

마이크로채널 내 블록의 정렬과 구조변경에 따른 교반특성

서 용 권[†] · 허 형 석^{*}

(2002년 12월 30일 접수, 2003년 5월 16일 심사완료)

A Numerical Study on Stirring Characteristics in a Microchannel with Various Arrangement of Blocks

Yong Kweon Suh and Hyeung Seok Heo

Key Words: MEMS(마이크로 전자기계 시스템), Stirring(교반), Micro Mixer(마이크로 믹서), Lyapunov Exponent(리아푸노프 지수)

Abstract

Numerical study on stirring characteristics in a microchannel with blocks arranged periodically has been performed. Viscous flows through the microchannel is simulated three-dimensionally using a commercial code, FLUENT 6.0. Focus is given to the effect on the stirring characteristics of the geometric factors including the pitch, height and angle of the block arrangement. The numerical results at low Reynolds numbers show that the particles' trajectories in the microchannel heavily depend on the block arrangement. A nonlinear dynamical tool, i.e. Lyapunov exponent, was used in analysing the mixing effect. It was found that the mixing is the most effective at a certain combination of parameter values.

1. 서론

생명공학(Bio-technology)은 생체나 생체유래물질 또는 생물학적 시스템을 이용하여 산업적으로 유용한 제품을 제조하거나 인간 유전체 해석 및 기능 연구, 의약품 안전성 평가기술, 동물 형질전환기술, 미생물 또는 식물 유전체 해석 및 기능 연구등을 취급하고 있다. 그러나 이런 연구과정을 이전에는 대규모의 실험실에서 이루어 졌으나 요즘은 손톱크기의 조그마한 공간에서 이루어고 노력하고 있다. 이것을 랩온칩(Lap-on-a-chip)이라고 부른다.⁽¹⁾ 이 과정을 통하면 수초~수분 내로 분석이 가능하며 시료 및 시약의 소모량을 최소로 할 수 있는 장점이 있다. 랩온칩은 반도체칩

제작기술을 응용한 것으로 MEMS(Micro Electro Mechanical System)기술을 기본적으로 이용하고 있다.

MEMS기술은 생명공학과 결합되면서 관심이 높아졌으며 각종 마이크로 제품들을 제작하는 것이 실제적인 기술의 목표이다. 그 예로, 마이크로 열교환기, 마이크로 펌프, 마이크로 밸브, 마이크로 믹서 등이 있다.⁽¹⁾

MEMS에서 마이크로 채널은 위에서 언급한 기기들의 가장 기본적인 구조이며 이 구조를 지나 는 유체의 혼합 특성을 분석하는 것이 매우 중요하다.

Weilin 등⁽²⁾과 Mala와 Li⁽³⁾는 각각 사다리꼴, 원형 마이크로 채널을 제작하여 낮은 레이놀즈수의 유동에 대한 일반적인 이론을 실험을 통하여 검증하였으며, 채널벽면의 거칠기가 유동특성에 대하여 상당한 영향을 끼치는 것으로 보고하였다. Meinhart 등⁽⁴⁾은 PIV기술을 이용하여 마이크로 채널내의 유동을 가시화하였다. 마이크로 채널에 대한 이같은 유동특성에 대한 연구와 더불어 채

[†] 책임저자, 회원, 동아대학교 기계산업시스템공학부

E-mail : yksuh@mail.donga.ac.kr

TEL : (051)200-7648 FAX : (051)200-7656

^{*} 회원, 동아대학교 대학원 기계공학과

널 내에서 혼합특성에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있는데, 마크로 스케일에서의 유동특성과 달리 마이크로 채널에서의 유동은 낮은 레이놀즈수의 유동특성을 가지고 있다. 고 레이놀즈수의 유동일 경우 난류를 형성시키면 쉽게 혼합이 되는 반면 저 레이놀즈수의 유동에서는 이같은 방법을 적용할 수 없으며 혼돈적 교반의 방법이 유일한 방법이다.⁽⁵⁾ 이와 같은 연구로 Stroock 등⁽⁶⁾은 점성이 다른 서로 섞이지 않는 유체를 혼합하는데 마이크로채널 바닥에 헤링본 구조의 골을 만들어 유동을 제어하여 혼합을 하였다. 그 결과 헤링본 구조의 두 골에 의하여 발생한 두가지 유동장을 주기적으로 적용함으로써 혼합효과를 높일 수 있었다. Aref⁽⁷⁾는 서펜타인 구조(serpentine type)의 채널을 제작하여 혼돈적 교반의 관점에서 혼합특성을 연구하였다.

본 연구는 마이크로 믹서에 대한 연구이며 기 연구자들은 채널의 기하학적 형상을 다소 복잡하게 형성하여 혼합효과를 높였지만 여기서는 더욱 더 간단한 구조로 혼합 효과를 높일 수 있음을 보여주고자 한다. Suh와 Kim⁽⁸⁾은 층류 조건에서 스크류 내부의 유동을 플라이트(flight)의 배치를 변경하여 혼돈적 교반의 관점에서 연구한 바 있다. 본 연구에서 이 연구결과를 참고하여 미소채널 내부에 블록을 설치하여 블록의 크기, 위치 등을 변경하여 혼합효과를 알아보고 최적의 혼합을 위한 파라미터 조건이 존재하는지 확인하고자 한다.

채널내 교반특성을 이해하기 위해 혼돈적 교반에 대한 개념을 사용하였으며, 교반 성능은 리야푸노프 지수를 도입하여 정량화 하였다.⁽⁹⁾

2. 유동모델 및 수치해석 기법

2.1 유동 모델

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 해석모델의 형상이다. x , y , z 는 각각 채널의 높이, 폭, 길이방향의 좌표이다. H 는 채널폭 및 채널높이이며, 채널길이는 z -방향으로 임의로 설정된다.

채널바닥의 블록은 y -방향 기준으로 각도 α 만큼 경사져 있다. 블록의 높이는 h , 정열피치는 p , z -방향 길이는 L 이다.

본 연구에서 레이놀즈수는

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

이다. 여기서 V 는 평균 유속, ρ 는 밀도, μ 는 점

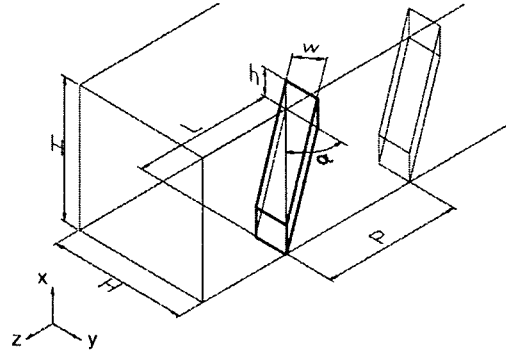


Fig. 1 Perspective view of the flow domain surrounded by a channel with blocks inside at the bottom wall

성계수, D_h 는 채널수력직경이다.

본 연구에서 유체는 연속체 성질을 만족한다고 가정하였다. 실제 마이크로 믹서의 경우 혼합하고자 하는 용액이 $10000 \mu\text{m}^2$ 정도 되는 면적의 채널입구에 유입된다고 가정하자. 그러면 대표길이는 $100 \mu\text{m}$ 이며 물의 경우 $\mu/\rho = 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 이므로 $V = 0.1\text{m/s}$ 이며 Re 는 10정도가 된다.

2.2 경계조건 및 사용 CFD 소프트웨어

Fig. 1에서 보여준 해석 모델에 대하여 입출구 경계조건으로 입구유속은 0.022m/s 의 균일속도분포를 사용하였고, 출구조건으로는 출구방향의 모든 물리량의 구배가 0이 된다는 조건을 사용하였다. 그리고 벽면 경계조건으로 비침투 조건과 점착조건을 부여하였다.

한편, 본 해석을 위하여 보편적인 신뢰성이 입증되어 있는 상용코드(FLUENT 6.0)를 사용하였다.

3. 결과 및 검토

본 연구의 해석조건은 평균유속 V 는 0.022m/s , 수력직경 D_h 는 $450 \mu\text{m}$, 유체는 물이며, $\mu/\rho = 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 이므로 레이놀즈수는 10이다.

Fig. 2는 $p = L = H$, $w = 0.2H$, $\alpha = 45^\circ$ 인 경우의 경사진 블록내의 유동에 대한 속도분포와 채널내 입자의 거동을 나타낸 것이다. Fig. 2(a), (b), (c), (d)는 블록과 블록사이의 한 구간을 3등분한 지점인 입구, 중간 그리고 출구부분의 단면 유동장을 나타낸 것이다. 주 유동 방향은 가장 위쪽에 표시한 채널 스케치에서 좌측에서 우측 방향이다. Fig. 2(a)의 경우 우측블록에서는 소스

(source)가 되고 좌측블록에는 싱크(sink)의 유동특성을 보인다. 이는 유체가 블록의 시작부분과 마주치면서 블록으로 인해 사방으로 흩어지며 또한 블록의 끝부분에서는 블록뒷부분의 빈 공간을 채우기 위해 다시 모여들기 때문이다. 그리고 뚜렷하지는 않지만 중심부분에는 안장점(saddle point)이 확인된다. Fig. 2(b),(c)에서는 시계방향의 회전 유동이 형성되는데, 이는 유체가 블록의 뒷부분을 채우기 위해 블록을 넘어가기 때문이다. Fig. 2(d)는 Fig. 2(a)와 동일한 유동장을 나타내고 있으며 이는 유동이 공간적, 주기적으로 반복되고 있음을 의미한다.

Fig. 2(e), (f), (g), (h)는 1000여개의 입자를 유동과 같이 흘러 보내 채널 입구에서부터 시작하여 출구까지의 입자거동을 살펴 본 수치해석 결과이다. 각 모양은 채널 전체길이를 3등분하여 입구, 중간 2곳, 그리고 출구부분에서 입자의 거동을 살펴본 것이다. 또한 각 단면은 입자의 분포상태를 채널의 길이방향으로 투영한 모양을 나타낸다. 채널입구에서 일정한 분포를 보이던 입

자들은 시계방향의 유동영향으로 채널의 중간부분에서 점점 일그러짐에 따라 채널 정사각형 전체를 차지하는 입자중 블록과 가까운 부분의 입자들이 점차 혼합이 되어가고 있는 것을 볼 수 있으며, 결국 출구에서는 중앙부분에 분포하던 유체덩치가 수직방향으로 늘어진 것을 확인할 수 있으며, 좌측아래 코너근처에서 혼합이 가장 활발하게 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 채널을 따라 흘러가는 입자분포의 모양을 채널상부에서 본 것이다. 채널을 출발할 때는 채널 윗 쪽에서 볼 때 선에 불과하였지만 블록을 지날 때마다 각 입자들의 속도차이의 결과로 입자사이의 거리가 멀어지면서 결과적으로 채널의 출구 부근에서는 입자가 넓게 분포되어 있다.

Fig. 4는 블록간의 피치를 $p = 0.71L$ 로 하여 채널 중간(a)과 출구(b)에서의 입자 분포를 나타낸 것이고, Fig. 5는 피치를 $p = 0.5L$ 로 한 경우이다. 피치가 작을수록 혼합효과가 미약한 것을 볼 수 있다.

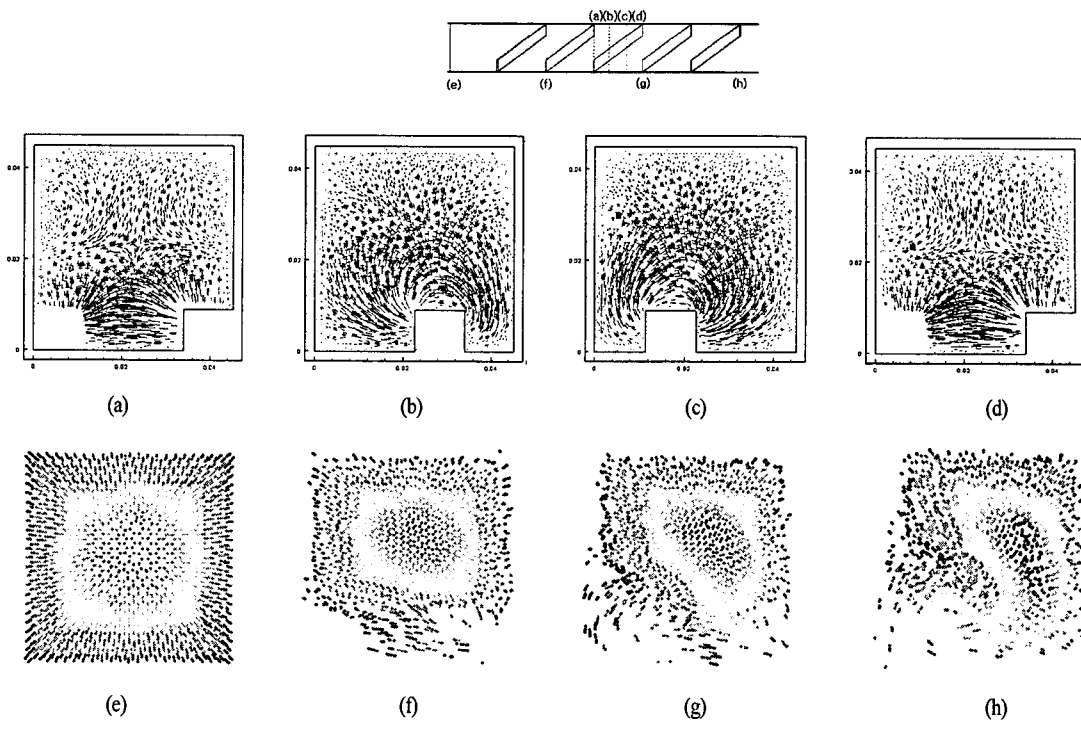


Fig. 2 Sectional view of velocity vectors in the channel, (a), (b), (c), (d) & dispersion of particles, (e), (f), (g), (h) ; $h = 0.2H$, $\alpha = 45^\circ$, $p = L$

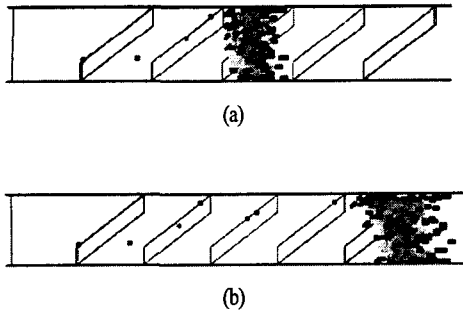


Fig. 3 Dispersion of particles for $h = 0.2H$, $\alpha = 45^\circ$, $p = L$

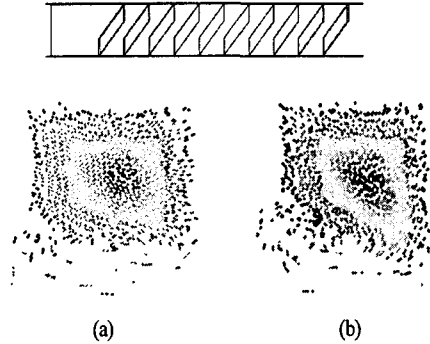


Fig. 6 Dispersion of particles for $h = 0.2H$, $\alpha = 30^\circ$, $p = 0.5L$

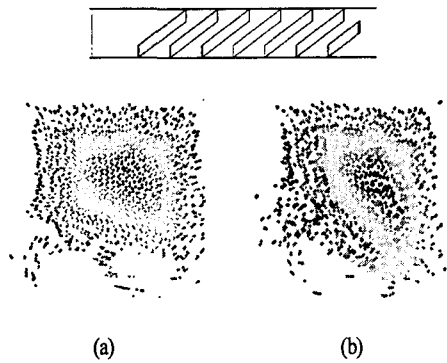


Fig. 4 Dispersion of particles for $h = 0.2H$, $\alpha = 45^\circ$, $p = 0.71L$

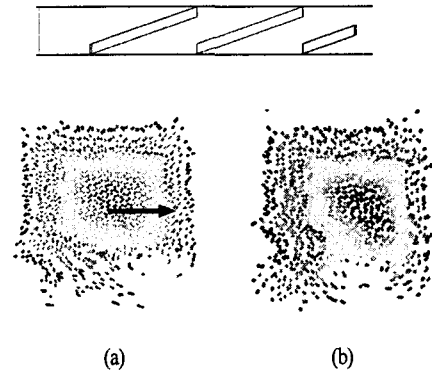


Fig. 7 Dispersion of particles for $h = 0.2H$, $\alpha = 60^\circ$, $p = 2L$

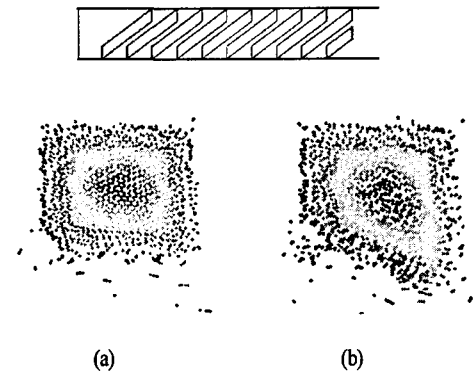


Fig. 5 Dispersion of particles for $h = 0.2H$, $\alpha = 45^\circ$, $p = 0.5L$

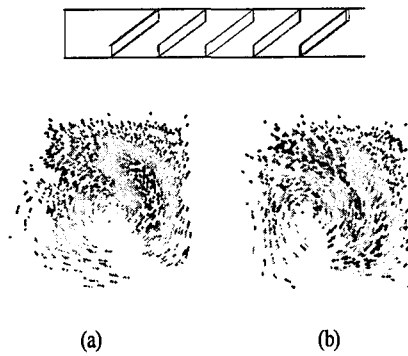


Fig. 8 Dispersion of particles for $h = 0.4H$, $\alpha = 45^\circ$, $p = L$

Fig. 6은 블록이 30° 경사진 형태에서 채널 중간과 출구에서의 입자 분포를 나타낸 것이고, Fig. 7은 60° 경사진 경우이다. 기본구조와 비교하여 경사각이 작은 경우는 좌측 하단에 있던 입

자들과 중앙부분의 입자가 조금 이동하고 있을 뿐 전체적으로 큰 변화를 나타내지는 못하고 있다. 그리고 경사각이 큰 경우도 같은 결과이며 오히려 경사각이 작은 경우와 비교하여 입자의 거동이 더 미약한 결과를 볼 수 있다.



Fig. 9 Dispersion of particles for $h = 0.8H$, $\alpha = 45^\circ$, $p = L$

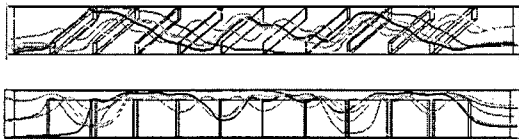


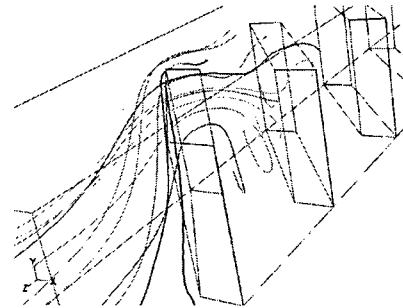
Fig. 10 Pathlines for $h = 0.8H$, $\alpha = 45^\circ$, $p = L$

Fig. 8(a), (b)는 블록의 높이를 두 배로 증가시켜 $h = 0.4H$ 한 경우 채널 중간과 출구에서의 입자분포를 나타낸 것이다. 채널 중간 부분에서부터 유체용치는 상당히 변형된 상태이다. 중앙부분의 유체는 우측으로 밀려나 길게 늘어진 모양을 보이고, 출구부분에서의 입자분포를 보면 원래 중앙에 있다가 우측으로 밀려난 입자들이 좌측하단에 길게 늘어나 있음을 볼 수 있다. 이 결과는 다른 결과들과 비교하여 상당히 혼합효과가 좋은 것으로 보인다.

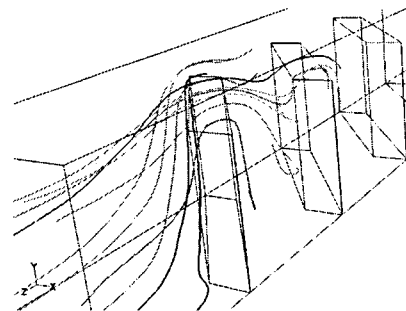
Fig. 9는 블록의 높이가 $0.8H$ 인 경우의 채널출구에서의 입자분포이다. Fig. 8(b)에서는 채널중심부에 있던 입자들이 5주기가 끝난 후 한바퀴 정도 회전한 것으로 관찰되었지만 Fig. 9에서는 같은 기간동안 3, 4회 회전한 것으로 관찰되었다. 이것으로 블록의 높이가 혼합효과에 가장 큰 영향을 미침을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 블록의 높이가 $0.8H$ 인 경우 채널의 윗쪽과 옆쪽에서 바라본 입자궤적이다. 입구에서의 입자분포는 임의적으로 설정하였다. 입자는 첫 번째 블록을 넘어 골을 따라 입자가 흘러가다 5, 6번째 블록까지는 채널상부를 따라 흘러가지만 7번째 블록에서 다시 골을 따라 내려가는 것을 확인할 수 있다. 더욱 중요한 사실은 유체입자의 거동이 상당히 불규칙적이며 예측불허의 이동을 한다는 사실이다.

Fig. 11은 $Re = 10$, 0.05 일 때 입자의 거동을 비교한 것이다. 일반적으로 높은 레이놀즈수에서



(a)



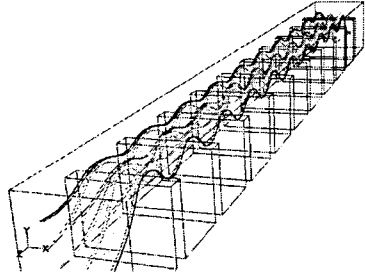
(b)

Fig. 11 Pathlines around blocks for (a) $h = 0.8H$, $\alpha = 45^\circ$, $p = L$, $Re = 10$, and (b) $h = 0.8H$, $\alpha = 45^\circ$, $p = L$, $Re = 0.05$

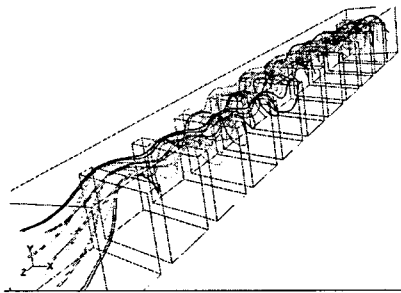
는 채널폭에 비해 상대적으로 좁은 블록상단의 유로를 이동하는 유체는 블록 바로 뒷면에서 유동박리가 일어나는 것으로 알려져 있으나 그림에서는 이러한 현상이 일어나지 않고 있다. 이렇게 레이놀즈수의 큰 차이에도 불구하고 박리현상이 나타나지 않은 것을 보아 $Re = 10$ 은 충분히 낮은 레이놀즈수라 할 수 있다.

Fig. 12는 $Re = 10$, $h = 0.8H$ 에서 다양한 파라미터에 대한 유체입자의 궤적을 보인 것이다. Fig. 12(a)의 경우는 채널 유동방향에 직각으로 블록을 배열한 경우로서, 유체는 채널 상부만을 따라 흐르며 약간의 물결모양의 궤적을 보이지만 블록사이에서의 유체혼합은 거의 이루어지지 않는 것을 예측할 수 있다. Fig. 12(b), (c)는 블록의 각도를 증가시킨 경우로서, 각도가 증가할수록 입자의 궤적은 복잡해지며 또한 골 아래로 내려가는 모양을 확인할 수 있다. Fig. 12(d)에서는 입자의 궤적이 다시 단순해지려는 경향을 보인다.

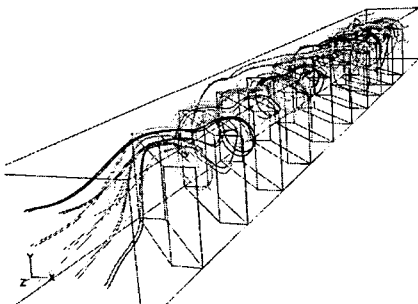
지금까지 마이크로채널내의 다양한 파라미터에 대한 유동특성을 살펴보았으며, 그로부터 혼합특성에 정성적으로 분석해 보았다. 그러나 실제 채



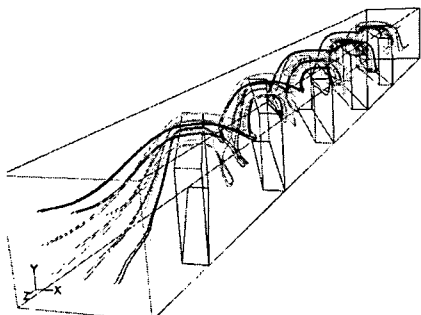
(a) $h = 0.8H, \alpha = 0^\circ, p = L, Re = 10$



(b) $h = 0.8H, \alpha = 22.5^\circ, p = L, Re = 10$



(c) $h = 0.8H, \alpha = 45^\circ, p = L, Re = 10$



(d) $h = 0.8H, \alpha = 60^\circ, p = 2L, Re = 10$

Fig. 12 Pathlines around blocks for various parameter sets

널의 설계를 위해서는 정량적 분석이 필요하며, 본 연구에서는 이를 위해 리야푸노프 지수 (Lyapunov Exponent)를 사용하였다.

리야푸노프 지수를 구한 방법을 설명하면 다음과 같다.⁽⁸⁾ 초기위치 (x_i, y_i) 에서 출발한 A_i 입자와 이로부터 x -방향으로 $d_0 = 0.03H$ 만큼 떨어진 위치에서 출발한 B_i 입자가 시간 $t_i(0.2s)$ 후에 서로 떨어진 거리를 d_i 라고 할 때 국소 리야푸노프 지수는

$$\lambda_i = \frac{1}{t_i} \ln \frac{d_i}{d_0} \quad (2)$$

으로 계산된다. 여기서 A_i 의 초기위치는 입구 단면을 바둑판 모양으로 16등분했을 때의 9개의 교점으로 하였다. 평균 리야푸노프 지수 λ 는 각 입자의 λ_i 를 평균한 것이다.

$$\lambda = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \lambda_i \quad (3)$$

Fig. 13은 블록 경사각이 45° 일 때 블록의 높

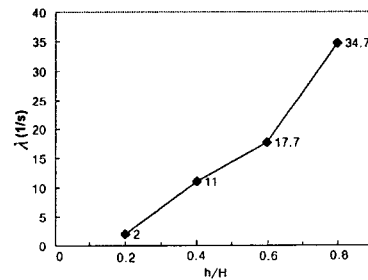


Fig. 13 Lyapunov exponent λ for various heights at $\alpha = 45^\circ$

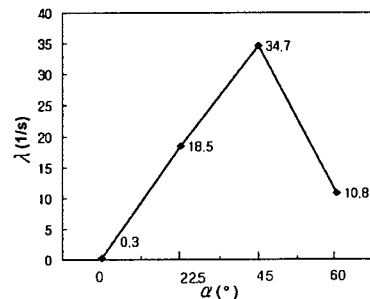


Fig. 14 Lyapunov exponent λ for various block angles at $h = 0.8H$

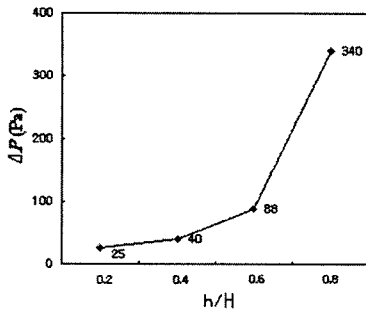


Fig. 15 Pressure drop ΔP for various heights at $\alpha = 45^\circ$

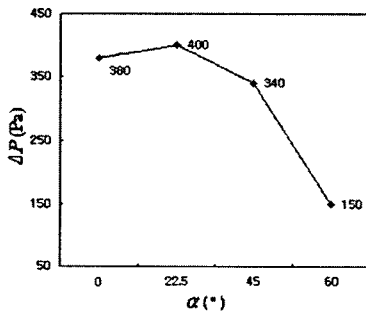


Fig. 16 Pressure drop ΔP for various block angles at $h = 0.8H$

이를 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H로 한 경우에 대한 리야푸노프 지수를 구한 결과이다. 이 그림에 따르면 h가 높아질수록 리야푸노프 지수가 커짐을 알 수 있다. 즉, $h = 0.8H$ 일 때 혼합이 가장 잘 이루어진다.

Fig. 14는 블록의 높이를 0.8H로 일정하게 두고 블록 경사각을 변경한 경우 리야푸노프 지수를 구한 결과이다. 이 그림에 따르면 경사각이 45° 일 때 리야푸노프 지수가 최대가 됨을 알 수 있다. 즉, $\alpha = 45^\circ$ 일 때 혼합이 가장 잘 이루어진다고 볼 수 있다.

Fig. 15는 블록 경사각이 45° 일 때 블록의 높이를 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H로 한 경우에 대한 압력강하를 구한 결과이다. 이 그림에 따르면 h가 높아질수록 압력강하가 증가함을 알 수 있다. 특히, $h = 0.8H$ 일 때 압력강하가 급격히 증가한다. 이 결과를 바탕으로 블록의 높이를 더 높일 경우 유체의 주입압력이 상당히 커질 것으로 예상된다.

Fig. 16는 블록의 높이를 0.8H로 일정하게 두고 블록 경사각을 변경한 경우 압력강하를 구한 결과이다. 이 그림에 따르면 경사각이 22.5° 일 때 압력강하가 최대임을 알 수 있고 이 각도를 기준으로 하여 블록의 각도를 증가시켰을 때 압력강하가 감소되고 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 압력강하가 최대가 되지 않은 조건에서 교반효과가 최대가 되는 것은 교반문제의 공통된 현상으로서 최적 설계와 관련하여 교반에 대한 연구는 그 가치가 충분히 있음을 암시한다.

4. 결론

본 연구에서는 수치해석을 이용하여 저 레이놀즈수 유동에 대한 마이크로채널내의 혼합효과에 대하여 분석하였다. 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 마이크로채널 내의 유동양상에 있어 상대적으로 차이가 있을 것이라 추측되는 두가지 레이놀즈수 $Re = 10, 0.05$ 에 대한 유동을 확인한 결과, 레이놀즈수가 유동양상에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 파악되었다.

(2) 블록간의 피치를 $p = 0.5L, 0.71L, 1L, 2L$ 로 바꾸어 낮은 블록 높이에서 혼합효과를 비교하였으나 큰 변화는 없었다.

(3) 블록의 높이를 $h = 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H$ 로 바꾸어 혼합효과를 비교한 결과, 블록이 높을수록 혼합이 잘 이루어지는 것을 확인하였다.

(4) 블록 경사각을 $\alpha = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 으로 바꾸어 혼합효과를 분석한 결과, 45° 일 경우 가장 혼합이 잘 이루어지는 것으로 확인되었다.

(5) 블록 높이 0.8H까지는 블록이 높을수록 혼합효과와 압력강하가 동시에 증가한다.

참고문헌

- (1) Gad-el-Hak, M., 2002, "The MEMS Handbook," CRC Press, New York.
- (2) Weilin, Q., Mala, G.M. and Li, D., 2000, "Pressure-Driven Water Flows in Trapezoidal Silicon Microchannels," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 353~364.
- (3) Mala, G.M. and Li, D., 1999, "Flow Characteristics of Water in Microtubes," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 142~148.

- (4) Meinhart, C. D., Wereley, S. T., Santiago, J.G., 1999, "PIV Measurements of a Microchannel Flow," *Exp. Fluids*, Vol. 27, pp. 417~419
- (5) Chate, H., Villermaux, E., Chomaz, J.M., 1999, "Mixing Chaos and Turbulence," Kluwer Academic Pub.
- (6) 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.
- (7) Aref, H., 2002, "The Development of Chaotic Advection," *Phys. Fluids*, Vol. 14, pp. 1315~1325.
- (8) Suh, Y.K. and Kim, Y.K., 1998, "Enhancement of Heat Transfer by Chaotic Advection in a Single Screw Extruder with a Staggered Flight Geometry," *Proc. Int. Conf. 11th IHTC*, Vol. 5, pp. 399~404.
- (9) Ottino, J.M., 1989, "The Kinematics of Mixing : stretching, chaos, and transport," Cambridge University Press, pp. 111~129.