미세유체기술을 이용한 입자계 현탁액에서의 부유입자의 거동 관찰

Microfluidic Observation of Colloidal Behavior in Particulate Suspension

황민선 · 정선엽 | Minsun Hwang · Seon Yeop Jung

Department of Chemical Engineering, Dankook University, 152 Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi 16890, Korea E-mail: seon27@dankook.ac.kr

1. 서론

미세유체기술(microfluidics)은 수십~수백 마이크로미터(µm) 단위의 채널에 수 마이크로리터(µL)~밀리리터 (mL)의 유체를 주입시켜 조작하는 시스템으로 화학공학, 전자공학, 생명공학, 의학 등의 많은 분야에서 활용되어 왔다. 미세유체기술은 채널의 구조나 유량 등의 변수를 조절하기 쉽고, 실험에 필요한 시료의 양이 적으며, 실험 시간이 짧아 분석에 용이하다. 또한, 일반적인 용액^{1.2}에서부터 콜로이드 입자를 포함한 현탁액³⁴까지 관찰하고자 하는 현상에 맞춰 시스템을 다양하게 구성할 수 있다는 장점도 있다. 미세유체기술을 활용하면 입자계 현탁액 (particulate suspension)에서 부유입자의 거동을 실시간으로 관찰할 수 있다. 입자계 현탁액은 불용성 고체 입자가 용매에 분산되어 있는 불균일 혼합물이다. 반도체, 이차전지, 연료전지 등의 제조공정에서는 소자에 기능성과 가공성을 부여하기 위해 유·무기 고형 입자와 첨가제, 증점제, 가소제 등을 혼합시킨 복잡유체 (complex fluid)를 다루게 되며, 이에 대한 이해를 바탕으로 공정을 설계하고 운전할 수 있어야 제조공정의 효율을 극대화하고 불량률을 최소화할 수 있다.

용액 기반 제조공정에서는 교반을 통해 입자계 현탁액을 준비한 뒤, 관을 통해 현탁액을 코팅, 프린팅 등의 단위공정으로 보낸다. 이 과정에서 현탁액 내의 고형 입자는 복잡한 유동환경 하에서 다양한 거동을 보이게 되는데, 이를 크게 고형 입자의 이송(transport)과 적층(deposition)으로 나눠볼 수 있다. 이송은 입자가 액체 매질에 분산된 상태에서 유동에 의해 움직이는 과정에서 일어나는 물리현상이며, 적층은 잘 분산되어 있었던 입자가 관 벽과 가까워짐에 따라 입자와 벽 사이의 상호작용으로 인해 분산상태를 유지하지 못하고 벽 위에 정지하거나 달라붙는 물리현상이다. 본 특집에서는 미세유체기술을 이용하여 입자계 현탁액이 관을 통해 흘러갈 때 나타나는 고형 입자의 이송과 적층 현상에 대한 기존의 연구들을 살펴보고자 한다. 먼저, 입자에 가해지는 수력학적인 힘에 따른 입자의 이동 및 집속 현상에 대한 연구를 소개한다. 다음으로 입자와 관 사이의 상호작용으로 인해 발생하는 적층 현상에 대한 연구를 살펴본다. 이후 결론을 통해 향후 연구 방향과 전망을 도출한다.

Author

황민선 2023 2023-현재

단국대학교 화학공학과 (학사) 단국대학교 화학공학과 (석사과정)



2012 서울 2014 서울 2019 서울 2020-2021 The Uni 2021-현재 단국

서울대학교 화학생물공학부 (학사) 서울대학교 화학생물공학부 (석사) 서울대학교 화학생물공학부 (박사) The Pennsylvania State University (Post-Doc.) 단국대학교 화학공학과 조교수

2. 본론

(a)

대부분의 마이크로 채널(microchannel)은 투명하고 유연한 고분자 소재인 polydimethylsiloxane(PDMS)을 사용하는 소프트리소그래피(soft lithography) 방식으로 제작된다. 제작과정을 간단히 설명하면 다음과 같다. 먼저, 포토리소그래피 (photo lithography) 등으로 채널의 형상을 새긴 마스터 몰드 (그림 1a)를 준비한다. PDMS와 경화제(curing agent)가 섞인 혼합용액을 붓고 약 80 °C에서 경화시킨다. 고화된 PDMS는 유연하여 몰드에서 쉽게 떼어낼 수 있고, 이를 유리 기재 위에 부착시켜 마이크로 채널을 제작한다(그림 1b).

마이크로 채널의 구조는 직선관 구조,^{3,5} 십(十)자 구조,^{6,7} Y자형 구조^{1,2} 등 다양하게 제작될 수 있다(그림 1c). 이러한 채널에 0.1~10 µm 정도의 고형 입자가 분산되어 있는 입자계 현탁액이 펌프를 통해 주입되면, 고형 입자는 채널을 따라 이동하면서 다양한 거동을 보이게 된다. 이번 특집에서는 입자계 현탁액의 다양한 거동을 크게 입자의 이송과 적층 현상으로 나누어서 살펴보고자 한다.

2.1 입자의 이송(Particle transport)

입자계 현탁액에 분산되어 있는 고형 입자는 입자의 함량이 매우 낮고(dilute) 유속이 매우 느린 스토크스 영역 (*Re* → 0, *Re* = ρ*UD*_h/µ, *Re*: 레이놀즈 수, ρ: 유체의 밀도, *U*: 유속, *D*_h: 채널 수력학적 지름, µ: 유체의 점도)에서는 유선(streamline)을 따라서 이송되는 것으로 알려져 있다. 그런데 마이크로 채널 내에서 유속이 높아져 유체의 관성효과 (inertial effect)가 커지게 되면, 입자가 유선을 벗어나는 이동 (migration)이 발생하고, 입자가 관 내의 특정한 위치에 모이는 집속(focusing) 현상이 발생하게 된다. 한편, 점탄성을 갖는 유체에서는 수직응력차(normal stress difference) 및 탄성(elasticity) 등에 의해 집속 위치가 달라진다는 것이



그림 1. 미세유체기술 소개; (a) 포토리소그래피를 통한 마스터 몰드 제조 방식, (b) 소프트리소그래피를 통한 PDMS 채널의 제조 방법, (c) 다양한 구조의 마이크로 채널 예.⁸



그림 2. 입자에 작용하는 여러 힘들에 대한 집속 방향.13

보고되었다.⁹⁻¹² 이때, 수직응력차는 서로 다른 두 방향의 수직응력의 차이로 정의되는데 제1수직응력차(*N*₁), 제2수직 응력차(*N*₂)가 있으며, 각각 $\tau_{11} - \tau_{22}, \tau_{22} - \tau_{33}$ 을 뜻한다. 이렇게 채널 내 관성효과와 유체의 점탄성 효과를 입자 집속에 영향을 주는 대표적인 요인으로 생각할 수 있으며, 각 효과가 만들어내는 집속 위치를 그림 2에 나타내었다.¹³

2.1.1 관성효과(Inertial effect)

대부분의 미세유체 연구는 크기가 매우 작은 마이크로 채널에서 비교적 낮은 유속에서 수행되기 때문에 관성효과는 거의 무시될 수 있다. 스토크스 영역에서 입자의 농도가 매우 낮을 경우에, 입자는 항력(F_D , drag force)에 의해 유선을 따라서 이동하는 것이 잘 알려져 있다.

$$F_D = 6\pi\mu Ua \tag{1}$$

여기에서 a는 입자의 반지름이다. 하지만, 관성력과 점성력의 비율을 나타내는 Re가 1보다 커지거나, 이차 흐름이 발생하는 유동환경에서는 관성효과에 의해 입자의 이동이 일어나게 된다.¹⁴ 이러한 현상은 1960년대에 Sigre와 Silberberg¹⁵에 의해 원통형 채널에서 입자가 관의 반지름의 약 0.6배가 되는 지점에서 집속되는 현상으로 보고된 바 있다. 이후 관성에 의해 입자가 이동하는 현상을 이해하려는 이론 및 실험적 연구가 진행되었고, 입자에 작용하는 여러가지 힘을 수식으로 표현할 수 있게 되었다. 직선 관(그림 3a)에서 구형 입자에 작용하는 양력(F_b, lift force)은 일반적으로 다음과 같이 주어진다.¹⁶

$$F_{L} = f_{L} \rho \, U^{2} a^{4} / D_{h}^{2} \tag{2}$$



그림 3. 다양한 구조의 관 내에서 작용하는 집속 현상에 대한 힘; (a) 직선관, (b) 곡선 관, (c) 확장-수축 관.¹⁴

여기에서 f_L 는 채널 단면에 대한 무차원 양력계수로 레이놀즈 수와 벽으로부터 입자의 상대적 위치의 함수(x/h)이다. 이 식을 통해, 입자의 크기가 커질수록 입자는 벽에서부터 멀어지는 방향으로 이동하는 것을 유추할 수 있다. 입자 집속 효과는 blockage ratio $(k = a/D_h)$ 에 따라 달라지는데,¹⁷ 효과적인 입자 집속을 위해서는 blockage ratio가 0.07 이상 이어야 함이 알려져 있다.

유체의 흐름방향이 급격히 변화할 때에도 입자는 본래의 흐름방향으로 나아가려는 관성의 영향을 받는데, 이러한 관성 효과는 이차흐름(secondary flow)이 존재하는 채널구조에서도 입자 이송에 큰 영향을 미친다. 이차흐름이 존재하는 채널 구조로는 곡선 관, 기둥(pillar) 등의 장애물^{18,19}이 있는 관, 확장/수축 구조의 관^{20,21} 등이 있다. 곡선 관에서는 딘 흐름 (dean flow)이라고 하는 순환 와류(recirculation vortex)가 존재한다(그림 3b). 딘 흐름의 크기는 무차원 수인 Dean number $(De = (D_b/2R)^{1/2}, R:$ 채널의 곡률 반지름)로 계산 된다. 확장-수축 관(그림 3c)에서 입자 집속은 양력, 와류 (vortex) 흐름, 딘 흐름, 그리고 다른 이차 흐름들이 입자 집속에 영향을 주기 때문에 집속 위치를 수식적으로 규명하기 어렵지만, 일반적으로 입자의 크기가 클 때 확장 구조에서의 이차 흐름이 더 크게 작용하는 것으로 알려져 있다. 수축관에서 일어나는 복잡 유동구조와 입자 거동에 대해서는 서울대학교 안경현 교수 연구그룹에서 많은 연구가 수행되어 왔다. 22-25

입자의 농도가 증가하는 경우에는 입체 혼잡 효과(steric crowding effect)가 작용하여 관성으로 인한 정렬에 장애를 빛을 수 있다. 이 현상은 채널 단위 길이 당 입자의 양 $(\lambda = aAV_f/V_p, A: 채널의 단면적, V_f: 용액 내 입자의 부피분율, V_p: 입자의 부피)에 따라, <math>\lambda > 1인$ 경우에는 입체 효과를 무시할 수 없으므로 관성력에 의한 입자 단일 흐름을 관찰하기 어려워진다.²⁶

2.1.2 점탄성 효과(Viscoelastic effect)

점탄성은 비뉴턴성 용액의 특성 중 하나로, 액체의 특성인 점성과 고체(탄성체)의 특성인 탄성을 함께 이르는 말이다.

표 1. 점탄성을 표현하는 무차원 수.¹³

	의미	수식
Wi	탄성과 점성의 비율	$Wi = N_1/ au = \lambda \dot{\gamma}$
El	탄성과 관성의 비율	El = Wi/Re
De	유체의 완화시간과 특성시간의 비율	$De = t_R/t_c$

점성이란 변형이 주어질 때 변형 속도에 비례하여 일어나는 저항을 의미한다. 반면, 탄성은 변형 총량에 비례하여 다시 본래의 모습으로 되돌아 가려는 성질이다. 점탄성 효과를 앞서 서술한 관성효과와 함께 이용하면 혈액 내 CTCs (circulating tumor cells),^{27,28} MCF-7 세포,^{29,30} 단백질^{31,32} 또는 DNA^{33,34} 등의 생체 입자들을 효과적으로 집속할 수 있어 생물학 분야에서의 연구가 꾸준히 진행되어 왔다.

유체의 점탄성은 점성, 탄성, 관성 사이의 상관관계를 표현하는 무차원 수인, Weissenberg number(Wi), Elastic number(EI), Deborah hnumber(De)에 의해 정의된다. Wi > 1 일때는 유체의 탄성이 점성보다 크게 작용하는 경우이고, EI > 1일때는 유체의 탄성이 관성보다 크게 작용한다. De는 유체의 완화시간 (t_{R})과 유동의 특성시간 (t_{c})의 비로 주어진다.

원형관에서 전단박화(shear thinning) 없이 탄성만을 갖는 Boger fluid를 사용하면, 유체에 분산된 입자는 Sigre-Silberberg 효과와 달리, 중앙으로 집속이 일어나게 된다(그림 4a).³⁵ 한편, 사각관에서 점탄성 유체를 흘리게 되면 입자는 전단율이 낮은 각 관의 구석(corner)과 중앙(center)에서 집속이 일어난다(그림 4b). 채널 중앙에서는 전단율이 낮게 유지되기 때문에 집속이 안정적이지만, 채널 구석의 경우 전단율이 작아도 벽 등으로 인한 외란으로 입자가 불안정하다. 구석 집속 구간 영역 너비는 유체의 점탄성 정도에 따라 변화하는데, 전단 박화 현상이 뚜렷하지 않을수록 너비가 감소하게 된다.³⁶ 유체의 점성력은 이러한 탄성력의 효과를 상쇄함으로써 입자가 채널의 중앙으로 이동하는 거동을 둔화시킨다(그림 4c). 하지만, 점성의 효과만을 고려할 수 있도록 실험을 수행하는 것은



그림 4. 점탄성 효과에 따른 집속 현상 연구.13

쉽지 않은데, 유속이 느린 경우에는 이미 Re가 작은 값을 갖기 때문에 유체의 점도 변화에 따른 효과가 뚜렷하지 않기 때문이다.³⁷ 이 외에도 점탄성 유체의 N₂가 커질수록 복잡 유동구조가 발생하여 입자를 다른 위치로 집속시키는 것이 보고되었다. De가 커질수록, 입자의 크기가 작아질수록, N₂에 의한 집속효과가 커지는 것이 관찰되었다(그림 4d).¹³

2.2 입자의 적층(Particle deposition)

입자가 채널의 벽과 가까워질 때, 입자와 벽은 상호작용을 하게 되고, 일부 입자는 벽 표면에 붙어 적층(deposition)된다. 입자가 적층되면 주변의 유동구조를 변화시킬 수 있고, 더 많은 입자가 적층되면 채널의 막힘(clogging) 현상이 발생할 수 있다. 적층은 채널 및 입자의 표면 거칠기, 표면성질 등에 따라 달라지며, 이에 관한 많은 연구가 이루어져왔다. 이 절에서는 적층에 대한 기본적인 매커니즘과 여러 구조에서의 적층 연구를 소개하고자 한다.

2.2.1 입자의 적층과정

적층 양상은 입자의 크기, 표면 전하, 표면 거칠기 등 다양한 변수에 따라 변화한다. 콜로이드 입자의 상호작용력은 일반적으로 DLVO 이론(Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek theory)으로 설명될 수 있다. DLVO 이론에서는 두 입자 사이에 작용하는 작용하는 힘을 반데르발스 인력과 정전기적 반발력의 합으로 설명한다(그림 5).

DLVO 곡선을 멀리 떨어져 있는 두 입자가 서로 가까워 지면서 겪게 되는 변화로 설명하면 다음과 같다. 두 입자 사이의 거리가 줄어들면 2차 극소점(secondary minimum)에 도달하게 된다. 이 거리에 해당하는 포텐셜은 수 k_BT 정도이므로 일정 크기 이상의 브라운 열운동(Brownian thermal motion)이나 전단응력(shear stress)이 가해지면 응집된 두 대상이 분리될 수 있다. 반면, 두 입자 사이의 거리가 1차



Distance

그림 5. DLVO 곡선.

극소점(primary minimum)에 도달하면, 두 입자 사이에 작용하는 인력이 매우 크기 때문에, 큰 전단응력이 가해져도 입자 구조체가 부서지기가 매우 어려워진다. 한편, 1차 극소점과 2차 극소점 사이에는 potential barrier가 있으며 이는 입자의 응접을 방해한다. 입자의 표면 전하로 인해 입자 사이에 척력이 작용하는 시스템에서는 염을 추가해주면 potential barrier가 낮아져 응접이 더 잘 일어나게 된다. 이처럼 입자-벽, 혹은 입자-입자 사이의 힘을 조절시키면 적층 발달 양상에 변화를 줄 수 있다(그림 6a).²⁵

적층이 일어나는 과정은 다음과 같이 설명된다. 먼저, 적층 초기에는 입자와 벽 간의 상호작용에 의해서 입자가 벽에 적층되기 시작한다. 이 과정은 DLVO 이론을 통해 계산되는 입자와 벽 사이의 상호작용력과 채널 내부에서 입자의 확산을 고려한 모델로 나타낼 수 있다. 구체적인 모델은 Emillie *et al.*³⁸의 연구에 기술되어 있다.

적층이 진행되어 관 내의 유동이 적층된 입자층에 의해 영향을 받게 되면 대류와 확산의 비를 나타내는 Féclet 수와 벽에서의 전단응력(wall shear stress)에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.^{39,40} 유체가 가하는 힘에 의해서 적층되었던 입자가 구르거나(rolling, 그림 6b) 응집체가 붙었다가 다시 떨어지는 (stick and detach) 현상이 관찰되기도 한다. 이러한 메커니즘에 의해 입자가 적층되더라도 채널이 완전히 막히지 않을 수 있다. 단순 수축 채널에서 전단응력이 일정 값 이상으로 높아지게 되면 채널이 막히지 않는다는 것이 보고되었다.⁴¹ 실제 점도와 유속을 변화시키며 적층을 방지하는 전단응력의 임계점을 찾으려는 연구가 진행되었으며, 전단응력 값에 따라 적층 발달 진행 여부가 다르다는 것이 관찰되었다(그림 6c).⁴

한편, 적층이 완전히 발달하게 되면 관이 막힐 수 있는데, 이때 관의 막힘 시간을 통해 막힘 현상을 기술할 수 있다. 평균 막힘 시간은 압력 강하와 현탁액 부피분율에 따라 반비례하는 것으로 알려져 있다.⁴²



그림 6. 적층 양상 관련 실험 소개: (a) 염의 농도를 변화에 따른 적층 양상 변화,²⁵ (b) rolling 현상 관찰,⁴¹ (c) 전단응력을 변화시켰을 때 막힘 현상 관찰.⁴

2.2.2 다양한 채널 구조에서의 적층연구

최근에는 미세유체기술을 활용해 직선관 뿐만 아니라 contraction



그림 7. 교차흐름 여과에서의 입자 적층 관찰 및 시뮬레이션 연구.44

channel, T-junction channel,⁴ serpentine channel⁴³ 등의 다양한 채널 구조에서 입자의 적층이 일어나는 양상에 대한 연구들이 활발하게 진행되고 있다.

가장 단순한 형태인 직선관에서는 입자 적층이 일어나기는 하지만, 미세유체실험을 통해 관찰하기에는 긴 시간이 필요하다. 그래서 적층 현상을 짧은 시간 내에 관찰할 수 있는 구조인 교차흐름 여과(crossflow filtration)에서 벽에 투수 플럭스 (permeate flux)를 부여하거나⁴⁴ 입자와 벽 사이에 인력을 작용하게 하여 입자가 벽에 부착되는 거동을 관찰하는 연구가 있었다. 미세유체실험에서 나타나는 거동을 CFD-DEM (computational fluid dynamics-discrete element method) 기법을 사용하여 재현하려는 시도도 있었다.^{5,45}

직선관 외의 구조, 특히 단순 수축 채널에서의 적층 양상은 다양한 관점에서 진행되었다. Dersoir는 단순 수축 채널 중 수축 길이에 따른 적층 양상과 수축 곡률에 따른 적층 양상을 분석하였다.⁴⁶ 필터 내부 단순 기공부분에서의 적층 양상은 Delouche에 의해 진행되었다.⁴⁷ 곡선 관이 연속적으로 되어 있는 serpentine channel 구조에서 생물 막의 screening에 대한 막힘 현상의 발달 과정도 관찰되었다.⁴³ 이 외에도 막 여과에서 이용되는 T-shpaed,⁴ dead-end flow,⁴⁸ cross flow,⁴² bottleneck⁴⁹ 구조에서 염의 여부, 입자의 성질 등에 따른 막힘 현상도 꾸준히 연구되고 있다.

3. 결론

본 특집에서는 미세유체기술을 이용해 입자계 현탁액의 고형 입자와 관 벽이 서로 상호작용함에 따라 나타나는 물리현상에 대해서 살펴보았다. 유속이 매우 느린 스토크스 영역에서 부유입자는 유선을 따라 이동하는 것으로 알려져 있다. 하지만, 유속 증가에 따른 관성 효과나 비뉴턴유체의 점탄성 효과가 주어지게 되면, 입자는 유선을 벗어나 이동하거나 특정 위치에 집속되는 것이 보고되었다. 탄성이 작용하는 유체에서는 입자가 중앙으로 이동하는 경향이 나타났으며, 유체의 점성과 №는 입자의 중앙 이동을 억제하는 효과를 갖는 것으로 보고되었다. 한편, 입자의 적층현상은 DLVO 이론으로 설명되는 입자와 벽 사이의 상호작용력과 유체가 관 벽에 가하는 전단응력 등에 의해 영향을 받는 것으로 관찰 되었다. 이러한 입자의 적층이 과도하게 일어나게 되면, 채널의 막힘 현상이 발생할 수 있다. 구체적인 적층양상은 채널의 기하구조에 따라 다양하게 나타나게 된다.

입자계 현탁액이 관을 따라 흐를 때 발생하는 이송 및 적층 현상은 미세유체실험 뿐만 아니라, 반도체, 이차전지, 연료전지 등의 제조공정에서도 흔히 발견된다. 용액 기반 제조공정에서는 다양한 재료들이 혼합되어 있는 복잡유체를 다루기 때문에 더 복잡한 현상이 발생할 수 있다. 따라서 미세유체기술은 기존의 막 여과 현상에 대한 이해를 넘어서 산업 전반에서 발생하는 막힘 현상에 대한 기본적인 이해를 제공하는 중요한 도구가 될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원 으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2022R 1C1C1006820).

참고문헌

- 1. D. Therriault, S. R. White, and J. A. Lewis, *Nat. Mater.*, **2**, 265 (2003).
- M. Wu, A. A. Yazdi, D. Attinger, and J. Xu, *Microfluid*. *Nanofluid*, **24**, 51 (2020).
- Y. K. Lee, C. Porter, S. L. Diamond, J. C. Crocker, and T. Sinno, *J. Colloid Interface Sci.*, 530, 383 (2018).
- 4. D. Y. Kim, S. Y. Jung, Y. J. Lee, H. Jin, and K. H. Ahn, Sep. Purif., 322, 124263 (2023).
- K. Shahzad, W. V. Aeken, M. Mottaghi, V. K. Kamyab, and S. Kuhn, *Microfluid. Nanofluid*, **22**, 104 (2018).
- Y. Kim, D. Y. Kim, J. S. Hong, and K. H. Ahn, *Langmuir*, 34, 11454 (2018).
- L. Martin-Alarcon and T. Schmidt, *Biorheology*, 53, 49 (2016).
- A. Sengupta, S. Herminghau, and C. Bahr, *Liq. Cryst. Rev.*, 2, 73 (2014).
- A. M. Leshansky, A. Bransky, N. Korin, and U. Dinnar, *Phys. Rev. Let.*, **98**, 234501 (2007).
- 10. M. Tehrani, J. Rheol., 40, 1057 (1996).
- M. M. Villone, G. D' avino, M. A. Hulsen, F. Greco, and P. L. Maffettone, *J. Non–Newton. Fluid Mech.*, **195**, 1 (2013).
- H. Lim, J. Nam, and S. Shin, *Microfluid Nanofluid*, **17**, 683 (2014).
- 13. J. Zhou and I. Papautsky, Microsyst. Nanoeng, 6, 113 (2020).
- 14. W. Tang, S. Zhu, D. Jiang, L. Zhu, J. Yang, and N. Xiang, Lab

Chip, 20, 3485 (2020).

- 15. G. Segré, and A. Silberberg, Nature, 189, 209 (1961).
- T. M. Geislinger and T. Franke, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 208, 161 (2014).
- D. R. Gossett, W. M. Weaver, A. J. Mach, S. C. Hur, H. T. K.Tse, W. Lee, H. Amini, and D. Di Carlo, *Anal. Bioanal. Chem.*, **397**, 3249 (2010).
- 18. Y. Yoon, S. Kim, J. Lee, J. Choi, R. K. Kim, S. J. Lee, O. Sul, and S. B. Lee, *Sci. Rep.*, 6, 26531 (2016).
- A. J. Chung, D. Pulido, J. C. Oka, H. Amini, M. Masaelia, and D. D. Carlo, *Lab Chip*, **13**, 2942 (2013).
- M. K. Raihan, P. P. Jagdale, S. Wu, X. Shao, J. B. Bostwick, X. Pan, and X. Xuan, *Micromachines*, **12**, 836 (2021).
- 21. S. Song and S. Choi, J. Chromatogr. A, 1302, 191 (2013).
- 22. D. Lee and K. H. Ahn, Korea Aust. Rheol. J., 27, 65 (2015).
- Y. Kim, K. H. Ahn, and S. J. Lee, J. Non–Newton, Fluid Mech., 234, 170 (2016).
- 24. S. Choi and K. H. Ahn, J. Non–Newton, Fluid Mech., 211, 62 (2014).
- D. Y. Kim, S. Y. Jung, Y. J. Lee, and K. H. Ahn, *Langmuir*, 38, 6013 (2022).
- 26. D. D. Carlo, Lab chip, 9, 3038 (2009).
- H. Lim, S. M. Back, M. H. Hwang, D. H. Lee, H. Choi, and J. Nam, *Micromachines*, **10**, 462 (2019).
- 28. M. G. Lee, J. H. Shin, C. Y. Bae, S. Choi, and J. Park, *Anal. Chem.*, **85**, 6213 (2013).
- S. C. Hur, A. J. Mach, and D. Di Carlo, *Biomicrofluidics*, 5, 022206 (2011).
- E. Sollier, D. E. Go, J. Che, D. R. Gossett, S. O'Byrne, W. M. Weaver, N. Kummer, M. Rettig, J. Goldman, N. Nickols, S. McCloskey, R. P. Kulkarni, and D. Di Carlo, *Lab Chip*, 14, 63 (2014).
- B. Kim, S. S. Lee, T. H. Yoo, and J. M. Kim, *Electrophoresis*, 42, 2238 (2021).

- 32. B. Kim, S. S. Lee, T. H. Yoo, S. Kim, S. Y. Kim, S. H. Choi, and J. M. Kim, *Sci. Adv.*, 5, eaav4819 (2019).
- 33. B. Kim and J. M. Kim, *Biomicrofluidics*, **10**, 024111 (2016).
- 34. J. Y. Kim, S. W. Ahn, S. S. Lee, and J. M. Kim, *Lab Chip*, **12**, 2807 (2012).
- 35. K. W. Seo, H. J. Byeon, H. K. Huh, and S. J. Lee, *RSCAdv.*, 4, 3512 (2014)
- 36. F. D. Giudice, S. Sathish, G. D' Avino, and A. Q. Shen, *Anal. Chem.*, **89**, 13146 (2017)
- P. Y. Huang and D. D. Joseph, J. Non–Newton, Fluid Mech., 90, 159 (2000).
- 38. E. Dressaire and A. Sauret, Soft Matter, 13, 37 (2017).
- C. P. Ortiz, R. Riehn, and K. E. Daniels, *Soft Matter*, 9, 543 (2013).
- M. R. de Saint Vincent, M. Abkarian, and H. Tabuteau, *Soft Matter*, 12, 1041 (2016).
- 41. Y. Kim, K. H. Ahn, and S. J. Lee, J. Membr. Sci., 534, 25 (2017).
- R. van Zwieten, T. van de Laar, J. Sprakel, and K. Schroen, Sci. Rep., 8, 5687 (2018).
- K. Drescher, Y. Shen, B. L. Bassler, and H. A. Stone, *PNAS*, 110, 4345 (2013).
- 44. S.Y. Jung, J. Jeong, J.D. Park, and K.H. Ahn., J. Membr. Sci., 635, 119497 (2021).
- M. Trofa, G. D' Avino, L. Sicignano, G. Tomaiuolo, F. Greco, P. L. Maffettone, and S.Guido, *Chem. Eng. J.*, **358**, 91 (2019).
- B. Dersoir, A. B. Schofield, M. R. de Saint Vincent, and H. Tabuteau, *Microfluid*. Nanofluid, 19, 953 (2015).
- N. Delouche, J. M. van Doorn, T. E. Kodger, A. B. Schofield, J. Sprakel, and H. Tabuteau, *J. Membr. Sci.*, 635, 119509 (2021).
- 48. H. M. Wyss, D. L. Blair, J. F. Morris, H. A. Stone, and D. A. Weitz, *Phys. Rev. E*, **74**, 061402 (2006).
- 49. Z. B. Sendekie and P. Bacchin, Langmuir, 32, 1478 (2016).