

미세 유로에서의 유체 혼합에 대한 수치해석

이 동 원* · 현 명 택** · 김 민 찬***

Numerical Study on the Fluid Mixing Processes in the Micro Channel

Dong-Won Lee · Myung-Taek Hyun · Min-Chan Kim

Abstract

Numerical investigations have been made to study the fluid mixing process in the micro channel. CFD-ACE program was used for the fluid flow in the micro channel. In a straight channel, it takes long time to mix up two fluids because the fluids mixing processes is mainly dependent on the diffusion, while two fluids mix well due to chaotic advection in a two dimensional serpentine micro channel. In the three dimensional analysis of serpentine micro channel, the apparently different effect in fluid mixing processes cannot be found comparing with two dimensional micro channel. Two dimensional serpentine micro channel is recommended as a passive mixer.

Key Words : Mixing Process, Serpentine Micro Channel, Numerical Analysis

1. 서 론

최근 미세 전자 소재 산업과 가공 기술의 발달로 미세계(micro system)에서의 유동 및 전달현상에 대한 관심이 증대되고 있다[1]. 미세유동에서는 Reynolds 수가 매우 작은 유동이기 때문에 두 유체

가 교란에 의해 혼합되는 현상이 나타나기 어렵고 두 유체간에 뚜렷한 유동 경계층이 나타난다. 또한 표면력(surface force)이 유동에 많은 영향을 미치게 되며 계의 길이 스케일이 작아짐에 따라 그 영향은 더욱 증가한다. 미세유동에서의 혼합은 표면력의 영향과 확산 길이 스케일에 비해 유동속도가 큼으로 인해 해석에 많은 어려움이 있다.

미세 스케일에서의 액체의 혼합은 micro total analysis system(micro TAS)와 항원-항체 결합과 DNA 조합(hybridization)과 같은 많은 생물학적 공정에서 중요하다[2,3]. 혼합을 증대시키기 위한 방안으로는 유체에 난류(turbulence)를 발생시키는 것이다. 하지만 미세 유로에서의 흐름과 같이 계의 길이 차원이 작고 액체의 속도가 느린 경우(낮은 Reynolds 수)에는 관벽과의 점성 효과 때문에 유동형태가 층류 특

* 제주대학교 대학원
Graduate school, Cheju Nat'l Univ.
** 제주대학교 기계·에너지·생산공학부, 첨단기술연구소
Faculty of Mechanical Energy & Production Eng., Cheju Nat'l Univ., Res. Inst. of Adv. Tech.
*** 제주대학교 청정화학공학과
Dept. of Chemical Eng. & Clean Tech., Cheju Nat'l Univ., Res. Inst. of Adv. Tech.

성을 가진다. 이러한 영역에서 확산(diffusion)에 의존한 유체의 혼합은 시간이 오래 걸려 아주 비효율적이다. 따라서 미세계에서의 층류 특성을 갖는 유체간 혼합을 증대시키기 위한 연구가 많이 이루어지고 있다[4].

미세유동의 층류 영역에서 혼합을 증대시키기 위한 혼합기는 계의 일부를 물리적으로 움직이거나 혹은 압력 구배의 변화를 주어 유동을 능동적으로 제어하는 능동 혼합기(active mixer)와 일정한 유속의 유동을 일으키기 위한 압력 구배 이외에는 다른 메커니즘을 사용하지 않는 수동 혼합기(passive mixer)가 있다. 이러한 혼합기들은 Tay [5]에 잘 소개되어 있다.

능동 혼합기는 효율을 높일 수 있지만 유체의 유동을 일으키는 것 외에도 부가적인 에너지를 다른 메커니즘을 통하여 흐름에 주입하여야 하기 때문에 유동계를 설계하고 가공하는데 많은 어려움이 있어서 실제 산업에 적용하기 어렵다. 이 때문에 보통 수동 혼합기를 많이 사용한다.

수동 혼합기에서 혼합 효율을 높이기 위해 많이 사용하는 방법은 유로를 복잡하게 설계하여 그 유로에서의 흐름이 혼란대류(chaotic advection)가 발생하도록 하는 방법이 많이 채용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 다양한 수동 혼합 방식의 유로에 대해 미소계에서의 두 유체간 혼합 과정을 수치적으로 해석하여 본 연구 영역에서 최적의 미세유로에 대한 제안을 하고자 한다.

II. 이론적 해석

2.1. 혼합 메커니즘

미세 스케일 액체 혼합 공정에서는 분자 확산이 중요한 인자이고, 분자 확산은 식(1)과 같이 Fick의 법칙에 의하여 기술된다.

$$J = -D \nabla C \quad (1)$$

여기서 J 는 물질 플럭스, D 는 확산 계수, C 는 농도이다.

확산이 지배적인 계에서 확산이 일어나는 시간 또는 길이에 관해 추산하기 위해서 다음과 같은 상관관계가 사용된다[8].

$$\frac{\lambda^2}{Dt} = \frac{\lambda^2 V}{DL} \sim 1 \quad (2)$$

여기서 λ 은 확산 거리, t 는 시간, V 는 유동 속도, L 은 확산이 충분히 일어나는 데 소요되는 거리이다. 이 기준으로부터 미세 유로의 폭, 흐름의 속도가 주어진 경우에, 충분한 혼합 효과를 얻기 위한 미세 유로의 길이를 예측할 수 있다.

만일 $D = 5 \times 10^{-6}$ [cm²/s], $\lambda = 200$ [μ m], $V = 3$ [mm]인 경우 충분한 혼합 효과를 얻기 위해서는 유로의 길이가 24cm, 접촉 시간은 80초 정도가 필요함을 식(2)에서 알 수 있다. 미세계에서 이 값들은 매우 큰 값이기 때문에 확산만에 의해 유체 혼합이 이루어지는 경우 효율적인 혼합이 이루어지기 위해서는 새로운 혼합 방식이 요구되며 이는 새로운 형태의 혼합기가 요구됨을 의미한다.

2.2. 지배 방정식 및 수치해석 방법

본 계는 미소계이므로 중력의 영향을 무시할 수 있으며 유동형태는 정상상태 층류 유동으로 가정할 수 있다. 따라서 미소유로에서의 혼합에 대한 지배방정식은 식(3)-(5)와 같이 물질 보존에 대한 연속 방정식, 유체 흐름에 대한 Navier-Stokes 식, 물질전달에 대한 대류-확산 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (3)$$

$$V \cdot \nabla V = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 V \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \nabla C = D \nabla^2 C \quad (5)$$

여기서 V , P , C , ρ , ν 와 D 는 각각 속도 벡터, 압력, 농도, 유체의 밀도, 동점성계수와 확산계수이다.

본 연구에서 미세 유로의 혼합은 물과 임의의 유체 A를 선정하여 두 유체간 유로를 따른 혼합 과정을 조사하였다. 이때 유로의 형태에 따른 확산 효과를

살펴보기 위해 직관, 2차원 뱀형 미세 유로(serpentine micro channel), 유로의 형상을 더욱 다양하게 하기 위해 이를 확장한 3차원 뱀형 미세 유로에 대해서도 조사하였다.

이 때 유체 A의 확산계수는 $D=5 \times 10^{-6}$ [cm²/s]이며 확산 계수를 제외한 유체 A의 물성치들은 모두 물과 같다고 가정하였다. 속도장과 농도장은 상용 전산유체 코드인 CFD-ACE를 사용하였다. 속도장 및 유동장 해석에는 상류도식(upwind scheme)을 적용하였고 반복법으로는 Gauss-Seidel 반복법을 사용하였다. 또한 안정된 수렴을 위해 하양이완계수(under relaxation factor)를 사용하였는데 속도장에서는 0.1-0.5, 농도장에서는 0.01-0.07의 범위내에서 사용하여 해석하였다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 1은 직관 형태의 미세 유로의 구조와 격자망을 나타낸 것이다. Fig. 1에서 보듯이 물과 유체 A는 높이 0.05mm, 폭 0.2mm인 서로 다른 도입부를 통하여 미세 유로로 유입되어 높이 0.2mm, 폭 0.2mm인 덕트형 미세유로를 지나면서 혼합이 이루어진다. 이를 계산하기 위한 격자 구조는 Fig. 1(b)에 주어져 있다. 수렴을 위해 다양한 격자망을 형성시켜 주었는데 경계층에서의 격자를 조밀하게 형성시켜 주었다.

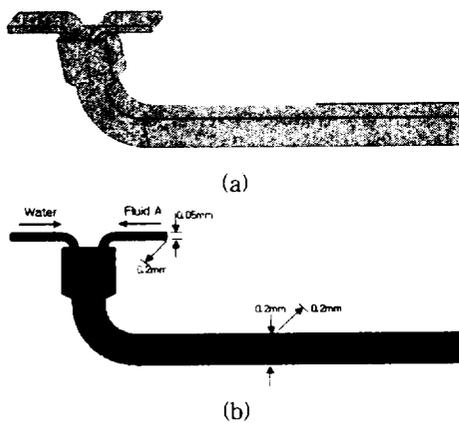


Fig. 1. Schematic diagram and mesh structure for the straight channel.

속도 변화에 따른 미세 직관에서의 계산 결과를 Fig. 2에 제시하였다. Fig. 2에서 보듯이 직관에서의 흐름은 경로가 길어질수록 확산경계면이 포물선형 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 유동 속도가 빠를수록 물과 유체 A의 경계면의 구분이 확실하여 두 유체간 혼합의 정도가 느림을 알 수 있다. 이는 직관에서는 확산에 의해서만 혼합이 진행되고 있음을 의미한다. 즉, 미세 유로내 체류시간이 증가할수록(속도가 감소할수록) 확산에 의한 혼합 효과는 증대되고 있음을 알 수 있다. 따라서 미세 유로 내에서 확산만에 의한 물질의 효과적인 혼합을 일으키기 위해서는 유로내 유속을 아주 작게 하여 확산에 필요한 충분한 시간이 확보되어야 하고 유로의 길이의 충분히 길게 하여야 할 것이다.

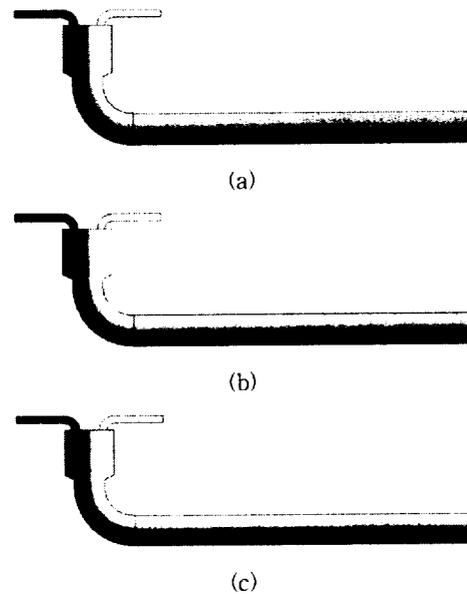


Fig. 2. Calculation results for the straight channel. Inlet velocities of both fluids are (a) $v=1$ mm/s, (b) $v=5$ mm/s and (c) $v=10$ mm/s.

이러한 혼합 시간이 증가하는 분석계(micro TAS 등)의 분석에 필요한 시간의 필요 이상 증가하는 것을 의미하는 것이다. 따라서 이의 개선을 위한 효과적인 혼합 방법에 대한 방안이 요구된다.

가장 쉽게 생각할 수 있는 방안은 유로를 복잡하게 설계하는 것이다. 비교적 쉽게 가공할 수 있는 2차원

구조의 여러 형태의 유로 중에서 혼합 효과 면에서 효율적인 요철구조에 대해 연구하였다(Fig. 3). 물과 유체 A의 도입부는 직관의 경우와 마찬가지로 높이 0.05mm, 폭 0.2mm이다. 요철 부위는 길이 0.1mm, 높이 0.1mm, 폭이 0.2mm 형태의 벽돌구조가 연차적으로 연결된 형태로 하였다.(Fig. 3(a)) 이를 해석하기 위한 격자 구조는 Fig. 3(b)에 제시하였다.

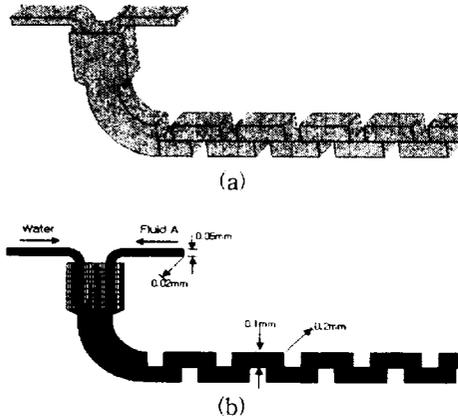


Fig. 3. Schematic diagram and mesh structure for the 2-dimensional curved channel

이와 같은 2차원 뱀형 미세 유로로 도입되는 두 유동에서 속도에 따른 혼합 효과를 Fig. 4에 제시하였다. Fig. 4에서 보듯이 같은 속도에서 비교하였을 때 2차원 뱀형 미세 유로의 경우 Fig. 2의 직관에서의 혼합 보다 훨씬 더 효율적으로 두 유체간 혼합이 이루어짐을 알 수 있다. 2차원 뱀형 미세 유로의 경우 유동의 방향에 격벽이 존재하여 혼합이 진행되어야 할 방향으로의 유동이 유발되고 있을 것이라는 추론이 가능하다. 따라서 확산방향으로의 유동의 존재가 혼합에 상당한 영향을 미친다는 것을 보여준다.

이러한 구조의 미세유로의 경우 Fig. 4(a)-4(c)에서 보듯이 유속에 관계없이 관 입구에서부터 빠른 혼합이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이는 확산에 의하여 혼합이 진행되었던 앞의 직관에서와는 달리 혼합이 확산에 무관하게 이루어지고 있음을 보여준다. 따라서 이러한 구조의 유로를 사용하여 유체를 흘려보내는 경우 혼합 효과를 증대시킬 수 있기 때문에 전체 계의 분석 시간을 단축시킬 수 있다.

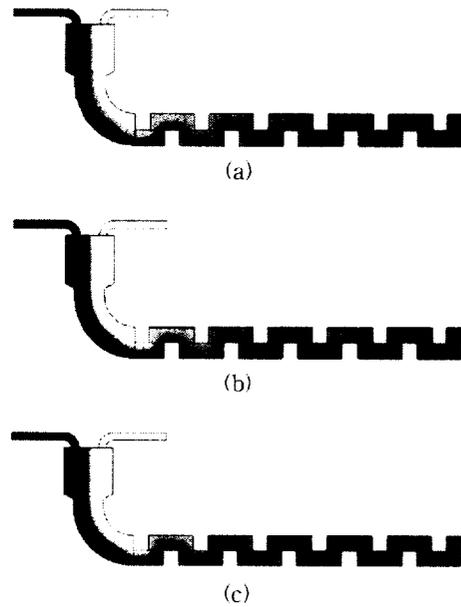
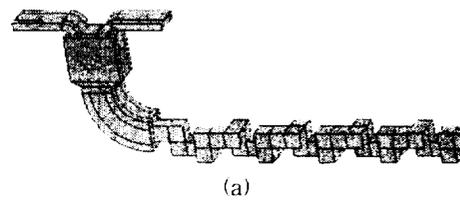


Fig. 4. Calculation results for the 2-dimensional curved channel. Inlet velocities of both fluids are (a) $v=1\text{mm/s}$, (b) $v=5\text{mm/s}$ and (c) $v=10\text{mm/s}$.

Liu 등[7]은 미세유로에서 복잡한 기하학적 형태로 인한 이차 유동(secondary flow)의 발생으로 혼란대류에 의한 두 유체간 혼합을 구명하기 위해 2차원 및 3차원 뱀형 미세 유로에서의 혼합을 실험적으로 고찰하였다. 이를 검증하기 위해 본 연구에서는 Fig. 5에 제시한 것과 같이 3차원 뱀형 미세 유로에서의 두 유체간 혼합과정을 해석하였다. 앞에서의 경우와 마찬가지로 물과 유체 A의 도입부는 직관의 경우와 마찬가지로 높이 0.05mm, 폭 0.2mm이다. 요철 부위는 길이 0.1mm, 높이 0.1mm, 폭이 0.1mm 형태의 벽돌구조가 Fig. 5(a)에서 알 수 있듯이 연차적으로 연결된 형태로 하였다. 이를 해석하기 위한 격자 구조는 Fig. 5(b)에 제시하였다.



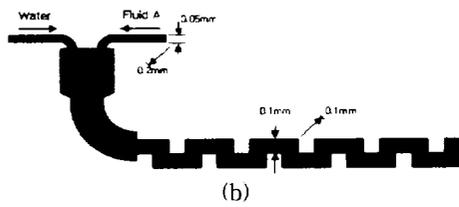


Fig. 5. Schematic diagram and mesh structure for the 3-dimensional serpentine channel.

3차원 유로에서의 혼합에 대한 해석 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 살펴보면 3차원 효과로 인해 유체 A의 쓸림 현상이 일어남을 관찰할 수 있으며 이는 유속이 증가할수록 더욱 심해짐을 추론할 수 있다.

2차원 뱀형 미세유로와 3차원 뱀형 미세유로를 비교하기 위해 $Re=10$ 일 때 각각의 혼합의 결과를 Fig. 7에 제시하였다. 그림에서 보듯이 혼합기의 구조가 2차원 혹은 3차원적인 배열에 관계없이 비슷한 시간(혹은 거리)에 혼합이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 즉, 두 유체가 연속적으로 계에 주입되고 있는 경우에는 유동 경로 효과(racetrack effect)[7]가 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 따라서 두 유체간 혼합효과를 높이기 위해 가공하기 어려운 3차원 뱀형 미세유로를 사용할 필요가 없다는 것을 의미한다.

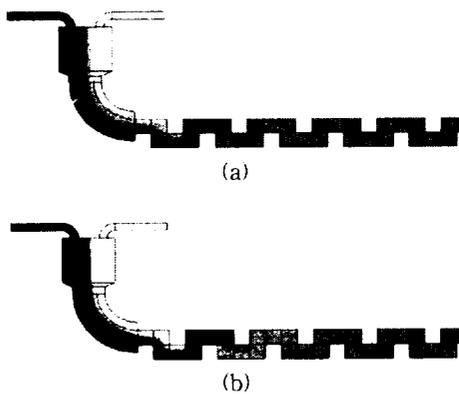


Fig. 6. Calculation results for the 3-dimensional serpentine channel. Inlet velocities for both fluids are (a) $v=0.5\text{mm/s}$ and (b) $v=5\text{mm/s}$

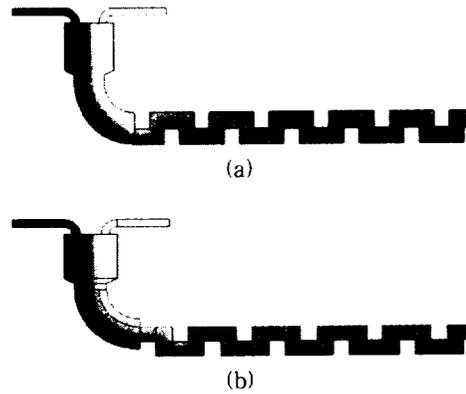


Fig. 7. Comparison of mixing effect in 2-dimensional and 3-dimensional serpentine channels. The Reynolds numbers for both cases are about 10.

IV. 결 론

본 연구에서는 다양한 미세 유로에서의 혼합을 수치해석을 통해 조사하였다. 직관에서의 혼합 메커니즘은 확산에 주로 의존하기 때문에 충분한 혼합을 얻기 위해서는 긴 체류시간이 필요하였다.

2차원과 3차원 뱀형 미세 유로의 해석 결과 두 유체의 혼합은 확산보다 유동 특성에 의존하고 있음을 알 수 있었다. 그러나 3차원 뱀형 미세유로의 경우 혼합의 정도는 2차원 뱀형 미세유로의 경우보다 큰 장점을 찾을 수 없어서 실제 사용에 있어서는 제작이 간편한 2차원 뱀형 미세유로 형태의 혼합기의 사용이 권장된다.

또한 미세유로에서의 혼합은 유동경로의 제어를 통해 보다 효과적인 혼합 효과를 얻을 수 있다.

참고문헌

- 1) M. Koch, A. Evans and B. Arthur, 2000, Microfluidic Technology and Applications, Research Studies Press, Philadelphia, PA.
- 2) R. Miyake, T.S. Lammerink, M. Elwenspoek and J. Fluitman, 1999, Proc. IEEE MEMS Workshop.

- pp. 141-146.
- 3) A.D. Deshmukh, D. Liepmann and A.P. Pisano, 2000, Proc. IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, pp. 73-76.
 - 4) J.-H. Tasi and L. Lin, 2002, Sensor and Actuator A, 97-98, pp. 665.
 - 5) Tay, F.E.H., Microfluids and BioMEMS Applications, 2002, Kluwer Academic Publishers, Boston.
 - 6) E.L. Cussler, 1984, Diffusion, Cambridge University Press, New York.
 - 7) Liu, R.H. et al., 2001, Proc. Micro-TAS.