

등방성 난류에서의 마이크로버블 거동

심기훈,¹ 이슬기,¹ 이창훈*^{1,2}

¹연세대학교 기계공학과

²연세대학교 계산과학공학과

BEHAVIOR OF MICROBUBBLES IN ISOTROPIC TURBULENCE

G.H. Shim,¹ S.G. Lee¹ and C. Lee*^{1,2}

¹Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

²Dept. of Computational Science and Engineering, Yonsei Univ.

Direct numerical simulation is conducted to observe the behavior of microbubbles in isotropic turbulence. Navier-Stokes equation and the motion of equation for microbubbles are solved with periodic boundary condition in a cube domain. Vorticity contour, enstrophy ratio, relative reduction of bubble rise velocity, and the closest distance of particles are investigated for various Stokes numbers and gravity factors to understand clustering of microbubbles. Also, clustering due to the effect of the lift force is investigated.

Key Words : 등방성 난류(Isotropic Turbulence), 마이크로버블(Microbubble), 집단화(Clustering), 스톡스 수(Stokes Number), 부력 수(Buoyancy number W), 양력(Lift Force)

1. 서 론

난류와 입자의 다상유동은 현대 사회에 필요한 유체역학적 현상으로써 산업 현장뿐만 아니라 우리 생활에서도 많이 찾아볼 수 있다. 특히 요즘 큰 주목을 받고 있는 마이크로버블은 물을 정화시키는 수처리 과정, 기체-액체 반응기, 탄산 음료 등 화학 산업이나 식품 산업에 이용될 뿐만 아니라 대기의 이산화탄소가 바다에 녹는 과정과 같이 자연 현상에서도 쉽게 찾아볼 수 있다.

마이크로버블은 일반적인 크기의 버블들보다 크기가 훨씬 작은 마이크로 스케일이고, 큰 표면장력을 가지고 있기 때문에 모양이 구 모양으로 일정하고 부피도 변하지 않는 특성을 갖고 있다. 계산에 용이한 마이크로버블의 모델링과 슈퍼 컴퓨터가 발전으로 인해 난류 내에서의 마이크로버블 거동에 대한 분석이 가능해졌다. 특히 등방성 난류에 의한 마이크로버블의 거동은 Mazzitelli et al.[1]에 의해 스톡스 수와 부력

수를 다르게 하여 시뮬레이션을 한 바가 있다.

본 연구에서는 등방성 난류 내에서 마이크로버블 거동을 관찰하기 위한 수치해석을 수행하였다. 코드를 이용하여 기존의 논문에서 제시한 변수들과 직접 계산을 한 변수들을 비교함으로써 코드에 대한 유효성을 검증하였다[1,2]. 그리고 스톡스 수와 부력 수를 독립적으로 사용함으로써 마이크로버블 집단화에 대한 결과를 제시하였다. 또한 버블이 가지는 큰 특성인 양력의 효과를 보기 위해 양력의 유무에 따른 마이크로버블 거동을 나타내었다.

난류 내에서의 마이크로버블 거동은 우리나라의 주요한 산업에도 많이 이용된다. 특히 Table 1-3는 산업현장에서 많이 쓰이는 물의 dissipation 범위($\varepsilon = 1.6 \sim 10 \text{ cm}^2/\text{s}^3$)와 마이크

Table 1 Real scale of microbubbles in industry
($\varepsilon = 1.6 \text{ cm}^2/\text{s}^3$, $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$)

Diameter	St	W
20 μm	0.0002	0.09
50 μm	0.001	0.57
100 μm	0.005	2.3
150 μm	0.012	5.2
200 μm	0.021	9.2
250 μm	0.033	14.4
300 μm	0.047	20.7
350 μm	0.065	28.2

Received: November 3, 2016, Revised: November 29, 2016,

Accepted: November 30, 2016.

* Corresponding author, E-mail: cleee@yonsei.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2016.21.4.046>

© KSCFE 2016

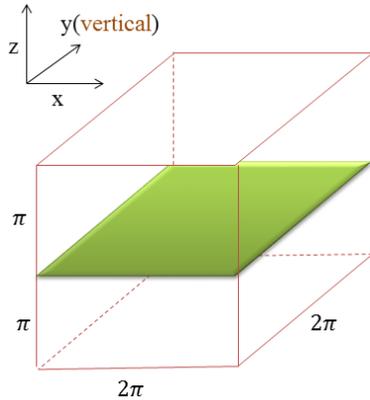


Fig. 1 Simulation domain

로버블의 지름($d = 20 \sim 350 \mu\text{m}$)에 따른 스톡스 수와 부력 수를 나타내었다. 이 변수들의 범위에 근거하여 각각의 외력들이 마이크로버블 거동에 어떤 영향을 미치는지에 대한 이론적인 측면에서 의미가 있을 것으로 판단된다.

2. 계산 방법 및 유효성 검증

2.1 시뮬레이션 모델

등방성 난류의 계산 방법으로는 직접수치해석기법(Direct Numerical Simulation)을 이용하였다. 계산 모델링의 경우 Fig. 1과 같이 정육면체 모양을 선택하였고, 길이는 각각 2π , 격자 개수는 각 축의 방향으로 128개씩 총 128^3 개를 사용하였다. Navier-Stokes 방정식을 풀 때 오차를 줄이기 위해 Pseudo-spectral 방법을 이용하여 계산하였고 시간 차분으로는 Runge-kutta 3차 방법을 이용하였다. 경계조건은 주기적 경계 조건을 이용하였다.

2.2 지배방정식

본 장에서는 Navier-Stokes 방정식과 마이크로버블에 대한 운동방정식을 나타내었다. 유체에 대한 지배방정식들은 다음

과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{u} + \vec{f}_L \tag{2}$$

여기서 u, p, ν 는 각각 유체의 속도 벡터, 압력, 동점성 계수를 나타낸다. 식 (2)의 \vec{f}_L 는 Fig. 1 안에서 지속적으로 난류 유동을 만들어주는 힘 벡터이고 식 (2)를 Pseudo-spectral 방법을 이용하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\vec{f}_L(k, t) = \varepsilon \frac{\vec{u}(k, t)}{\sum_{k \in K_s} |u_i(k, t)|^2}, \quad k \in K_s \tag{3}$$

여기서 K_s 는 파상수를 나타낸다. 마이크로버블은 대한 뉴턴의 제 2법칙에서 유도된다[3].

$$\begin{aligned} \rho_p V_p \frac{d\vec{v}}{dt} = & (\rho_p - \rho_f) V_p \vec{g} - C_D \frac{\pi a^2}{2} \rho_f |\vec{v} - \vec{u}| (\vec{v} - \vec{u}) \\ & + \rho_f V_p C_M \left(\frac{D\vec{u}}{Dt} - \frac{d\vec{v}}{dt} \right) + \rho_f V_p \frac{D\vec{u}}{Dt} \\ & - C_L \rho_f V_p (\vec{v} - \vec{u}) \times \vec{\omega} \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)에서 $\rho_p, \rho_f, V_p, v, g, \omega, C_D, C_M, C_L$ 은 각각 버블의 밀도, 유체의 밀도, 버블의 부피, 유체의 속도 벡터, 중력가속도 벡터, 입자가 있는 지점에서의 유체 와도, 항력 계수, 부가 질량 계수, 양력 계수를 나타낸다. 여기서 $C_L = 1/2$ 을 가지는데 1987년 Auton이 이론적으로 증명했으며 후에 실험을 통해 이 값을 직접 확인한바 있다[4,5]. 부가질량 계수는 $C_M = 1/2$ 을 갖는데 이 값은 유체의 Reynolds 수와 관계없다는 것을 증명한 바 있다(Auton et al.[6], Rivero et al.[7], Chang and Maxey[8]). 위의 값을 이용해서 식 (4)를 정리하면 다음과

Table 2 Real scale of microbubbles in industry ($\varepsilon = 5.0 \text{ cm}^2/\text{s}^3, \nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$)

Diameter	St	W
20 μm	0.0004	0.07
50 μm	0.002	0.43
100 μm	0.009	1.73
150 μm	0.021	3.89
200 μm	0.037	6.91
250 μm	0.058	10.8
300 μm	0.084	15.6
350 μm	0.114	21.2

Table 3 Real scale of microbubble in industry ($\varepsilon = 10 \text{ cm}^2/\text{s}^3, \nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$)

Diameter	St	W
20 μm	0.0005	0.06
50 μm	0.003	0.36
100 μm	0.013	1.45
150 μm	0.030	3.27
200 μm	0.053	5.82
250 μm	0.082	9.09
300 μm	0.119	13.1
350 μm	0.162	17.8

같다.

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = 3 \frac{D\vec{u}}{Dt} - \frac{1}{\tau_b}(\vec{v} - \vec{u}) - 2\vec{g} - (\vec{v} - \vec{u}) \times \vec{\omega} \quad (5)$$

식 (5)에서 τ_b 는 입자의 반응 시간으로 $\tau_b = a^2/(6\nu)$ 로 주어지고 여기서 a 는 마이크로버블의 반지름을 나타낸다.

식 (4)에서 마이크로버블 거동에 미치는 힘은 부가질량과 함께 작용하는 유동 가속도, 부력, 항력, 양력 등 4가지가 있다. 마이크로버블의 위치에서의 유체의 속력과 와도를 구하기 위해 4점을 이용한 Hermite interpolation을 이용하였다. 또한 주기적 경계조건을 사용했기 때문에 입자의 개수는 일정하게 유지되었다.

입자의 거동을 해석하기 위해 2가지의 정규화된 매개변수인 스톡스 수와 부력 수를 이용하였다. 스톡스 수와 부력 수는 다음과 같이 정의한다.

$$St = \frac{\tau_b}{\tau_k}, W = \frac{V_T}{V_k} \quad (6)$$

$$V_T = 2\tau_b g \quad (7)$$

식 (6)에서 Stokes number는 유체의 Kolmogorov time scale에 대한 입자의 반응 시간비를 나타내고 부력 수는 Kolmogorov 속도와 외력이 없는 유체에서의 버블의 상승 속도에 대한 비를 나타낸다. 식 (7)에서 마이크로버블의 상승 속도는 입자 반응 시간과 중력가속도에 비례한다.

2.3 유효성 검증

개발된 수치방법에 대한 유효성 검증을 위해 Table 4와 같이 유체의 매개변수들을 결정하였다. 여기서 $\varepsilon, \eta, u_0, Re_\lambda$ 는 각각 유체의 난류소산율, 콜모고로프 길이스케일, rms 속도, 테일러-스케일 레이놀즈수를 각각 나타낸다. 길이는 영역길이 2π 에 대한 무차원 길이이며, 시간차원 또한 점성계수와 영역 길이로 무차원화된 시간을 의미하며 모든 변수들은 이 기본 차원으로 무차원화되어 있다.

2.3.1 기존연구와의 비교 1

유효성의 검증을 위해 Mazzitelli et al.[1]의 논문과 비교를 하였다. 비교 대상으로는 마이크로버블 위치에 있는 유체의

Table 4 Fluid parameters

ε	ν	η	τ_k	V_k	u_0	Re_λ
9.2	0.018	0.028	0.044	0.64	2.54	62

엔스트로피의 평균값($\langle \Omega \rangle_b$)을 각 격자점에서의 유체의 엔스트로피의 평균값($\langle \Omega \rangle$)으로 나눈 엔스트로피의 비와 외력이 작용하지 않는 고요한 유체에서의 버블의 상승속도(V_T)에 대해서 난류의 영역에 있는 마이크로버블의 상승속도($\langle V \rangle_b$)의 비를 나타내었다. 여기서 엔스트로피 Ω 는 표면적 S 에 대하여 다음 식 (8)과 같이 정의된다.

$$\Omega = \frac{1}{2} \int_S \omega^2 dS \quad (8)$$

Reference의 경우 계산조건으로 마이크로버블의 개수는 144,000개를 사용하였으며 총 계산시간은 3 large eddy turnover만큼 계산하였다. 결과값은 Table 5와 Table 6에 비교 제시하였다.

Table 5의 경우 직접 계산한 것과 다른 논문의 값을 비교하였을 때 엔스트로피의 비는 오차가 5% 이내로, Table 6의 경우 마이크로버블의 상대적 상승속도 감소비 역시 값이 굉장히 작은 범위에 있지 않은 경우 작은 오차를 보인다.

Table 5 Enstrophy ratio

Case	St	W	Lift	$\frac{\langle \Omega \rangle_b}{\langle \Omega \rangle} (Ref)$	$\frac{\langle \Omega \rangle_b}{\langle \Omega \rangle}$
a	1	1	O	2.3	2.24
b	$\frac{1}{3}$	1	O	2.12	2.13
c	$\frac{1}{6}$	1	O	1.86	1.80
d	$\frac{1}{10}$	1	O	1.63	1.67
a'	1	1	X	2.7	2.65
c'	$\frac{1}{6}$	1	X	1.87	1.96
e	1	2	O	2.2	2.25
f	1	4	O	2.2	2.33

Table 6 Relative reduction of bubble rise velocity

Case	St	W	Lift	$\frac{(\langle V \rangle_b - V_T)}{V_T} (Ref)$	$\frac{(\langle V \rangle_b - V_T)}{V_T}$
a	1	1	O	-0.72	-0.66
b	$\frac{1}{3}$	1	O	-0.53	-0.53
c	$\frac{1}{6}$	1	O	-0.35	-0.39
d	$\frac{1}{10}$	1	O	-0.21	-0.29
a'	1	1	X	-0.45	-0.48
c'	$\frac{1}{6}$	1	X	-0.21	-0.26
e	1	2	O	-0.67	-0.62
f	1	4	O	-0.62	-0.56

2.3.2 기존연구와의 비교 2

두 번째 논문의 경우 Mazzitelli and Loshe[2]의 논문과 비교를 하였다. 이 경우도 엔스트로피의 비와 마이크로버블의 상승속도의 감소비를 나타내었다. 버블의 개수는 40,960개를 사용하였고, 수렴할 때까지 충분히 긴 시간을 계산하였다.

Table 7과 8에서 볼 수 있듯이 엔스트로피의 비는 오차가 전부 10% 이내이며 버블의 상승속도 감소비 역시 논문의 값과 작은 오차를 보인다.

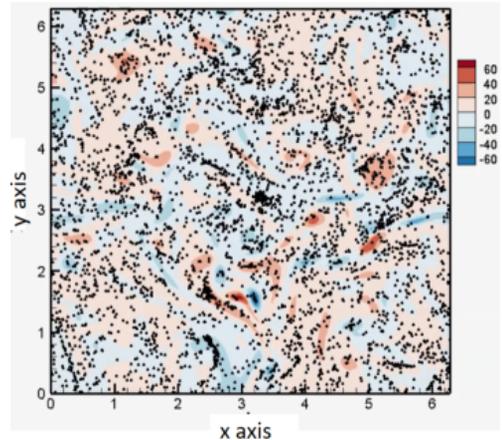
3. 결 과

개발한 수치기법을 이용하여 직접 시뮬레이션을 수행함으로써 여러 결과를 분석하였다. 마이크로버블의 개수는 50,000개를 사용하였으며 point particle approximation을 사용함으로써 버블의 지름과 상관없이 버블의 움직임을 나타내었다. 계산 조건은 Table 4의 조건과 동일하게 진행하였고 스톡스 수와 부력 수의 범위는 Table 9과 같이 설정하였다.

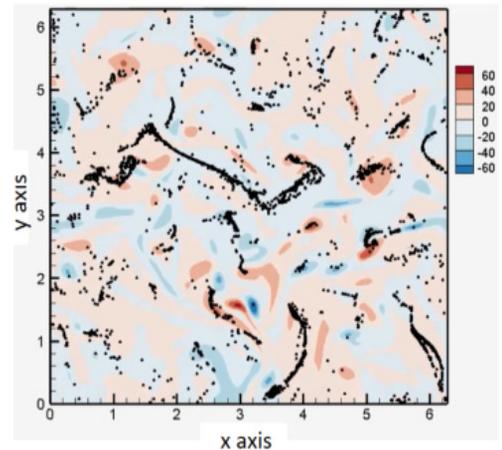
3.1 Vorticity contour

Vorticity contour는 Fig. 1에서 z축의 위치가 π 인 지점에서 xy 평면을 나타내었다. 마이크로버블의 포집범위는 z축의 방향으로 ± 0.3 를 선택하였다.

Fig. 2는 부력 수가 1일 때 스톡스 수가 0.1인 경우(a)와 스톡스 수가 1인 경우(b)에 대해서 나타내었다. 부력 수가 상대적으로 작기 때문에 (a)와 (b) 둘 다 부력에 의한 영향은 거의 나타나지 않는다. 스톡스 수가 큰 1의 경우 마이크로버블의 집단화 현상이 더 강하게 나타나는데 특히 와도가 큰 지점에



(a) St = 0.1, W = 1



(b) St = 1, W = 1

Fig. 2 Vorticity contour

Table 7 Enstrophy ratio

Case	St	W	Lift	$\frac{\langle \Omega \rangle_b (Ref)}{\langle \Omega \rangle}$	$\frac{\langle \Omega \rangle_b}{\langle \Omega \rangle}$
(i)	0.1	6	O	1.25 ± 0.03	1.36
(ii)	0.1	6	X	1.21 ± 0.02	1.30
(iii)	1	6	O	2.3 ± 0.5	2.3 ± 0.05

Table 8 Relative reduction of bubble rise velocity

Case	St	W	Lift	$\frac{\langle V \rangle_b - V_T}{V_T} (Ref)$	$\frac{\langle V \rangle_b - V_T}{V_T}$
(i)	0.1	6	O	-0.11	-0.13
(ii)	0.1	6	X	-0.04	-0.06
(iii)	1	6	O	-0.58	-0.57

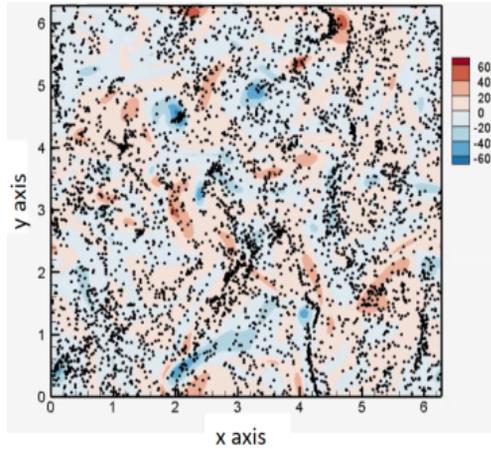
Table 9 Range of Stokes number and W

St	W
0.1	1, 2, 4, 6, 8, 10, 14, 18
0.4	
1.0	

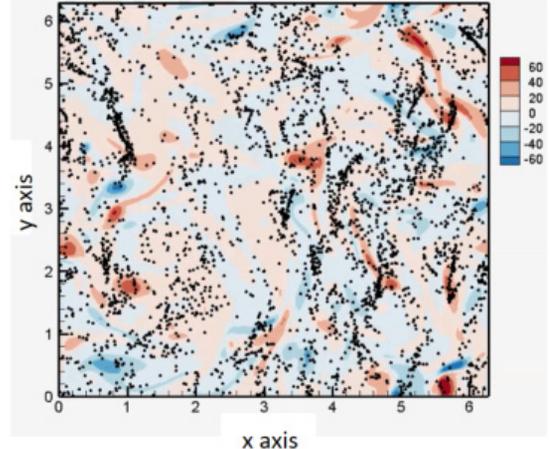
집단화 현상이 강하게 나타나는 것을 알 수가 있다.

Fig. 3는 부력 수가 8일 때 스톡스 수가 0.1인 경우(a)와 스톡스 수가 1인 경우(b)에 대해서 나타내었다. 부력 수로 인해 (a)와 (b) 둘 다 수평보다는 수직으로 띠모양이 형성되는 것을 볼 수 있다. 스톡스 수가 큰 1의 경우 Fig. 2(b)와 비교했을 때 수직방향으로 띠모양이 발달한다.

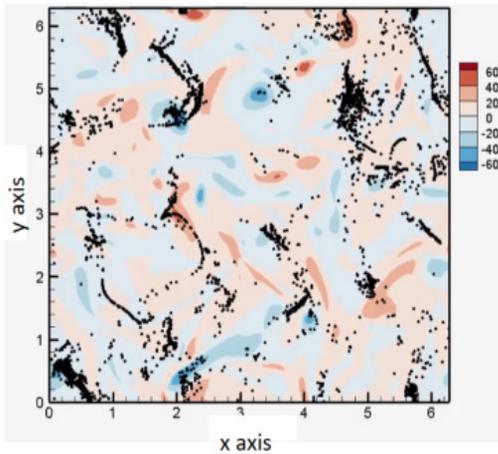
Fig. 4는 부력수 14일 때 스톡스 수에 따른 결과를 나타내었다. 부력 수가 크기 때문에 버블들의 배열이 수직적으로 나타난다. Fig. 4(a)의 경우 Fig. 3(a)의 경우보다 버블들이 더 밀집해있는데 부력이 크기 때문에 와도가 큰 경우에만 영향을 받아 밀집되는 현상이 더 강하게 일어난다. Fig. 4(b)는 스톡스 수가 1, 부력 수가 14일 때의 vorticity contour에 대해 나타내었다. Fig. 4(b)의 경우 유체에 의한 집단화 현상과 큰 부력으로 인해 마이크로버블의 집단화가 높은 와도를 중심으로



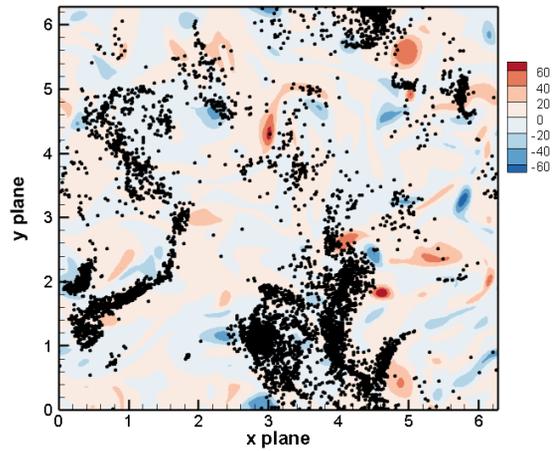
(a) $St = 0.1, W = 8$



(a) $St = 0.1, W = 14$



(b) $St = 1, W = 8$



(b) $St = 1, W = 14$

Fig. 3 Vorticity contour

Fig. 4 Vorticity contour

넓은 영역으로 분산되어있다.

3.2 Enstrophy ratio

엔스트로피 Ω 는 유체에서 소산 효과에 대한 운동에너지와 관련된 양으로 여기서 사용되는 엔스트로피 비는 마이크로버블 위치에 있는 유체의 엔스트로피 평균($\langle \Omega \rangle_b$)을 격자 점에 있는 유체의 엔스트로피 평균($\langle \Omega \rangle$)으로 나눈 값을 나타낸다. 이 값이 1보다 크면 마이크로버블의 집단화 현상이 나타나고, 값이 클수록 더 강한 집단화 현상이 발생한다.

Fig. 5는 스톡스 수가 0.1, 0.4, 1.0일 때 부력 수에 따른 엔스트로피의 비에 대해서 나타내었다. 스톡스 수가 클수록 엔스트로피의 비가 크며 집단화 현상이 훨씬 강하다. 부력이 커질수록 유체에 영향이 줄어들기 때문에 엔스트로피의 비가 전체적으로 작아진다.

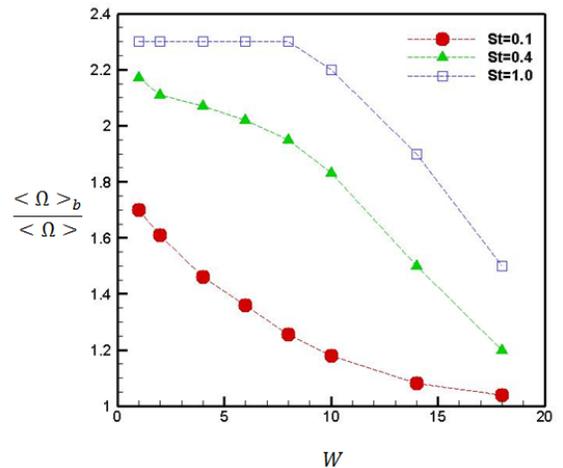


Fig. 5 Enstrophy ratio

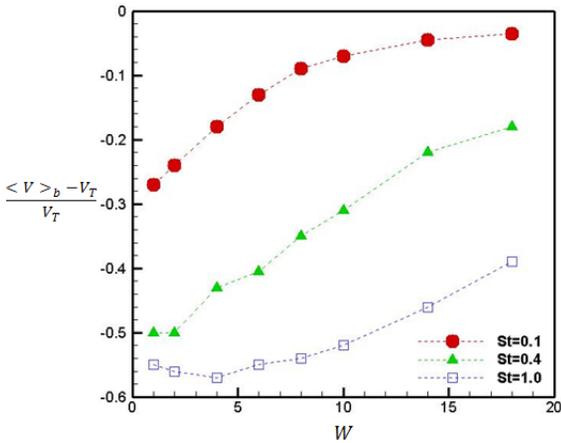


Fig. 6 Relative reduction of bubble rise velocity

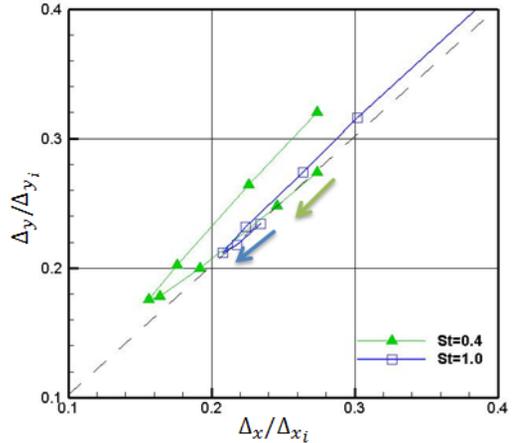


Fig. 8 Closest distance at $St = 0.4, 1.0$

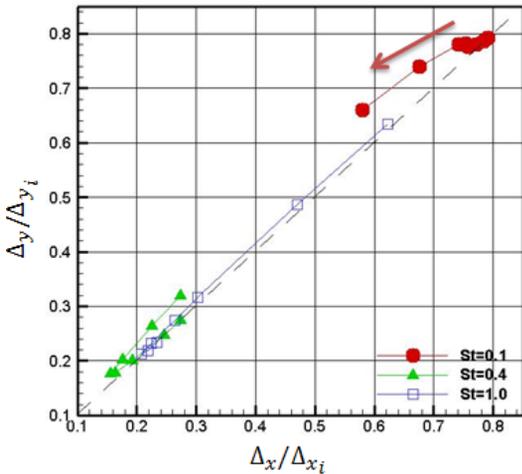


Fig. 7 Closest distance

3.3 Relative reduction of bubble rise velocity

Fig. 6는 스톱스 수가 0.1, 0.4, 1.0일 때 아무런 외력이 없는 유체에서의 버블 상승속도(V_T)에 대한 시뮬레이션에서의 마이크로버블 상승속도($\langle V \rangle_b$)에 대한 비를 나타낸다. 스톱스 수가 클수록 버블의 상승속도의 감소비가 더 커지는데 이는 스톱스 수가 클수록 마이크로버블의 집단화 현상이 강하게 나타나기 때문에 마이크로버블의 상승속도가 감소한다. 부력 수가 커질수록 부력의 영향이 강해지고 이에 비해 유체의 영향이 감소해 버블의 상승속의 감소비는 낮아진다.

3.4 Closest distance

Fig. 7은 스톱스 수와 부력에 따른 마이크로버블의 Closest

distance에 대해 나타내었다.

$$\Delta_x = \frac{1}{N_b} \sum_{i \neq j}^{i,j=N_b} \min(x_i - x_j) \tag{9}$$

$$\Delta_y = \frac{1}{N_b} \sum_{i \neq j}^{i,j=N_b} \min(y_i - y_j) \tag{10}$$

식 (9), (10)은 Fig. 7에서의 x축과 y축에 대한 변수에 대하여 나타내었다. 분모의 i 항은 처음 마이크로버블이 유체에 균일하게 뿌려진 상태에서의 평균 Δ_x, Δ_y 값을 나타내고 분자의 항은 굉장히 오랜 시간 후에 측정된 Δ_x, Δ_y 값을 나타낸다. 화살표는 부력 수가 커지는 방향을 나타내며 Table 9에서 나타난 부력 수를 각각 나타내었다. Fig. 7에서 스톱스 수가 0.1인 경우 부력 수가 커지면서 y축의 평균 closest distance가 x축의 값보다 커지게 된다. 이로 인해 Fig. 4(a)처럼 띠모양이 나타나게 된다.

Fig. 8은 Fig. 7에서 스톱스 수가 0.4와 1.0인 부분을 확대하였다. 스톱스 수가 0.4인 경우 $W = 8$ 일 때까지 closest distance가 감소하다가 그 이후 부력의 영향으로 유체의 영향력이 상대적으로 약해지면서 집단화 현상이 약화되고, y축의 closest distance가 x축의 값보다 더 커지게 되면서 띠모양이 나타나게 된다. 스톱스 수가 1인 경우 Fig. 7과 Fig. 8을 통해 $W = 4$ 보다 커지는 경우 스톱스 수가 0.4와 마찬가지로 closest distance가 각 축에 대해서 커지게 된다. 이 경우에 집단화 현상이 강하기 때문에 W 가 커지게 되도 closest distance가 y축으로 조금 치우쳐 있을 뿐 등방성 라인을 크게 벗어나지 않는다. Fig. 4(b)를 통해 이를 확인할 수 있다.

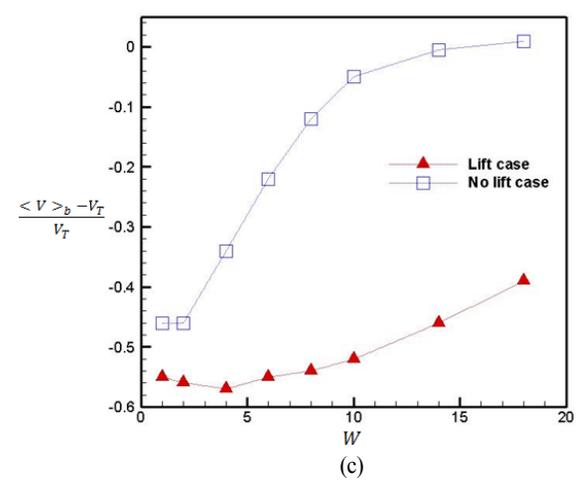
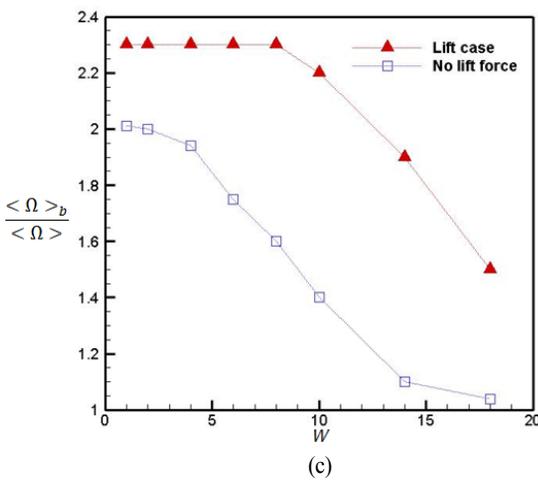
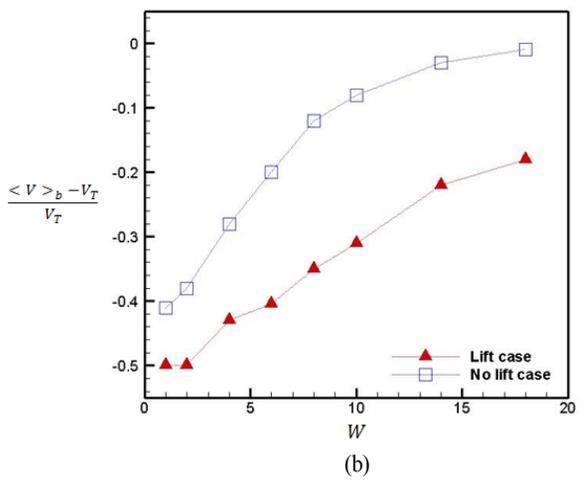
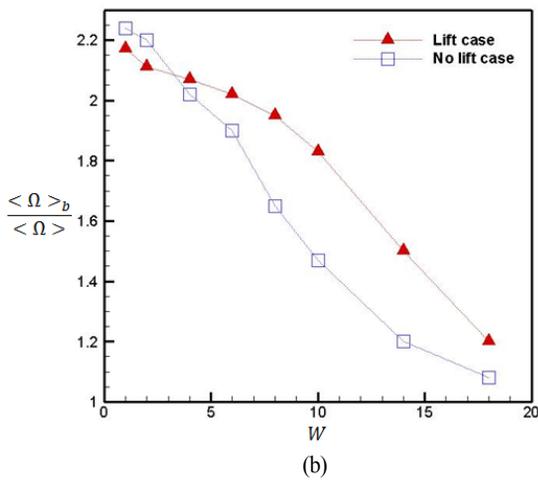
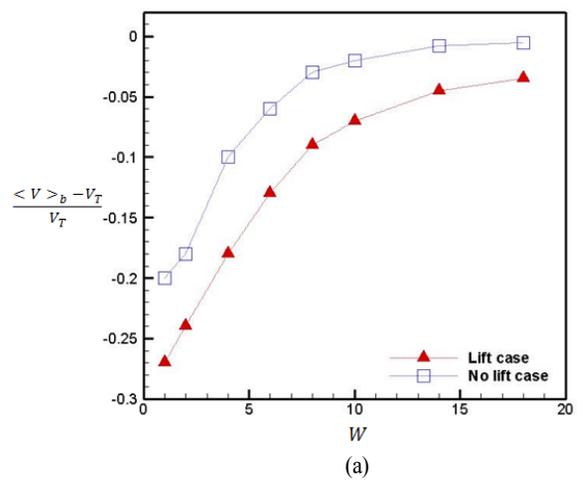
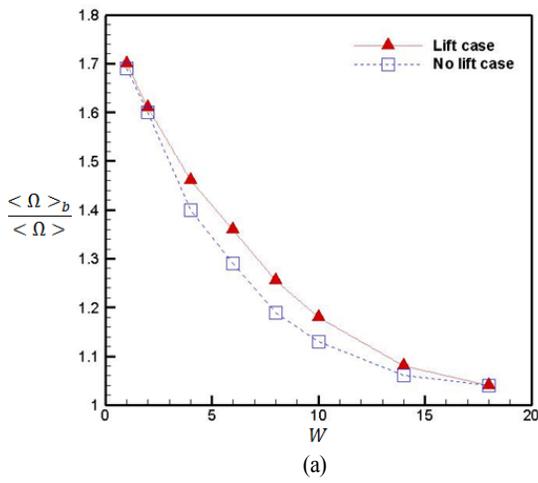


Fig. 9 Enstrophy ratio according to lift force
(a) $St = 0.1$ (b) $St = 0.4$ (c) $St = 1.0$

Fig. 10 Relative reduction of bubble rise velocity according to lift force
(a) $St = 0.1$ (b) $St = 0.4$ (c) $St = 1.0$

3.5 Effect of lift force

식 (4)에서 양력이 없는 상태에서의 마이크로버블의 거동에 대해 Wang and Maxey에 대해 시뮬레이션 한 바가 있다 [9].

Fig. 9는 스톱스 수가 0.1, 0.4, 1.0일 때 양력이 유무에 따른 엔스트로피의 비에 대한 결과를 나타내었다. Lift O인 경우는 양력이 존재하는 경우, Lift X인 경우는 양력이 존재하지 않는 경우에 대해 나타내었다. 스톱스 수가 커질수록 양력이 있을 때 집단화 현상이 더 강한 점을 알 수 있으며, 부력 수가 커질수록 일반적으로 양력이 유무에 따른 집단화 현상의 차이가 심해지는 것을 알 수가 있다.

Fig. 10은 Fig. 9과 같은 조건하에 버블의 상대적 상승속도의 감소비를 나타내었는데 이 역시 Fig. 9과 같이 스톱스 수와 부력 수가 클수록 양력으로 인한 버블의 상승속도의 감소비에 대한 차이는 더 커지게 된다.

Fig. 9과 Fig. 10을 통해 양력은 버블을 높은 와도가 있는 방향으로 작용하며 스톱스 수와 부력 수가 커질수록 양력의 영향력이 더 강해진다.

4. 결 론

본 연구에서는 직접수치해법(DNS)를 통해 마이크로버블의 거동을 스톱스 수와 부력 수를 독립적인 변수로 하여 이에 따른 결과를 분석하였다. 스톱스 수가 커질수록 마이크로버블의 집단화가 강해졌으며 특히 유체의 와도가 높은 부근에 집단화 되는 경향을 보인다. 낮은 부력 수에서 스톱스 수가 1인 경우 띠의 모양이 방향에 관계없이 나타나며 부력이 커질 경우 수직으로 작은 띠모양이 형성된다. 부력이 더욱 커지게 되면 버블의 집단화 현상과 부력의 영향으로 버블의 집단화가 높은 와도 근처를 중심으로 넓은 영역에 걸쳐 분포하게 되는 성향을 보인다. 반면에 스톱스 수가 작은 경우 부력이 커질수록 수직으로 나타난 띠모양의 형성이 오히려 강해지며 버블들이 더욱 밀집하게 되는 특성을 보인다. 이를 확인하기 위해 enstrophy ratio, relative reduction of bubble rise velocity, closest distance를 통해 정량적으로 분석을 하였으며 마이크로버블의 거동과 잘 일치하였다. 또한 양력은 높은 와도의 방향으로 작용하며, 스톱스 수와 부력 수가 클수록 양력으로 인한 집단화 현상이 강해지는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 개인연구지원사업(No. 2014R1A2A2A01006544)의 일환으로 수행된 연구로서 이에 감사드립니다.

References

- [1] 2003, Mazzitelli, I.M., Lohse, D. and Toschi, F., "The effect of microbubbles on developed turbulence," *Physics of Fluids*, Vol.15, pp.L5-L8.
- [2] 2004, Mazzitelli, I.M. and Lohse, D., "Lagrangian statistics for fluid particles and bubbles in turbulence," *New Journal of Physics*, Vol.6, p.203.
- [3] 2003, Mazzitelli, I.M., Lohse, D. and Toschi, F., "On the relevance of the lift force in bubbly turbulence," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 488, pp. 283-313.
- [4] 1987, Auton, T.R., "The lift force on a spherical body in a rotational flow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.183, pp.199-218.
- [5] 1998, Legendre, D. and Magnaudet, J., "The lift force on a spherical bubble in a viscous linear shear flow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.368, pp.81-126.
- [6] 1988, Auton, T.R., Hunt, J.C.R. and Prud'homme, M., "The force exerted on a body in inviscid unsteady non-uniform rotational flow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.197, pp.241-257.
- [7] 1995, Magnaudet, J., Rivero, M. and Fabre, J., "Accelerated flows past a rigid sphere or a spherical bubble. Part 1. Steady straining flow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.284, pp.97-135.
- [8] 1995, Chang, E.J. and Maxey, M.R., "Unsteady flow about a sphere at low to moderate reynolds number. Part 2. Accelerated motion," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.303, pp.133-153.
- [9] 1993, Wang, L.P. and Maxey, M.R., "The motion of microbubbles in a forced isotropic and homogeneous turbulence," *Applied Scientific Research*, Vol.51, pp.291-296.