 혼합 메커니즘 중 하나인 유동의 “분할 및 재배열(splitting and recombination)” 혹은 이상적으로는 “라미네이션(lamination)” 혼합 메커니즘은 넓은 영역의 Re 하에서 유입된 시료 간의 경계 면(interfacial area)을 기하급수적으로 늘려 두 유동 층의 두께를 기하급수적으로 줄임으로써 혼합 성능을 월등히 향상시킨다.⁽¹²⁻¹⁵⁾ Branebjerg 등⁽¹²⁾은 “분리 판(separation plate)”을 마이크로 채널 내부에 도입하여 다층(multi-layer)의 라미네이션을 유도하여 효과적인 혼합을 얻은 바 있다. 이 경우 실리콘 기판에 식각 정지 층(etchstop layer)을 이용하여 일반적인 UV 사진식각(UV photolithography) 공정을 통해 유동 제어 요소들과 함께 마이크로 채널 내부에 분리 판을 구현할 수 있었으며, 라미네이션 마이크로 믹서는 이 실리콘 기판과 일반적인 UV 사진식각 공정을 통해 제작된 유리 기판과 함께 접합되어 구현되었다. 이와 비슷한 시기에 Schwesinger 등⁽¹³⁾은 두 장의 실리콘 기판에 이방성 식각 공정(anisotropic bulk etching)을 통해 구현된 포크 형상의 혼합 요소들을 연속적으로 맞물리게 배열하여 분할 및 재배열의 혼합 메커니즘을 유도함으로써, 분리 판 없이 상대적으로 높은 수준의 혼합을 얻은 바 있다. 하지만 이 경우 불투명한 실리콘 기판을 이용해 마이크로 믹서를 제작하였기 때문에, 마이크로 믹서 내부에서 일어나는 혼합 거동을 직접 관찰할 수 없었다. 최근에 Schönfeld 등⁽¹⁴⁾은 Löwe 등⁽¹⁵⁾의 분할 및 재배열 방법을 기반으로 제작된 마이크로 믹서를 통해 이상적인 라미네이션을 얻기 위해서는, 채널 내부에 분할 중간 층(splitting intermediate layer, 혹은 분리 벽)이 반드시 필요하다는 것을 보였다. 이에 밀링 공정을 통해 제작된 마이크로 채널 내부에 레이저 가공을 통해 스테인레스강으로 제작된 분할 층을 도입하여 이상적인 라미네이션을 통한 카오스 혼합을 유도하였다.⁽¹⁴⁾ Schönfeld 등⁽¹⁴⁾의 결과를 살펴보면, 이상적인 라미네이션을 얻기 위해서 분리 벽(separation wall)은 반드시 필요한 듯이 보인다. 하지만 마이크로 믹서의 대량 생산 관점에서, 분리 벽의 제작 및 마이크로 채널로의 도입은 대량 생산에 한계를 줄 수 있으며, 특히 사출 성형 등의 고분자를 이용한 마이크로 믹서의 대량 생산을 고려할 경우, 분리 벽은 그 제작이나 제작 후 기계적인 강도 면에서 한계를 갖게 된다. 즉, 분리 벽이 마이크로

채널 내부에 도입되는 라미네이션 타입의 마이크로 믹서는 대량 생산 방식의 적용에 한계를 가진다고 볼 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 분리 벽이 없이도 분할 및 재배열 방식을 통해 유체 유동의 라미네이션을 향상시켜 높은 수준의 카오스 혼합을 유도할 수 있으며, 나아가 대량 생산 방식을 통해 제작이 가능하여 가격 경쟁력을 가질 수 있는 마이크로 믹서를 제안하고자 한다. 이에 다음 장에서부터는 두 가지 카오스 혼합 메커니즘인 “분할 및 재배열(splitting and recombination)”과 “카오스 이류(chaotic advection)”을 효과적으로 결합하여, 유체 유동의 라미네이션을 향상시켜 높은 수준의 카오스 혼합을 유도하는 새로운 형태의 마이크로 믹서를 제시할 것이다. 수치해석을 통해, 일반적인 마이크로 채널인 T-타입 마이크로 믹서와의 혼합 성능을 비교하는 한편, 제시된 마이크로 믹서의 혼합 메커니즘, 즉 두 가지 혼합 메커니즘의 효과적인 결합을 논의할 것이다. 본 논문의 Part I 디자인 및 수치해석에 이어 본 논문의 Part II에서는 제안된 마이크로 믹서의 대량 생산을 위한 금형 인서트 제작 및 사출성형, 그리고 혼합 실험을 통한 마이크로 믹서의 혼합 성능 평가가 논의될 것이다.

2. 카오스 마이크로 믹서의 디자인

Fig. 1(a)는 본 연구에서 제안된 카오스 마이크로 믹서의 개략도를 보여준다. 이 카오스 마이크로 믹서는 두 층에 F-자 형상 혼합 유닛들이 연속적으로 맞물려 배열된 모습으로 디자인되어 있다. 특히 배열된 F-자 형상 혼합 유닛들은 마이크로 채널 내부에 흐르는 유동이 전체적으로 3 차원 나선형(3-dimensional serpentine) 유로를 따라 흐르도록 디자인되어 있다. 이렇게 연속적으로 맞물려 배열되어 있는 F-자 형상 혼합 유닛들은 유체 유동의 연속적인 “분할 및 재결합”을 유도한다. 또한 마이크로 채널 전체가 가진 3 차원 나선형 구조는 채널이 90°로 꺾이는 코너 부분에서 “카오스 이류”에 의한 교반 효과(stirring effect)를 야기하게 된다.

제안된 마이크로 믹서의 분할 및 재배열을 통해 이상적인 라미네이션이 일어난다고 가정하면, Fig. 1(b)와 같이 유동이 하류 방향으로 진행할수록 두 유체간의 경계 면이 기하급수적으로 증가하게 된다. (이 때, Fig. 1(b)의 A-K는 Fig. 1(a)에서 표시된 위치를 의미한다.) 이 때, Schönfeld 등⁽¹⁴⁾이 지

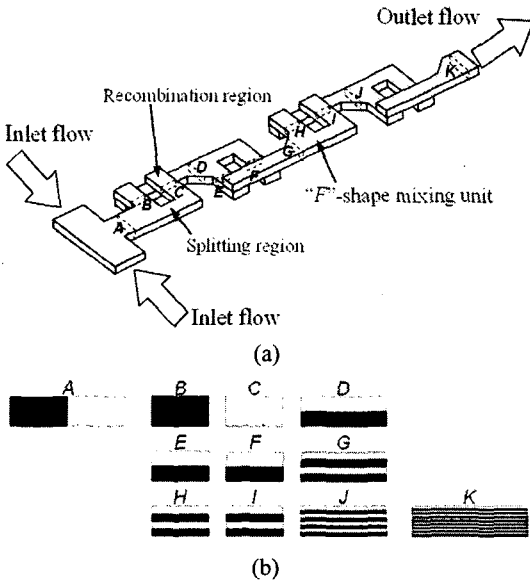


Fig. 1 Serpentine Laminating Micromixer (SLM) proposed in this study: (a) schematic diagram of the SLM and (b) the conceptual cross-sectional mixing behaviors of the ideal lamination at each indicated position in (a)

적한 바와 같이 분할 및 재배열의 혼합 메커니즘만을 이용할 때, 분리 벽이 존재하지 않는다면 Fig. 1(b)와 같은 이상적인 라미네이션을 얻기 힘들 수 있다. 하지만 본 연구에서 제안된 마이크로 믹서의 나선형 유로 구조는 분할된 두 유체 유동이 다시 재결합하는 구간에서 카오스 이류를 통한 교반 효과를 야기하여, 두 유체의 재결합 시에 분리 벽 없이는 구현하기 힘든 이상적인 라미네이션을 유도할 수 있도록 도움을 준다. (이러한 혼합 메커니즘은 수치해석을 통해 보다 심도있게 설명하고자 한다.) 따라서, 본 연구에서 제안된 마이크로 믹서 내에 효과적으로 결합된 두 카오스 혼합 메커니즘은 마이크로 채널의 하류 방향으로 갈수록 유입된 두 유체 간의 경계 면을 기하급수적으로 늘려 넓은 영역의 Re 에서 보다 높은 수준의 카오스 혼합을 유도한다. 이에 본 논문에서는 제안된 카오스 마이크로 믹서를 “나선형 라미네이션 마이크로 믹서(Serpentine Laminating Micromixer, SLM)”라 명명하고자 한다.

실제로 SLM 은 마이크로 채널 내부에 분리 벽이 존재하지 않기 때문에 F-자 형상 혼합 유닛을 가진 상, 하 기판을 사출성형 등의 공정을 통해 대량으로 성형한 후 접합하여 대량 생산하는 것이 가능하다. 특히, SLM 이 가진 라미네이션 혼합 방식은 두께 방향으로 분할된 유체를 적층하는 방식으로, MEMS 공정(UV 사진식각공정)을 통해 제작

된 너비가 두께에 비해 충분히 큰 일반적인 사각 단면의 마이크로 채널에 대해 보다 높은 수준의 혼합을 유도할 수 있는 장점이 있다. 즉, 너비가 두께에 비해 충분히 큰 사각 단면 채널에 대해 두께 방향으로 유체를 적층하는 방식은, 유체를 너비 방향으로 적층하는 방식에 비해 적층된 유체의 경계 면을 늘리는 한편, 혼합 시켜야 할 유동층 두께 또한 줄여, 혼합 소요 시간을 빠르게 줄일 수 있는 장점을 가지게 된다. 이는 특히, 삼각 단면을 가지는 마이크로 채널에 포크 형상의 혼합 요소를 적용한 Schwesinger 등⁽¹³⁾의 마이크로 믹서와도 차이가 있다. 또한, F-자 형상 혼합 유닛은 분할되는 두 유체 유동의 유동 경로 길이를 동일하게 유지한 상태에서 재결합을 유도하는 장점을 가지고 있다. 이와 달리 Schwesinger 등⁽¹³⁾의 포크 형상 혼합 요소는 분할되는 두 유체의 유동 경로 길이가 차이가 나기 때문에 자칫 혼합이 이루어지지 않고 마이크로 믹서를 빠져나가는 부분이 생길 수 있는 단점을 가진다.

3. 수치 해석

언급한 바와 같이, 본 연구에서 제안된 SLM 내부에는 분할 및 재배열 카오스 혼합 메커니즘과 카오스 이류 카오스 혼합 메커니즘의 두 카오스 혼합 메커니즘이 분리 벽 없이 유체 유동의 라미네이션을 구현하기 위해 효과적으로 결합되어 있다. 이에 제안된 SLM 내부에서 일어나는 혼합 거동을 검증하기 위해, 유한 체적법(Finite Volume Method)을 기반으로 하는 상용 전산 유체역학(computational fluid dynamics) 모사 프로그램인 CFD-ACE+를 이용하여 혼합 거동 수치모사를 수행하였다.

수치 모사에서는 비압축성, 뉴턴 유체를 가정하였으며, 정상 상태의 유동을 가정하였다. 지배 방정식으로 유체 유동에 대해서는 연속 방정식[식 (2)]과 Navier-Stokes 방정식[식 (3)]을 적용하였으며, 마이크로 믹서 내부에 흐르는 입자(solute)에 대해서는 입자 대류-확산 방정식(species convection-diffusion equation, 식 (4))을 적용하였다.

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (3)$$

$$\frac{dC}{dt} = D \nabla^2 C \quad (4)$$

이 때, \mathbf{V} 는 유동 속도 벡터이며, ρ 와 μ 는 유체의 밀도와 동적 점도(dynamic viscosity)이며, d/dt 는 물

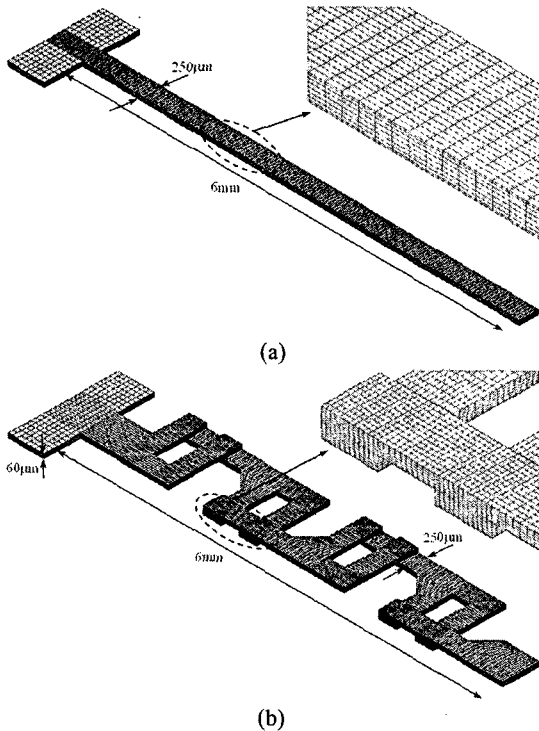


Fig. 2 Three-dimensional structured grids of the computational domains used in the present CFD (computational fluid dynamics) mixing simulations: (a) T-type micromixer and (b) SLM

질 미분(material derivative), t 는 시간, p 는 압력, C 는 입자의 농도를 의미한다.

또한 혼합 거동 수치 모사에 있어서, SLM 과의 혼합 성능 비교를 위해 동일한 특성 길이를 가지는 T-타입 마이크로 믹서를 디자인하여 동일한 조건에 따른 수치 모사를 수행하였다.

우선, SLM 에 대해서는 Fig. 1(a)와 같이 유체가 유입되는 두 입구와 유체가 유출되는 출구, 그리고 총 4 개의 F-자 형상 혼합 유닛, 즉 4 개의 분할 구간 및 재결합 구간이 계산 영역 (computational domain)으로 설정되었다. 이 때, 메인 마이크로 채널의 너비와 높이는 각각 250µm 과 60µm 이며, 두 입구와 출구의 너비와 높이는 각각 500µm 과 60µm 으로 디자인되었으며, 마이크로 믹서의 총 길이는 6.5mm 로 디자인되었다. 이 때, F-자 형상 혼합 유닛의 길이는 2mm 로 디자인 되었다. T-타입 마이크로 믹서에 대해서는 두 입구와 출구 그리고 메인 마이크로 채널이 계산 영역으로 설정되었다. 메인 마이크로 채널과 출구의 너비와 높이는 각각 250µm 과 60µm 이며, 두 입구의 너비와 높이는 각각 500µm 과 60µm 으로 디자인되었으며, 마이크로 믹서의 총 길이는 6.5mm 로

Table 1 Physical properties used in the numerical simulations

Physical properties	Density of water (kg/m ³)	Dynamic viscosity of water (kg/m-s)	Diffusivity of solute in water (m ² /s)
	997	8.55×10^{-4}	1×10^{-10}

SLM 과 동일하게 디자인되었다.

Fig. 2 는 이렇게 디자인된 마이크로 믹서들의 계산 영역을 3 차원 구조 격자(structured grids)로 분할한 T-타입 마이크로 믹서[Fig. 2(a)]와 SLM[Fig. 2(b)]을 보여준다. T-타입 마이크로 믹서의 경우 총 절점(node) 수와 총 체적 요소(volume element) 수는 각각 29736 개 그리고 24888 개이며, SLM 의 경우 총 절점 수와 총 체적 요소 수는 각각 68749 개 그리고 57056 개이다.

마이크로 믹서 내부로 흐르는 작동 유체로는 물을 선택하였다. 이 때, 물의 물성치와 함께 마이크로 믹서 내의 혼합 거동을 파악하기 위해 선택한 입자의 확산 계수를 Table 1 에 나타내었다.

수치해석 기법으로는, 속도장 해석과 입자(species) 분포 해석의 공간 차분(spatial differencing)에 대해 1 차 풍상 차분법(first order upwind scheme)을 적용하였으며, 계산법으로는 conjugate gradient squared and preconditioning (CGS+Pre) 방법을 사용하였고, 압력장 계산법으로는 algebraic multigrid (AMG) 방법을 적용하였다. 경계 조건으로는 두 입구에 일정 속도를 인가하였으며, 출구에는 고정 압력을 인가하였다. 입자에 대해서는 입구에서 일정 농도로 유입되게 하였으며, 출구에서는 유출이 자유롭게 하였다. 또한 모든 벽면에는 안미끄러짐 조건(no-slip condition)을 적용하였다.

4. 수치 해석 결과 및 고찰

4.1 수치 모사를 통한 혼합 성능 비교

본 연구에서 제안된 SLM 의 혼합 성능을 비교하기 위하여, Fig. 2 의 격자들을 이용하여 T-타입 마이크로 믹서와 SLM 에 대해 유량 50µl/min 에서 혼합 수치 모사를 수행하였다. 이 때, Re 는 특성 길이를 마이크로 채널의 높이인 60µm 으로 잡을 경우 Table 1 의 물성치에 기초하여 3.89 에 해당하였다.

이렇게 수행된 T-타입 마이크로 믹서와 SLM 의 전체적인 혼합 수치 모사 결과는 Fig. 3 에서 볼

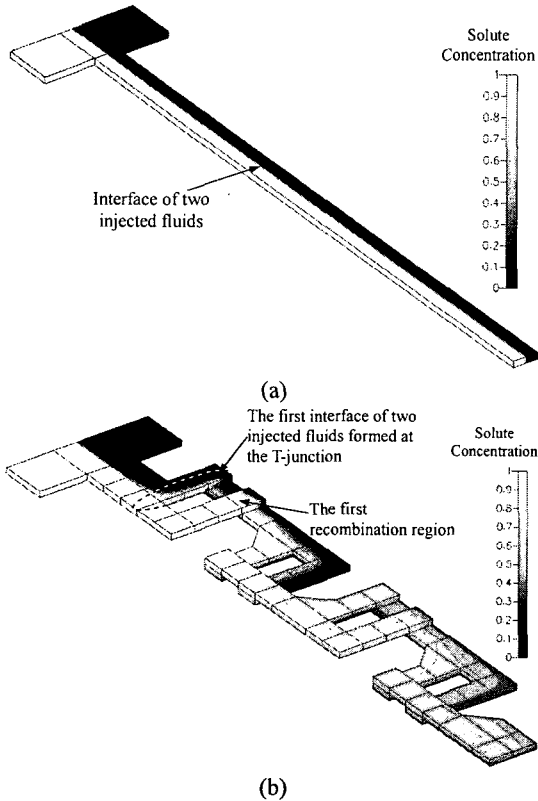


Fig. 3 Numerical mixing simulation results at the flow rate of $50\mu\text{l}/\text{min}$ (the corresponding $Re \approx 3.89$): (a) T-type micromixer and (b) SLM. An almost complete mixing was achieved with four F-shape mixing units of the SLM for the given present conditions

수 있으며, 동일한 하류 위치에서의 T-타입 마이크로 믹서와 SLM의 단면 혼합 거동은 각각 Fig. 4와 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 이 때, Fig. 4와 Fig. 5(b)~(e)의 메인 채널의 너비는 $250\mu\text{m}$ 이지만, Fig. 5(a)와 5(f)는 채널의 너비가 $500\mu\text{m}$ 이기 때문에 다른 그림들에 비해 너비가 두 배에 해당한다. 수치 모사 결과에서 알 수 있듯이, SLM이 T-타입 마이크로 믹서에 비해 탁월한 혼합 성능을 가지고 있음을 알 수 있다. T-타입 마이크로 믹서의 경우, Fig. 3(a)와 Fig. 4에서 보여지는 바와 같이, 본 연구에서 주어진 조건 하에서는 T-합류점에서 형성된 두 유체의 경계 면이 마이크로 채널의 출구까지 거의 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 실제로 본 연구에서 주어진 혼합 유동 층 두께 ($250\mu\text{m}$)와 확산 계수 ($10^{-10}\text{m}^2/\text{s}$)를 식 (1)에 대입하면 총 혼합 소요 시간(혹은 체류 시간, residence time)으로 대략 625초가 필요함을 알 수 있다. 이

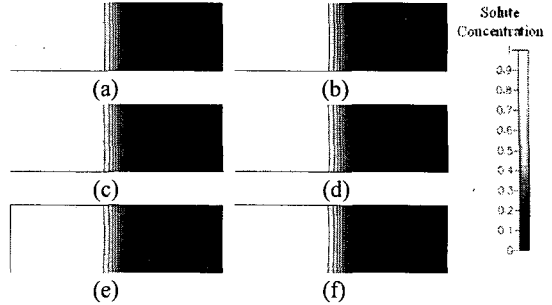


Fig. 4 Cross-sectional simulation results of mixing behaviors of the fluid flow in the T-type micromixer at each downchannel position from the T-junction of: (a) 0.6, (b) 1.8, (c) 3.1, (d) 4.4, (e) 5.7 and (f) 6.4mm

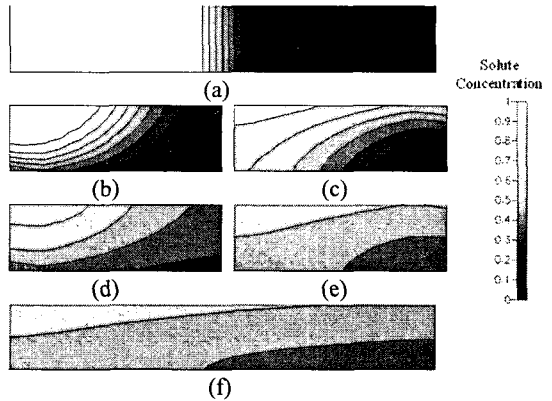


Fig. 5 Cross-sectional simulation results of mixing behaviors of the fluid flow in the SLM at each downchannel position from the T-junction of: (a) 0.6 (T-junction), (b) 1.8 (first recombination), (c) 3.1 (second recombination), (d) 4.4 (third recombination), (e) 5.7 (fourth recombination) and (f) 6.4mm (exit)

때, 마이크로 채널에 흐르는 유동의 속도는 0.056m/s 로, 본 연구에서 주어진 조건 하에 T-타입 마이크로 믹서를 이용하여 완전한 혼합을 얻으려면 무려 35m 의 마이크로 채널 길이가 필요하게 된다. 따라서 주어진 조건 하에 T-타입 마이크로 믹서로 혼합을 기대하는 것은 불가능하다. 이에 반해 SLM의 경우, Fig. 3(b)와 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 채널 출구에서 거의 완전한 혼합이 이루어졌음을 알 수 있다. 유동의 두께 방향 라미네이션이 이상적으로 이루어졌을 경우 현재 디자인된 계산 영역의 SLM 출구에서의 혼합 유동 층 두께는 $3.75\mu\text{m}(=60\mu\text{m}/2^4)$ 에 해당하므로, 혼합 소요 시간은 식 (1)에 따라 0.14초가 필요하게 된다. 따라서, 이상적인 라미네이션이 일어났다면 채널의 출구에서 완전한 혼합을 기대할 수 있게 된다. 하지만, 현재 주어진 속도 조건에서 카오스 이류의 충분한

효과를 보지 못하여, SLM 내부에서 이상적인 라미네이션을 얻을 수는 없었지만, 두 카오스 혼합 메커니즘의 효과적인 결합에 의해 거의 완전한 혼합을 얻을 수 있었다.

또한 재미있는 사실은 Fig. 3(b)에서 표시된 바와 같이 T-합류점에서 처음 생긴 경계 면이 첫 번째 분기 채널로 흐른다는 것이다. 이는, 본 논문의 Part II에서 실험적으로 확인될 것이다. 그리고 Fig. 4의 수치 모사 결과를 살펴보면, 마이크로 채널로 흐르는 두 유체 사이의 경계 면에서 일어나는 확산에 대해, 하류 방향으로 진행해갈수록 채널의 위, 아래 벽면에서 보다 많은 확산이 진행되고 있음을 알 수 있다. 이러한 확산 경향성은 Ismagilov 등⁽¹⁹⁾에 의해 밝혀진 바 있으며, 본 연구의 수치 모사를 통해 동일한 경향성을 보였다. 마지막으로 Fig. 5의 결과에서 Fig. 1(b)의 개략적인 혼합 거동과 동일한 혼합 거동을 확인할 수는 없었다. 이는 유동의 라미네이션에 의해 생성된 유동 층이 본 연구에서 주어진 조건 하에서는 빠르게 혼합되어 확인하기 어려운 점도 있으며, 또한 본 연구에서 사용한 격자 구조와 수치 모사 프로그램에서 생성되는 수치 확산(numerical diffusion)⁽²⁰⁾에 의해 기인될 수 있다. 하지만 본 수치 모사를 통해 정성적으로 SLM 내부의 혼합 거동 및 혼합 성능을 파악할 수 있었다.

4.2 SLM의 혼합 메커니즘 검증

본 연구에서 제안된 SLM 내부에서 일어나는 카오스 혼합 메커니즘을 검증하기 위해서는, SLM이 가지는 전체적인 나선형 유로에 의해 일어나는 카오스 이류가 유동의 라미네이션에 미치는 영향을 알아보는 것이 중요하다. 카오스 이류는 관성력에 기반을 두고 있기 때문에, Re 가 커질수록 큰 영향력을 발휘한다.⁽⁶⁾ 이에 본 연구에서는 Re 변화에 따른 라미네이션 효과를 관찰하기 위해, 유량을 3.6, 36, 180, 360 μ l/min로 변화시키면서 혼합 수치 모사를 수행하여, 첫 번째 재결합 구간(T-합류점으로부터 1.8mm 떨어진 구간)에서의 혼합 거동 변화를 관찰하였다. 이 때, Re 는 특성길이를 마이크로 채널의 높이인 60 μ m으로 잡을 경우 Table 1의 물성치에 기초하여 0.28, 2.80, 14.0, 27.99에 해당하였다.

Fig. 6은 이렇게 수행된 혼합 수치 모사의 결과로서, 첫 번째 재결합 구간에서의 단면 혼합 거동을 보여준다. Fig. 6(a)의 경우 Re 가 0.28로 유지되었기 때문에, 관성력에 기반한 카오스 이류의 효과를 기대하는 것이 어려우며, 카오스 이류 효과

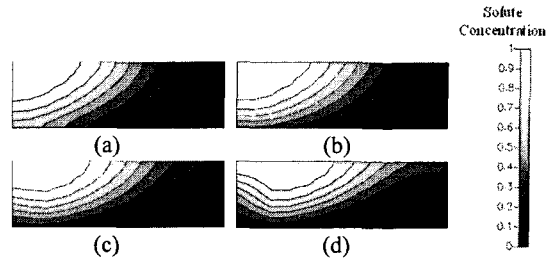


Fig. 6 Cross-sectional simulation results of mixing behaviors of the fluid flow right after the first recombination region of the SLM for the Re of: (a) 0.28, (b) 2.80, (c) 14.0 and (d) 27.99

를 제외한 F-자 형상 혼합 유닛에 의한 분할 및 재배열의 혼합 효과만을 기대할 수 있게 된다. 분할 및 재배열만을 통해서도 횡단 방향으로 유동을 유발하여 경계 면을 증가시켜 혼합 성능의 향상을 기대할 수 있지만, Fig. 6(a)의 단면 혼합 거동 결과에서 볼 수 있듯이 분리 벽 도입을 통해 얻을 수 있는 이상적인 라미네이션을 얻을 수 없었다. 하지만 Re 가 증가함에 따라 카오스 이류가 중요한 역할을 하게 되며, Fig. 6(b)-(d)에서 볼 수 있듯이 단면 혼합 거동이 카오스 이류 효과에 의해 이상적인 두께 방향 라미네이션에 가까워져 가는 것을 확인할 수 있다. 즉, SLM의 나선형 유로 디자인에 의해 유발되는 카오스 이류는, 본 연구에서 제안된 바와 같이, F-자 형상 혼합 유닛에 의해 일어나는 분할 및 재배열의 카오스 혼합 메커니즘에 긍정적인 방향으로 결합되어, 분리 벽이 있어야만 얻을 수 있는 이상적인 라미네이션을 유도할 수 있도록 도움을 주고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 SLM은 분할 및 재배열 그리고 카오스 이류의 두 카오스 혼합 메커니즘을 효과적으로 결합하여, 유체 유동의 라미네이션을 향상시켜 높은 수준의 카오스 혼합을 유도하게 된다. 참고로, SLM은 F-자 형상 혼합 유닛이 연속적으로 연결된 "주기성"을 가지기 때문에, Fig. 6에서 주어진 첫 번째 재결합 구간의 단면 혼합 거동으로부터 다음 재결합 구간에서 일어나는 단면 혼합 거동을 쉽게 유추할 수 있다.

5. 결론

본 논문 Part I에서는, 새로운 형태의 수동 혼합 방식을 가지는 카오스 마이크로 믹서인 나선형 라미네이션 마이크로 믹서(Serpentine Laminating Micromixer, SLM)를 제안하는 한편, 혼합 수치 해석을 통해 제안된 혼합 메커니즘을 검증하였다.

제안된 SLM은 두 층의 기판에 F-자 형상 혼합

유닛들이 연속적으로 맞물려 배열된 간단한 형상으로 “분할 및 재배열(splitting and recombination)”의 카오스 혼합 메커니즘을 유도하며, 또한 배열된 F-자 형상 혼합 유닛이 전체적으로 3 차원 나선형 구조를 가지고 있어 “카오스 이류(chaotic advection)”의 카오스 혼합 메커니즘을 유도하게 된다. 이들 두 카오스 혼합 메커니즘은 상호 보완적으로 효과적으로 결합되어 유체 유동의 라미네이션을 향상시켜 높은 수준의 카오스 혼합을 유도하게 된다.

혼합 성능 비교 및 혼합 메커니즘 검증을 위해 전산 유체역학 수치 모사 프로그램을 통해 혼합 수치 모사를 수행하였으며, 수치 해석 결과는 SLM 이 일반적인 T-타입 마이크로 믹서에 비해 월등히 향상된 혼합 성능을 보이고 있음을 보여주었다. 또한 Re 를 증가시키면서 관찰한 단면 혼합 거동 결과는, 본 연구에서 제안된 바와 같이, 나선형 유로에 의해 유발되는 카오스 이류가 분할된 유체의 재결합 구간에서 긍정적인 방향으로 작용하여 유동의 두께 방향 라미네이션을 향상시키는 것을 보여주었다.

제안된 SLM 은 마이크로 채널 내부에 분리 벽이 없이 F-자 형상 혼합 유닛이 배열된 간단한 형상으로 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.

본 논문 Part I 에 이어 본 논문의 ‘Part II 제작 및 실험’ 편에서는 본 연구에서 제안된 SLM 의 실제 대량 생산을 위한 금형 인서트 제작 및 금형 인서트를 통한 기판의 사출성형, 사출성형된 기판의 접합을 통한 SLM 의 제작 및 제작된 SLM 과 T-타입 마이크로 믹서를 이용한 혼합 실험을 수행하였다.

후 기

본 연구는 한국과학기술부의 국가지정연구실사업(2000-N-NL-01-C-148)의 지원과 한국교육인적자원부의 BK21 program 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) 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) Johnson, T.J., Ross, D. and Locascio, L.E., 2002, “Rapid Microfluidic Mixing,” *Anal. Chem.*, Vol. 74, pp. 45~51.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) Branebjerg, J., Gravesen, P. and Krog, J.P., 1996, “Fast Mixing by Lamination,” *MEMS 96*, San Diego, CA, February 11-15, pp. 441~446.
- (13) Schwesinger, N., Frank, T. and Wurmus, H., 1996, “A Modular Microfluid System with an Integrated Micromixer,” *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 6, pp. 99~102.
- (14) 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.
- (15) Löwe, H., Ehrfeld, W., Hessel, V., Richter, T. and Schiewe, J., 2000, “Micromixing Technology,” *IMRET 4*, Atlanta, USA, pp. 31~47.
- (16) Ottino, J.M., 1989, *The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos, and Transport*, Cambridge Univ. Press, New York.
- (17) 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.
- (18) 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.
- (19) Ismagilov, R.F., Stroock, A.D., Kenis, P.J.A., Whitesides, G. and Stone, H.A., 2000, "Experimental and Theoretical Scaling Laws for Transverse Diffusive Broadening in Two-phase Laminar Flows in Microchannels," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76, pp. 2376~2378.
- (20) Kang, T.G. and Kwon, T.H., 2004, "Colored Particle Tracking Method for Mixing Analysis of Chaotic Micromixers," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 14, pp. 891~899.