관성 미세유체역학

DOI: 10.3938/PhiT.22.039

이 원 희

Inertial Microfluidics

Wonhee LEE

Inertial microfluidics may sound strange to many people because of the widespread misunderstanding that the influence of inertia can always be ignored in microfluidic systems. However, the Reynolds number in microfluidic systems can be as large as 100 when the flow speed is high enough (~ 1 m/s). In the regime that fluid inertia and viscosity are both important, microfluidic systems exhibit many interesting phenomena, including inertial focusing, ordering and Dean flow. In this article, the physical origins of these inertial effects in microfluidic systems are discussed. The unique operation of inertial microfluidic system may lead to many important applications with significant impacts in various fields including biology, chemistry and materials science.

서 론

미세유체역학(microfluidics)¹⁾은 마이크로, 나노 크기의 미세한 채널 내에서의 유체 및 부유 입자의 거동을 연구하거나 이를 이용한 응용연구 분야를 통칭하는 말이다. 미세유체역학 분야는 반도체 공정(CMOS process)과 같은 미세식각공정의 발달과 함께 다양한 미세구조 제작이 가능해지면서 많은 발전이 이루어졌다. 특히 replica molding, casting, injection molding과 같이 플라스틱을 이용하여 값싸고 손쉽게 미세 채널을

제작하는 기술이 개발됨에 따라 다양한 분야의 연구자들에게 쉽게 배워서 적용할 수 있는 기술로 널리 퍼지게 되었다.^[1] 이러한 높은 접근성과 함께 자동화의 이점, 작은 크기로 스케일링되었을 때 얻는 다양한 장점들을 통해 미세유체역학은 생물학 및 화학적인 분석으로부터 의공학 분야나 새로운 물질 합성 등의 다양한 응용분야에 적용되고 있다.

나노과학에서와 같이 크기가 축소되면서 나타나는 새로운 물리적 현상들은 매우 흥미로운 연구 주제일 뿐 아니라 응용분야에서도 중요한 이슈이다. 예를 들어 반도체 소자의 크기가 작아짐에 따라 고전적 전자기학뿐 아니라 소자 간에 전자의 터널링과 같은 양자역학을 고려해야 하는 것을 생각해 볼 수 있다. 유체역학의 영역에서 크기가 작아진다는 의미는 일반적으로 낮은 레이놀즈 수(Reynolds number, $Re = \rho UH/\mu$, 여기에서 U 는 유체의 속력, H 는 채널단면의 크기, ρ 와 μ 는 각각 액체의 밀도와 점성이다.)를 의미하게 된다. 낮은 레이놀즈 수라는 조건($Re \ll 1$)에서 유체의 운동은 나비에-스토크스 방정식(Navier-Stokes equation)의 관성을 나타내는 비선형항을 무시하고, 시간역전 대칭성(time reversal symmetry)을 가지는 선형의 스토크스 방정식으로 기술할 수 있게 된다. 따라서 미세채널 내에서의 유체 운동은 비교적 예측이 쉽게 되는 층흐름(laminar flow)을 보이고, 자칫 미세유체역학은 물리학적으로 재미없는 분야라는 인식을 가질 수 있다. 그러나 자세히 들여다보면 실제 미세유체역학계는 아주 흥미로운 물리적 현상들을 보여주며 유체역학뿐 아니라 전자기, 열역학, 통계 역학, 재료 분야의 다양한 지식들을 요구하는 융합적 학문분야임을 알 수 있다.^[2,3]

REFERENCES

- [1] J. M. K. Ng, I. Gitlin, A. D. Stroock and G. M. Whitesides, *Electrophoresis* **23**, 3461 (2002).
- [2] H. A. Stone, A. D. Stroock and A. Ajdari, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **36**, 381 (2004).
- [3] T. M. Squires and S. R. Quake, *Rev. Mod. Phys.* **77**, 977 (2005).

저자약력

이원희 교수는 미국 Caltech 응용물리학 박사(2008)로서, Caltech 물리학과와 UCLA 생명공학과에서 박사후 연구원을 거쳐 2011부터 현재까지 KAIST 나노과학기술대학원에서 교수로 재직 중이다.
(whlee153@kaist.ac.kr)

1) 미세유체역학은 microfluidics와 nanofluidics로 나누어서 나노 크기의 채널을 사용하는 경우를 구분하는 경우도 있으나 일반적으로 1 mm 이하 채널 폭을 가지는 미세채널의 경우를 통칭하여 microfluidics로 부른다.

Fig. 1. (A) Inertial migration in a pipe flow. Image modified from [4] (B) Microfluidic inertial migration leads to distinct focusing positions. (C) Inertial focusing positions are determined by balance of wall effect lift force and shear gradient lift force. (D) Cross-sectional shape of microfluidic channel influence the focusing positions and ordering of particles.^[8]

그러한 일례로 이 글에서 관성미세유체를 소개하고자 한다. 일반적으로 미세유체분야에서 낮은 레이놀즈 수라는 가정은 널리 받아들여지던 개념이지만 실제 많은 경우에서 레이놀즈 수는 1에 근접한 값을 가지며 관성을 무시한 예측이 실제 관측 결과와 다르게 된다. 비록 미세채널의 작은 크기의 영향이 있지만 유체의 속력을 0.01–1 m/s 수준으로 흘려주게 될 경우 레이놀즈 수가 1 이상 혹은 수백에 달하는 영역에 도달할 수 있다 ($Re \propto UH$). 이렇게 레이놀즈 수가 1–100의 영역에서는 미세채널에서도 점성의 영향에 비해 무시되었던 관성의 효과가 가시적으로 나타나게 된다는 사실이 비교적 최근에 알려지게 되었다.^[4] 이러한 레이놀즈 수 영역에서는 관성항을 포함한 비선형 운동방정식을 풀 때 나타나게 되는 복잡하고 직관적으로 쉽게 이해되지 않는 결과들이 발생하게 된다. 이러한 결과로 나타나는 관성효과(inertial effect)들은 미세유체역학 분야에 흥미로운 질문들을 던져 주었고, 현재 관성미세유체라는 분야로 정립되게 되어 많은 학자들의 관심을 모으고 있다. 이 글에서는 관성집중(inertial focusing), 관성정렬(inertial ordering), 딥 흐름(Dean flow)의 세 가지 관성효과에 대해 소개하고자 한다.

관성집중 현상

직사각형의 단면을 가지는 직선채널은 미세유체 채널 중 가장 단순한 모양이다. 이러한 채널 내에 미세 입자를 포함한 유체를 흘릴 때를 가정하자. 입자는 유체로부터 증밀력(shear stress)과 수직 변형력(normal stress)을 받으며 이는 항력(drag force, 유체의 흐름과 나란한 방향)과 양력(lift force, 유체의 흐름에 수직인 방향)의 형태로 나타나게 된다. 이러한 힘은 유체 내에서 힘의 평형이 이루어질 때까지 입자들을 유

체의 흐름에 거슬러 운동하게 한다.

유체 내 관성효과에 의한 양력의 중요한 예인 관성 이동(inertial migration) 현상은 1960년에 Segre와 Silberberg에 의해 처음 발견되었다^[5] (그림 1(A)). 그들은 이 실험에서 원형 도관 속을 흐르는 유체 내 부유 입자들이 유체의 흐름에 수직인 방향으로 이동하며, 관의 중심으로부터 반지름의 0.6배에 해당하는 위치에 모이는 현상을 관찰하였다. 이 현상은 비행기 날개나 커브볼 등에서 발생하는 양력과 같이 유체의 흐름방향이 물체에 의해 변화될 때 생기는 반작용으로는 설명이 되지 않는, 전혀 예상치 못한 새로운 종류의 양력으로 인한 것이었다. 이 연구결과가 발표된 뒤로 이러한 입자의 이동을 일으키는 양력을 규명하기 위하여 많은 후속 연구들이 이루어졌다. 이 양력은 “shear gradient 양력”과 “wall effect 양력”이라 불리는 두 가지 성분으로 나뉘며, 두 힘의 균형에 의해 입자들이 특정위치에 모이는 현상이 발생하는 것으로 밝혀졌다^[6,7] (그림 1(C)).

여러 연구들을 통한 다양한 논의가 이루어졌지만 안타깝게도 이 두 가지 힘의 근원에 대해 직관적으로 이해할 수 있도록 쉽게 설명하는 방법은 없는 듯하다. Wall effect 양력은 스트레스릿(stresslet)의 작용과 스트레스릿이 벽에 반사되어 bulk shear 와 주고받는 영향에 기인하고, shear gradient 양력은 스트레스릿과 bulk velocity profile의 상호작용으로 이해되어진다. (관심 있는 독자들은 참고문헌 7, 8을 읽어 보길 권한다.) 현상적으로 나타나는 성질을 살펴보면, shear gradient 양력은 증밀률 비율(shear rate)에 기울기가 있을 때 변화가 커지는 방향으로 작용하는 힘이다. 원형채널에서와 같이 포물선형의 유속 분포가 발생할 경우에는 채널중심에서 멀어지는 방향, 즉 채널 벽을 향하는 방향이 된다. Wall effect 양력은 항상 벽으로부터 멀어지는 방향으로 입자에 작용하게 된다.

비교적 큰 사이즈의 원형채널에서 원모양의 연속된 집중선(focusing line)이 형성되었던 것과는 달리 미세유체 내에서는 집중점(focusing position)이라 불리는 입자가 모이는 점이 형성되는 것이 확인되었다(그림 1(B), 1(D)).^[8] 이러한 사각형 단면의 미세채널 내에서 발생하는 관성집중 현상이 실험과 계산을 통해 자세하게 분석되었다.^[9] 전자계산을 통한 모사 결과는

REFERENCES

- [4] D. Di Carlo, Lab Chip **9**, 3038 (2009).
- [5] G. Segre and A. Silberberg, Nature **189**, 209 (1961).
- [6] B. P. Ho and L. G. Leal, J. Fluid Mech. **65**, 365 (1974).
- [7] E. S. Asmolov, J. Fluid Mech. **381**, 63 (1999).
- [8] W. Lee, H. Amini, H. A. Stone and D. Di Carlo, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **107**, 22413 (2010).
- [9] D. Di Carlo, J. F. Edd, K. J. Humphry, H. A. Stone and M. Toner, Phys. Rev. Lett. **102**, 094503 (2009).

Fig. 2. (A) Inertial lift force map in a quadrant of square channel (left). Magnitude of the lift force from center to wall (right).^[9] (B) Size dependence of the inertial focusing position.^[9] (C) Inertial lift force in a rectangular channel.^[10] (D) The magnitudes of the lift forces along the lines in C.

양력의 크기가 0이 되는 4군데의 평형점이 생기는 실험 결과를 정확히 예측하고 관성집중에 대한 이해를 도와주었다. 정사각형 채널 내에서는 각 면의 중간지점 근처에 입자들의 집중점들이 형성되고, 채널 중심으로부터의 거리는 벽까지 거리의 약 0.6배로 원형채널에 대응하는 결과를 얻었다(그림 2(A)). 미세채널 내 입자의 항력과 양력의 평형을 계산한 결과 양력의 크기를 구할 수 있었으며, 채널 중심 근처에서 $F_L \propto \rho U^2 a^3 / H$, 벽에 가까운 곳에서 $F_L \propto \rho U^2 a^6 / H^4$ 의 양력을 받는 것을 밝혔

다. 이러한 경향성은 벽 근처에서 wall effect 양력이 강하게 작용함을 의미하는 것이며 또한 입자의 크기에 따라 힘의 크기가 급격히 변화됨을 알려준다(그림 2(A) 오른쪽). 실제 입자의 크기가 커지면 wall effect 양력이 더 강하게 작용하여 작은 입자에 비해 벽으로부터 좀 더 먼 곳에 집중점이 형성된다(그림 2(B)). 이러한 현상을 활용하면 입자의 크기에 따라 입자들을 다른 유선(stream line)에 배치하는 것이 가능하고 유선을 확장시키면 다른 채널로 입자들을 유도 및 분리해 내는 것이 가능하다.

미세 채널 내의 관성집중의 흥미로운 점은 집중점이 채널의 단면모양이 달라짐에 따라, 그리고 Re 에 따라 변화한다는 것이다(그림 1(D), 2(A)). 직사각형 채널의 경우에는 정사각형 채널에서 4개였던 집중점이 길이가 더 긴 면에 가까운 2개의 점으로 줄어드는 것이 관측되었다. 이러한 현상은 짧은 면에 위치한 집중점이 불안정해지는 것으로 해석할 수 있다^[10](그림 2(C), 2(D)). 그리고 불안정한 2개의 관성집중점은 유속을 높여 Re 가 높아지면 다시 안정화되어 4개의 집중점으로 변하게 된다. 그림 2(C)에서 보이는 양력의 분포를 보면 입자의 위치에 있는 입자가 어느 집중점으로 이동할지를 예측할 수 있다. 한 방향이 긴 직사각형 채널에서 층밀림의 변화는 채널이 짧은 방향(z 방향)으로 더 크게 나타나며, 이에 따른 양력 역시 이 방향으로 더 강하게 작용하게 된다. 따라서 입자들은 shear gradient 양력에 의해 z 방향으로 먼저 이동하게 되며 서서히 wall effect 양력에 의해 서서히 y 축 방향으로 이동하여 그림에 표시된 집중점을 향하여 움직이게 된다. 따라서 짧은 면에 위치한 집중점(x 표시)에는 확률적으로 적은 수의 입자들이 모이게 되고, 작은 교란에도 입자들이 집중점을 벗어나 다른 안정한 집중점으로 이동하는 결과를 가져오게 된다.

관성정렬 현상

Matas와 그 동료 연구자들은 관성집중 현상을 연구하는 중에 입자들이 동일한 간격으로 줄을 지어 움직이는 것을 관찰하였다.^[11] 이러한 현상은 미세유체를 이용한 실험에서 더욱 깊이 있게 연구되었다.^[4,8] 관성미세유체에서 입자들의 밀도가 높아지면 그림 1(D)에서와 같이 마치 고체의 결정격자와 같은 형태로 입자들이 정렬되는 현상이 발생한다. 이 현상은 관성정

REFERENCES

- [10] D. R. Gossett, H. T. K. Tse, J. S. Dudani, K. Goda, T. A. Woods, S. W. Graves and D. Di Carlo, *Small* **8**, 2757 (2012).
- [11] J. P. Matas, V. Glezer, E. Gualzzelli and J. F. Morris, *Phys. Fluids* **16**, 4192 (2004).

Fig. 3. (A) Mechanism of inertial ordering.^[8] (B) Reversing stream lines due to a particle in a rectangular channel flow.^[8] (C) Stream lines around rotating particle in a Stokes flow (top) and an inertial flow (bottom).^[12] (D) Wave propagation in a droplet microfluidic crystal.^[14] (E) Microfluidic crystal with bubbles.^[15]

렬이라고 불리는 입자간, 입자-유체간 상호작용으로 발생하는 미세입자의 자가조립(self-assembly) 현상이다.^[8] 그림 1(D)에서 보이는 것 같이 입자들이 집중될 수 있는 자유도를 조정함에 따라 1차원적인 결정이나 준 3차원 결정구조를 형성할 수 있어 이러한 시스템은 미세유체결정(microfluidic crystal)이라 불린다.

관성정렬을 통해 자가조립 구조가 형성되는 원리는 입자가 유체의 관성효과에 의해 집중점으로 이동하는 것 외에, 입자가 존재함으로써 유체의 흐름이 변화되면서 형성되는 이차적 흐름이 다른 입자에 영향을 주기 때문이다(그림 3(A)).^[8] “Reversing stream”으로 불리는 유체의 역진현상은 입자 주변에서 다른 입자나 유체를 밀어내는 힘으로 나타날 수 있다.^[12,13] 이러한 reversing stream은 미세채널과 같이 공간이 제한되어 있을 때와 유체의 관성이 작용할 때 발생하는 것으로 알려져 있다(그림 3(B), 3(C)). 그림 3(C)의 위쪽은 일반적인 낮은 Re 흐름 조건에서 구형입자가 층밀림 흐름(shear flow)에 놓여있는 경우에 나타나는 유선을 보여주고 있다. 입자중심좌표계에서 유체의 흐름은 입자의 위쪽에서 오른쪽으로 아래쪽에서 왼쪽으로 연속적으로 흐르고 있다. 반면 유체의 관성이 작용하는 경우(그림 3(C) 아래)나 벽면의 영향 아래서는 회전하는 입자 왼쪽과 오른쪽에서 흐름의 방향이 뒤집히는(reversing) 영역이 발생한다. 이러한 흐름은 주변에 입자들이 존재할 경우, 입자가 접근하다가 다시 멀어지는 것처럼 보이게 만든다. 이러한 척력에 의해 밀려난 입자는 포물선형 배경 흐름(base flow)에 의해 서로 멀어지게 되고 관성집중과 reversing stream의 균형에 의해 특정 간격으로 정렬하는 것을 알 수 있었다(그림 3(A)).^[8]

관성미세유체 외의 시스템에서도 다양한 미세유체결정 구조가 관찰된다. 유체 내 입자계뿐 아니라 미세유체를 이용한 droplet 형성을 통해 액체-액체, 액체-기체와 같은 다양한 2상

계에서 규칙적인 간격을 가지는 미세유체결정을 만들 수 있다(그림 3(D), 3(E)).^[14,15] 미세유체결정에서는 자가조립을 통한 규칙적인 구조가 생기는 것 외에 결정구조 내에서 파동이 전달되는 흥미로운 현상도 발견되었다(그림 3(D)). 관성정렬을 통해 형성된 입자 계에서도 비슷한 파동전달이 보고되어^[8] 앞으로 더 많은 연구가 필요한 영역으로 여겨진다.

관성집중과 관성정렬의 응용

관성 이동현상을 이용하면 복잡한 공정을 통해 제작한 미세유체채널을 사용하거나, 특별한 외부의 장치 없이 단순히 빠른 흐름만으로 미세유체 내의 입자를 이동시키는 것과 같은 작업이 가능해진다. 미세유체 내에서 관성효과는 세포나 마이크로입자를 높은 처리량(throughput)으로 분리, 정렬하는 분야에 다양한 응용을 보여주었다. 그 대표적인 예로 유세포 분석(flow cytometer)을 위한 시료 준비를 들 수 있다. 상용 유세포 분석기에서는 sheath flow를 이용하여 유체역학적으로 세포들을 직경 약 10 μm 영역의 흐름 안에 집중시켜 준다. 이러한 방식으로 준비된 시료들로 광학적 분석 및 특정 세포의 분리 등의 작업을 할 수 있다. 관성 집중은 이러한 과정에서 요구되는 유체역학적 입자집중(hydrodynamic focusing) 기술로 유용하

REFERENCES

- [12] G. Subramanian and D. L. Koch, Phys. Rev. Lett. **96**, 134503 (2006).
- [13] M. Zurita-Gotor, J. Blawdziewicz and E. Wajnryb J. Fluid Mech. **592**, 447 (2007).
- [14] T. Beatus, T. Tlusty and R. Bar-Ziv, Nat. Phys. **2**, 74 (2006).
- [15] P. Garstecki and G. M. Whitesides, Phys. Rev. Lett. **97**, 024503 (2006).

Fig. 4. (A) High throughput particle focusing in parallel channels ($>1\text{M cells/s}$).^[16] (B) Nonstochastic particle encapsulation using inertial ordering.^[17] (C) Rapid solution exchange.^[10] (D) Bacteria filtration using inertial focusing.^[18]

게 쓰일 수 있다.

유세포 분석기로 분석하는 세포의 개수는 약 초당 10만 개 수준이다. Sheath flow를 이용한 입자집중은 약 $10 \mu\text{m}$ 의 입자가 포함된 $\sim 1 - 10 \text{ mL}$ 의 액체를 다룸으로써 거시와 미시를 적절한 기술로 연결해 주는 동시에 아주 높은 처리량을 얻을 수 있게 된 예이다. 실제 미세유체 기술은 세포나 나노입자 등 작은 크기의 샘플을 다루는 데 매우 유용하지만 이를 이용한 대량생산과 같은 실생활에 연결시키기에는 처리량의 한계가 있는 경우가 많다. 관성 미세유체는 아주 빠른 유속을 이용하여 이러한 한계를 극복하고 있다. 관성집중을 이용할 경우 sheath fluid나 외부 장 없이 세포들을 쉽게 집중시킬 수 있으며, 또한 간단히 채널을 병렬화 함으로써 더욱 높은 처리량을 가질 수 있다(그림 4(A)). 병렬화된 미세유체채널을 이용하여 초당 100만 개의 세포를 집중시키는 것이 가능함이 보였다.^[16]

관성집중과 함께 관성정렬 현상을 이용하면 입자를 하나씩 미세액체방울(micro droplet)에 캡슐화(encapsulation)할 수 있다.^[17] 미세유체를 이용하면 다양한 미세액체방울을 쉽고 균일하게 만들 수 있는데, 이렇게 제조되는 hydrogel에 세포를 삽입하여 다양한 연구에 이용할 수 있다. 특히 단일 세포를 삽입한 액체방울은 단일세포의 생물학적 분석에 유용하게 사용될 수 있다. 일반적으로 캡슐화되는 입자의 개수는 확률적으로 푸아송 분포(Poisson distribution)를 따르게 된다. 이러한 분포에 따르면 단일입자를 포함한 액체방울의 비율이 절반을 넘지 못하는 한계가 있다. 하지만 관성정렬을 이용하면 확률에 의존하는 대신 입자간의 간격을 정확히 조절하여 대부분 ($>90\%$)의 액체방울에 단일 입자를 포함하는 것이 가능하게 된다(그림 4(B)).

이외에 관성집중현상의 특성을 이용하여 입자를 조작하는 여러 가지 응용연구가 있었다. 입자의 집중점이 직사각형 채널에서 긴 면에 생기는 현상을 이용하면 세포와 같은 미세 입자를 다른 종류의 용액으로 아주 빠른 시간에 옮기는 것이 가능하

다^[10] (그림 4(C)). 입자들에 작용하는 양력의 크기가 입자의 크기에 좌우되는 것을 이용하여 박테리아를 적혈구로부터 분리해 내거나 (그림 4(D)),^[18] 관성집중점의 위치가 입자의 모양,^[19] 변형성(deformability)^[20]에 따라 다름을 이용하여 입자를 분리해 내는 방법들도 제시된 바 있다.

딘 흐름

관성미세유체에서 유체가 굽어진 채널을 따라 흐를 경우, 원심력에 의한 영향이 생기는 것을 예측할 수 있다. 일반적인 미세유체 채널에는 큰 점성 효과로 인해 두드러진 포물선형 유속 분포를 볼 수 있다. 이때 유체가 채널 중심에서 더 빠르게 흐름에 따라 채널 벽 근처보다 더 큰 원심력을 받는 것을 알 수 있다(그림 5(A)). 따라서 채널 중심부의 유체는 채널의 곡률 반경의 바깥쪽으로 밀려나려는 경향을 보이게 되며, 상대적으로 작은 원심력을 받는 벽에 가까운 쪽의 유체는 이러한 흐름에 밀려 곡률반경의 안쪽으로 흘러들어가는 경향을 보이게 된다. 따라서 유체는 전체적인 채널방향의 흐름에 수직방향으로 그림 5(A) 오른쪽에서 보이는 것과 같은 이차적 흐름을 형성하게 되는데, 이러한 흐름을 딥 흐름이라고 부른다.

REFERENCES

- [16] S. C. Hur, H. T. K. Tse and D. Di Carlo, *Lab Chip* **10**, 274 (2010).
- [17] J. F. Edd, D. Di Carlo, K. J. Humphry, S. Koester, D. Irimia, D. A. Weitz and M. Toner, *Lab Chip* **8**, 126 (2008).
- [18] A. J. Mach and D. Di Carlo, *Biotechnol. Bioeng.* **107**, 302 (2010).
- [19] M. Masaeli, E. Sollier, H. Amini, W. Mao, K. Camacho, N. Doshi, S. Mitragotri, A. Alexeev and D. Di Carlo, *Phys. Rev. X* **2**, 031017 (2012).
- [20] S. C. Hur, N. K. Henderson-MacLennan, E. R. B. McCabe and D. Di Carlo, *Lab Chip* **10**, 1039 (2010).

Fig. 5. (A) Dean flow arises in curved channel due to centrifugal force.^[4] (B) Particle ordering in serpentine channel leads to a single focusing position.^[21] (C) Dean drag changes focusing position.^[22] (D) Fluid mixing enhancement using Dean flow.^[24] (E) Dean flow changes water CaCl_2 interface, which works as a tunable optofluidic lens.^[25]

딘 흐름의 크기를 결정하는 무차원의 숫자로 딘 수($De = Re (H/2R)^{1/2}$)가 있다. 여기서 R 은 채널이 휘어지는 곡률반경이다. 딘 수는 2차적 흐름의 세기를 나타내는 것으로 전체적인 흐름의 세기(Re)와 채널의 모양($H/2R$)에 의해 결정되는 것으로 이해할 수 있다. 강한 딘 흐름은 높은 레이놀즈 수와 급격한 회전(작은 R)에 의해 얻을 수 있다.

딘 흐름을 유체가 아닌 입자를 조작하는데 이용하는 연구가 최근에 많이 이루어졌다. 관성집중이 이루어지는 채널에 굽어지는 디자인을 이용한 딘 흐름에 의한 항력을 더하여 입자의 집중점 위치와 개수를 조절할 수 있음이 이러한 연구들을 통하여 보여졌다(그림 5(B), 5(C)).^[21-23] 굽어진 채널에서는 2차적 흐름으로 인해 안정적이었던 관성 집중점으로부터 입자의 이동이 발생한다. 이에 따라 나선형 채널이나 그림 5(B)와 같은 굽어진 채널에서 입자를 하나의 집중점에 모으는 것이 가능함이 보여졌다.

딘 흐름의 응용

딘 흐름은 입자나 유체를 채널방향에 수직으로 이동시키는 목적으로 이용할 수 있다. 딘 흐름의 응용으로 미세 유체에서 가장 먼저 시도된 것은 두 가지 액체의 경계면을 조절함으로써 빠른 혼합을 유도하는 것이었다(그림 5(D)).^[24] 미세유체에서는 대류의 효과가 미미하여 유체의 혼합이 확산에 의존함은 잘 알려진 사실이다. 딘 흐름으로 인해 나란히 흘러가던 두 액

체가 서로 섞이는 효과를 줄 수 있으며, 경계면의 넓이가 커짐으로써 빠른 확산을 유도할 수 있게 된다. 그 외에 유체의 흐름을 조절하여 광학적으로 초점거리 조절이 가능한 유체 렌즈를 만들거나(그림 5(E))^[25] 3차원적으로 유체를 집중시키는 응용에 딘 흐름이 이용된 예^[26]가 있다.

결론

관성미세유체는 미세유체에서 기존에 무시되었던 관성효과를 재조명하면서 많은 관심을 모았다. 미세채널을 이용한 실험들은 과거에 거시적 환경에서 실험할 수 없었던 조건들을 만들어 줌으로써 관성집중이나 관성정렬과 같은 새로운 유체역학적 현상을 쉽게 관찰할 수 있게 해 주었다. 다양한 연구들을 통해 관성현상에 대한 이론들이 정립되었고 이를 바탕으로

로 여러 가지 응용분야에 적용이 이루어졌다. 이들 응용은 특히 유세포 분석과 같이 높은 처리량을 요구하는 분야에서 새로운 대안들을 제시한다. 이는 관성미세유체가 빠른 유체 흐름이라는 조건 안에서 빠른 시간 안에 입자들을 조작할 수 있기 때문에 가능한 것이다.

채널단면이 직사각형으로 제한된 채널을 벗어나 채널에 장애물 구조를 만들거나 삼각형 채널을 이용하는 등 미세채널의 단면을 다양하게 조절할 때 발생하는 관성현상들에 관한 연구들이 진행되고 있으며, 미세유체 결정 등과 같은 분야들도 아직 연구해야 할 부분이 많이 남아있다. 관성미세유체 분야는 앞으로 더 많은 연구들과 함께 새로운 분야로의 응용이 이루어질 것으로 예상된다.

REFERENCES

- [21] D. Di Carlo, D. Irimia, R. G. Tompkins and M. Toner, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **104**, 18892 (2007).
- [22] A. Russom, A. K. Gupta, S. Nagrath, D. Di Carlo, J. F. Edd and M. Toner, New J. Phys. **11**, 075025 (2009).
- [23] J. M. Martel and M. Toner, Phys. Fluids **24**, 032001 (2012).
- [24] A. P. Sudarsan and V. M. Ugaz, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **103**, 7228 (2006).
- [25] X. Mao, J. R. Waldeisen, B. K. Juluri and T. J. Huang, Lab Chip **7**, 1303 (2007).
- [26] X. Mao, J. R. Waldeisen and T. J. Huang, Lab Chip **7**, 1260 (2007).