

엇갈림 배플 구조의 마이크로 채널 내 유동 및 혼합 특성에 관한 수치해석적 연구

허성규,¹ 강상모,² 서용권^{*2}

A NUMERICAL STUDY ON FLOW AND STIRRING CHARACTERISTICS IN A MICROCHANNEL WITH PERIODIC ARRAY OF CROSS BAFFLES

S.G. Heo,¹ S.M. Kang² and Y.K. Suh^{*2}

In the microfluidic devices the most important thing is mixing efficiency of various fluids. In this study a newly designed mixer is proposed to enhance the mixing effect with the purpose to apply it to microchannel mixing in a short future. This design is composed of a channel with cross baffles periodically arranged on the both bottom and top surfaces of the channel. To obtain the flow patterns, the numerical computation was performed by using a commercial code, ANSYS CFX 10.0. To evaluate the mixing performance, we computed Lyapunov exponent and obtained Poincare sections. It was shown that our design provides the excellent mixing effect.

Key Words : 마이크로 믹서(Micro Mixer), 배플(Baffle), 포앙카레 단면(Poincare section), 리아푸노프 지수(Lyapunov exponent), 혼돈적 교반(Chaotic advection), 수치해석(Numerical Computation)

1. 서 론

MEMS 기술의 발전과 함께 생명공학(bio techno-logy)이 각광을 받은 이래 수많은 연구자들에 의해 Lab-on-a-chip (LOC)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. LOC는 적은 양의 시료를 사용하여 샘플의 준비, 청결화, 혼합, 반응, 분리 등의 일련의 과정들을 하나의 마이크로 시스템(integrated micro-system)상에서 이루어질 수 있도록 한 집적장치로서 이 경우 시료의 빠르고 효과적인 혼합이 매우 중요하다.

일반적으로 혼합을 증가시키기 위하여 난류를 형성시키는 혼합 기구를 고려할 수 있으나, 마이크로 단위에서는 매우 작은 형상 크기와 유동 속도로 인해 레이놀즈 수가 매우 작으므로 ($Re \ll 1$), 이와 같은 방법을 적용할 수 없다. 또한 분자적 확산(molecular diffusion)의 빠르기는 물성치 분포에서 구배(gradient)에 비례하나 많은 경우에 있어서 확산계수는 매우

낮으므로 확산을 위해서는 물성치 분포의 구배를 크게 할 필요가 있다. 이에 대한 방법으로 유로의 형상을 변화시켜 유체의 혼합을 증대시키는 혼돈적 교반(chaotic advection)이 주로 이용된다[1].

이와 같은 연구로 Aref[2]는 서펜타인 구조(serpentine type)의 채널에 대한 혼합효과를 연구하였고, Bertsch 등[3]은 헬리컬 모양의 두 채널이 교차하는 혼합기를 제작하여 혼돈적 교반의 관점에서 혼합특성을 연구하였으며, Stroock 등[4]은 채널의 바닥에 물고기 뼈 모양의 홈을 지그재그로 낸 헤링본 구조(staggered herringbone mixer)의 혼합기를 제작하여 혼합효과를 높일 수 있음을 보였다. 혼돈적 교반의 제반 도구들을 수치해석적도구로 이용할 수 있는 기틀을 Suh와 Moon[5] 그리고 Moon과 Suh[6]가 제시한 바 있으며, Heo와 Suh[7]는 사각 채널 내 블록 구조에 대해 수치해석 및 실험적 연구를 진행하여 마이크로 채널에 이를 응용 할 수 있는 가능성을 제시하였다. 한편 Suh 등[8]과 Suh[9]는 압출기용 스크류 내의 혼합특성을 수치해석적으로 규명하여 그 양호한 혼합특성을 보여주었다.

본 연구에서는 이 연구결과들을 참조하여 교차된 배플 구조에서의 유동과 혼합 특성을 알아보고 실제 채널 혼합기로

접수일: 2006년 11월 17일, 심사완료일: 2006년 12월 20일.

1 학생회원, 동아대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 동아대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: yksuh@dau.ac.kr

서의 효과를 예측해 보고자 한다. 본 장치는 궁극적으로 마이크로 채널 내 유동의 혼합에 응용하기 위한 목적으로 개발되었다. 앞선 연구자들이 제안한 혼합장치에 비해 이 장치는 채널의 기하학적 형상을 다소 간단한 구조로 하고 짧은 채널의 길이로도 혼합효과를 더 높일 수 있음을 보여주고자 한다. 채널 내 교반 특성을 이해하기 위해 혼돈적 교반에 대한 개념을 사용하였다. 교반 특성은 포앙카레 단면(Poincare section)으로 지역적 혼합특성을 규명하였고, 혼합효과의 정량화에는 리아푸노프 지수(Lyapunov exponent)를 사용하였다.

2. 유동모델 및 수치해석 기법

2.1 유동모델

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 해석모델의 형상이다. x, y, z 는 각각 채널의 길이, 폭, 높이 방향의 좌표이다. H 는 채널 높이, W 는 채널 폭, 그리고 P 는 배플 배치의 공간적 주기이다. 본 연구에서 대상으로 한 유동모델은 공간적으로 4개의 주기를 가진다. 이들 치수와 그 외 다른 변수들의 정의 및 치수를 Table 1에서 제시하였다. 완전발달 유동을 위해 수치해석 시 유입구의 길이는 $150 \mu\text{m}$ 로 하였다.

본 연구에서 레이놀즈수는

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (1)$$

이다. 여기서 V 는 평균유속, ρ 는 밀도, μ 는 점성계수, D_h 는 채널의 수력직경이다.

본 연구에서 대상으로 하는 마이크로 채널은 $100 \mu\text{m}$ 의 폭을 갖는다. 이 정도 크기에서 흐름은 연속류(continuum flow regime : $Kn < 0.001$)에 속한다. 또한, 매우 느린 저속유동으로 Stokes 형태의 유동에 해당된다.

2.2 수치해석 기법

우선, 지배방정식인 Navier-Stokes 방정식을 상용 프로그램인 CFX를 사용하여 해를 구한다. 여기서 격자는 비정렬 사면체 형태이며 격자수는 11,000,000 개 정도이다. 얻어진 속도장으로 수동적 유체입자(passive particle)의 운동방정식을 적분하여 유선을 구하는데 이 또한 CFX 툴을 사용하여 구한다. 그 다음, 포앙카레 단면과 리아푸노프 지수를 구함에 있어서는 위에서 구해진 유선의 정보를 이용하여 지정된 단면을 통과하는 입자의 위치를 보간법으로 구하는 방법을 적용하였다.

포앙카레 단면상에서는 교반이 잘 되는 지역(혼돈영역:chaotic region)과 그렇지 못한 지역(정규영역:regular region)을 구분할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 이러한 목적보다는

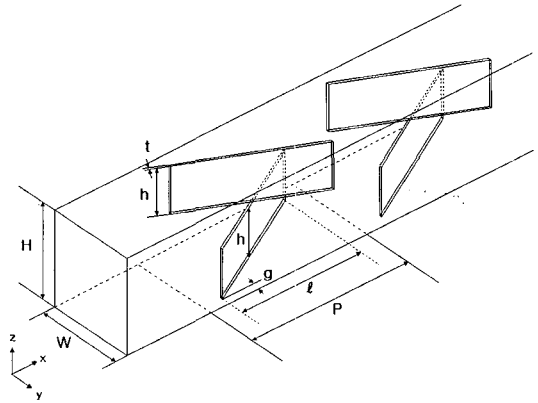


Fig. 1 Perspective view of the channel with blocks attached to the bottom and top walls.

유입단면의 절반 만큼에 분포된 입자가 지정된 단면에 도착하였을 경우의 모습(즉 혼합양상)을 분석하기 위한 목적을 가진다.

리아푸노프 지수는 가상적인 물질이 유동장에서 늘여지는 빠르기를 장시간 (이론적으로는 무한대의 시간)에 걸쳐 평균한 양이다. 혼돈영역에서 유체입자의 길이는 평균적으로 보아 시간의 경과와 더불어 지수적으로 증가하므로, 임의의 시간 t 때의 길이 l 을 초기 $t=0$ 때의 길이 l_0 에 대하여 평균적으로 나타내면 다음과 같다.

$$l = l_0 \exp(\Lambda t) \quad (2)$$

여기서, Λ 가 리아푸노프 지수에 해당한다. 이것을 달리 쓰면, 아래와 같이 리아푸노프 지수를 구하는 공식을 얻는다.

$$\Lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln(l/l_0) \quad (3)$$

Table 1 Geometric variables and their dimensions of the channel and the baffles.

Variable	Dimension	Remarks
H	100 μm	height of channel
W	100 μm	width of channel
h	0.5H	height of baffle
L	950 μm	total length of channel
l	1.5H	length of baffle
t	0.05H	thickness of baffle
g	0.1H	gap between baffle and channel wall
P	2H	period of baffle array

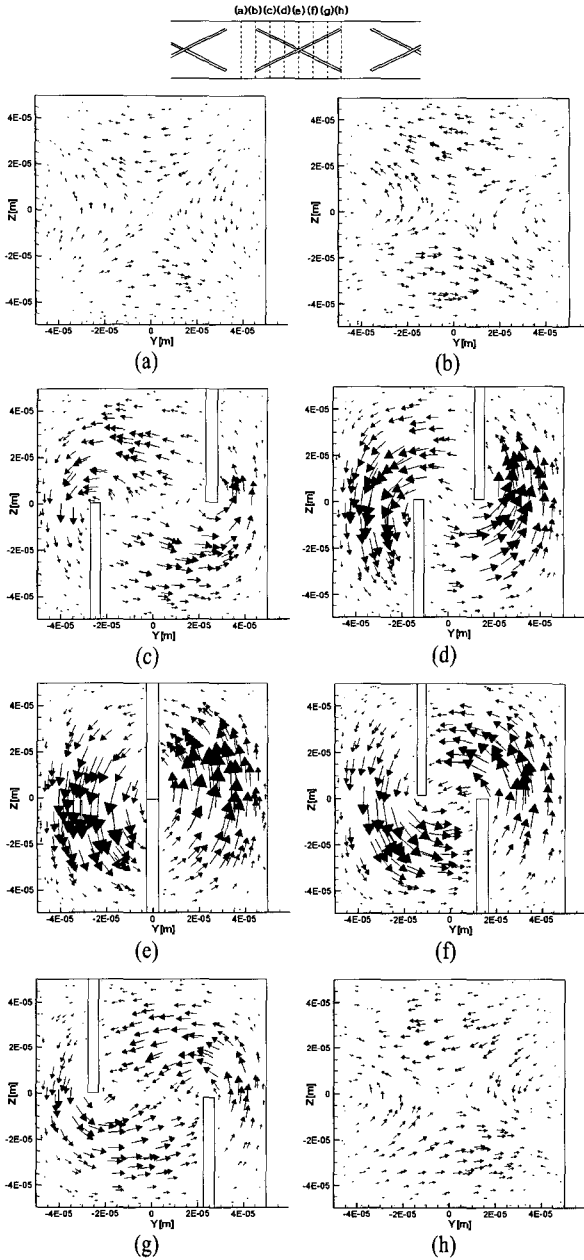


Fig. 2 Sectional view of velocity vectors in the channel; viewed from the outlet side.

한편 본 연구에서 모든 변수는 차원을 가진다. 리야푸노프 지수의 차원은 [1/s]이다.

2.3 경계조건

Fig. 1에서 보여준 해석 모델에 대한 입출구 경계조건을 설명한다. 입구 단면에서는 완전발달 유동으로 가정하여

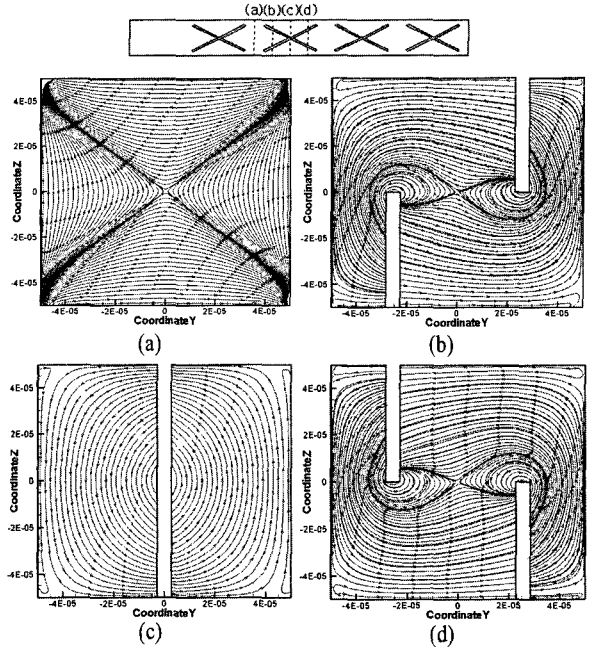


Fig. 3 Sectional view of the secondary-flow streamlines in the channel; viewed from the outlet side.

Gondret 등[10]이 제시한 아래의 속도곡선 식을 적용하였다.

$$u(y, z) = \frac{GW^2}{8\mu} \left\{ 1 - \left(\frac{2y}{W}\right)^2 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{32}{(2n-1)^3 \pi^3} \times \frac{\cosh(2n-1)\pi(z/W)}{\cosh((2n-1)\pi/2H/2)} \cos((2n-1)\pi \frac{y}{W}) \right\} \quad (4)$$

단, 이 식에 필요한 압력구배 G 는 직경이 D_h 인 원관이 $500 \mu\text{m/s}$ 의 평균유속을 가지도록 Hagen-Poiseuille 공식을 이용하여 결정하였다. 그러면 본 사각 채널에서의 평균유속은 기하학적인 차이와 배플 구조 때문에 $500 \mu\text{m/s}$ 보다 작아진다. 전형적으로 평균유속은 $440 \mu\text{m/s}$ 정도가 되며, 이 때 레이놀즈 수는 약 0.1이다. 출구조건으로는 출구방향의 모든 물리량의 구배가 0 이 된다는 조건을 사용하였다. 그리고 벽면 조건으로는 비침투 조건과 점착조건을 부여하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 2는 채널의 3번째 배플이 위치한 단면상에서의 2차유동(secondary flow)의 속도장을 나타낸 것이다. 전체적으로 보면 2차유동은 반시계 방향의 회전운동을 한다. 이는 Fig. 1에서 보인 바와 같이 배플 설치구조의 특징에서 비롯된다. 만약

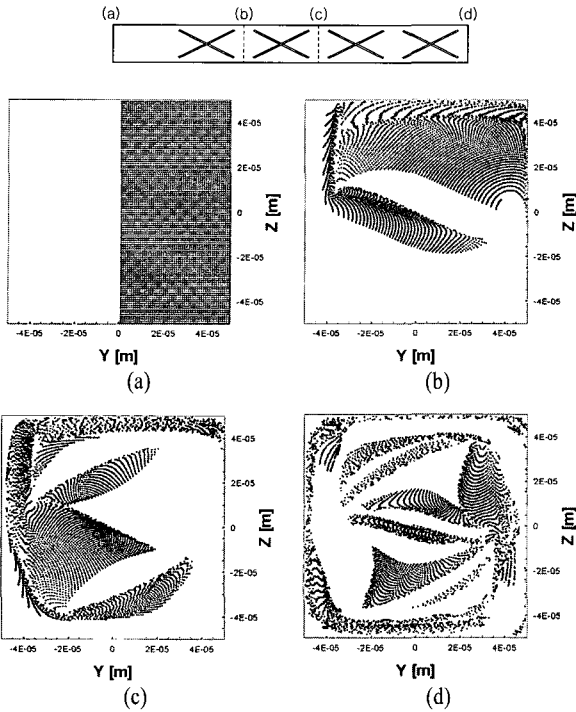


Fig. 4 Sectional view of Poincare sections in channel.

배플의 설치방향을 Fig. 1과 반대로 하였다면(즉 아래 위의 배플을 방향을 유지하면서 위치만 교환하였다면) 2차유동의 방향은 시계방향이 될 것이다. 이러한 2차 유동은 혼합효과에 매우 중요한 기여를 할 것으로 기대할 수 있다. 2차 유동의 강도는 배플이 정확히 대칭으로 교차한 중앙 지점에서(즉 Fig. 2의 (e)에서)최대가 된다.

한편, 배플이 시작되는 입구 부분(Fig. 2(b))과 출구 부분(Fig. 2(h))에서는 2차유동이 쌍곡형의 형태를 보이며 안장점(saddle point)은 채널의 중심에 있다. 이처럼 회전과 쌍곡형 운동이 공존하므로 양호한 혼합효과를 기대할 수가 있다[11].

Fig. 3의 그림은 각 채널의 단면에서의 2차 유동을 유선을 통해 보여주고 있다. Fig. 3에서와 마찬가지로 2차 유동은 반시계방향의 회전운동을 하고 있다. 또한 안장점의 위치도 더욱 선명하게 볼 수 있다.(Fig. 3(a), (b), (d))

Fig. 4의 그림들은 처음 입구 면(Fig. 4(a))에서 우측 반(하류에서 보았을 때)에만 입자를 분포시키고 이것들이 유선을 따라 각 단면에 도착한 모양을 나타낸 포앙카레 단면이다. 입구에서 반으로 나뉘어 들어오던 서로 다른 유체 입자들이 앞에서 설명한 2차유동(회전운동 + 쌍곡형 운동)의 영향을 받아 접힘(folding)과 늘임(stretching)의 과정을 반복하기 때문에 두 유체의 경계 길이는 급속히 늘어나고 있다. 이는 바로 양호한 혼합을 의미한다.

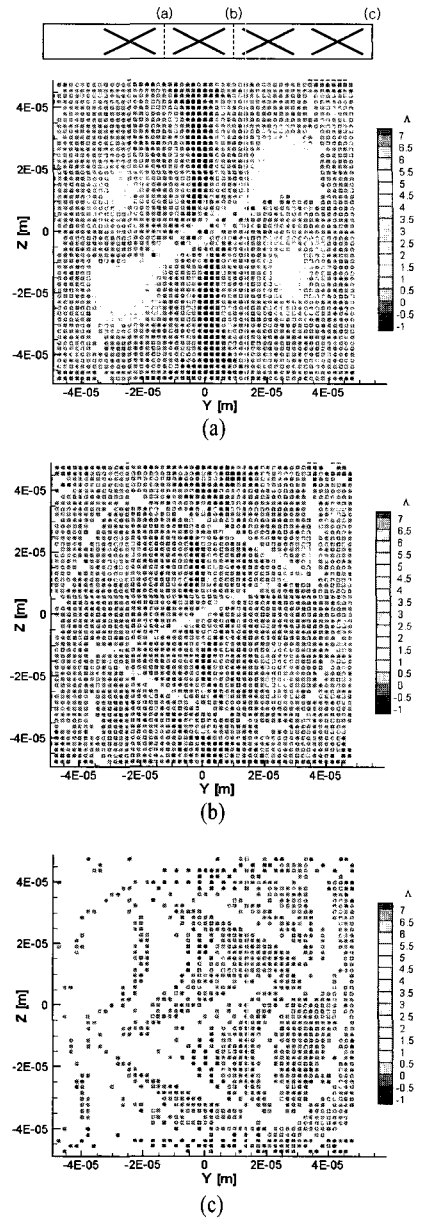


Fig. 5 Distribution of the Lyapunov exponent at each sectional position

Fig. 5의 그림은 수치해석적으로 구한 리아푸노프 지수를 나타낸 것이다. 처음, 유입 단면에서 10000개의 입자쌍들을 균일하게 분포시키고 이것들이 유선을 따라 흘러가서 각 단면에 도달하였을 때 같은 쌍의 두 입자들의 거리 l 과 이 단면에 도달할 때까지 걸린 시간 t 를 사용하여 식 (3)로부터 계산하였다. 여기서 한 쌍의 입자는 초기에 매우 가까이 ($0.5\mu\text{m}$) 놓여 있도록 하였다. 그림에서 리아푸노프 지수의 값은

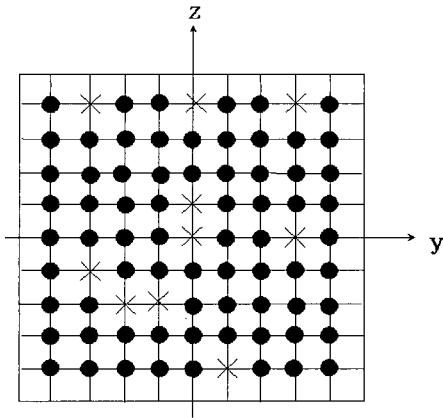


Fig. 6 Distribution of the points where the Liapunov exponent was calculated. The cross marks represent the points where it was unsuccessful(refer to the text).

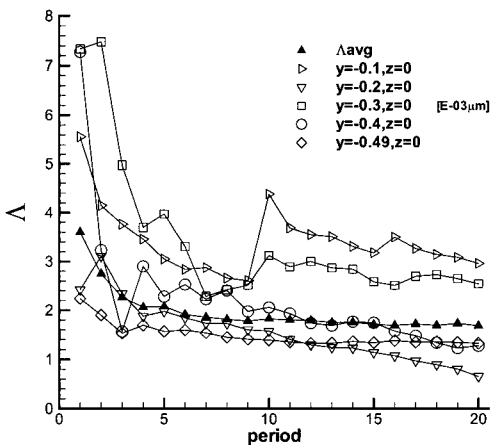


Fig. 7 Comparison of the Lyapunov exponents at each position along the line z=0.

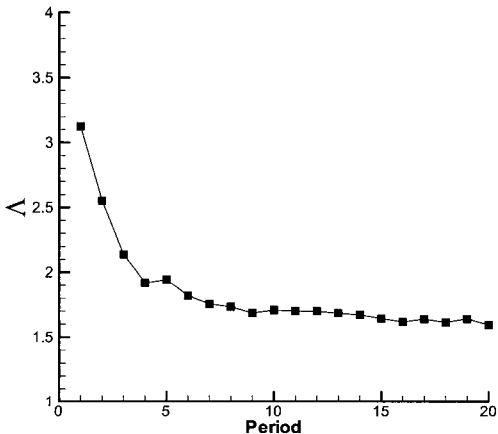


Fig. 8 Variation of the spatially averaged Lyapunov exponent.

입자 쌍의 초기 위치를 기준으로 하여 그 분포를 나타내었다. 리야푸노프 지수의 값이 정의되어 있지 않은 지점은 두 입자 모두 혹은 그 중 하나의 입자가 미처 그 단면에 도달하지 않았기 때문이며, 그 이유는 입자가 벽면 가까이 놓이게 되면 매우 느린 유속으로 진행하기 때문이다. 전체적으로 보면 양의 리야푸노프 지수가 지배적이다. 이것은 본 구조가 혼돈적 교반 즉 양호한 혼합을 일으키고 있음을 의미한다. 그러나 시간이 갈수록(즉 하류로 갈수록) 지수의 값이 정의되지 않은 지점이 늘어나고 있다. 앞으로 이러한 계산상의 문제를 해결할 필요가 있을 것이다.

리야푸노프 지수는 시간이 무한히 증가한다고 가정할 때 이상적인 값을 가진다. 그리고 초기시간에 리야푸노프 지수는 급격히 감소하며 큰 변동값을 가지게 된다. 그러므로 수렴된 값을 얻기 위해서는 장시간에 걸친 계산이 필요하다. 그러나 주어진 유동장은 네 개의 공간주기만을 가지므로 장시간에 걸친 입자 쌍 사이의 거리변화를 구하기 위해서는 다른 방법을 사용할 수 밖에 없다. 여기서는 유동이 비교적 안정화 되었다고 판단할 수 있는 세 번째 배플 구조의 유동장 데이터를 사용하고 입구와 출구 단면에서는 주기조건을 부여함으로써 장시간에 대한 계산이 가능하도록 하였다. 다시 말해서, 세 번째 배플이 시작하는 입구 단면의 한 위치에서 공간적으로 매우 가까이 위치한 한 쌍의 수동적 유체입자의 유선을 구하고 배플이 끝나는 출구단면에 도착하였을 때의 각각의 위치를 구한 다음, 두 입자사이의 거리를 계산하고 이 거리와 그 동안 경과된 시간을 사용하여 리야푸노프 지수를 구한다. 다음으로 출구단면에서의 입자 쌍의 y, z 좌표를 그대로 유지한 채 입자를 유입 단면에 가져간 다음 같은 요령으로 하여 두 입자가 출구 단면에 도착하도록 하고 이 때의 입자 쌍 사이의 거리와 경과 시간을 구한다. 이러한 방법으로 20 주기 동안 리야푸노프 지수를 구하며, 여러 점에 대한 결과를 평균함으로써 공간 평균 리야푸노프 지수를 구한다.

Fig. 6은 이와 같은 작업에서 초기 입구 단면에 위치시킨 81개의 입자 위치를 나타내고 있다. 여기서 "X"로 표시된 지점은 해당 입자 쌍의 적어도 하나가 하류로 흘러가는 도중 채널 벽면 혹은 배플 벽면에 가까워지면서 유속이 매우 느려 채널 출구단면에 도달하지 못하기 때문에 리야푸노프 지수를 구할 수 없게 된 점을 나타낸다. (이같은 현상은 Fig. 5에서도 나타나고 있다.)

Fig. 7은 이같이 구한 리야푸노프 지수의 변화로서 채널의 중심 선 즉 z=0에 위치한 여러 점들에서 구한 값들을 상호 비교한 것이다. 전체적으로 벽면에 가까운 지점에서의 리야푸노프 지수 값이 작게 나타나고 채널의 중심에 위치한 지점일수록 값이 크게 나타난다. 이는 벽면에 가까우면 주 유동 방향의 유속 뿐만 아니라 2차유동의 속도도 작기 때문에 유선

의 모양이 단순하며, 또한 입자가 하나의 공간주기만큼 흐르는데 필요한 소요시간도 길어지기 때문이라 생각된다. 그러나 초기에 벽면에 가까이 있더라도 그 이후에 하류로 흐르는 과정에서 다시 중앙 지점으로 이동하는 경우에는 리야푸노프 지수의 값이 증가하는 형태도 나타나고 있다.

Fig. 8은 전체 지점에서의 리야푸노프지수 값을 평균한 결과를 나타낸 것이다. 값이 약 1.6에서 수렴되는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 양의 리야푸노프 값이 얻어지는 것은 앞서 언급한 대로 본 배플 구조의 채널이 혼돈적 교반을 일으키며 따라서 혼합특성도 양호하다는 것을 뜻한다.

한편 본 논문에서 제안한 채널은 향후 실제로 제작하여 실험적으로도 연구할 예정이다. 채널의 제작에 다소의 어려움이 예상되지만 z-방향으로 양분하여 별도 제작한 뒤 서로 본딩(bonding)하는 방법을 구상중에 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 수치해석을 통하여 마이크로 채널 믹서의 유동 및 혼합 특성에 대해 분석하였다. 이상의 분석을 토대로 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 제시한 배플 구조는 채널의 단면 상에서 2차 유동을 야기하며, 이 2차 유동은 회전유동과 쌍곡형 유동의 양상을 동시에 보여준다.
- (2) 수치해석적으로 구한 포앙카레 단면은 두 개의 서로 다른 유체 사이의 경계선이 시간에 대해 매우 빠르게 길어지는 양상을 보이며 이는 바로 양호한 혼합을 기대할 수 있게 한다.
- (3) 수치적으로 구한 리야푸노프 지수는 전체적으로 양의 값이 지배적이며, 이로부터 본 배플 구조의 믹서가 혼돈적 교반의 특징을 보임을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 국가지정연구실사업에 의한 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] Suh, Y.K., 1995, "Chaotic Stirring of an Alternately-Driven-Cavity Flow," *Trans. of the KSME(B)*, Vol.19, No.2, pp.537-547.
- [2] Aref, H., 2002, "The Development of Chaotic Advection," *Phys. Fluids*, Vol.14, pp.1315-1325.
- [3] Bertsch, A., Heimingartner, S. and Cousseau, P., 2001, "3D micromixers-downscaling large scale industrial static mixers," *TProc. IEEE MEMS*, p.507.
- [4] Stroock, A.D., Destinger, 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.
- [5] Suh, Y.K. and Moon, J.C., 1994, "Chaotic Stirring in a Shallow Rectangular Tank," *Trans. of the KSME(B)*, Vol.18, No.2, pp.380~388.
- [6] Moon, J.C. and Suh, Y.K., 1994, "Fluid Flow and Stirring in a Rectangular Tank -effect of the Plate Length-," *Trans. of the KSME(B)*, Vol.18, No.10, pp.2698-2750.
- [7] Heo, H.S. and Suh, Y.K., 2005, "Enhancement of Stirring in a Straight Channel at Low Reynolds-Number with various Block-Arrangement," *Journal of Mechanical Science of Technology*, Vol.19, No.1, pp.199-208.
- [8] Suh, Y.K., Kim, Y.K. and Moon, J.C., 1997, "A numerical study on a chaotic stirring in a model for a single screw extruder," *Trans. of the KSME(B)*, Vol.21, No.12, pp.1615-1623.
- [9] Suh, Y.K., 2004, "Analysis of the Stokes flow and stirring characteristics in a staggered screw channel," *J. Comput. Fluids Engng*, Vol.9, No.4, pp.55-63.
- [10] Gondret, P., Rakotomalala, N., Rabaud, M., Salin, D. and Watzky, P., 1997, "Viscous parallel flow in finite aspect ratio Hele-Shaw cell: Analytical and numerical results," *Phys. Fluids*, Vol.9, No.6, pp.1841-1843.
- [11] Ottino, J.M., 1989, *The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos, and Transport*, Cambridge Univ. Press.