(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0082089
(43) 공개일자 2020년07월08일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 15/10 (2006.01) *B01L 3/00* (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 15/10 (2013.01)
B01L 3/502761 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-0172299
(22) 출원일자 2018년12월28일
심사청구일자 2018년12월28일

(71) 출원인
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
박범준
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732, 화학공학과(서천동,경희대학교국제캠퍼스)
최규환
경기도 수원시 영통구 청명로 18, 507호(영통동)
(74) 대리인
김연권

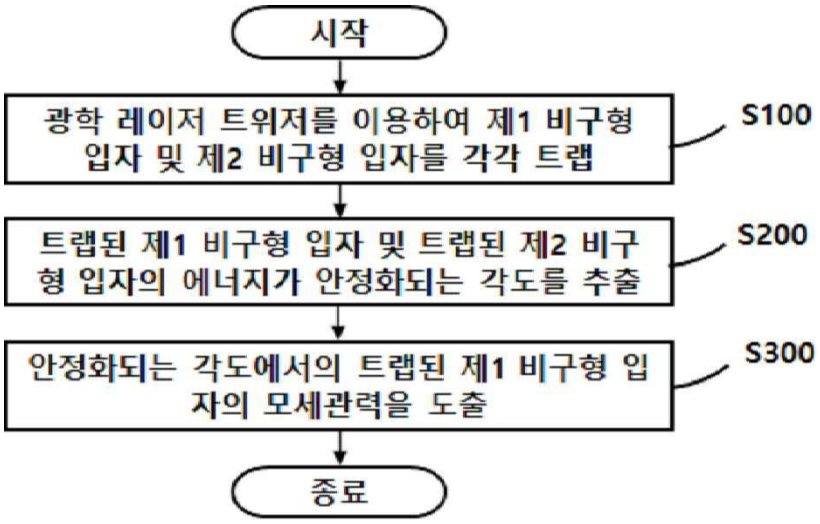
전체 청구항 수 : 총 13 항

(54) 발명의 명칭 **비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법**

(57) 요 약

본 발명은 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법을 개시한다. 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법은 광학 레이저 트위저를 이용하여 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자를 각각 트랩하는 단계; 상기 트랩된 제1 비구형 입자 및 상기 트랩된 제2 비구형 입자의 에너지가 안정화되는 각도를 추출하는 단계; 상기 안정화되는 각도에서의 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 모세관력을 도출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.

대 표 도 - 도2a



(52) CPC특허분류
G21K 1/00 (2013.01)
B01L 2200/0668 (2013.01)
B01L 2400/0454 (2013.01)
G01N 2015/105 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 20180305
부처명 한국연구재단
연구관리전문기관 한국연구재단(학술진흥)
연구사업명 이공분야기초연구사업/중견연구자지원사업
연구과제명 마이크로 에멀전 반응기의 미세 교반 시스템 개발: 자성 야누스 입자 및 광학 레이저 트위저 활용(2/3)
기 여 율 1/2
주관기관 경희대학교 산학협력단
연구기간 2017.03.01 ~ 2020.02.29
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 20180529
부처명 한국연구재단
연구관리전문기관 한국연구재단(학술진흥)
연구사업명 이공분야기초연구사업/선도연구센터지원사업/이공학분야(S/ERC)
연구과제명 [2018 ERC]결정 기능화 공정기술 센터(2단계 1차년도)
기 여 율 1/2
주관기관 경희대학교 산학협력단
연구기간 2014.05.01 ~ 2021.02.28

명 세 서

청구범위

청구항 1

광학 레이저 트위저(optical laser tweezer)를 이용하여 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자를 각각 트랩하는 단계;

상기 트랩된 제1 비구형 입자 및 상기 트랩된 제2 비구형 입자의 에너지가 안정화되는 각도를 추출하는 단계;

상기 안정화되는 각도에서의 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 모세관력을 도출하는 단계

를 포함하는 것을 특징으로 하는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 트랩된 제1 비구형 입자의 위치는 고정되나 각도는 변화되고,

상기 트랩된 제2 비구형 입자의 위치 및 각도는 모두 변화되는 것을 특징으로 하는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 트랩된 제1 비구형 입자의 위치 및 각도는 모두 고정되고,

상기 트랩된 제2 비구형 입자의 위치 및 각도는 모두 변화되는 것을 특징으로 하는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 트랩된 제1 비구형 입자 및 상기 트랩된 제2 비구형 입자의 에너지가 안정화되는 각도를 추출하는 단계는,

상기 트랩된 제1 비구형 입자 및 상기 트랩된 제2 비구형 입자 사이의 거리를 조절하여 상기 트랩된 제1 비구형 입자 및 상기 트랩된 제2 비구형 입자의 에너지가 안정되는 각도를 추출하는 것을 특징으로 하는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 안정화되는 각도에서의 상기 트랩된 제1 비구형 입자 및 상기 트랩된 제2 비구형 입자의 모세관력을 도출하는 단계는,

상기 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 도출하는 단계; 및

상기 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 이용하여 모세관력을 도출하는 단계;

를 포함하는 것을 특징으로 하는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 도출하는 단계는,

상기 트랩된 제1 비구형 입자의 스톡스 항력(F_{drag})을 도출하는 단계;

상기 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)를 도출하는 단계; 및

상기 트랩된 제1 비구형 입자의 스톡스 항력(F_{drag}) 및 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)의 기울기를 도출하는 단계;

를 포함하는 것을 특징으로 하는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 트랩된 제1 비구형 입자의 스톡스 항력(F_{drag})을 도출하는 단계는,

하기 [식 1]을 이용하여 계산되는 것

[식 1]

$$F_{drag} = -\eta \check{c} v = -3\pi d_{eff} \eta f_E v$$

(η는 유체의 점도이고, $\check{c}$ 는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 배향과 모양에 따른 상수이며, v는 유체의 속도 또는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 속도이고, d_{eff}는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 유효 반지름이며, f_E는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 모양 및 배향에 따른 스톡스 항력을 보정하기 위한 상수이다)

을 특징으로 하는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 [식 1]의 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 유효 반지름(d_{eff})은 하기 [식 2]를 통해 계산되는 것

[식 2]

$$d_{eff} = d_a E^{1/3}$$

(E는 d_c/d_a이고, d_a는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 단축 방향의 반지름이며, d_c는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 장축 방향의 반지름이다)

을 특징으로 하는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법.

청구항 9

제7항에 있어서,

상기 [식 1]의 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 배향과 모양에 따른 상수($\check{c}$)는 하기 [식 3]을 통해 계산되는 것

[식 3]

$$\check{c} = 3\pi d_{eff} f_E = \sqrt{C_a^2 \cos^2\theta + C_c^2 \sin^2\theta}$$

(d_{eff}는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 유효 반지름이고, f_E는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 모양 및 배향에 따른 스톡스 항력을 보정하기 위한 상수이며, C_a 및 C_c는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 모양에 따른 항력 계수이고, Θ는 상기 트랩된 제1 비구형 입자 또는 유체의 움직이는 방향과 상기 제1 비구형 입자의 배향이 이루는 각도이다)

을 특징으로 하는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 [식 3]에서, 상기 C_a와 $\check{c}$ 가 동일하면, Θ는 0° 인 것을 특징으로 하는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법.

청구항 11

제9항에 있어서,

상기 [식 3]에서, 상기 C_b와 $\check{c}$ 가 동일하면, Θ는 90° 인 것을 특징으로 하는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법.

청구항 12

제6항에 있어서,

상기 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)를 도출하는 단계는,

하기 [식 4]를 통해 계산되는 것

[식 4]

$$\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

(△x는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 x축의 거리이고, △y는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 x축의 거리이다)

을 특징으로 하는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법.

청구항 13

제5항에 있어서,

상기 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)을 이용하여 모세관력을 도출하는 단계는,

상기 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 단축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,a}$) 및 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)로 분리하는 단계;

상기 단축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,a}$) 및 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)를 이용하여 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 단축 방향의 모세관력(Fa) 및 장축 방향의 모세관력(Fc)을 도출하는 단계;

상기 트랩된 제1 비구형 입자의 단축 방향의 모세관력(Fa) 및 장축 방향의 모세관력(Fc)을 보정하여 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 모세관력(F_{net})을 도출하는 단계

를 포함하는 것을 특징으로 하는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 광학 레이저 트위저를 이용하여 비구형 입자의 유변학적 특성을 정량적으로 측정할 수 있는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 21세기 미래 지향적인 연구의 특징은 다학제간 연구라는데 있다. 광학을 기반으로 하는 측정 방법을 전자 및 생명공학에 응용하려는 연구 또한 활발히 진행되고 있다. 그 중에서 광 핀셋은 물리적인 접촉 없이 세포를 다룰 수 있어 그로 인한 감염의 위험이 없고, 외부에서 세포에 작용하는 아주 미세한 힘(pN)까지 측정을 할 수 다는 장점을 가지고 있기 때문에 이미 생물학 쪽에서 단일 세포를 조작하고 세포사이의 결합 에너지 측정 등 다양한 연구에 활용되고 있다.

[0004] 이와 같이, 생물학, 물리학 그리고 나노 기술에서도 광학 레이저 트위저는 매우 유용한 도구이며, 현재 단일 세포나 DNA, 특히 나노입자와 같은 매우 미세한 입자를 다루는 연구가 주가 되고 있다.

[0005] 나노, 마이크로 크기의 고체입자는 유체와 유체 계면에 비가역적으로 흡착되어 계면장력을 낮추고 계면을 안정화시키는 역할을 한다. 이들 입자들이 두 개의 서로 섞이지 않는 상으로 이루어진 에멀전 표면에 흡착되서 안정한 에멀전을 제조할 수 있는데, 이렇게 고체 입자에 의해서 안정화된 에멀전을 피커링 에멀전(Pickering emulsion)이라 한다.

[0006] 일반적으로 고체 입자는 대량생산에 유리하고, 친환경적인 입자제조가 용이하기 때문에, 비환경친화적이고 값비싼 분자계면활성제의 대체재로 사용될 수 있고, 화장품, 잉크, 페인트, 의약품, 폐수처리 등 다양한 산업분야에 응용이 가능하다. 따라서 입자가 유체 계면에 흡착되어 있을 때의 계면물성을 근본적으로 이해하기 위해 입자간 상호작용에 대한 연구가 필수적으로 선행되어야 한다.

[0007] 입자가 유체 계면에 존재할 때, 입자 주위의 계면 변형이 필연적으로 일어나게 되고, 결과적으로 표면 자유에너지를 증가시키게 된다. 이때 입자가 차지하는 면적을 제외한 유체계면의 전체 표면적을 감소시키는 방향으로 입자들이 서로 배열되고 움직이는 현상이 발생하는데, 이러한 구동력이 되는 힘을 모세관력(capillary interaction)이라고 한다.

[0008] 따라서 모세관력의 세기는 계면에 흡착된 입자들의 미세구조와 계면의 유변학적 특성을 결정하는 매우 중요한 요소가 된다. 지금까지 모세관력을 측정하기 위해서, 스톡스 끌림힘(Stoke's drag force)을 측정하는 방법이 사용되어 왔다.

[0009] 스톡스 끌림힘을 측정하는 방법은, 광학현미경에 부착된 초고속카메라를 이용하여 두 개의 입자가 모세관력에 의해 서로 접근할 때 수많은 이미지 프레임을 저장하고, 이미지 분석법을 이용하여 입자가 움직이는 속도(drift velocity)를 계산하고, 이 속도를 힘으로 환산하는 방법이다. 하지만, 이 방법은 두 개의 입자가 서로 붙을 때

까지 몇 시간동안 지속적으로 기다려야 하므로 매우 비효율적이고, 또한 서로 접근하는 입자들이 근거리에서는 회전을 하게 때문에 근거리에서의 모세관력 측정에 무시할 수 없을 정도의 상당한 에러가 발생하게 된다.

[0010] 더욱이, 입자가 접근하는 동안에 배향 변화가 연속으로 일어나기 때문에, 입자배향에 따른 모세관력 측정에 정량적 연구가 불가능한 문제가 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0012] (특허문헌 0001) 미국 공개특허공보 제2015-0330951호, "LASER TWEEZER SYSTEM FOR MEASURING ACOUSTIC VIBRATIONS OF NANOPARTICLES"

비특허문헌

[0013] (비특허문헌 0001) E. Loth, Drag of non-spherical solid particles of regular and irregular shape, Volume 182, Issue 3, 10 March 2008, Pages 342-353, 2008

발명의 내용

해결하려는 과제

[0014] 본 발명의 목적은 광학 레이저 트위저(optical laser tweezer)를 이용하여 계면에 분산된 비구형 입자들을 개별적으로 트랩(trap)하고, 개별 입자들의 상호 배향(configuration)과 분리 거리(separation)를 정밀히 제어함으로써, 비구형 입자간 모세관력(capillary interaction)과 에너지적으로 안정한 평형배향(equilibrium configuration)을 직접적/정량적으로 측정할 수 있는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법을 제공하고자 한다.

[0015] 본 발명의 목적은 유체 계면에 분산된 비구형 입자들 사이의 모세관력과 상호배향을 정량적으로 측정하고, 수득된 모세관력을 이용하여 비구형 입자의 기하학적 또는 화학적 성질이 모세관력의 이종성 및 비등방성에 미치는 영향을 측정할 수 있는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법을 제공하고자 한다.

[0016] 더욱이, 본 발명은 많은 수의 같은 비구형 입자들이 회합 현상, 미세 구조 및 유변학적 성질에 어떻게 영향을 주는지에 대해 정량적 분석이 가능한 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법을 제공하고자 한다.

과제의 해결 수단

[0018] 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법은 광학 레이저 트위저를 이용하여 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자를 각각 트랩하는 단계; 상기 트랩된 제1 비구형 입자 및 상기 트랩된 제2 비구형 입자의 에너지가 안정화되는 각도를 추출하는 단계; 상기 안정화되는 각도에서의 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 모세관력을 도출하는 단계를 포함한다.

[0019] 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 위치는 고정되나 각도는 변화되고, 상기 트랩된 제2 비구형 입자의 위치 및 각도는 모두 변화될 수 있다.

[0020] 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 위치 및 각도는 모두 고정되고, 상기 트랩된 제2 비구형 입자의 위치 및 각도는 모두 변화될 수 있다.

[0021] 상기 트랩된 제1 비구형 입자 및 상기 트랩된 제2 비구형 입자의 에너지가 안정화되는 각도를 추출하는 단계는, 상기 트랩된 제1 비구형 입자 및 상기 트랩된 제2 비구형 입자 사이의 거리를 조절하여 상기 트랩된 제1 비구형 입자 및 상기 트랩된 제2 비구형 입자의 에너지가 안정되는 각도를 추출할 수 있다.

[0022] 상기 안정화되는 각도에서의 상기 트랩된 제1 비구형 입자 및 상기 트랩된 제2 비구형 입자의 모세관력을 도출

하는 단계는, 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(Trap stiffness, κ_t)를 도출하는 단계; 및 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 이용하여 모세관력을 도출하는 단계;를 포함할 수 있다.

[0023] 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 도출하는 단계는, 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 스톡스 항력(F_{drag})을 도출하는 단계; 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)를 도출하는 단계; 및 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 스톡스 항력(F_{drag}) 및 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)의 기울기를 도출하는 단계;를 포함할 수 있다.

[0024] 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 스톡스 항력(F_{drag})을 도출하는 단계는, 하기 [식 1]을 이용하여 계산될 수 있다.

[0025] [식 1]

[0026] $$F_{drag} = -\eta \check{c} v = -3\pi d_{eff} \eta f_E v$$

[0027] (η는 유체의 점도이고, $\check{c}$는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 배향과 모양에 따른 상수이며, v는 유체의 속도 또는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 속도이고, d_{eff}는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 유효 반지름이며, f_E는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 모양 및 배향에 따른 스톡스 항력을 보정하기 위한 상수이다)

[0028] 상기 [식 1]의 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 유효 반지름(d_{eff})은 하기 [식 2]를 통해 계산될 수 있다.

[0029] [식 2]

[0030] $$d_{eff} = d_a E^{1/3}$$

[0031] (E는 d_c/d_a이고, d_a는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 단축 방향의 반지름이며, d_c는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 장축 방향의 반지름이다)

[0032] 상기 [식 1]의 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 배향과 모양에 따른 상수($\check{c}$)는 하기 [식 3]을 통해 계산될 수 있다.

[0033] [식 3]

[0034] $$\check{c} = 3\pi d_{eff} f_E = \sqrt{C_a^2 \cos^2\theta + C_c^2 \sin^2\theta}$$

[0035] (d_{eff}는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 유효 반지름이고, f_E는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 모양 및 배향에 따른 스톡스 항력을 보정하기 위한 상수이며, C_a 및 C_c는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 모양에 따른 항력 계수이고, Θ는 상기 트랩된 제1 비구형 입자 또는 유체의 움직이는 방향과 상기 제1 비구형 입자의 배향이 이루는 각도이다)

[0036] 상기 [식 3]에서, 상기 C_a와 $\check{c}$가 동일하면, Θ는 0° 일 수 있다.

[0037] 상기 [식 3]에서, 상기 C_b와 $\check{c}$가 동일하면, Θ는 90° 일 수 있다.

[0038] 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)를 도출하는 단계는, 하기 [식 4]를 통해 계산될 수 있다.

[0039] [식 4]

[0040] $$\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

[0041] (△x는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 x축의 거리이고, △y는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 x축의 거리이다)

[0042] 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 이용하여 모세관력을 도출하는 단계는, 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 단축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,a}$) 및 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)로 분리하는 단계; 상기 단축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,a}$) 및 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)를 이용하여 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 단축 방향의 모세관력(Fa) 및 장축 방향의 모세관력(Fc)을 도출하는 단계; 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 단축 방향의 모세관력(Fa) 및 장축 방향의 모세관력(Fc)을 보정하여 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 모세관력(F_{net})을 도출하는 단계를 포함할 수 있다.

발명의 효과

[0044] 본 발명의 실시예에 따르면, 광학 레이저 트위저(optical laser tweezer)를 이용하여 계면에 분산된 비구형 입자들을 개별적으로 트랩(trap)하고, 개별 입자들의 상호 배향(configuration)과 분리 거리(separation)를 정밀히 제어함으로써, 비구형 입자간 모세관력과 에너지적으로 안정한 평형배향을 직접적/정량적으로 측정할 수 있는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법을 제공할 수 있다.

[0045] 본 발명의 실시예에 따르면, 유체 계면에 분산된 비구형 입자들 사이의 모세관력과 상호배향을 정량적으로 측정하고, 수득된 모세관력을 이용하여 비구형 입자의 기하학적 또는 화학적 성질이 모세관력의 이종성 및 비등방성에 미치는 영향을 측정할 수 있는 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법을 제공할 수 있다.

[0046] 더욱이, 본 발명은 많은 수의 같은 비구형 입자들이 회합 현상, 미세 구조 및 유변학적 성질에 어떻게 영향을 주는지에 대해 정량적 분석이 가능한 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법을 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0048] 도 1a은 광학 레이저 트위저를 도시한 개략도이고, 도 1b는 광학 레이저에 의해 트랩된 비구형 입자를 도시한 이미지이다.

도 2a 내지 도 2d는 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법을 도시한 흐름도이다.

도 3a 내지 도 3c는 트랩된 제1 비구형 입자의 파라미터를 도시한 모식도이다.

도 4a는 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)의 기울기를 도출한 그래프이다.

도 4b는 트랩된 제1 비구형 입자의 스톡스 항력(Fdrag) 및 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)의 기울기를 도출한 그래프이다.

도 4c는 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)의 단축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,a}$)를 도출한 그래프이고, 도 4c는 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)의 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)를 도출한 그래프이다.

도 5는 트랩된 제1 비구형 입자의 위치 및 파라미터를 도시한 그래프이다.

도 6a 및 도 6b는 트랩된 제1 비구형 입자의 중심과 기준점이 이루는 각도(Θ') 및 트랩된 제1 비구형 입자가 이루는 각도(ϕ1)에 따른 트랩된 제1 비구형 입자의 위치를 도시한 그래프이다.

도 7a 내지 도 7e는 모세관력을 이용하여 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자의 거리별 가장 안정한 배양을 도출하는 그래프를 도시한 것이다.

도 8a 및 도 8b는 각 배향에서의 상호 작용을 나타내는 도표를 도시한 것이다.

도 9a 내지 도 9c는 광학 레이저 트위저를 이용하여 위치는 고정되고 각도는 변화되도록 트랩된 제1 비구형 입자 및 위치 및 각도가 모두 변화되도록 트랩된 제2 비구형 입자의 움직임을 도시한 이미지이다.

도 10은 광학 레이저 트위저를 이용하여 위치는 고정되고 각도는 변화되도록 트랩된 제1 비구형 입자 및 위치 및 각도가 모두 변화되도록 트랩된 제2 비구형 입자의 기어-회전 모드를 구체화한 이미지이다.

도 11a는 광학 레이저 트위저를 이용하여 위치는 고정되고 각도는 변화되도록 트랩된 제1 비구형 입자 및 위치 및 각도가 모두 변화되도록 트랩된 제2 비구형 입자의 스윙 모드에서의 모세관력 상호작용을 도시한 그래프이고, 도 11b는 및 도 11c는 기어-회전 모드에서의 모세관력 상호작용을 도시한 그래프이다.

도 12a 및 도 12b는 광학 레이저 트위저를 이용하여 위치는 고정되고 각도는 변화되도록 트랩된 제1 비구형 입자 및 위치 및 각도가 모두 변화되도록 트랩된 제2 비구형 입자의 모세관 상호작용의 회전 측정을 도시한 그래프이고, 도 12c는 각도에 따른 광학 레이저 트위저를 이용하여 위치는 고정되고 각도는 변화되도록 트랩된 제1 비구형 입자 및 위치 및 각도가 모두 변화되도록 트랩된 제2 비구형 입자의 모세관 상호작용의 회전 측정을 도시한 이미지이다.

도 13a은 광학 레이저 트위저를 이용하여 위치 및 각도가 모두 고정되도록 트랩된 제1 비구형 입자 및 위치 및 각도가 모두 변화되도록 트랩된 제2 비구형 입자의 움직임을 도시한 이미지이다.

도 13b 내지 도 13d는 광학 레이저 트위저를 이용하여 위치 및 각도가 모두 고정되도록 트랩된 제1 비구형 입자 및 위치 및 각도가 모두 변화되도록 트랩된 제2 비구형 입자의 회전 측정을 도시한 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0049] 이하 첨부 도면들 및 첨부 도면들에 기재된 내용들을 참조하여 본 발명의 실시예를 상세하게 설명하지만, 본 발명이 실시예에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다.

[0050] 본 명세서에서 사용된 용어는 실시예를 설명하기 위한 것이며 본 발명을 제한하고자 하는 것은 아니다. 본 명세서에서, 단수형은 문구에서 특별히 언급하지 않는 한 복수형도 포함한다. 명세서에서 사용되는 "포함한다(comprises)" 및/또는 "포함하는(comprising)"은 언급된 구성요소, 단계, 동작 및/또는 소자는 하나 이상의 다른 구성요소, 단계, 동작 및/또는 소자의 존재 또는 추가를 배제하지 않는다.

[0051] 본 명세서에서 사용되는 "실시예", "예", "측면", "예시" 등은 기술된 임의의 양상(aspect) 또는 설계가 다른 양상 또는 설계들보다 양호하다거나, 이점이 있는 것으로 해석되어야 하는 것은 아니다.

[0052] 또한, '또는' 이라는 용어는 배타적 논리합 'exclusive or'이기보다는 포함적인 논리합 'inclusive or'를 의미한다. 즉, 달리 언급되지 않는 한 또는 문맥으로부터 명확하지 않는 한, 'x가 a 또는 b를 이용한다'라는 표현은 포함적인 자연 순열들(natural inclusive permutations) 중 어느 하나를 의미한다.

[0053] 또한, 본 명세서 및 청구항들에서 사용되는 단수 표현("a" 또는 "an")은, 달리 언급하지 않는 한 또는 단수 형태에 관한 것이라고 문맥으로부터 명확하지 않는 한, 일반적으로 "하나 이상"을 의미하는 것으로 해석되어야 한다.

[0055] 도 1a은 광학 레이저 트위저를 도시한 개략도이고, 도 1b는 광학 레이저에 의해 트랩된 비구형 입자를 도시한 이미지이다.

[0056] 도 1a 및 도 1b를 참조하면, 광학 레이저 트위저(optical laser tweezer)는 과학 연구 도구로 집광된 레이저 빔을 사용하여 현미경으로 볼 수 있는 작은 물체(미세 입자)에 인력 또는 척력을 제공하고, 그 움직임을 기록하는 장치이다. 주어지는 인력과 척력은 광학적으로 잡아 움직이려는 미세 유전체 물체의 굴절률의 차이에 따라 다르다. 광학 레이저 트위저를 통한 포획 원리는 운동량 보존 법칙에 의해 설명 된다.

[0057] 광의 운동량(모멘텀, momentum) 변동으로 인해서 레이저의 라디에이션 압력(radiation pressure)이 발생된다. 광 그래디언트를 통해 유전체인 단일 세포나 입자가 집광된 레이저의 중심으로 힘이 작용하게 되고, 운동량 보존에 의해 물질과 레이저 빛 사이에 운동량 이동이 발생하여 뉴턴의 제 3법칙(작용-반작용 법칙)에 의해 또 다른 힘이 작용하게 된다. 이때 발생하는 힘이 각각 그래디언트힘(gradient force)과, 확산력(scattering force)이다. 그래디언트힘은 광의 굴절에 기인한 것이고 입자를 당긴다. 반면에, 확산력은 광의 반사에 기인한

것이고, 입자를 밀어낸다.

[0058] 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법은 이러한 광학 레이저 트위저를 이용하여 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자를 각각 트랩하여 입자의 유변학적 특성을 정량적으로 검출할 수 있다.

[0060] 도 2a 내지 도 2d는 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법을 도시한 흐름도이다.

[0061] 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법은 광학 레이저 트위저를 이용하여 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자를 각각 트랩하는 단계(S100), 트랩된 제1 비구형 입자 및 트랩된 제2 비구형 입자의 에너지가 안정화되는 각도를 추출하는 단계(S200), 안정화되는 각도에서의 트랩된 제1 비구형 입자의 모세관력을 도출하는 단계(S300)를 포함한다.

[0062] 먼저, 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법은 광학 레이저 트위저를 이용하여 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자를 각각 트랩하는 단계(S100)를 진행한다.

[0063] 제1 비구형 입자 또는 제2 비구형 입자는 타원형 입자일 수 있고, 제1 비구형 입자 또는 제2 비구형 입자의 장축 방향의 너비가 단축 방향의 너비보다 길이가 커질수록 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자가 멀리에 떨어져 있어서 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자 사이의 상호작용(예; 모세관력)이 증가될 수 있다.

[0064] 이후, 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법은 트랩된 제1 비구형 입자 및 트랩된 제2 비구형 입자의 에너지가 안정화되는 각도를 추출하는 단계(S200)를 진행한다.

[0065] 트랩된 제1 비구형 입자 및 트랩된 제2 비구형 입자의 에너지가 안정화되는 각도를 추출하는 단계(S200)는, 트랩된 제1 비구형 입자 및 트랩된 제2 비구형 입자 사이의 거리를 조절하여 트랩된 제1 비구형 입자 및 트랩된 제2 비구형 입자의 에너지가 안정되는 각도를 추출할 수 있다.

[0066] 트랩된 제1 비구형 입자 및 트랩된 제2 비구형 입자의 에너지가 안정화되는 각도를 추출하는 단계(S200)는, 트랩된 제1 비구형 입자의 위치는 고정되나 각도는 변화되고, 트랩된 제2 비구형 입자의 위치 및 각도는 모두 변화(1 to 2 방법)될 수 있다.

[0067] 또는, 트랩된 제1 비구형 입자 및 트랩된 제2 비구형 입자의 에너지가 안정화되는 각도를 추출하는 단계(S200)는, 트랩된 제1 비구형 입자의 위치 및 각도는 모두 고정되고, 트랩된 제2 비구형 입자의 위치 및 각도는 모두 변화(2 to 2 방법)될 수 있다.

[0068] 예를 들어, 타원형(ellipsoid)의 제1 및 제2 비구형 입자의 유변학적 특성을 검출할 때, 트랩된 제1 비구형 입자의 위치는 고정시키고 각도를 변화시키며, 트랩된 제2 비구형 입자의 위치 및 각도를 모두 변화시켜 측정(1 to 2 방법)하는 경우, 인력(attraction)만 측정이 가능하고, 스윙 모드(swing mode)와 기어-회전 모드(gear-rotating mode)로 변하는 거리를 찾을 수 있다. 또한, 트랩된 제1 비구형 입자가 이루는 각도(ϕ_1)를 통해서 어느 배향이 더 안정한지 확인 할 수 있다(예; 팁-팁(tip-tip) 또는 사이드-사이드(side-side)).

[0069] 반면, 트랩된 제1 비구형 입자의 위치 및 각도를 모두 고정시키고, 트랩된 제2 비구형 입자의 위치 및 각도를 모두 변화(2 to 2 방법)시키는 경우, 인력(attraction)과 척력(repulsion)을 모두 측정할 수 있고, 각각의 힘(force, 예; 스톡스 항력)을 계산할 수 있다. 또한, 힘을 통해 1 to 2 방법보다 정량적 분석이 가능하고, 주위의 모세관력 파일상(capillary filed)(도 8a 또는 도 8b 참조)을 만들 수 있다.

[0070] 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법은 광학 레이저 트위저를 이용하여 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자를 개별적으로 트랩하여 각도를 1° 간격으로 조절할 수 있고, 거리를 약 600㎚로 정밀하게 조절하여 광이 산란되는 각도를 미세하게 제어할 수 있다.

[0071] 트랩된 제1 비구형 입자 및 트랩된 제2 비구형 입자의 에너지가 안정화되는 각도를 추출하는 것은, 각 거리에서 어떤 배향을 가장 선호하는지 찾기 위한 것이다.

[0072] 만약, 트랩된 제1 비구형 입자 및 트랩된 제2 비구형 입자를 해당 거리에 고정해두었을 때, 트랩된 제1 비구형 입자 및 트랩된 제2 비구형 입자는 안정화된 배향을 가지기 위해 움직이게 된다.

[0073] 따라서, 특정 거리에서 모든 배향에 대해 힘(force, 예; 스톡스 항력)을 계산하고 그 중 가장 낮은 값(F<0)에서 인력(attraction)이 최대인 배향이 가장 안정화되는 것이고, 가장 큰 값(F>0)에서 척력(repulsion)이 최대인 배향이 가장 안정화된 것이다.

[0074] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법은 광학 레이저 트위저를 이용하여 계면에 분산된 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자를 개별적으로 트랩(trap)함으로써, 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자의 상호배향(configuration)과 분리거리(separation)를 정밀히 제어할 수 있다.

[0076] 도 2b는 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법의 안정화되는 각도에서의 트랩된 제1 비구형 입자의 모세관력을 도출하는 단계를 도시한 흐름도이다.

[0077] 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법은 안정화되는 각도에서의 트랩된 제1 비구형 입자의 모세관력을 도출하는 단계(S300)를 진행한다.

[0078] 바람직하게는, 안정화되는 각도에서의 트랩된 제1 비구형 입자의 모세관력을 도출하는 단계(S300)는, 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 도출하는 단계(S310) 및 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)을 이용하여 모세관력을 도출하는 단계(S320)를 포함할 수 있다.

[0079] 단계 S300에 대해서는 도 2c 및 도 2d를 참조하여 상세히 설명하도록 한다.

[0081] 도 2c는 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법의 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 도출하는 단계를 도시한 흐름도이다.

[0082] 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 도출하는 단계(S310)는, 트랩된 제1 비구형 입자의 스톡스 항력(F_{drag})을 도출하는 단계(S311), 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)를 도출하는 단계(S312) 및 트랩된 제1 비구형 입자의 스톡스 항력(F_{drag}) 및 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)의 기울기를 도출하는 단계(S313)를 포함할 수 있다.

[0083] 트랩된 제1 비구형 입자의 스톡스 항력(F_{drag})을 도출하는 단계(S311)는, 하기 [식 1]을 이용하여 계산될 수 있다.

[0084] 하기 [식 1]에서 속도(v)를 제외한 나머지는 모두 상수이기 때문에, 속도가 제한된 시스템(system)에서 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자를 트랩(trap)한 상태에서 움직이게 되면, 트랩된 제1 비구형 입자의 스톡스 항력(F_{drag})을 구할 수 있다.

[0085] 이때, 제1 비구형 입자를 트랩하고 있는 힘($\overrightarrow{F_{trap}} = \kappa_t * \overrightarrow{\Delta r}$)과 스톡스 항력(drag force)은 평형을 이루고 있으므로 F_{drag} vs $\overrightarrow{\Delta r}$ (△r 은 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리) 그래프의 기울기(κ_t)를 구할 수 있다.

[0086] [식 1]

[0087] $$F_{drag} = -\eta \check{c} v = -3\pi d_{eff} \eta f_E v$$

[0088] η는 유체의 점도이고, $\check{c}$ 는 트랩된 제1 비구형 입자의 배향과 모양에 따른 상수이며, d_{eff}는 트랩된 제1 비구형 입자의 유효 반지름이며, f_E는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 모양 및 배향에 따른 스톡스 항력을 보정하기 위한 상수이다.

[0089] 또한, 트랩된 제1 비구형 입자가 정지되어 있는 경우, v는 유체의 속도일 수 있고, 유체가 정지되어 있는 경우에는 v는 트랩된 제1 비구형 입자의 속도일 수 있다.

[0090] 이 때, -는 인력을 나타내기 때문에 방향을 나타내주는 부호이고, 속도 v(+)와 반대 방향으로 스톡스 항력(drag force, -)이 작용한다는 것을 나타내기 위한 부호이다.

[0091] f_E는 하기 표 1을 통해 계산될 수 있다.

[0092] [표 1]

Stokes correction factors for spheroids

Spheriod shape	$f_{E\parallel}$	$f_{E\perp}$
Oblate exact ($E<1$)	$\frac{(4/3)E^{-1/3}(1-E^2)}{E+\frac{(1-2E^2)\cos^{-1}E}{\sqrt{1-E^2}}}$	$\frac{(8/3)E^{-1/3}(E^2-1)}{E-\frac{(3-2E^2)\cos^{-1}E}{\sqrt{1-E^2}}}$
Oblate approx. ($0.25<E<1$)	$\left(\frac{4}{5}+\frac{E}{5}\right)E^{-1/3}$	$\left(\frac{3}{5}+\frac{2E}{5}\right)E^{-1/3}$
Disk ($E<0.25$)	$\frac{8}{3\pi}E^{-1/3}$	$\frac{16}{9\pi}E^{-1/3}$
Prolate exact ($E>1$)	$\frac{(4/3)E^{-1/3}(1-E^2)}{E-\frac{(2E^2-1)\ln(E+\sqrt{E^2-1})}{\sqrt{E^2-1}}}$	$\frac{(8/3)E^{-1/3}(E^2-1)}{E+\frac{(2E^2-3)\ln(E+\sqrt{E^2-1})}{\sqrt{E^2-1}}}$

[0093]

[0094] 예를 들어, f_E는 장구형(prolate)형태의 제1 비구형 입자를 장축의 평행 방향(fe,0 = fe,||)으로 움직일 때와 장축의 수직한 방향(단축 방향, fe,90 =fe,⊥)으로 움직일 때의 값을 이용하여 사용될 수 있다.

[0095] [식 1]의 트랩된 제1 비구형 입자의 유효 반지름(d_{eff})은 하기 [식 2]를 통해 계산될 수 있다.

[0096] [식 2]

[0097] $$d_{eff} = d_a E^{1/3}$$

[0098] E는 d_c/d_a이고, d_a는 트랩된 제1 비구형 입자의 단축 방향의 반지름이며, d_c는 트랩된 제1 비구형 입자의 장축 방향의 반지름(도 3a 참조)이다.

[0099] [식 1]의 트랩된 제1 비구형 입자의 배향과 모양에 따른 상수($\check{c}$)는 하기 [식 3]을 통해 계산될 수 있다.

[0100] [식 3]

[0101] $$\check{c} = 3\pi d_{eff} f_E = \sqrt{C_a^2 \cos^2\theta + C_c^2 \sin^2\theta}$$

[0102] d_{eff}는 트랩된 제1 비구형 입자의 유효 반지름이고, f_E는 상기 트랩된 제1 비구형 입자의 모양 및 배향에 따른 스톡스 항력을 보정하기 위한 상수이며, C_a 는 트랩된 제1 비구형 입자가 단축 방향으로 움직일 때의 항력 계수이고, C_c는 트랩된 제1 비구형 입자가 장축 방향으로 움직일 때의 항력 계수이며, Θ는 트랩된 제1 비구형 입자 또는 유체의 움직이는 방향과 제1 비구형 입자의 배향이 이루는 각도(도 3b 참조)이다.

[0103] 또한, [식 3]에서, C_a와 $\check{c}$ 가 동일($C_a=\check{c}$)하면, Θ는 0° (Θ=0°)일 수 있다.

[0104] 예를 들어, C_a와 $\check{c}$ 가 동일하면, Θ는 0° 일 때, $C_a = 3\pi d_{eff} f_{E,0°}$ 일 수 있다.

[0105] 따라서, Θ이 0° 일 때, $f_{E,0°}$ 는 하기 [식 3-1]로 계산될 수 있다.

[0106] [식 3-1]

$$f_{E,0^\circ} = \frac{\frac{4}{3}(E^2-1)}{\frac{2E^2-1}{\sqrt{E^2-1}}\ln\left[E+\sqrt{E^2-1}\right]-E}$$

[0107] 일 수 있다.

[0108] 이 때, E는 장축과 단축의 비율(aspect ratio)로 dc/da 로 계산될 수 있다.

[0109] 또한, [식 3]에서, C_b와 $\check{C}$ 가 동일($C_b=\check{C}$)하면, Θ는 90°(Θ=90°)일 수 있다.

[0110] 예를 들어, C_b와 $\check{C}$ 가 동일하면, $C_c = 3\pi d_{eff} f_{E,90^\circ}$ 일 수 있다.

[0111] 따라서, Θ이 90° 일 때, $f_{E,90^\circ}$ 는 하기 [식 3-1]로 계산될 수 있다.

[0112] [식 3-2]

$$f_{E,90^\circ} = \frac{\frac{8}{3}(E^2-1)}{\frac{2E^2-3}{\sqrt{E^2-1}}\ln\left[E+\sqrt{E^2-1}\right]+E}$$

[0113]

[0114] 이 때, E는 d_c/d_a이다.

[0115] 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)를 도출하는 단계(S312)는, 하기 [식 4]를 통해 계산될 수 있다.

[0116] 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)는 트랩된 제1 비구형 입자의 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 계산하기 위한 것이다.

[0117] [식 4]

$$\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

[0118]

[0119] △x는 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 x축의 거리이고, △y는 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 x축의 거리(도 3c 참조)이다.

[0120] 마지막으로, 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)의 기울기를 도출하는 단계(S313)를 진행한다.

[0121] 앞서 계산된 트랩된 제1 비구형 입자의 배향과 모양에 따른 상수($\check{C}$)를 이용하여 각 각도(Θ=0°, 30°, 60°, 90°)에서 트랩된 제1 비구형 입자의 속도(v)를 달리하여 트랩된 제1 비구형 입자의 스톡스 항력(F_{drag})을 계산하고, 그때, 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)를 이용하여 기울기를 수득함으로써, 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 도출할 수 있다.

[0122] 이후, 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)을 이용하여 모세관력을 도출하는 단계(S320)를 진행한다.

[0124] 도 2d는 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법의 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)을 이용하여 모세관력을 도출하는 단계를 도시한 흐름도이다.

[0125] 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)을 이용하여 모세관력을 도출하는 단계(S320)는, 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 단축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,a}$) 및 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)로 분리하는 단계(S321), 단축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,a}$) 및 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)를 이용하여 트랩된 제1 비구형 입자

의 단축 방향의 모세관력(Fa) 및 장축 방향의 모세관력(Fc)을 도출하는 단계(S322) 및 트랩된 제1 비구형 입자의 단축 방향의 모세관력(Fa) 및 장축 방향의 모세관력(Fc)을 보정하여 트랩된 제1 비구형 입자의 모세관력(F_{net})을 도출하는 단계(S323)를 포함할 수 있다.

[0126] 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)을 이용하여 모세관력을 도출하는 단계(S320)는 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)을 이용하여 단축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,a}$) 및 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)로 분리하여 모세관력을 구하기 위한 것이다.

[0127] 먼저, 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 단축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,a}$) 및 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)로 분리하는 단계(S321)는 도 5를 참조하여 설명하기로 한다.

[0128] 트랩된 제1 비구형 입자의 장축 방향으로 작용하는 힘($\overrightarrow{F_c}$)과 단축 방향으로 작용하는 힘($\overrightarrow{F_a}$)의 합이 입자의 작용하는 전체 힘($\overrightarrow{F_{net}}$)이므로, $\overrightarrow{F_c} = \kappa_{t,c} \cdot \overrightarrow{\lambda_c}$ 와 $\overrightarrow{F_a} = \kappa_{t,a} \cdot \overrightarrow{\lambda_a}$ 에 필요한 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(Trap stiffness, κ_t)를 얻기 위해 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 단축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,a}$) 및 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)로 분리하여야 한다.

[0129] 또한, 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(Trap stiffness, κ_t)는 일정한 상수이므로, 트랩 힘(trapping force)은 초점에서 벗어난 거리에 비례하여 힘이 증가하기 때문에($\overrightarrow{F_c} = \kappa_{t,c} \cdot \overrightarrow{\lambda_c}$ 와 $\overrightarrow{F_a} = \kappa_{t,a} \cdot \overrightarrow{\lambda_a}$) 정량적인 계산을 할 수 있다.

[0130] 도 5는 트랩된 제1 비구형 입자의 위치 및 파라미터를 도시한 그래프이다.

[0131] 도 5를 참조하면, 점선은 트랩된 제1 비구형 입자에 가해지는 힘이 없을 때의 위치(2개의 레이저의 초점 중심, 기준점)이고, 실선은 트랩된 제1 비구형 입자가 힘을 받아 기준점에서 벗어난 위치(실제 트랩된 제1 비구형 입자의 중심)을 나타낸다.

[0132] Θ는 트랩된 제1 비구형 입자의 장축 방향이 이루는 각도이고, Θ'는 트랩된 제1 비구형 입자의 중심과 기준점이 이루는 각도이며, ϕ_1는 트랩된 제1 비구형 입자가 이루는 각도이다.

[0133] 트랩된 제1 비구형 입자에 가해지는 힘을 수직한 2개의 성분($\overrightarrow{F_c} \perp \overrightarrow{F_a}$)으로 분리하기 위해서는 장축 방향의 초점으로부터 벗어난 거리($\overrightarrow{\lambda_c}$)와 단축 방향의 초점으로부터 벗어난 거리($\overrightarrow{\lambda_a}$)를 구해야 한다.

[0134] $\overrightarrow{F_{net}} = \overrightarrow{F_a} + \overrightarrow{F_c} = \kappa_{t,c}\overrightarrow{\lambda_c} + \kappa_{t,a}\overrightarrow{\lambda_a}$ 의 트랩된 제1 비구형 입자에 가해지는 힘인 수직한 2개의 성분 ($\overrightarrow{F_c} \perp \overrightarrow{F_a}$)은 각각 장축 방향과 단축 방향의 힘을 나타낸다.

[0135] 앞서 설명한 [식 4]를 참고하면, 장축 방향의 초점으로부터 벗어난 거리($\overrightarrow{\lambda_c}$)는 하기 [식 5]를 통해 계산될 수 있다.

[0136] [식 5]

[0137] $$\overrightarrow{\lambda_c} = \overrightarrow{\Delta r}\cos(\varphi_1 - \theta')$$

[0138] 또한, 트랩된 제1 비구형 입자의 장축 방향의 성분은 하기 [식 6]을 통해 계산될 수 있다.

[0139] [식 6]

[0140] $$\overrightarrow{F_c} = \overrightarrow{F_{\Delta r}} \cos(\varphi_1 - \theta')$$

[0141] 또한, 앞서 설명한 [식 4]를 참고하면, 단축 방향의 초점으로부터 벗어난 거리($\overrightarrow{\lambda_a}$)는 하기 [식 7]을 통해 계산될 수 있다.

[0142] [식 7]

[0143] $$\overrightarrow{\lambda_a} = \overrightarrow{\Delta r} \sin(\varphi_1 - \theta')$$

[0144] 또한, 트랩된 제1 비구형 입자의 단축 방향의 성분은 하기 [식 8]을 통해 계산될 수 있다.

[0145] [식 8]

[0146] $$\overrightarrow{F_a} = \overrightarrow{F_{\Delta r}} \sin(\varphi_1 - \theta')$$

[0147] 따라서, 앞서 계산된 트랩된 제1 비구형 입자에 가해지는 힘을 수직한 2개의 성분($\overrightarrow{F_c} \perp \overrightarrow{F_a}$)을 이용하여 제1 또는 제2 성분($\overrightarrow{F_c}$, $\overrightarrow{F_a}$)과 장축 방향의 초점으로부터 벗어난 거리($\overrightarrow{\lambda_c}$) 또는 단축 방향의 초점으로부터 벗어난 거리($\overrightarrow{\lambda_a}$)의 기울기를 추출하면 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 단축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,a}$) 및 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)를 도출할 수 있다.

[0148] 다만, 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)는 Θ에 따라서 고정(fitting)하여 맞는 값을 사용할 수 있다.

[0149] 예를 들어, $\kappa_{t,a}$ 와 $\kappa_{t,c}$ 는 모두 한가지 값으로 일치할 수 있기에, 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)는 수식을 이용하여 계산되지 않고, 한가지 값인 6.51pN/㎛로 사용될 수 있다. 이 때의, $\kappa_{t,a}$는 35.69pN/㎛일수도 있으나, 이에 제한되지 않는다.

[0150] 따라서, 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)의 단축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,a}$)는 하기 [식 9]와 같고, 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)의 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)는 6.51pN/㎛ 일 수 있다.

[0151] [식 9]

[0152] $$\overrightarrow{F_a} = \kappa_{t,a} \cdot \overrightarrow{\lambda_a}$$

[0153] 이 때, 트랩된 제1 비구형 입자 및 트랩된 제2 비구형 입자가 움직일 때, 0° 및 90° 인 경우, y축 방향으로의 이동이 거의 없기 때문에 90° 에서 $\lambda_c \approx 0$ 이므로 $\Delta r = \lambda_a$ 로 고려할 수 있고, 0° 에서 $\lambda_a \approx 0$이므로 $\Delta r = \lambda_c$ 로 고려할 수 있다.

[0154] 이 후, 단축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,a}$) 및 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)를 이용하여 트랩된 제1 비구형 입자의 단축 방향의 모세관력(Fa) 및 장축 방향의 모세관력(Fc)을 도출하는 단계(S322)를 진행한다.

[0155] 단계 S322는 해당 배향에서 비구형 입자간의 힘의 계산할 수 있다.

[0156] 단축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,a}$) 및 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)를 이용하면, 각 배향에서의 단축 방향의 모세

관력(Fa) 및 장축 방향의 모세관력(Fc)를 구할 수 있다.

[0157] 마지막으로, 트랩된 제1 비구형 입자의 단축 방향의 모세관력(Fa) 및 장축 방향의 모세관력(Fc)을 보정하여 트랩된 제1 비구형 입자의 모세관력(Fnet)을 도출하는 단계(S323)를 진행한다.

[0158] 비구형 입자의 경우, 각 축으로의 탄성 계수(trap stiffness)가 다르기 때문에, 장축 방향과 단축 방향으로 나누어 보다 정확한 모세관력을 도출해야 한다.

[0159] 따라서, 트랩된 제1 비구형 입자의 모세관력(Fnet)은 하기 [식 10]으로 계산될 수 있다.

[0160] [식 10]

[0161] $$F_{net} = k\sqrt{(\overrightarrow{Fc})^2 + (\overrightarrow{Fa})^2}$$

[0162] 이 때, k는 보정 상수이고, k의 부호는 하기 [식 11]로 결정될 수 있다.

[0163] [식 11]

[0164] $$k\text{의 부호는 } k = \begin{cases} +1, (x > 0) \\ -1, (x < 0) \end{cases}$$

[0165] K의 부호는 제1 비구형 입자 중심의 좌표에 따라 결정되게 되고, x<0일 때는 척력(repulsion)(+)이고, x>0 일 때는 인력(attraction)(-)일 수 있다.

[0166] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법은 광학 레이저 트위저(optical laser tweezer)를 이용하여 계면에 분산된 비구형 입자들을 개별적으로 트랩(trap)하고, 개별 입자들의 상호 배향(configuration)과 분리 거리(separation)를 정밀히 제어함으로써, 비구형 입자간 모세관력과 에너지적으로 안정한 평형배향을 직접적/정량적으로 측정할 수 있다.

[0167] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법은 유체 계면에 분산된 비구형 입자들 사이의 모세관력과 상호배향을 정량적으로 측정하고, 수득된 모세관력을 이용하여 비구형 입자의 기하학적 또는 화학적 성질이 모세관력의 이종성 및 비등방성에 미치는 영향을 측정할 수 있다.

[0168] 더욱이, 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법은 많은 수의 같은 비구형 입자들이 회합 현상, 미세 구조 및 유변학적 성질에 어떻게 영향을 주는지에 대해 정량적 분석이 가능하다.

[0169] 실시예에 따라, 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법은 모세관력을 이용하여 각 거리별 가장 안정한 배양을 도출할 수 있다.

[0170] 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 특성 측정 방법은 모세관력을 이용하여 각 거리별 가장 안정한 배양을 도출하는 기술에 대해서는 도 7a 내지 도 7e를 참조하여 설명하도록 한다.

[0172] 도 4a는 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)의 기울기를 도출한 그래프이다.

[0173] 도 4a는 트랩된 제1 비구형 입자의 각도(φ)별, 속도 v에 따른 제1 비구형 입자 중심이 벗어난 거리를 좌표에 도시한 것으로, 각도에서 속도가 0일 때 기준점(0,0) 이다.

[0174] 도 4a를 참조하면, 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 x축의 거리(△x) 및 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 x축의 거리(△y)를 통해 트랩된 제1 비구형 입자의 속도(v)에 따른 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)를 확인할 수 있다.

[0175] 도 4b는 트랩된 제1 비구형 입자의 스톡스 항력(F_{drag}) 및 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)의 기울기를 도출한 그래프이다.

[0176] 도 4b를 참조하면, 트랩된 제1 비구형 입자의 중심이 초점으로부터 벗어난 거리(△r)를 x축에 배치하고, 트랩된 제1 비구형 입자의 스톡스 항력(F_{drag})을 y축으로 배치하여 나타난 기울기가 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수

(κ_t)를 확인할 수 있다.

[0177] 도 4c는 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)의 단축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,a}$)를 도출한 그래프이고, 도 4d는 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)의 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)를 도출한 그래프이다.

[0178] 따라서, 도 4a 내지 도 4d를 참조하면, 트랩된 제1 비구형 입자에 가해지는 힘을 수직한 2개의 성분(Fa. Fc)를 y축에 배치하고, 장축 방향의 초점으로부터 벗어난 거리(λc) 또는 단축 방향의 초점으로부터 벗어난 거리(λa)를 x축에 배치하여, 기울기를 추출하면 트랩된 제1 비구형 입자의 탄성계수(κ_t)를 단축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,a}$) 및 장축 방향의 탄성계수($\kappa_{t,c}$)를 도출할 수 있다.

[0180] 도 6a 및 도 6b는 트랩된 제1 비구형 입자의 중심과 기준점이 이루는 각도(Θ') 및 트랩된 제1 비구형 입자가 이루는 각도(ϕ_1)에 따른 트랩된 제1 비구형 입자의 위치를 도시한 그래프이다.

[0181] 도 6a는 $\phi_1 - \Theta' > 0$인 경우이고, 도 6b는 $\phi_1 - \Theta' < 0$인 경우이다.

[0182] 도 6a 및 도 6b를 참조하면, 트랩된 제1 비구형 입자의 중심과 기준점이 이루는 각도(Θ') 및 트랩된 제1 비구형 입자가 이루는 각도(ϕ_1)에 따라 트랩된 제1 비구형 입자의 단축 방향의 모세관력(Fa) 및 장축 방향의 모세관력(Fc)의 배향이 변경되는 것을 알 수 있다.

[0184] 도 7a 내지 도 7e는 모세관력을 이용하여 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자의 거리별 가장 안정한 배양을 도출하는 그래프를 도시한 것이다.

[0185] 도 7a를 참조하면, 각 거리에서 인력(attraction)이 최대인 점(Fnet의 최소값, F<0)을 선택하여, 그때의 각 입자의 배향을 확인할 수 있다.

[0186] 도 7b를 참조하면, 인력(attraction)에서 도 7a인 점들의 두 각의 합이, 타원형(ellipsoid)의 비구형 입자인 경우, 팁-팁(tip-tip) 또는 사이드-사이드(side-side)에서 인력(attraction)이 나타난다는 것을 알 수 있다.

[0187] 도 7c를 참조하면, 각 거리에서 척력(repulsion)이 최대인 점(Fnet의 최대값, F>0)을 선택하여, 그때의 각 입자의 배향을 확인할 수 있다.

[0188] 도 7d를 참조하면, 척력(repulsion)에서 도 7c인 점들의 두 각의 합이, 타원형(ellipsoid)의 비구형 입자인 경우, 팁-사이드(tip-side)에서 척력(repulsion)이 나타나는 것을 알 수 있다.

[0189] 도 7e를 참조하면, 각 거리별 힘의 최대값 과 최소값을 플롯팅(plot)한 것으로 거리가 가까워짐에 따라 인력(attraction)과 척력(repulsion)이 모두 증가하는 것을 알 수 있다.

[0190] 보다 구체적으로, 도 7a 및 도 7c는 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자의 거리 별 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자의 배향(각도)를 나타내고, 도 7b 및 도 7d는 거리 별 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자의 배향(각도)의 합을 나타낸다.

[0191] 인력(Attraction)이 0보다 작은 경우에는 도 7a 및 도 7b에서와 같이 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자의 거리별로 모세관력이 가장 작은 것을 추출하고, 척력(repulsion)이 0보다 큰 경우에는 도 7c 및 도 7d에서와 같이 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자의 거리별로 모세관력이 가장 큰 것을 추출할 수 있다.

[0192] 도 7e를 참조하면, 각 거리별, 인력(Att) 및 척력(Rep)을 확인할 수 있다.

[0193] 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자 (예; 타원(Ellipsoid) 입자)의 인력(Attraction)은 하기 [식 12]으로 나타낼 수 있다.

[0194] [식 12]

[0195] $$\varphi_1' + \varphi_2' = n\pi$$

[0196] n=0 또는 1 이상의 자연수이다.

[0197] 반면, 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자(예; 타원(Ellipsoid) 입자)의 척력(repulsion)은 하기 [식 13]를 나타낼 수 있다.

[0198] [식 13]

[0199] $$\varphi_1' + \varphi_2' = \frac{2n+1}{2}\pi$$

[0200] n=0 또는 1 이상의 자연수이다.

[0202] 도 8a 및 도 8b는 각 배향에서의 상호 작용을 나타내는 도표를 도시한 것이다.

[0203] 도 8a 및 도 8b를 참조하면, 거리와 배향에 따라서 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자 간 상호작용에 대한 성질을 한눈에 볼 수 있는 도표는 제1 비구형 입자 (P1)를 중심에 두고, 제1 비구형 입자 (P1)에서 떨어진 거리에 따라 모세관력을 색에 따라 힘(force)을 색깔로 플롯(plot)할 수 있다. 이 때, 붉은색은 척력을 의미하고, 파란색은 인력을 의미한다.

[0204] 각 배향에서의 상호 작용을 나타내는 도표에서 고정된 제1 비구형 입자 (P1)는 ϕ_1만큼 회전한 후 고정되고, 이동하는 제2 비구형 입자(P2)는 ϕ_2에 따라 비구형 입자를 돌려가며 배향할 수 있다.

[0205] 도 8a를 참조하면, 초록색 입자는 고정하고(각과 위치 모두 고정), 붉은 영역에 입자가 위치하고 있을 때, 어떠한 상호 작용(interaction)을 하는지(인력 또는 척력)와 그 크기를 한눈에 확인할 수 있다.

[0206] 도 8b를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 비구형 입자의 유변학적 측정 방법을 이용하면 제1 비구형 입자의 각도에 따른 결과를 확인할 수 있다.

[0208] 도 9a 내지 도 9c는 광학 레이저 트위저를 이용하여 위치는 고정되고 각도는 변화되도록 트랩된 제1 비구형 입자 및 위치 및 각도가 모두 변화되도록 트랩된 제2 비구형 입자의 움직임을 도시한 이미지이다.

[0209] 도 9b는 스윙 모드(swing mode)를 도시한 것이고, 도 9c는 기어-회전 모드(gear-rotating mode)를 도시한 것이다.

[0210] 도 9a를 참조하면, 제1 비구형 입자(왼쪽 입자)는 1개의 트랩을 이용해 위치만 고정하고, 제2 비구형 입자(오른쪽 입자)는 위치와 각도 모두 고정하였다. 이후 제2 비구형 입자(오른쪽 입자)의 위치와 각을 바꾸어가며 제1 비구형 입자(왼쪽 입자)의 응답각을 측정하였다.

[0211] 도 9b를 참조하면, 스윙 모드(swing mode)에서 거리별 비구형 입자 이미지의 중첩, 거리가 가까워짐에 따라 스윙(swing)하는 폭이 커지는 것을 알 수 있다.

[0212] 도 9c를 참조하면, 기어-회전 모드에서 거리별 비구형 입자 이미지의 중첩, 거리가 가까워짐에 따라 제2 비구형 입자(오른쪽 입자)와 비슷한 형상이 나타나는 것을 알 수 있다.

[0213] 따라서. 도 9a 내지 도 9c를 참조하면, 제1 비구형 입자와 제2 비구형 입자의 거리가 가까워지면서 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자가 회전하여 각도 및 위치가 변화되는 것을 알 수 있다.

[0215] 도 10은 광학 레이저 트위저를 이용하여 위치는 고정되고 각도는 변화되도록 트랩된 제1 비구형 입자 및 위치 및 각도가 모두 변화되도록 트랩된 제2 비구형 입자의 기어-회전 모드를 구체화한 이미지이다.

[0216] 도 10을 참조하면, 만약 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자가 균일한 상호작용을 가진다면, 모든 팁-팁(빨간 상자)은 동일한 힘의 크기를 가지고, 모든 사이드-사이드 또한 동일한 힘의 크기를 가질 수 있다.

[0218] 도 11a는 광학 레이저 트위저를 이용하여 위치는 고정되고 각도는 변화되도록 트랩된 제1 비구형 입자 및 위치 및 각도가 모두 변화되도록 트랩된 제2 비구형 입자의 스윙 모드에서의 모세관력 상호작용을 도시한 그래프이고, 도 11b는 및 도 11c는 기어-회전 모드에서의 모세관력 상호작용을 도시한 그래프이다.

[0219] 도 11a를 참조하면, 스윙 모드(Swing mode)에서 제2 비구형 입자(오른쪽 입자)의 입력각(phi2, 가로축)에 따라 제1 비구형 입자(왼쪽 입자)의 응답각(phi1, 세로축)이 변화되는 것을 정량적으로 확인할 수 있고, 거리가 가까워짐에 따라(빨간색->보라색) 진폭이 커지는 것을 알 수 있다.

[0220] 도 11b를 참조하면, 기어-회전 모드(Gear-rotating mode)에서 제2 비구형 입자(오른쪽 입자)의 입력각(phi2, 가로축)에 따라서 제1 비구형 입자(왼쪽 입자)의 응답각(phi1, 세로축)이 변화되는 것을 정량적으로 확인할 수 있고, 만약 비구형 입자의 상호작용이 동일하다면(homogeneous quadrupolar interaction) 선형으로 나타나는 것을 알 수 있다.

[0221] 도 11c를 참조하면, 기어-회전 모드(Gear-rotating mode)에서 제2 비구형 입자(오른쪽 입자)의 입력각(phi2, 가로축)에 따라서 제1 비구형 입자(왼쪽 입자)의 응답각(phi1'+phi2, 세로축)으로 정규화(normalize)하면 도 11a에 도시한 바와 같이 진폭, 주기를 확인할 수 있고, 거리가 가까워짐에 따라(빨간색->보라색)진폭이 줄어드는 것을 알 수 있다.

[0223] 도 12a 및 도 12b는 광학 레이저 트위저를 이용하여 위치는 고정되고 각도는 변화되도록 트랩된 제1 비구형 입자 및 위치 및 각도가 모두 변화되도록 트랩된 제2 비구형 입자의 모세관 상호작용의 회전 측정을 도시한 그래프이고, 도 12c는 각도에 따른 광학 레이저 트위저를 이용하여 위치는 고정되고 각도는 변화되도록 트랩된 제1 비구형 입자 및 위치 및 각도가 모두 변화되도록 트랩된 제2 비구형 입자의 모세관 상호작용의 회전 측정을 도시한 이미지이다.

[0224] 도 12a를 참조하면, 거리에 따라 제1 비구형 입자(왼쪽 입자)의 중심이 이동한 궤적을 확인할 수 있고, 이때, 빨간색 선은 제2 비구형 입자(오른쪽 입자)가 0° 일 때이고, 파란색 선은 제2 비구형 입자(오른쪽 입자)가 180° 이며, 초록색 선은 제2 비구형 입자(오른쪽 입자)가 90° 일 때이며, 보라색 선은 제2 비구형 입자(오른쪽 입자)가 270° 일 때이다.

[0225] 도 12b를 참조하면, 도 12a의 결과를 3차원이 아닌 한 평면에 나타낸 것이다.

[0226] 도 12c를 참조하면, 기어-회전 모드(gear-rotating mode)에서 거리별, 제2 비구형 입자(오른쪽 입자)의 각도별(0° , 90° , 180° , 270°)에서 비구형 입자의 배향상태를 알 수 있다.

[0228] 도 13a은 광학 레이저 트위저를 이용하여 위치 및 각도가 모두 고정되도록 트랩된 제1 비구형 입자 및 위치 및 각도가 모두 변화되도록 트랩된 제2 비구형 입자의 움직임을 도시한 이미지이다.

[0229] 도 13b 내지 도 13d는 광학 레이저 트위저를 이용하여 위치 및 각도가 모두 고정되도록 트랩된 제1 비구형 입자 및 위치 및 각도가 모두 변화되도록 트랩된 제2 비구형 입자의 회전 측정을 도시한 그래프이다.

[0230] 도 13b를 참조하면, 각 거리에서 인력(attraction)이 최대인 점(Fnet의 최소값, F<0)을 선택하여, 그때의 각 입자의 배향을 확인할 수 있다.

[0231] 도 13c를 참조하면, 인력(attraction)에서 도 13a인 점들의 두 각의 합이, 타원형(ellipsoid)의 비구형 입자인 경우, 팁-팁(tip-tip) 또는 사이드-사이드(side-side)에서 인력(attraction)이 나타난다는 것을 알 수 있다.

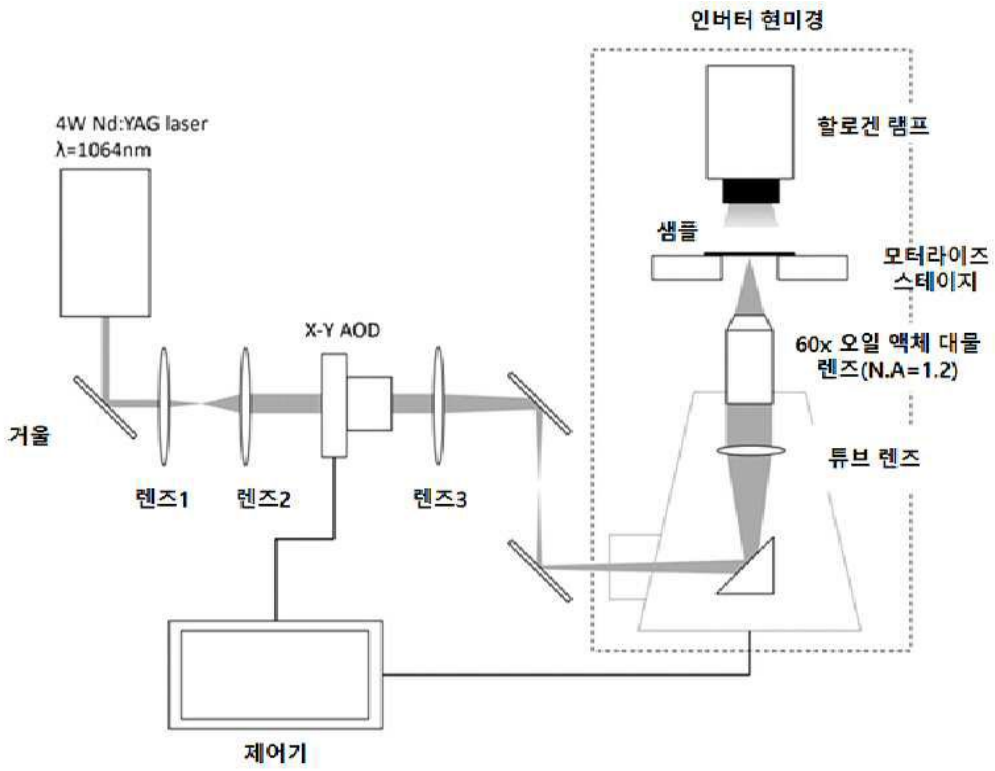
[0232] 도 13d를 참조하면, 각 거리별 힘의 최대값 과 최소값을 플롯팅(plot)한 것으로 거리가 가까워짐에 따라 인력(attraction)과 척력(repulsion)이 모두 증가하는 것을 알 수 있다.

[0233] 따라서, 도 13a 내지 13d를 참조하면, 제1 비구형 입자와 제2 비구형 입자의 거리가 가까워지면서 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자가 회전하여 각도 및 위치가 변화되는 것을 알 수 있고, 제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자가 접근 시 안정한 형상의 모세관력을 나타내는 것을 알 수 있다.

[0235] 한편, 본 명세서와 도면에 개시된 본 발명의 실시 예들은 이해를 돕기 위해 특정 예를 제시한 것에 지나지 않으며, 본 발명의 범위를 한정하고자 하는 것은 아니다. 여기에 개시된 실시 예들 이외에도 본 발명의 기술적 사상에 바탕을 둔 다른 변형 예들이 실시 가능하다는 것은, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 자명한 것이다.

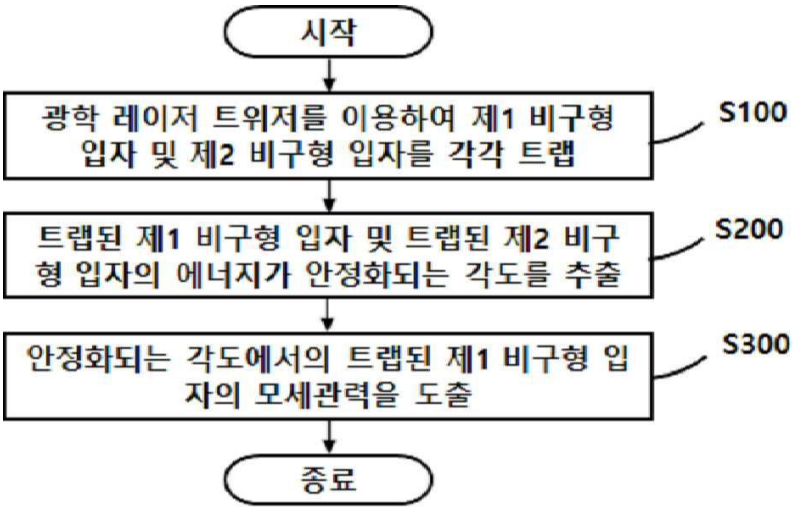
도면

도면1a

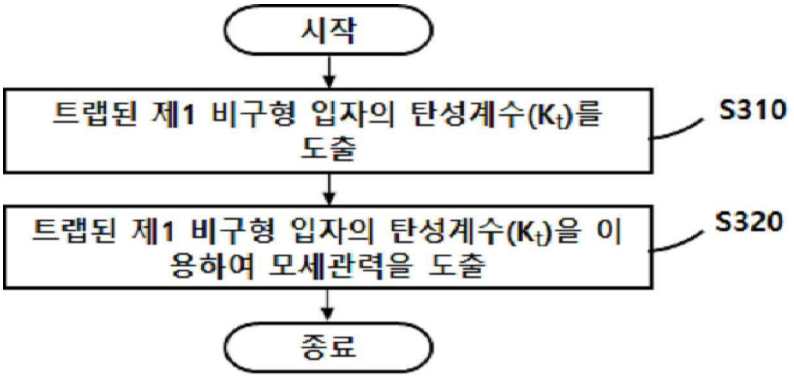


도면1b

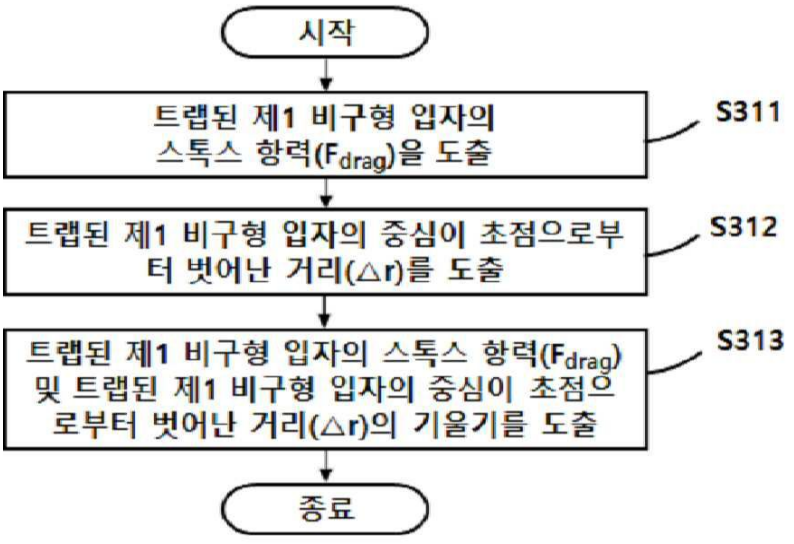
도면2a



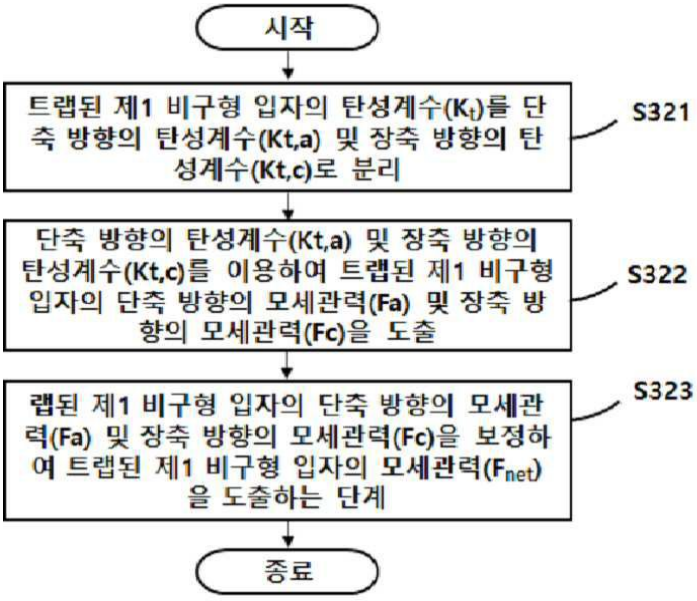
도면2b



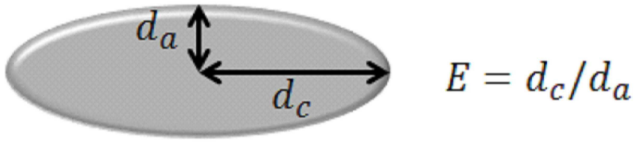
도면2c



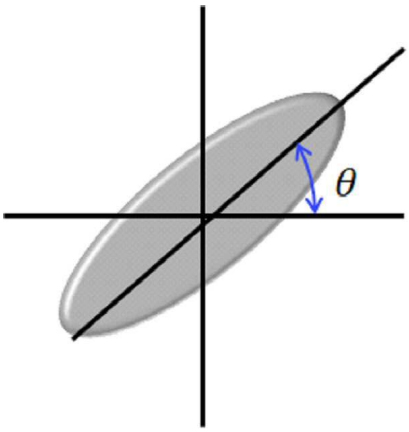
도면2d



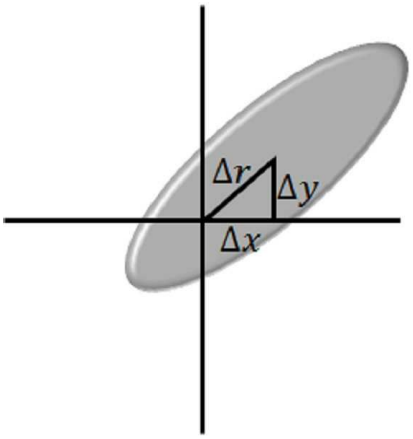
도면3a



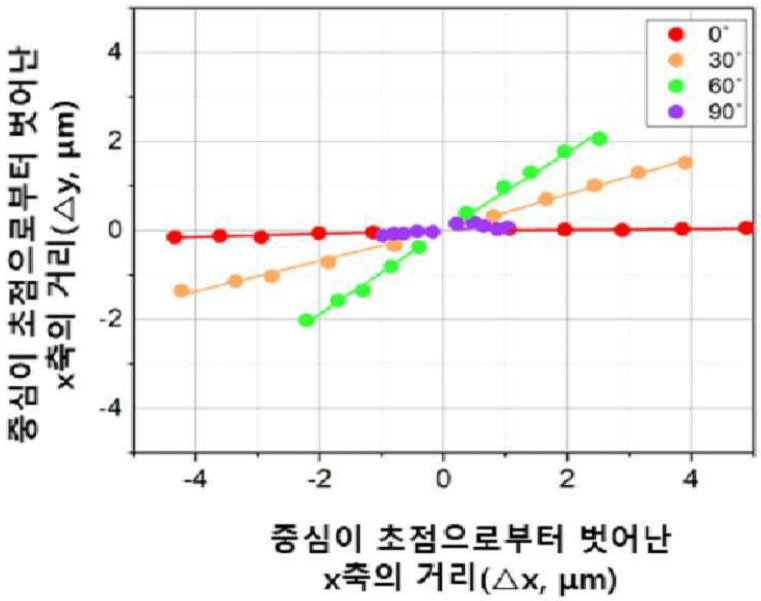
도면3b



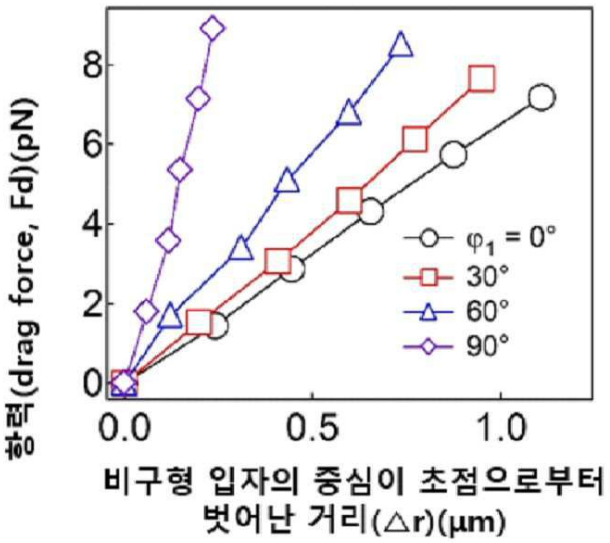
도면3c



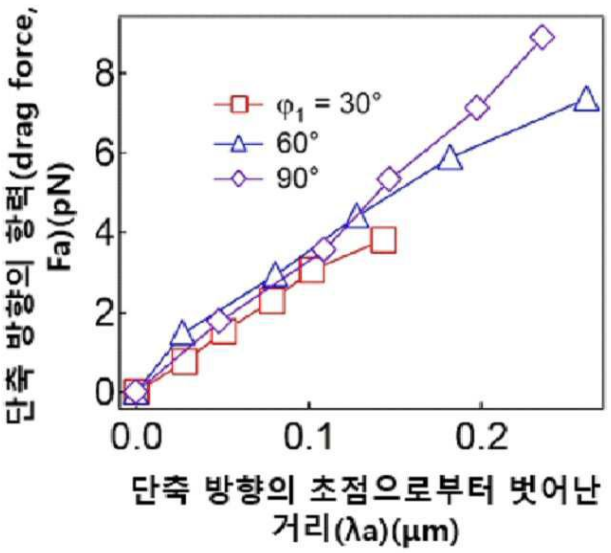
도면4a



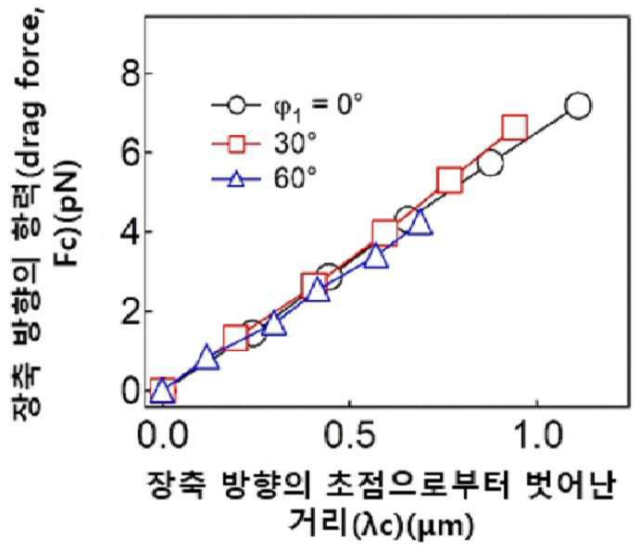
도면4b



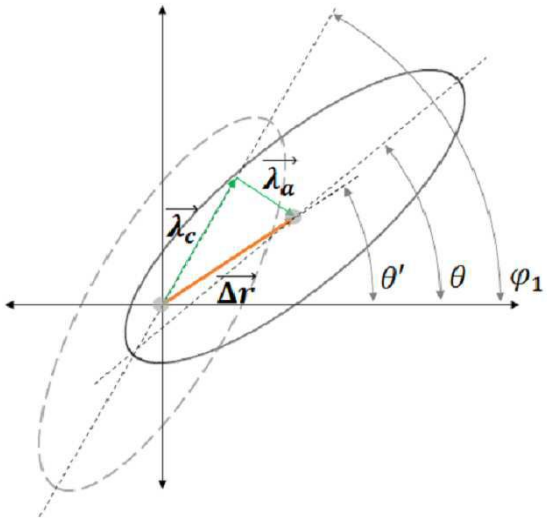
도면4c


단축 방향의 항력(drag force, Fa)(pN)
8
6
4
2
0
0.0
0.1
0.2
φ1 = 30°
60°
90°
단축 방향의 초점으로부터 벗어난 거리(λa)(μm)

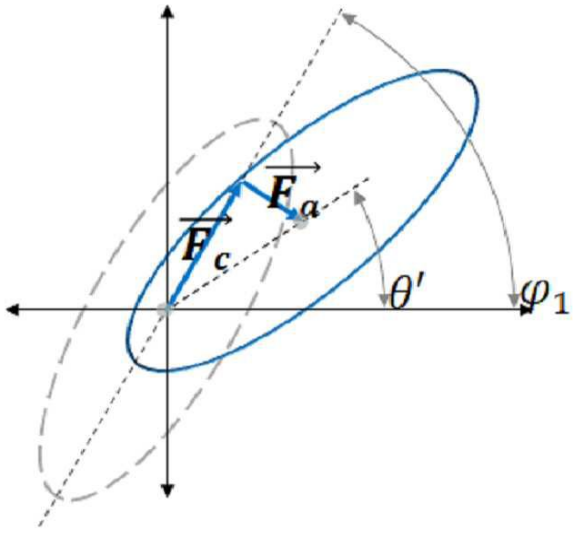
도면4d


장축 방향의 항력(drag force, Fc)(pN)
8
6
4
2
0
0.0
0.5
1.0
φ1 = 0°
30°
60°
장축 방향의 초점으로부터 벗어난 거리(λc)(μm)

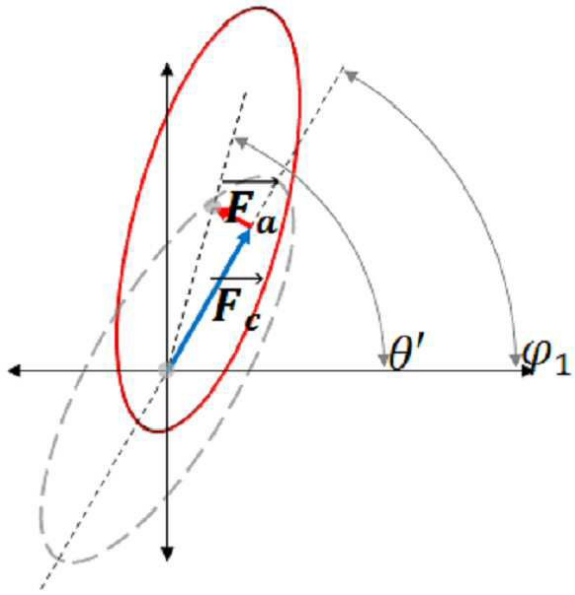
도면5


$\vec{\lambda_a}$
$\vec{\lambda_c}$
$\vec{\Delta r}$
θ'
θ
φ_1

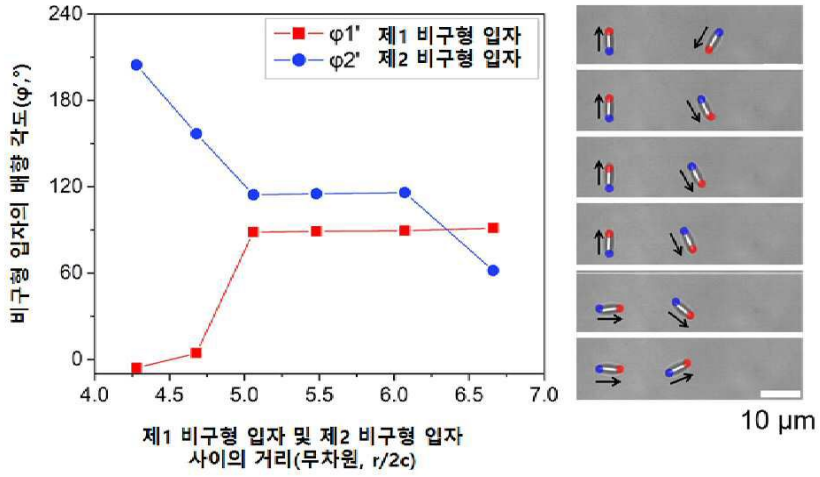
도면6a


$\vec{F_a}$
$\vec{F_c}$
θ'
φ_1

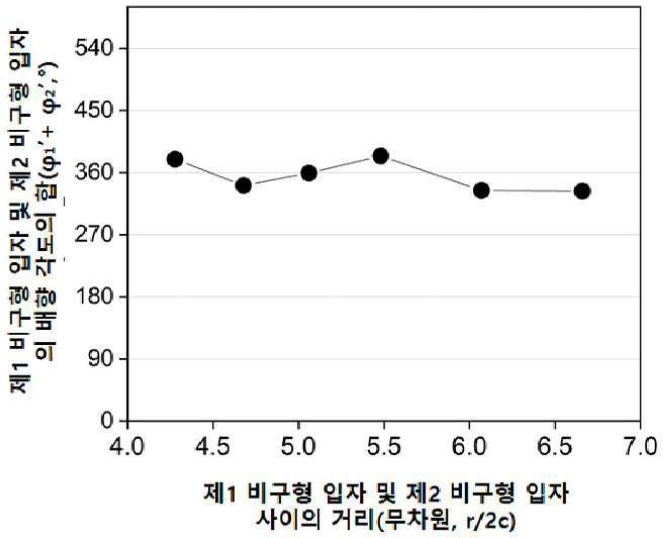
도면6b


$\overrightarrow{F_a}$
$\overrightarrow{F_c}$
θ'
φ_1

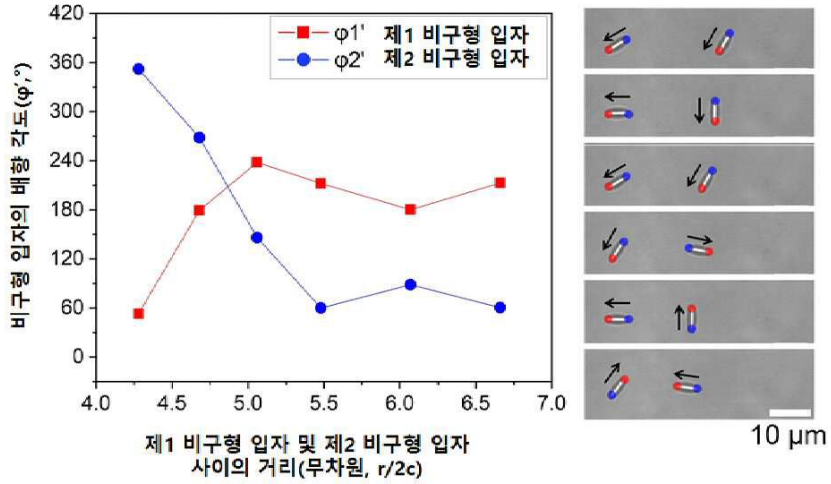
도면7a


φ1' 제1 비구형 입자
φ2' 제2 비구형 입자
비구형 입자의 배향 각도(φ',°)
240
180
120
60
0
4.0
4.5
5.0
5.5
6.0
6.5
7.0
제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자
사이의 거리(무차원, r/2c)
10 μm

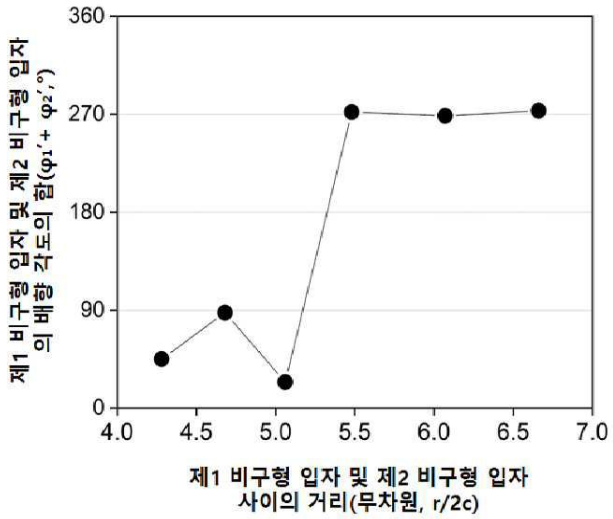
도면7b


제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자의 배향 각도의 합(φ1'+ φ2', °)
540
450
360
270
180
90
0
4.0
4.5
5.0
5.5
6.0
6.5
7.0
제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자 사이의 거리(무차원, r/2c)

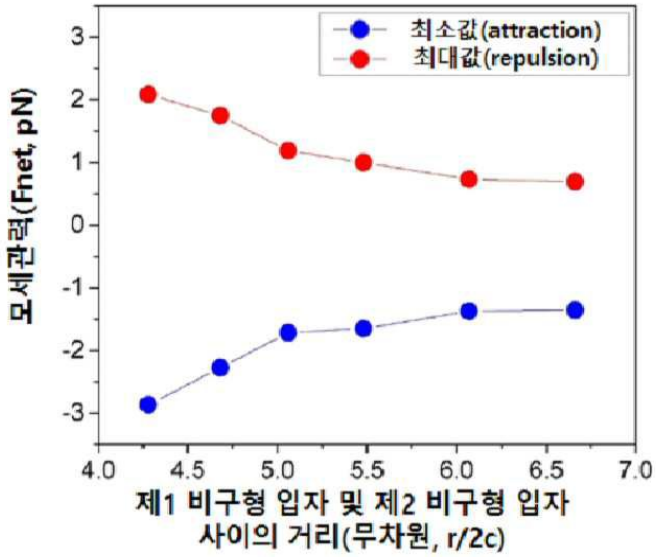
도면7c


비구형 입자의 배향 각도(φ', °)
420
360
300
240
180
120
60
0
φ1' 제1 비구형 입자
φ2' 제2 비구형 입자
4.0
4.5
5.0
5.5
6.0
6.5
7.0
제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자 사이의 거리(무차원, r/2c)
10 μm

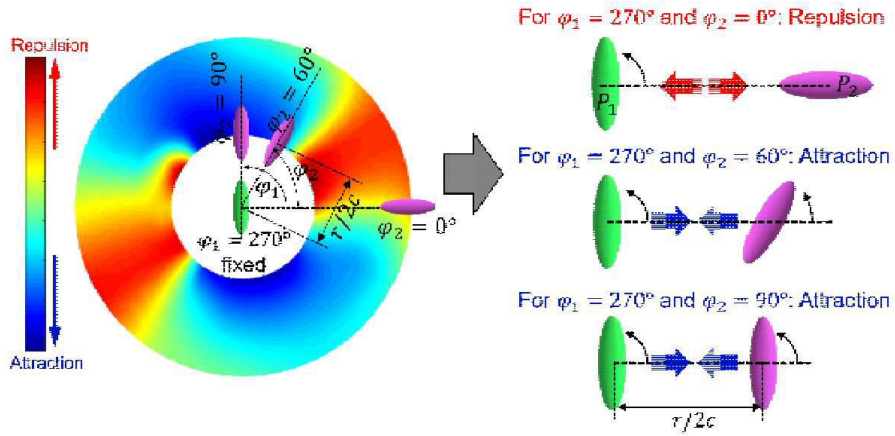
도면7d


360
270
180
90
0
4.0
4.5
5.0
5.5
6.0
6.5
7.0
제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자의 배향 각도의 합(φ1′+ φ2′,°)
제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자 사이의 거리(무차원, r/2c)

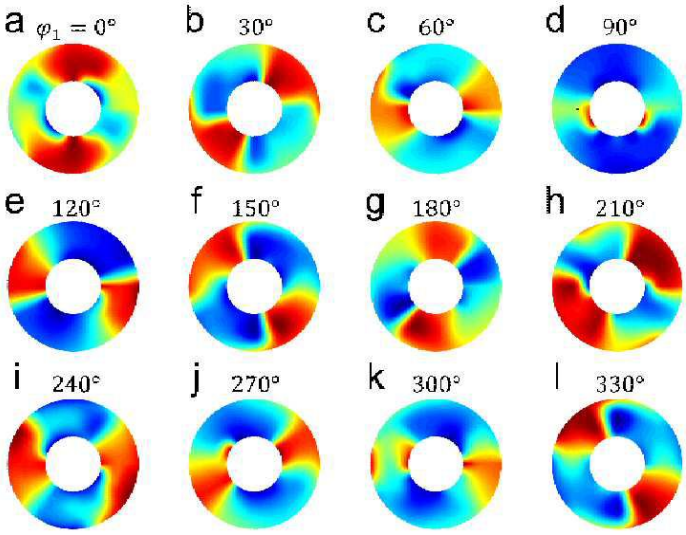
도면7e


최소값(attraction)
최대값(repulsion)
3
2
1
0
-1
-2
-3
4.0
4.5
5.0
5.5
6.0
6.5
7.0
모세관력(Fnet, pN)
제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자 사이의 거리(무차원, r/2c)

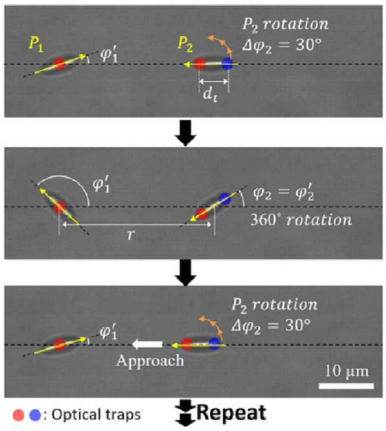
도면8a



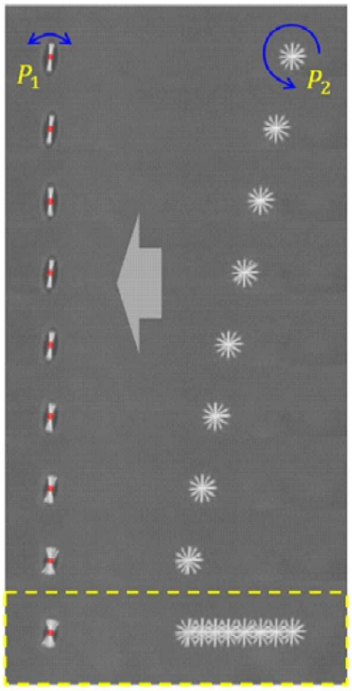
도면8b



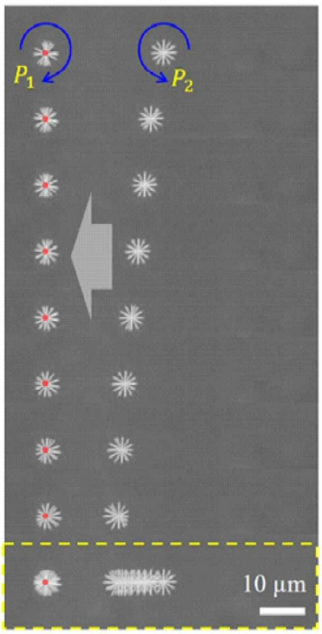
도면9a



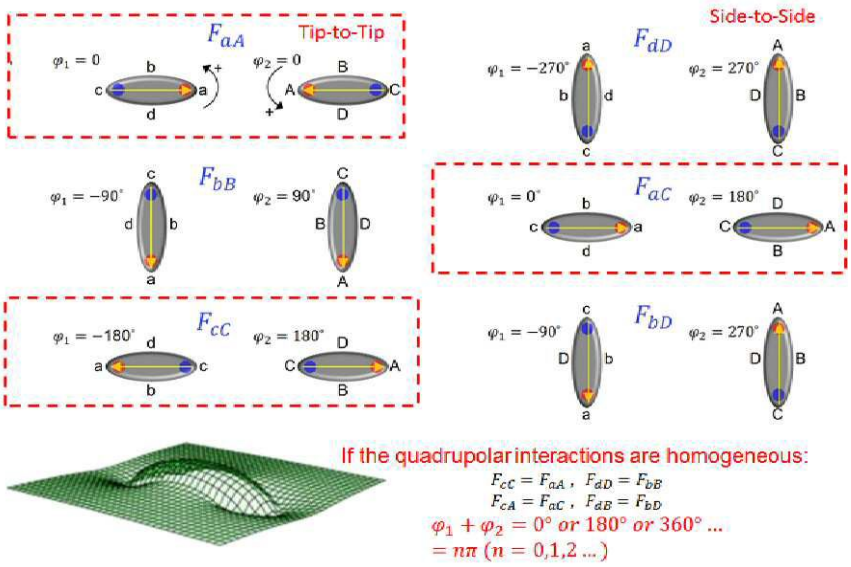
도면9b



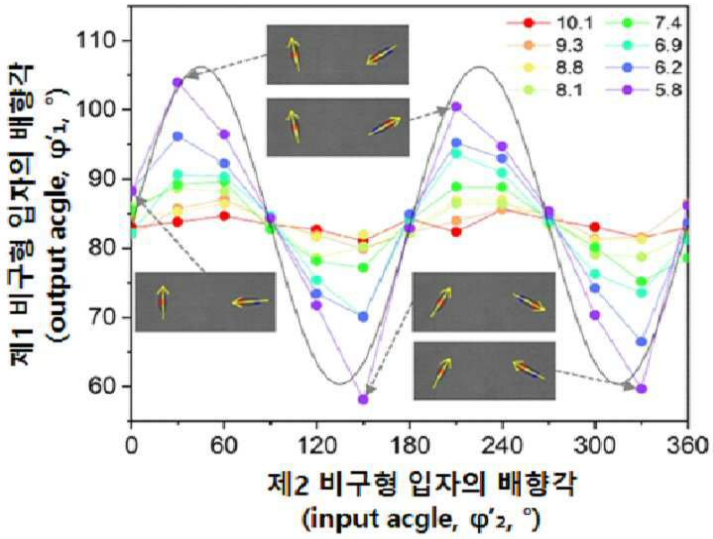
도면9c



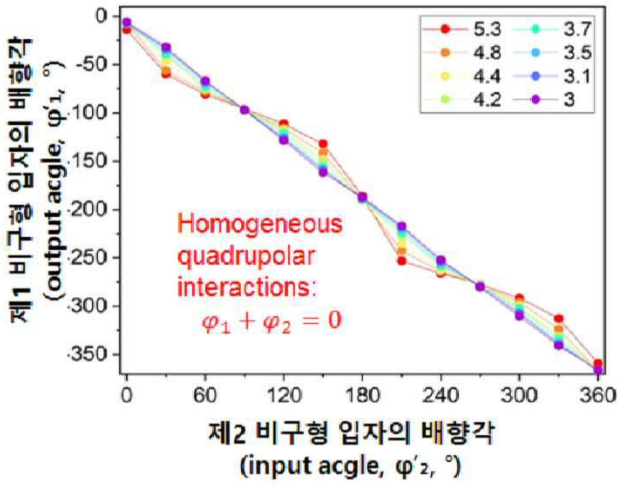
도면10


F_{aA}
Tip-to-Tip
$\varphi_1 = 0$
$\varphi_2 = 0$
Side-to-Side
F_{dD}
$\varphi_1 = -270°$
$\varphi_2 = 270°$
F_{bB}
$\varphi_1 = -90°$
$\varphi_2 = 90°$
F_{aC}
$\varphi_1 = 0°$
$\varphi_2 = 180°$
F_{cC}
$\varphi_1 = -180°$
$\varphi_2 = 180°$
F_{bD}
$\varphi_1 = -90°$
$\varphi_2 = 270°$
If the quadrupolar interactions are homogeneous:
$F_{cC} = F_{aA}$, $F_{dD} = F_{bB}$
$F_{cA} = F_{aC}$, $F_{dB} = F_{bD}$
$\varphi_1 + \varphi_2 = 0°$ or $180°$ or $360°$ ...
$= n\pi$ $(n = 0,1,2 \ldots)$

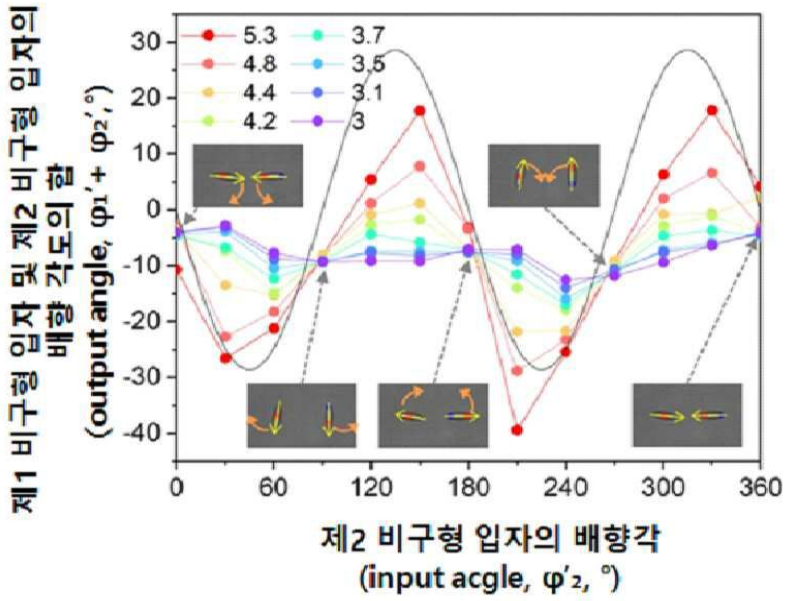
도면11a


10.1
9.3
8.8
8.1
7.4
6.9
6.2
5.8
제1 비구형 입자의 배향각
(output acgle, φ'1, °)
제2 비구형 입자의 배향각
(input acgle, φ'2, °)
110
100
90
80
70
60
0
60
120
180
240
300
360

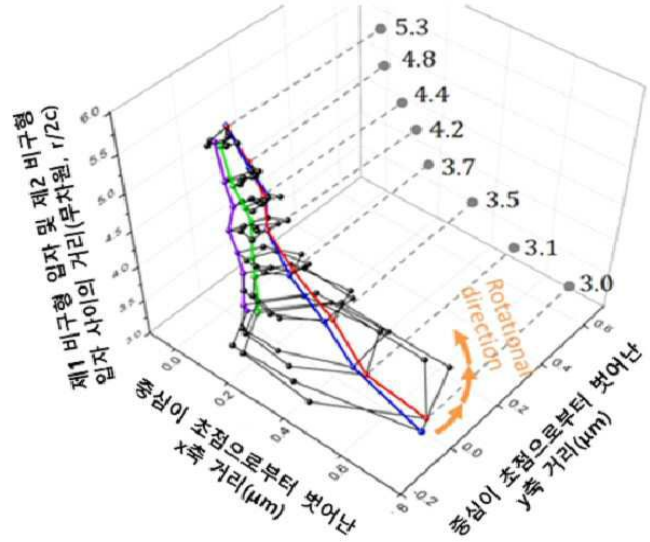
도면11b


제1 비구형 입자의 배향각
(output acgle, φ'1, °)
0
-50
-100
-150
-200
-250
-300
-350
5.3
4.8
4.4
4.2
3.7
3.5
3.1
3
Homogeneous
quadrupolar
interactions:
$\varphi_1 + \varphi_2 = 0$
0
60
120
180
240
300
360
제2 비구형 입자의 배향각
(input acgle, φ'2, °)

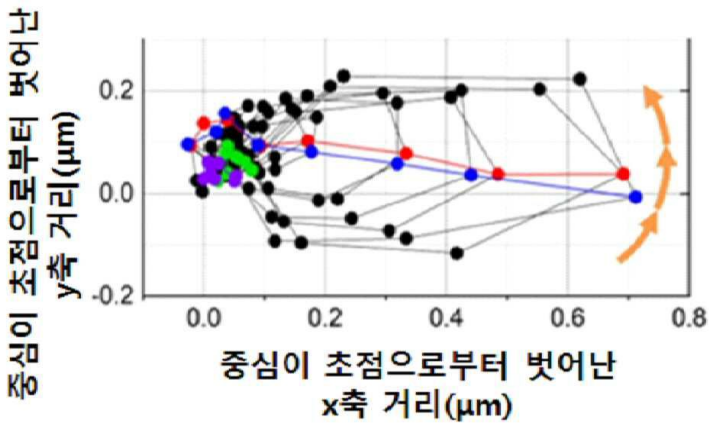
도면11c


제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자의
배향 각도의 합
(output angle, φ1' + φ2', °)
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
5.3
4.8
4.4
4.2
3.7
3.5
3.1
3
0
60
120
180
240
300
360
제2 비구형 입자의 배향각
(input acgle, φ'2, °)

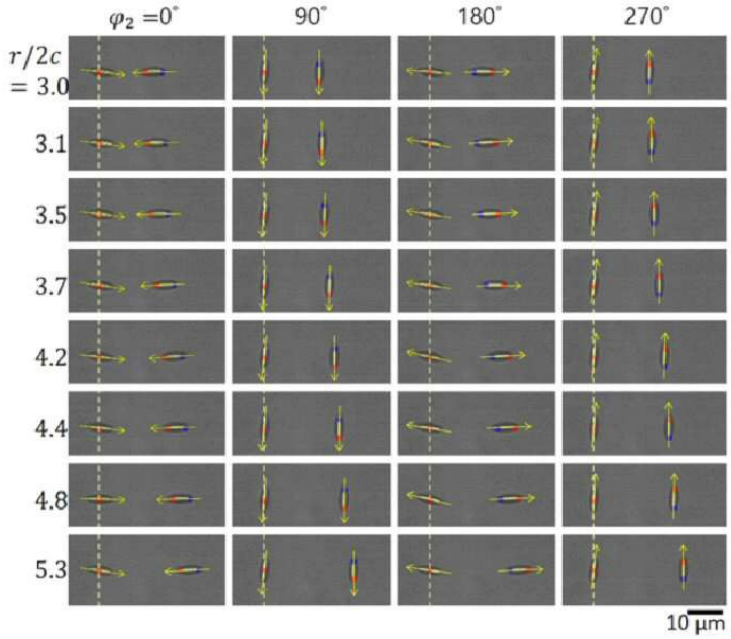
도면12a


5.3
4.8
4.4
4.2
3.7
3.5
3.1
3.0
Rotational direction
제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자 사이의 거리(무차원, r/2c)
중심이 초점으로부터 벗어난 x축 거리(μm)
중심이 초점으로부터 벗어난 y축 거리(μm)

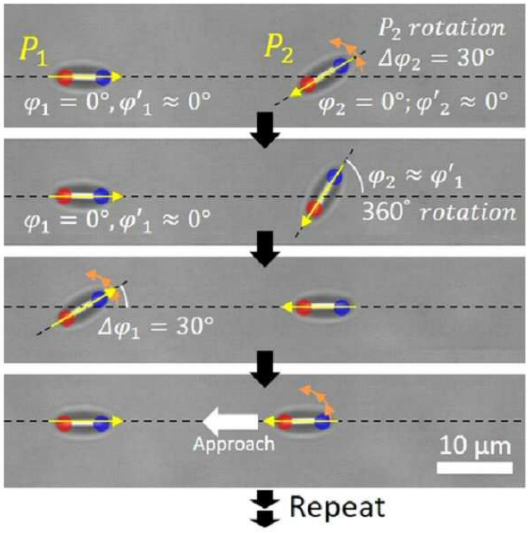
도면12b


중심이 초점으로부터 벗어난 y축 거리(μm)
0.2
0.0
-0.2
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
중심이 초점으로부터 벗어난 x축 거리(μm)

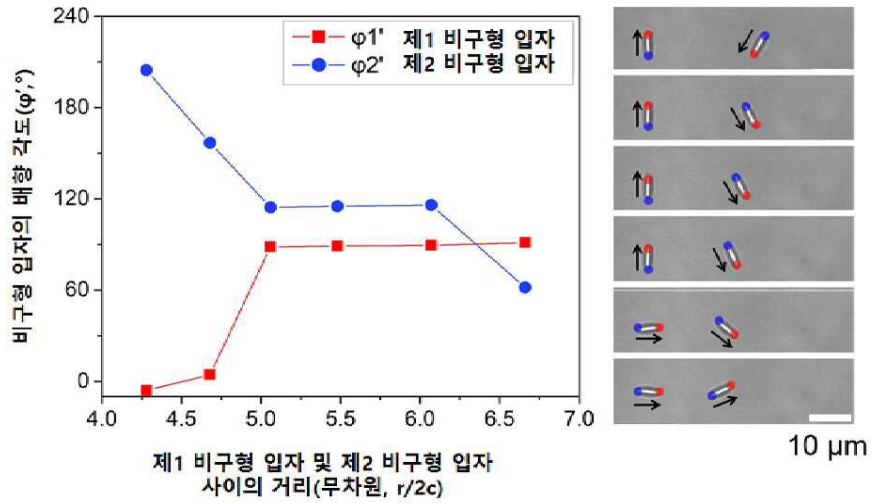
도면12c


φ2 =0°
90°
180°
270°
r/2c = 3.0
3.1
3.5
3.7
4.2
4.4
4.8
5.3
10 μm

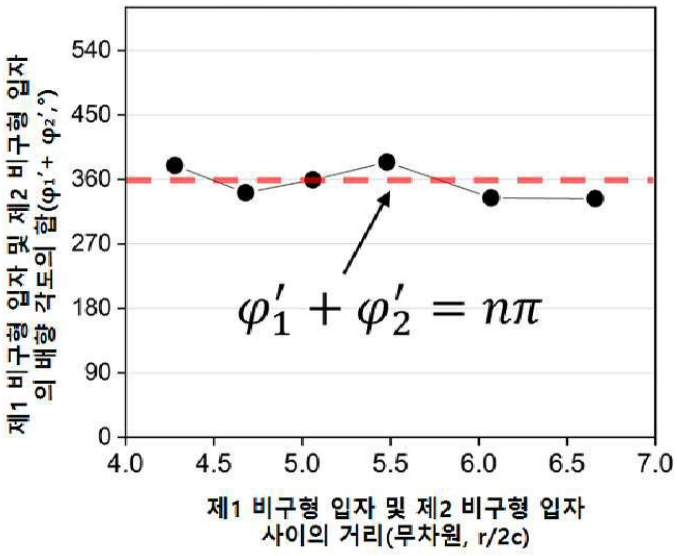
도면13a


P1
P2
P2 rotation
Δφ2 = 30°
φ1 = 0°, φ'1 ≈ 0°
φ2 = 0°; φ'2 ≈ 0°
φ2 ≈ φ'1
360° rotation
φ1 = 0°, φ'1 ≈ 0°
Δφ1 = 30°
Approach
10 μm
Repeat

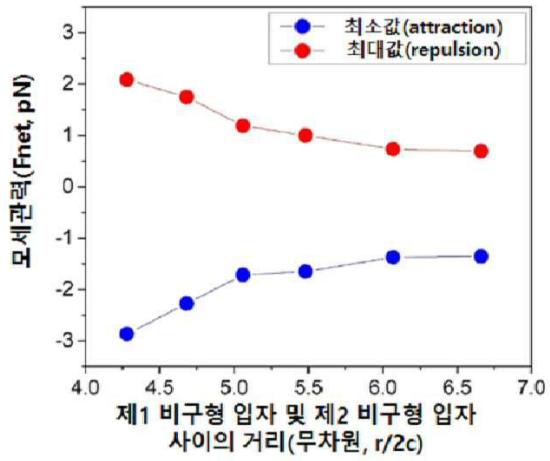
도면13b


φ1' 제1 비구형 입자
φ2' 제2 비구형 입자
비구형 입자의 배향 각도(φ',°)
240
180
120
60
0
4.0
4.5
5.0
5.5
6.0
6.5
7.0
제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자
사이의 거리(무차원, r/2c)
10 μm

도면13c


제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자의 배향 각도의 합(φ1' + φ2',°)
540
450
360
270
180
90
0
4.0
4.5
5.0
5.5
6.0
6.5
7.0
$\varphi_1' + \varphi_2' = n\pi$
제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자
사이의 거리(무차원, r/2c)

도면13d


최소값(attraction)
최대값(repulsion)
모세관력(Fnet, pN)
3
2
1
0
-1
-2
-3
4.0
4.5
5.0
5.5
6.0
6.5
7.0
제1 비구형 입자 및 제2 비구형 입자
사이의 거리(무차원, r/2c)