<학술논문> DOI https://doi.org/10.3795/KSME-B.2017.41.7.455 ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

점성유체에 분산된 타원형 야누스 입자의 자성 상호작용에 관한 직접수치해석§

김 희 은* · 강 태 곤*†
* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Direct Simulation of the Magnetic Interaction of Elliptic Janus Particles Suspended in a Viscous Fluid

Hei Eun Kim* and Tae Gon Kang*†
* School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace Univ.

(Received February 7, 2017 ; Revised March 14, 2017; Accepted April 11, 2017)

Key Words: Janus Magnetic Particle(야누스 자성입자), Magnetic Interaction(자성 상호작용), Direct Simulation (직접수치해석), Magnetic Field(자기장)

초록: 외부자기장에 의한 타원형 야누스 자성입자 사이의 자성 상호작용을 직접수치해석을 사용하여 분석하였다. 유한요소법에 기초한 가상영역법을 사용하여 입자계 유동해석을 수행하였고, 자기장 문제에서는 자성 포텐셜에 대한 지배방정식을 입자와 유체를 포함하는 전체영역에 대하여 풀어 자기장을 구하였다. 이 때 구해진 자기장으로부터 구한 맥스웰 응력을 사용하여 개별 입자에 작용하는 자기력이 계산된다. 입자의 운동과 최종적인 조립구조는 입자의 형상비, 개별 입자의 배향, 입자의 초기 분포에 크게 영향을 받는 것이 확인되었다. 또한 입자의 배향은 입자 주위의 유체 유동에도 영향을 주었다. 외부자기장에 의한 타원형 야누스 입자의 최종 조립구조는 앞서 언급한 인자들에 의해서 영향을 받은 것을 수치해석을 통해 확인할 수 있었다.

Abstract: The magnetic interaction between elliptic Janus magnetic particles are investigated using a direct simulation method. Each particle is a one-to-one mixture of paramagnetic and nonmagnetic materials. The fluid is assumed to be incompressible Newtonian and nonmagnetic. A uniform magnetic field is applied externally in a horizontal direction. A finite-element-based fictitious domain method is employed to solve the magnetic particulate flow in the creeping flow regime. In the magnetic problem, the magnetic field in the entire domain, including the particles and the fluid, is obtained by solving the governing equation for the magnetic potential. Then, the magnetic forces acting on the particles are calculated via a Maxwell stress tensor formulation. In a single particle problem, it is found that the orientation angle at equilibrium is affected by the aspect ratio of the particle. As for the two-particle interaction, the dynamics and the final conformation of the particles are significantly influenced by the aspect ratio, the orientation, and the spatial positions of the particles. For the given positions of the particles, the fluid flow is also influenced by the orientation of each particle. The self-assembly structure of the particles is not a fixed one, but it varies with the above-mentioned factors.

- 기호설명 -

Γ_i : 채널의 경계면
Ω : 입자와 유체를 포함한 전체 영역
χ_p : 입자의 자화율

§ 이 논문은 대한기계학회 2016년도 학술대회(2016. 12.14.-16., 강원랜드 컨벤션센터) 발표논문임.
† Corresponding Author, tgkang@kau.ac.kr
ⓒ 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

α : 입자의 배향각
β : 유효 분극 계수
ϕ : 자기 포텐셜
μ_0 : 진공에서 투자율
μ_p : 입자의 투자율
η : 유체의 점도
θ : 자기장과 입자를 연결한 선이 이루는 각도
θ_{eq} : 평형상태의 θ
$\boldsymbol{\sigma}$: 코시 응력
$\boldsymbol{\omega}_i$: 입자의 회전 각속도
AR: 타원형 입자의 형상비
$\boldsymbol{H}$: 자기장
H_0 : 외부자기장의 크기
L : 정사각형 채널에서 한 변의 길이
$\boldsymbol{T}_m$: 맥스웰 응력
$\boldsymbol{U}_i$: 입자의 속도
X : 타원 입자 중심의 x좌표
Y : 타원 입자 중심의 y좌표
$\boldsymbol{X}_i$: 입자 중심의 위치 벡터
a : 타원형 입자의 수평방향 길이
b : 타원형 입자의 수직방향 길이
d : 두 입자 사이의 거리
p : 압력
r_e : 입자의 유효 반지름
t : 시간
$\boldsymbol{u}$: 유체의 속도
$\boldsymbol{x}$: 입자 표면 위 한 점의 위치벡터

1. 서 론

미세유체역학(microfluidics) 분야에서 다양한 종류의 자성입자를 사용한 바이오센서(magnetic bead-based biosensor)가 화학, 생물, 및 의료 분야에서 각광을 받고 있으며, 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다.[1~4] 이러한 초소형 분석시스템은 다양한 작동 유체를 이송하는 마이크로채널(microchannel), 두 가지 이상의 유체를 혼합하여 화학 또는 생물학적 반응을 촉진시키는 미세혼합기(micromixer), 입자 이송장치, 반응을 검출하는 검출기(detector) 등으로 이루어져 있다.

유체 내부에 포함된 0.1~10 μm 크기의 미세한 자성입자를 능동적으로 제어하면 순수한 유체가 가지지 못하는 특성을 구현할 수 있다고 알려져 있다.[4] 이러한 자성 유체에 외부에서 자기장을 인가하면 자화된 입자들이 사슬(chain)이나 클러스터(cluster)와 같은 응집구조를 형성하게 된다. 이러한 미세구조는 주위 유체의 유동에 영향을 주고, 또한 유동에 의해서 미세구조가 변하게 된다. 특히 기능성 고분자 기반의 자성입자(functional polymer-based magnetic particle)[5]를 이용한 바이오센서는 의료장비 제조업체에서 상업화를 위한 활발한 응용 연구가 진행되고 있다. 기능성 자성 입자에 대한 초기 연구에서는 대부분 구형이나 구형에 가까운 상자성입자(paramagnetic particles)들이 미세유체시스템에 사용되었고, 이러한 입자들의 동적 거동에 대한 실험 및 수치해석 연구들이 진행되었다.[3,4] 하지만 최근 자성 입자를 활용한 미세유체역학 분야에서 디스크 또는 타원체와 같은 비등방 입자(anisotropic particles)와 야누스 입자(Janus particles)가 주목을 받고 있다.[6~9]

야누스 자성입자(Janus magnetic particle)는 로마 신화에서 서로 반대편을 보고 있는 두 얼굴과 머리가 있는 모습으로 묘사되는 신의 이름을 따라 명명되었으며, 하나의 입자 내부에 두 개의 서로 다른 자기적 특성이 공존하는 비등방 기능성 입자이다. 이러한 야누스 입자의 자기이방성(magnetic anisotropy)을 활용하면 계면활성제, 전자종이, 촉매, 약물 전달, 바코드 등 다양한 분야에 응용될 수 있다. 최근 미세입자 제조 기술이 비약적으로 발전함에 따라서 다양한 형상과 복잡한 내부 구조를 가지는 입자를 만들 수 있게 되어 그 활용 분야를 넓혀가고 있다.[7]

야누스 자성입자 내부에는 자성 영역이 불균일하게 분포한다. 이에 따른 비등방 자성으로 인해 등방성 자성입자와는 다른 특이한 자기조립(self-assembly) 구조를 형성한다는 실험 연구들이 보고되고 있다.[8,9] 또한 비구형(non-spherical) 입자의 경우 형상 자체가 가지는 비등방성도 입자의 운동 특성과 입자 사이의 상호작용에 영향을 미치는 인자이다. 한 예를 들면, 야누스 자성입자로 이루어진 사슬구조(chain structure)에서 입자들이 서로 엇갈리게 정렬되는 특이한 조립 구조는 입자 내부에 자성영역이 어떻게 분포하고 있는지에 따라서 결정된다.[8,9] 본 연구에서는 원형 야누스 입자에 대한 선행 연구[10,11]를 발전시켜 균일자기장에서 타원형 야누스입자의 형상비, 입자의 분포, 그리고 초기 배향각도가 입자운동과 유체유

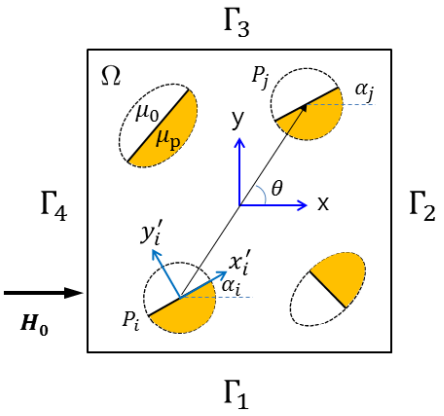


Fig. 1 Schematic illustration of Janus magnetic particles suspended in a viscous fluid under the influence of an externally applied uniform magnetic field $\boldsymbol{H}_0$

동에 미치는 영향을 직접수치해석법[10~13]을 사용하여 규명하고자 한다.

2. 모델링

2.1 문제정의

본 연구에 사용된 해석영역은 Fig. 1에 도시되어 있다. 점성유체 내부에 야누스 입자가 분산되어 있으며, 외부자기장($\boldsymbol{H}_0$)은 수평방향으로 균일하게 가해진다. 이 문제에서 유체 유동은 오직 자기장에 의해 구동된 자성입자의 운동에 의해서만 발생한다. 계산 영역의 한 변의 길이(L)와 입자의 유효반지름(r_e)의 비는 $L/r_e = 20$이다. 이 때 r_e는 타원입자와 동일한 면적을 가지는 원형 입자의 반지름으로 정의한다. (x_i, y_i)는 입자 P_i의 강체운동과 함께 움직이는 국소좌표계를 나타낸다. 입자 P_i의 배향각(orientation angle) α_i는 고정된 좌표계의 x 축과 국소좌표계에서 x_i축이 이루는 각도로 정의한다. 본 연구에서는 선행 연구에서 정의된 무차원 변수[10]들을 사용하여 해석 결과들을 나타내었다.

2.2 지배방정식

자성입자를 포함하는 유동문제를 풀기 위해서는 자기장과 속도장을 함께 풀어야 한다. 이 때 입자와 입자 그리고 입자와 유체 사이의 자기적/수력학적 상호작용을 반드시 고려해야 한다. 본 연구에서 다루는 전류가 흐르지 않는 정자기장(magnetostatic) 문제의 경우, 자기 포텐셜(magnetic potential, ϕ)을 도입하면 자기장 문제에 관한 맥스웰방정식(Maxwell equation)은 식 (1)과 같이 간단히 표현된다.[12]

$$\nabla \cdot (\mu \nabla \phi) = 0 \tag{1}$$

이 때 μ는 자기 투자율(magnetic permeability)이며, 자기장($\boldsymbol{H}$)과 자기 포텐셜(ϕ)은 $\boldsymbol{H} = -\nabla\phi$와 같은 관계를 만족한다. 외부자기장을 인가하기 위해 Γ_2과 Γ_4 사이의 포텐셜의 차이가 구속조건(constraint)으로 주어지고, Γ_1와 Γ_3 사이에는 포텐셜 차이가 없다. 자성 영역과 비자성 영역의 경계에서는 포텐셜(ϕ)과 자속밀도(magnetic flux density)의 수직성분($\mu\nabla\phi \cdot \boldsymbol{n}$)이 연속인 조건이 만족해야 하며, 이는 추가적인 구속조건으로 고려된다. 자기장 문제에서 계산된 자기장의 발산(divergence)은 운동량 보존식에서 자기력으로 추가된다[식 (2) 참조].

액체를 작동유체로 하는 미세유체소자에서 유체의 관성력은 점성력에 비해 매우 작아 무시할 수 있다. 따라서 입자계 유동은 스톡스 유동(Stokes flow)으로 가정할 수 있으며, 유체 영역에서 만족해야할 지배방정식과 구속조건은 다음과 같다.

$$-\nabla p + \eta \nabla^2 \boldsymbol{u} + \nabla \cdot \boldsymbol{T_m} = 0 \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{3}$$

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{U_i} + \boldsymbol{\omega_i} \times (\boldsymbol{x} - \boldsymbol{X_i}) \tag{4}$$

위 식에서 $\boldsymbol{u}$는 속도, p는 압력, η는 유체의 점도, $\boldsymbol{T_m}$은 맥스웰 응력(Maxwell stress), $\boldsymbol{U_i}$는 i번째 입자 P_i의 병진 속도, $\boldsymbol{\omega_i}$는 입자의 회전 속도, $\boldsymbol{x}$는 입자의 표면 위 한 점의 위치 벡터, $\boldsymbol{X_i}$는 입자 중심의 위치 벡터를 나타낸다. 식 (2)의 좌변의 마지막 항이 자기력에 의한 힘을 나타내며, 맥스웰응력은 $\boldsymbol{T_m} = \boldsymbol{HH} - 0.5H^2\boldsymbol{I}$로 정의된다. 이 때 H^2은 자기장의 크기이고 $\boldsymbol{I}$는 단위 텐서(unit tensor)이다. 경계조건으로 Γ_1과 Γ_3에서 점착경계조건(no-slip condition)이, 그리고 Γ_2와 Γ_4에는 주기조건(periodic condition)이 부여된다.

$1 \sim 10\,\mu m$ 크기의 자성입자의 경우 입자 자체의 관성과 브라운 운동(Brownian motion)의 영향

은 무시할 수 있다고 알려져 있다.[1] 따라서 개별 입자에는 자기력(magnetic force)과 수력학적 힘(hydrodynamic force)만 외력으로 작용하고, 두 힘의 합은 영이다. 따라서 관성을 무시할 수 있는 자성입자 P_i에 작용하는 힘($\boldsymbol{F}_i$)과 토크($\boldsymbol{T}_i$)에 관한 식은 아래와 같이 기술할 수 있다.

$$\boldsymbol{F}_i = \int_{\partial P^+} (\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{T}_m) dS = \boldsymbol{0} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{T}_i = \int_{\partial P^+} \boldsymbol{r}_i \times [(\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{T}_m) \cdot \boldsymbol{n}] \; dS = \boldsymbol{0} \tag{6}$$

식 (5)와 (6)에서 $\boldsymbol{\sigma}$는 코시응력(Cauchy stress), ∂P^+는 입자 표면, $\boldsymbol{r}_i$는 입자의 중심($\boldsymbol{X}_i$)에서 입자 표면 위의 점($\boldsymbol{x}$)을 잇는 벡터, $\boldsymbol{n}$은 입자 표면에서 외부를 향하는 수직방향의 단위 벡터이다.

자성 입자계 유동을 푸는 과정은 다음과 같이 요약할 수 있다. 먼저, 자기장 문제를 풀면 입자와 유체를 포함하는 전체 영역의 자기장 분포가 구해진다. 계산된 자기장 분포는 유동문제에서 입자에 작용하는 자기력을 구하기 위한 맥스웰응력 계산에 사용된다. 유동 문제에서 해의 일부로 구해지는 입자의 병진 속도($\boldsymbol{U}_i$)와 각속도($\boldsymbol{\omega}_i$)는 시간에 따른 입자의 위치와 배향각을 구하기 위한 식 (7)과 (8)을 풀 때 사용된다.

$$\frac{d\boldsymbol{X}_i}{dt} = \boldsymbol{U}_i, \qquad \boldsymbol{X}_i(0) = \boldsymbol{X}_{i,0} \tag{7}$$

$$\frac{d\alpha_i}{dt} = \omega_i, \qquad \alpha_i(0) = \alpha_{i,0} \tag{8}$$

위 식에서 $\boldsymbol{X}_{i,0}$는 입자 P_i의 초기 위치, t는 시간, $\alpha_{i,0}$는 입자의 초기 방향각이다. 새롭게 얻어진 입자의 위치와 각도에 대해 자기장 문제와 유동 문제를 푸는 일련의 과정이 반복되어 정해진 시간까지 계산 과정이 진행된다.[10~13]

2.3 수치해석기법

자기장문제에서 자기포텐셜은 전체 계산영역에서 유한요소법을 사용하여 구해진다. 유동문제는 유한요소법에 기초한 가상영역법(fictitious domain method)을 사용하여 푼다. 두 문제에 포함된 구속조건들은 유한요소 수식에서 라그랑지 곱수(Lagrange multipliers)를 사용하여 처리된다. 등방 또는 비등방 자성입자계 유동에 관한 자세한 수치해석 기법과 이에 대한 검증은 참고문헌[10,11,13]에 상세히 기술되어 있다. 본 연구에서는 Seong 등[10]에 의해 개발된 수치해석기법을 사용하여 2차원 비등방 자성입자계에 대한 자기장 및 유동 문제를 풀었다.

3. 결과 및 토의

3.1 단일입자 문제

Fig. 2는 균일한 자기장 $\boldsymbol{H}_0$가 수평방향으로 인가된 유체내부에 있는 타원입자를 보여준다. 입자의 형상비(AR)는 $AR = b/a$로 정의하고, 형상비가 $0.5 \le AR \le 2$인 입자를 사용하여 단일 입자의 회전 운동을 분석하였다. 이 때 형상비가 다른 두 입자의 면적은 같다. 입자는 정사각형 영역의 중앙에 위치하고 있으며, 초기 배향각은 $\alpha = 10^\circ$로 설정하였다. 유체와 입자에서 비자성 영역의 투자율은 진공상태의 투자율인 μ_0와 같다고 가정한다. 입자 내부 자성 영역의 투자율은 $\mu_p = 2\mu_0$으로 고정하여 자화율은 $\chi_p = 1$이다.

외부 자기장이 가해지면 입자에 자기 토크가 작용하고, 입자는 회전 운동을 한 후 평형상태에 도달한다. Fig. 3은 무차원 시간(t^*)에 따른 입자의 배향각(α)의 변화를 보여준다. 본 연구에서 사용된 무차원 시간은 $t^* = t/t_m$로 정의되며, 자기장과 관련된 특성시간 t_m은 식 (9)와 같이 정의된다.[12]

$$t_m = \frac{\eta}{\mu_0 \beta^2 H_0^2} \tag{9}$$

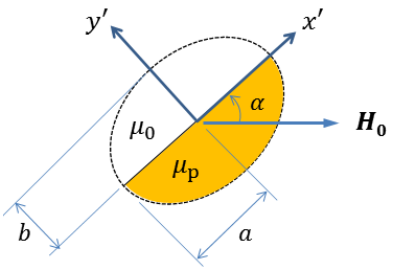
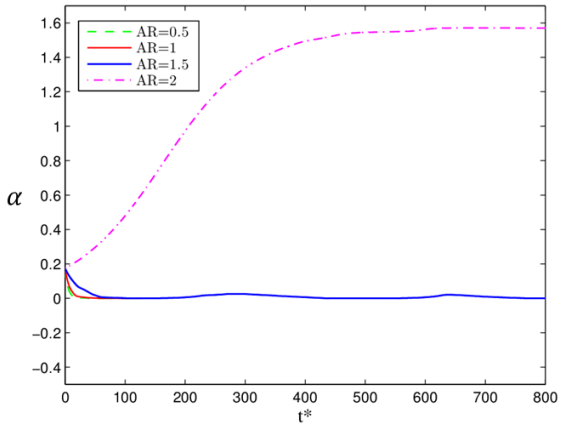
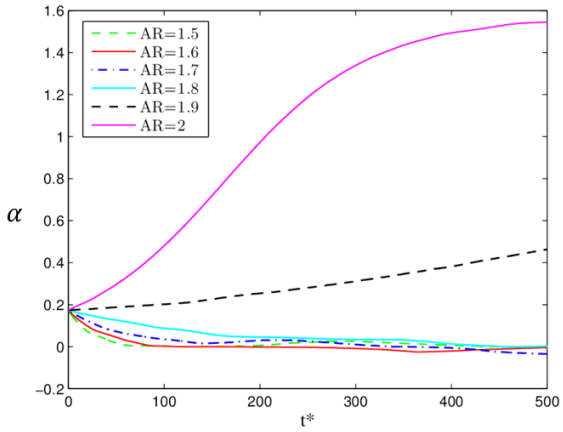


Fig. 2 Definition of the orientation angle (α) for a single elliptic particle in the presence of an externally applied uniform magnetic field $\boldsymbol{H}_0$. The shaded region in the particle represents the magnetic domain with the permeability μ_p



(a)



(b)

Fig. 3 Evolution of the orientation angle (α) with the dimensionless time t^*. (a) Change of α in $0.5 \leq AR \leq 2$ and (b) change of α in $1.5 \leq AR \leq 2$, showing transition in the orientation angle in equilibrium. Here, the unit of the angular measure is the radian

식 (9)에서 β는 유효분극인자(effective polarization factor)이고 H_0은 가해진 외부자기장의 크기이다.

입자의 형상비가 1.9보다 작은 입자의 경우, 평형각도는 $\alpha = 0^\circ$로 수렴한다. 하지만 형상비가 1.9 이상인 타원입자는 배향각이 초기 값보다 증가하여 $\alpha \approx 89.9^\circ$로 수렴함을 확인하였다. 단일 입자문제를 통해 입자의 형상비와 비등방 자성에 의해 평형상태의 입자 배향각이 달라지는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 두 입자의 상호작용

이 절에서는 채널 내부에 두 타원입자가 존재할 때 두 입자사이의 자성 상호작용(magnetic interaction)에 대해 살펴보고자 한다. 두 입자의

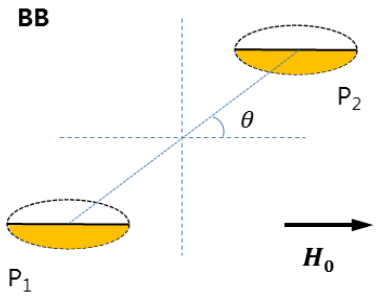
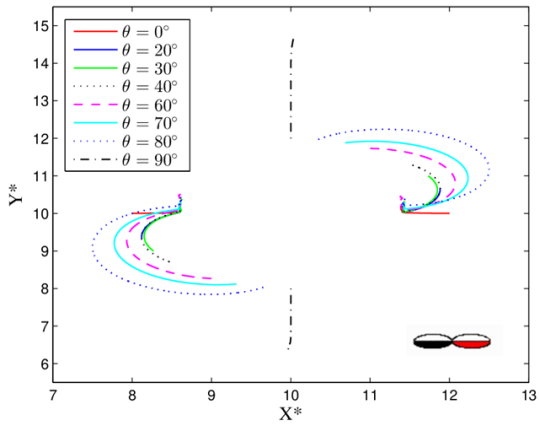


Fig. 4 A BB configuration for two elliptic particles, P_1 and P_2, with $AR = 0.5$. Here, θ is the angle between the externally applied magnetic field and the line-of-centers of the two particles

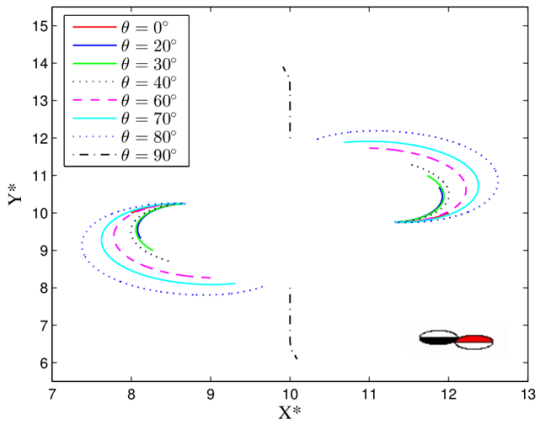
형상비(AR), 외부 자기장과 입자의 중심을 연결한 선이 이루는 각도(θ), 그리고 초기배열의 변화에 따른 입자의 운동을 해석하였다. 입자의 형상비는 0.5와 2를 사용하였고, 초기 배열은 BB와 BT 배열을 사용하여 수치해석을 진행하였다. 이때 입자 P_1과 P_2의 자성영역이 모두 아래쪽에 위치한 경우를 BB(Bottom-Bottom) 배열 그리고 아래쪽과 위쪽에 엇갈리게 위치한 경우를 BT(Bottom-Top) 배열이라고 정의한다. Fig. 4는 형상비가 0.5인 두 타원 입자로 구성된 BB 배열의 예를 보여준다. 초기 두 입자 사이의 거리(d)는 $d = 4r_e$이다.

Fig. 5(a)와 (b)는 $AR = 0.5$인 타원입자의 BB 배열과 BT 배열에서 입자의 운동 궤적을 보여준다. 초기 각도가 $\theta = 90^\circ$인 경우를 제외하고, 두 입자는 결합하여 각각의 그림 우측하단에 있는 조립구조를 형성한다. BB와 BT 배열 모두 θ가 어떤 임계값보다 작을수록 두 입자 사이에 인력이 작용하여 두 입자가 결합한다. 하지만 초기 각도 θ가 증가함에 따라 처음에는 입자 사이에 척력이 작용하여 입자간 거리가 멀어지고, 다시 인력의 작용으로 입자의 결합이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. $AR = 0.5$인 입자의 경우, 두 입자사이의 자기력이 인력인 영역과 척력인 영역을 구분하는 임계각도는 BB 배열에서 $\theta_{c,BB} \approx 25^\circ$에 존재하며, BT 배열에서 $\theta_{c,BT} \approx 20^\circ$에 존재하는 것을 수치해석을 통해 찾을 수 있었다.

Fig. 6(a)와 (b)는 $AR = 2$인 두 입자에 대해서 BB와 BT 배열에서 입자의 궤적을 보여준다. 초기 각도가 $\theta = 90^\circ$인 경우를 제외하고 두 입자가 최종적으로 결합하는 것은 $AR = 0.5$인 경우

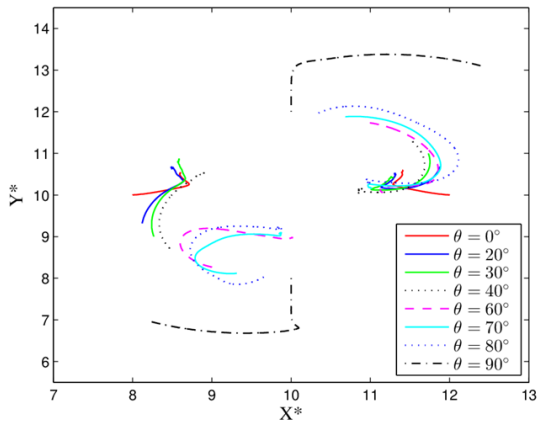


(a)

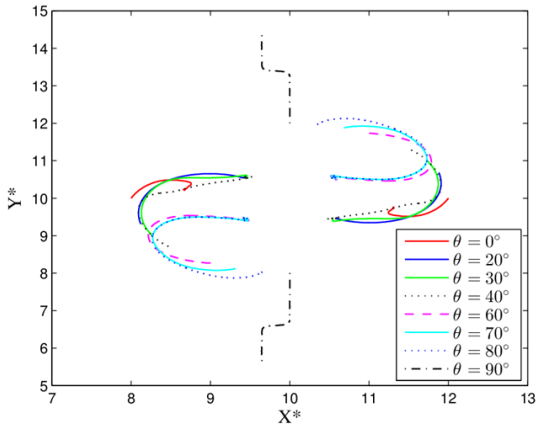


(b)

Fig. 5 Trajectories of two elliptic Janus particles with $AR = 0.5$ for two initial configurations, (a) BB and (b) BT configurations. Here, X^* and Y^* are dimensionless coordinates, defined by $X^* = X/r_e$ and $Y^* = Y/r_e$



(a)



(b)

Fig. 6 Trajectories of two elliptic Janus particles with $AR = 2$ for two initial configurations, (a) BB and (b) BT configurations

와 같다. 하지만, 초기 각도 θ의 변화에 따른 개별 입자의 운동 궤적은 $AR = 0.5$인 경우와 확연히 다른 경향을 보인다. 초기각도 θ가 변함에 따라서 두 입자의 최종 조립구조가 달라지며, 입자들의 궤적도 불규칙적이다. 두 입자 사이의 자기력이 인력인 경우와 척력인 경우를 구분하는 임계각은 BB 배열에서 $\theta_{c,BB} \approx 50^\circ$ 이며, BT 배열에서 $\theta_{c,BT} \approx 35^\circ$ 이다. 따라서 두 타원형 야누스 자성입자 사이에 작용하는 자기력과 최종 조립구조가 입자의 형상비와 초기 배열에 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

3.3 다중 입자의 운동 및 자기조립

주어진 입자의 분포에서 개별 입자의 배향각 차이가 유동에 미치는 영향을 살펴본다. 이를 위해 형상비가 $AR = 0.5$인 세 개의 타원 입자가 분산된 입자계 유동 문제를 풀었다. Fig. 7에 도시된 것과 같이 세 개의 입자는 선형 또는 삼각형 형태로 분포하고 있다. 동일한 입자 분포에서 두 가지 배열 BBB와 BBT를 사용하여 자기장과 유동 문제를 풀었다. 따라서 두 배열에서 세 번째 입자의 배향 각도만 180° 차이가 있고 나머지 입자의 배향각은 같다. 입자 사이의 자성 상호작용에 의해 입자들에 힘이 작용하여 입자 운동이 유도된다. 이 때 입자들의 위치가 같더라도 한 입자의 배향 각도의 차이가 완전히 다른 형태의 유동을 발생시키는 것을 확인할 수 있다. 이는 입자의 배향이 입자의 운동과 주위 유체의 유동에 큰 영향을 주는 인자하는 것을 보여주는 예라고 할 수 있다.

마지막으로 형상비의 차이에 따른 자기조립 구조의 차이에 대해 살펴보았다. Fig. 8은 형상비가 0.5와 2인 입자들의 초기상태와 수평 방향으로

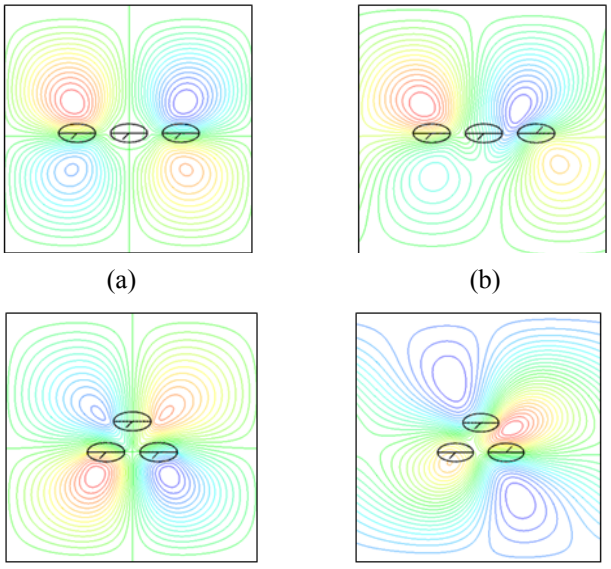


Fig. 7 Snapshots of the streamlines around three elliptic Janus particles for two linear configurations, (a) BBB and (b) BBT, and two triangular configurations, (c) BBB and (d) BBT

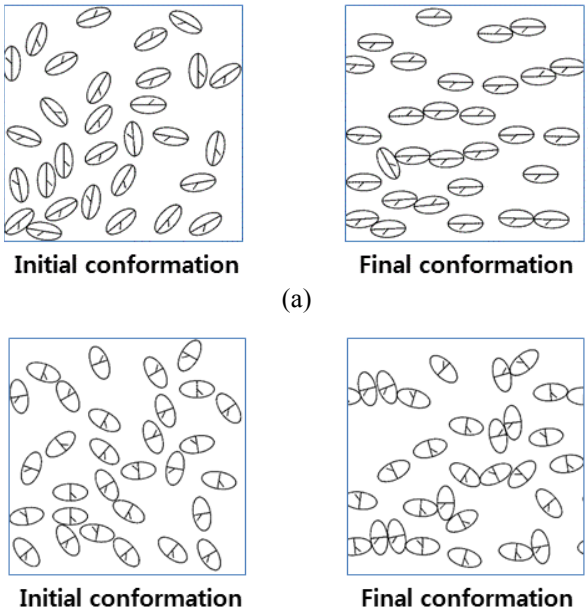


Fig. 8 Self-assembly of Janus magnetic particles for two aspect ratios, (a) $AR = 0.5$ and (b) $AR = 2$, showing the initial and final conformations affected by the aspect ratio

균일한 자기장이 인가된 후 생성된 조립구조를 보여준다. 형상비가 0.5인 입자들은 결합 후 입자의 장축이 자기장 방향으로 정렬된 조립구조를 보인다. 이 때 생성된 조립구조는 원형 야누스입자와 유사한 곧은 사슬(straight chain)과 엇갈린 사슬(staggered chain)이 공존하는 구조이다.[8] 하지만 형상비가 2인 입자의 경우, 명확하게 정렬된 구조가 보이지 않고, 규칙성이 없는 사슬구조를 형성하였다. 입자의 형상비와 입자의 충전 비율에 따른 조립구조의 차이에 대해서는 향후 더 상세한 연구가 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

직접수치해석기법을 이용하여 균일한 자기장이 인가된 점성 유체 속에 분산된 비등방 야누스 자성입자의 운동 특성과 입자의 조립구조를 분석하였다. 본 연구에 사용된 수치해석기법은 입자 사이의 자성/수력학적 상호작용을 가정 없이 고려할 수 있는 장점이 있다. 단일 입자문제에서 입자의 형상비에 따라 평형 상태의 배향각도가 달라짐을 확인하였다. 또한 입자의 초기 위치와 초기 배향각도가 두 입자 사이의 상호작용에 큰 영향을 미치고 최종적인 조립구조의 변화를 가져옴을 확인할 수 있었다. 세 입자 사이의 상호작용에 관한 문제를 통해 동일한 위치에 있는 입자들에서 개별 입자의 배향각 차이가 주위 유체 유동에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. 마지막으로 다중입자 문제에서 외부자기장에 의해 생성되는 입자들의 자기조립구조도 입자의 형상비에 따라 상이하게 나타남을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2016년 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2015R1D1A1A01057691)

참고문헌
(References)

(1) Gao, Y., Kang, T. G., Hulsen, M. A. and den Toonder, J. M. J., 2012, "Numerical and Experimental Study of a Rotating Magnetic Particle Chain in a Viscous Fluid," *Phys. Rev. E*, Vol. 86, p. 041503.

(2) Pamme, N., 2006, "Magnetism and Microfluidics," *Lab Chip*, Vol. 6, pp. 24~38.

(3) Ganguly, R. and Puri, I. K., 2010, “Microfluidic Transport in Magnetic MEMS and BioMEMS,” *Wiley Interdiscip. Rev.-Nanomed. Nanobiotechnol*. Vol. 2, pp. 382~399.
(4) van Reenen, A., de Jong, A. M., den Toonder, J. M. J. and Prins, M. W. J., 2014, “Integrated Lab-on-chip Biosensing Systems based on Magnetic Particle Actuation - a Comprehensive Review,” *Lab Chip*, Vol. 14, pp. 1966~1986.
(5) Kawaguchi, H., 2000, “Functional Polymer Microspheres,” *Prog. Polym. Sci*. Vol. 25, pp. 1171~1210.
(6) Walther, A. and Müller, A. H. E., 2008, “Janus Particles,” *Soft Matter*, Vol. 4, pp. 663~668.
(7) Walther, A. and Müller, A. H. E., 2013, “Janus Particles: Synthesis, Self-assembly, Physical Properties, and Applications,” *Chem. Rev*., Vol. 113, pp. 5194~5261.
(8) Yuet, K. P., Hwang, D. K., Haghgooie, R. and Doyle, P. S., 2010, “Multifunctional Superparamagnetic Janus Particles,” *Langmuir*, Vol. 26, pp. 4281~4287.
(9) Ren, B., Ruditskiy, A., Song, J. H. K. and Kretzschmar, I., 2012, “Assembly Behavior of Iron Oxide-Capped Janus Particles in a Magnetic Field,” *Langmuir*, Vol. 28, pp. 1149~1156.
(10) Seong, Y., Kang, T. G., Hulsen, M. A., den Toonder, J. M. J. and Anderson, P. D., 2016, “Magnetic Interaction of Janus Magnetic Particles Suspended in a Viscous Fluid,” *Phys. Rev. E*, Vol. 93, p. 022607.
(11) Kim, H. E., Kim, K., Ma, T. Y. and Kang, T. G., 2017, “Numerical Investigation of the Dynamics of Janus Magnetic Particles in a Rotating Magnetic Field,” *Korea-Aust. Rheol. J.*, Vol. 29, pp. 17~27.
(12) Kang, T. G., Gao, Y., Hulsen, M. A., den Toonder, J. M. J. and Anderson, P. D., 2013, “Direct Simulation of the Dynamics of Two Spherical Particles Actuated Magnetically in a Viscous Fluid,” *Comput. Fluids*, Vol. 86, pp. 569~581.
(13) Kang, T. G., Hulsen, M. A. and den Toonder, J. M. J., 2012, “Dynamics of Magnetic Chains in a Shear Flow under the Influence of a Uniform Magnetic Field,” *Phys. Fluids*, Vol. 24, p. 042001.