

# 기포탑 유동에서의 기포분율과 혼합정도의 상관관계

Islam MD Zahidul\* · 이주범\* · 박형민†

## Relationship between void fraction and mixing in bubble column flow

Islam MD Zahidul\*, Jubeom Lee\* and Hyungmin Park†

**Abstract** Control of mixing and transport processes are the key areas that can be benefited by understanding the hydrodynamics in gas-liquid two-phase flows. In particular, the enhanced bubble-induced liquid-phase mixing is known to be a function of void fraction distribution, gas phase velocity and so on. To further our insight on the characteristics of the liquid-phase mixing induced by the bubbles, in the present study, we experimentally investigate the mixing performance of a rectangular bubble column while changing the void fraction from 0.006 to 0.075%. A shadowgraphy technique is used to measure the gas-phase properties such as void fraction and size/velocity of bubbles. On the other hand, we use dye visualization with low diffusive buoyant dye to directly measure the level of mixing. Finally, we confirm that the time taken for full mixing scales with the inverse of volume void fraction.

**Key Words** : Bubble column(기포탑), Mixing(혼합), Void fraction(기포분율), Dye visualization(염료 가시화)

### 기호설명

$A$  : 기포 그림자 이미지 면적  
 $AR$  : 기포의 가로세로비  
 $C^*$  : 무차원화된 염료의 concentration  
 $d_B$  : 기포의 지름  
 $P$  : 기포 그림자 이미지 둘레길이  
 $R_o$  : 형상인자  
 $T_c$  : 기포탑유동의 특성 시간 스케일

$T_m$  : mixing time  
 $u^*$  : 무차원화된 기포의 상승속도  
 $x$  : 수평 방향  
 $y$  : 주유동 방향(수직 방향)  
 $a$  : 시간평균 국부 기포분율  
 $\langle a \rangle$  : 체적기포분율

### 1. 서론

기체-액체 2상유동은 발전, 화학공정, 정제, 반응 및 폐수처리 등 매우 다양한 산업의 생산효율 및 시스템 안정성을 결정하는 중요한 분야이다. 특히 상승하는 기포의 후류영역에 유도되는 액체상의 유동구조<sup>(1-2)</sup>들의 상호작용으로 유도되는 2상 난류(two-phase turbulence)는 단상 난류유동과 매

† Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University  
E-mail: hminpark@snu.ac.kr

\* Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University

우 유사한 특징을 가지면서<sup>(3)</sup>, 열 및 물질전달(즉, 열전달 및 혼합)을 효과적으로 증가시키기 위한 방법으로 많은 연구가 진행되고 있다. 기포탑 반응로(bubble column reactor)는 이러한 기포류 유동의 혼합증대 성능을 이용하기 위한 시스템으로, 제한된 크기의 용기에 액체를 채우고 용기의 바닥에서 다수의 기포를 생성하여 상승시킴으로써, 용기 내 향상된 혼합을 이용하여 다양한 물리적, 화학적 반응효율 향상을 꾀하는 것이 공통된 목적이라고 할 수 있다. 다양한 목적에 따라서 최적의 혼합성능을 달성하기 위한 기포의 조건을 밝히기 위해 많은 연구들이 수행되었으며, 혼합성능은 기포분율 분포, 기포탑의 형상, 기포의 크기 및 속도 등 다양한 인자들에 의해 결정된다는 것이 보고된 바 있다<sup>(4,7)</sup>. 하지만, 현재까지 알려진 상관관계들은 실제 산업현장에 직접 적용하기에는 너무 복잡하거나 연구조건에 따라 다른 경향을 보인다는 단점을 가지고 있다.

최근 Almeras et al<sup>(7)</sup>은 기포탑에 의해 염료가 혼합이 되는 정도를 실험적으로 측정하고, 기포에 의해 염료가 완전하게 용해되는 시간(mixing time)이 기포탑의 체적평균 기포분율의 역수에 비례하여 짧아진다는 것을 보고한 바 있다. 이들이 수행한 연구는 기포탑 유동이 생성되는 용기가 폭이 매우 짧은 2차원 형상(Hele-Shaw cell)을 사용하였으며, 따라서 체적평균 기포분율이 비교적 큰  $\langle \alpha \rangle = 1.4\text{--}5.4\%$ 의 범위에서 위의 상관관계가 도출이 되었다. 하지만 상승하는 기포의 경우 크기에 따라 단순히 수직으로 상승하는 것이 아니라, 2차원 또는 3차원으로 진동하며 상승하는 path instability가 존재하는 것이 매우 잘 알려져 있으며, 이는 특히 벽 근처를 상승하는 기포의 경우 매우 복잡한 경향을 보이는 것으로 알려져 있다<sup>(8)</sup>. 또한 기포탑 유동이 응용되는 실제 조건이 대부분 3차원 용기를 사용하는 것을 고려해보면, 더 다양한 조건에서 기존의 상관관계를 검증할 필요가 있다고 생각된다.

따라서, 본 연구에서는 3차원 직육면체 형상의 용기에 물을 채우고 바닥에 설치된 노즐을 통해 기포탑을 생성하여, 유도되는 액체상의 혼합정도를 정량적으로 측정, 분석하고자 한다. 이를 위하여 바닥에 설치된 노즐을 on/off 시켜가면서 기포

분율과 기포탑의 형상을 제어할 수 있도록 하였으며, 이 때 생성되는 기포들의 물리량(즉, 크기, 속도 및 분포 등)은 고속 그림자 이미지(high-speed shadowgraphy)을 이용하여 측정하였다. 액체상의 혼합은 일정부피의 염료를 용기 바닥에 주입하고, 이 염료가 기포탑에 의해 용기 전체에 균일하게 용해되는 시간을 측정하여 정량적으로 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 기포탑(bubble column)

본 연구에서는  $150 \times 150 \times 500 \text{ mm}^3$  크기의 직육면체 형상의 시험부(투명한 아크릴 재질)를 제작하였고, 기포탑을 생성하기 위하여 바닥에 독립적으로 제어가 가능한 64개( $8 \times 8$  배치, 8 mm 간격)의 공기노즐(내경 0.84 mm)을 설치하였다. 각 노즐은 레귤레이터와 솔레노이드 밸브 등을 통해 plenum chamber로 연결이 되어 있으며, 공기압축기를 이용하여 plenum chamber내 압력을 일정하게 유지할 수 있도록 하였다(Fig. 1). 이 때, 액체상으로는 물을 사용하였으며, 자유류가 없는 정지된 경우에 대하여 실험을 수행하였고, 액체상의 유동은 오직 기포탑에 의해 유도된 것이다. 기포분율(또는 기포탑의 형상)의 영향을 알아보기 위하여, 64개의 노즐 중  $2 \times 1$ ,  $2 \times 2$  그리고  $4 \times 4$  배열의 노즐을 이용하여 기포를 생성하였으며, plenum chamber의 압력을 0.08-0.32 MPa로 변화시켰다. 이렇게 해서 모두 12가지 체적기포분율(0.006-0.075%)에 대한 연구를 수행할 수 있었다. 이때, 체적기포분율은 시험부 전체 부피에서 기포가 차지하는 비율을 계산한 것이다. 본 기포탑을 구성하는 기포의 크기는 4.1-4.9 mm에 분포하며, 종단 상승속도를 기준으로 하는 Reynolds 수, Weber 수 그리고 Eötvös 수는 각각 1,200, 1.24 및 3.80이다.

### 2.2 기포 분포 및 크기 측정

기포탑을 형성하는 기포의 분포, 속도 및 크기를 측정하기 위하여 그림자이미지 기법을 사용하였다(Fig. 2). 이를 위하여 광원으로는 LED 패널을 사용하였다. 측정된 이미지로부터 기포 각각의 형

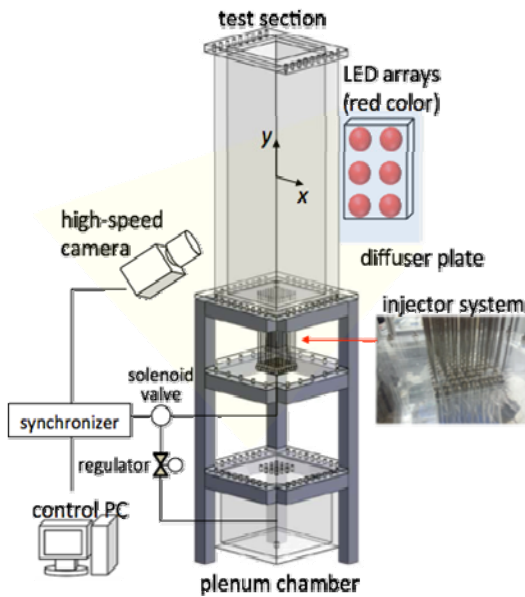


Fig. 1. Experimental setup for bubble column.

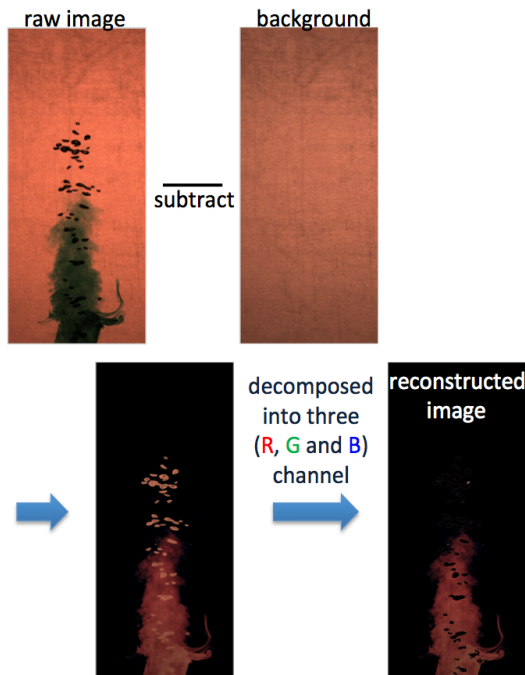


Fig. 2. Measurement of mixing performance with dye visualization.

상을 정확하게 추출하기 위해서 개선된 이분법 (binarization)을 사용하였으며<sup>6)</sup>, 그림자 이미지가 중첩되어 나타나는 경우에는 Watershed transform 알고리즘을 적용하였다. 이 때, 단일기포 또는 복수의 기포 이미지인지를 판단하기 위해서 형상인자( $R_o = P/(4\pi A)^{1/2}$ ,  $P$ : 둘레길이,  $A$ : 면적)를 사용하였다. 이렇게 해서 구분한 각 기포들은 시간에 따라 추적이 가능하며, 매 순간 기포가 차지하는 면적의 중심에 대하여 PTV (particle tracking velocimetry) 알고리즘을 적용하여 기포의 속도를 측정하였다.

### 2.3 염료 가시화를 통한 혼합 측정

앞서 설명한 바와 같이, 기포탑에 의한 액체상의 혼합성능의 변화를 정량적으로 측정하기 위하여 전통적인 염료가시화 기법을 확장, 응용하여 적용하였다. 즉, 녹색의 food color 염료, 물 그리고 에탄올을 혼합하여 물과 밀도를 같게 만든 in-house low diffusive buoyant dye를 사용하여, 동일한 양의 염료가 기포탑에 의해 완전히 용해될 때까지 걸리는 시간을 측정하는 것이다. 각각의 경우, 염료는 외력이 거의 작용하지 않도록 매우 주의하여 기포가 생성되는 노즐 위쪽에 위치할 수 있도록 주입하였다. 이를 위해, 정확한 양을 조절할 수 있는 injection pump와 sparger 다공성 노즐을 연결하여 염료주입 장치를 만들었다.

기포탑 유동의 염료가시화 이미지는 흑백 카메라가 아니라 컬러 카메라를 이용하여 측정하였으며, RGB 색상채널로 raw image를 분리해낼 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 녹색의 염료를 사용하였기 때문에, 이미지를 구성하는 각 pixel의 G 채널의 값을 이용하여 염료의 concentration을 측정하는 것이 가능하다(Fig. 2). 이 때, 기포탑에 의해 염료가 완전히 용해될 때까지 걸리는 mixing time( $T_m$ )은 시험부 내 모든 위치에서의 concentration profile이 평형상태로 일정하게 될 때까지 걸리는 시간으로 정의하였다.

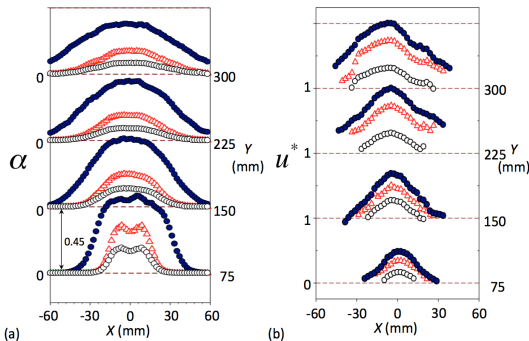
이러한 방법은, 기포탑에 의한 액체상의 혼합정도를 정량적으로 측정함과 동시에 기포탑에 의해 유도되는 액체상 유동장을 정성적으로 가시화할 수 있다는 장점이 있다.

### 3. 결과 및 분석

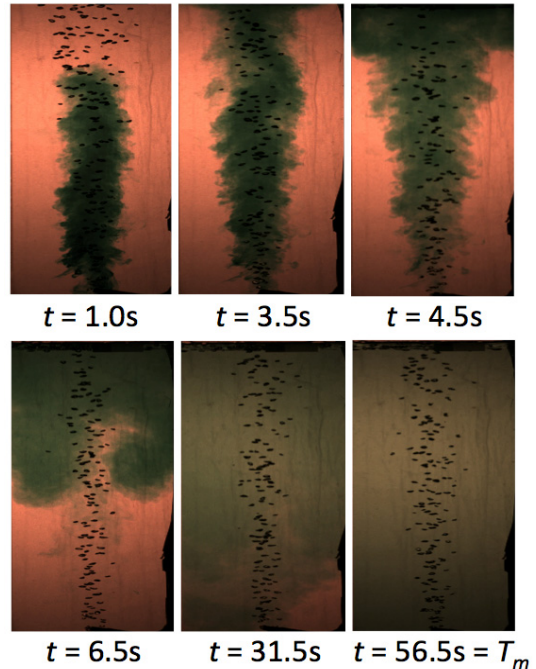
#### 3.1 기포탑 특성

Fig. 3은 본 연구에서 측정된 12가지 기포분율의 경우 중 대표적인 3가지 경우에 대한 기포분율 및 기포 상승속도의 분포를 기포탑의 높이에 따라 측정한 결과를 도시한 것이다. 모든 경우에 대하여 공통적으로, 기포분율이 가운데 부분에서 최대값을 가지는 모자형상의 분포를 가지고 있으며, 기포탑이 발달함에 따라 점차 최대값이 줄어들지만 모자형상의 폭이 넓어지는 것을 확인할 수 있다(Fig. 3a). 한편, 기포의 상승속도 역시 가운데 부분에서 최대값을 가지는 점은 유사하지만, 기포분율과는 달리 기포탑이 발달함에 따라 최대값이 증가하여 일정하게 유지되는 특징을 확인할 수 있다(Fig. 3b). 기포분율과 마찬가지로, 기포의 상승속도 분포 역시 높이가 증가하면서 폭이 넓어지는 것을 볼 수 있다. 한편, 최대 기포분율 및 기포의 상승속도 모두 기포탑의 체적기포분율이 증가함에 따라 같이 증가하는 것을 알 수 있다.

기포탑의 혼합성능에 대해서 논의하기 전에, 염료가시화를 통해 유동장에 대한 정성적인 분석을 수행할 수 있다. Fig. 4는 2 × 2 배열의 노즐로부터 생성된 기포탑(체적기포분율 0.02%)에 의한 유동장을 시간에 따라 가시화한 것을 나타낸 것이다.



**Fig. 3.** Distribution of bubble statistics at different heights: (a) void fraction; (b) normalized vertical velocity. ○, 1×2 nozzles with  $\langle \alpha \rangle = 0.01\%$ ; △, 2×2 nozzles with  $\langle \alpha \rangle = 0.02\%$ ; ●, 4×4 nozzles with  $\langle \alpha \rangle = 0.075\%$ .

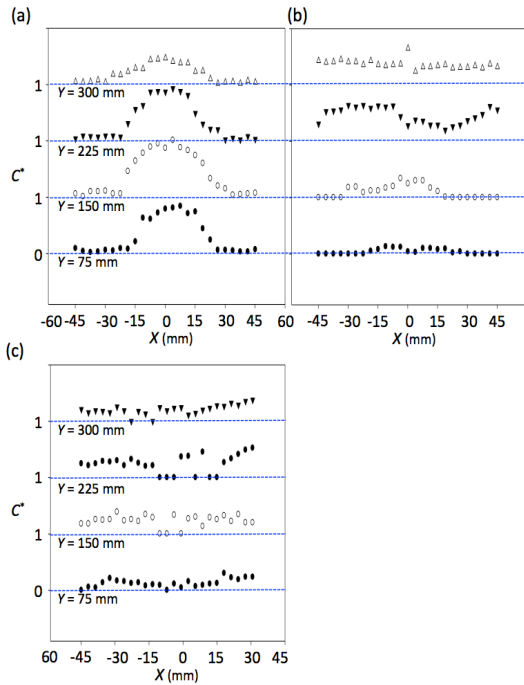


**Fig. 4.** Dye visualization of the liquid flow induced by the bubble column of 2×2 nozzles with  $\langle \alpha \rangle = 0.02\%$ .

직육면체 형상의 시험부 중앙 바닥에서 기포탑이 생성되기 때문에, 시간이 지남에 따라서 시험부 좌우에 대칭으로 회전하는 유동장이 생겨나는 것을 확인할 수 있다. 이는 기존의 모든 연구들에서 동일하게 보고가 된 것이기도 하다<sup>(6-7)</sup>. 또한, 시간이 지남에 따라 시험부 내 모든 영역에 걸쳐서 염료의 농도가 일정하게 되는 것을 확인할 수 있다.

#### 3.2 기포탑의 혼합성능

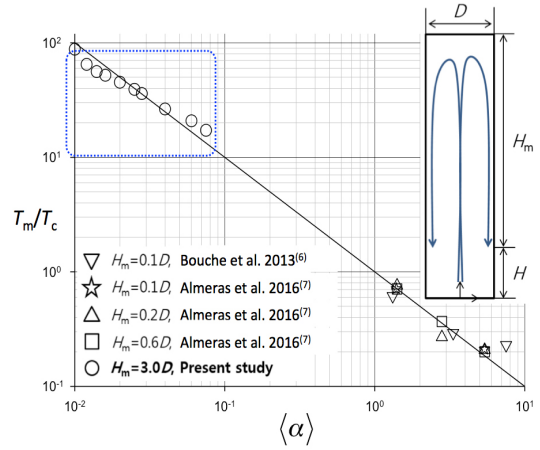
Fig. 4의 가시화 이미지를 이용하여 시간에 따른 염료의 concentration을 측정할 수 있으며, Fig. 5에 대표적인 결과를 도시하였다. 즉, 기포탑을 가동하고 6.5초가 지난 후에, 3가지 경우(Fig. 3에 도시한 경우와 동일함)의 기포탑 조건에 대하여 염료의 농도분포를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 체적기포분율이 상대적으로 작은 경우에는 가운데 부분이 상대적으로 높은 염료 농도를 가지는 분포를 가지고 있지만(Fig. 5a), 체적기포분율이 증가함에 따라서 같은 시간이 지났지만, 이미 농도의



**Fig. 5.** Profiles of normalized dye concentration at different heights at  $t = 6.5s$ : (a)  $1 \times 2$  nozzles with  $\langle \alpha \rangle = 0.01\%$ ; (b)  $2 \times 2$  nozzles with  $\langle \alpha \rangle = 0.02\%$ ; (c)  $4 \times 4$  nozzles with  $\langle \alpha \rangle = 0.075\%$ .

분포가 매우 일정한 상태로 발달한 것을 볼 수 있다(Fig. 5c). 또한, 흥미로운 사실은 기포분율의 분포와 concentration의 분포가 매우 유사한 형상을 가지고 있다는 사실인데, 특히 Fig. 3(a)와 Fig. 5(a)의  $1 \times 2$  배열 노즐의 경우를 보면, 그 경향성을 명확하게 확인할 수 있다. 이는 기포탑의 혼합성능이 기포분율과 밀접한 상관관계를 가진다는 기존의 연구결과들의 결과를 뒷받침하는 것으로, 다음의 분석을 수행하는 근거가 된다.

앞서 언급한 바와 같이, Almeras et al.<sup>(7)</sup>은 기포탑에 의해 염료가 완전하게 용해되는 시간(mixing time)이 기포탑의 체적평균 기포분율의 역수에 비례하여 짧아진다는 것을 보고한 바 있다. 본 연구에서는 이를 검증하기 위하여 12가지 경우의 실험 결과와 과거 연구들의 데이터를 모아서 하나의 그래프로 도시하였다(Fig. 6). 이 때, mixing time( $T_m$ )은 기포탑유동의 특성 시간 스케일( $T_c$ )로 무차원화하였는데, 이는 기포탑유동의 크기를 기포의 상



**Fig. 6.** Variation of normalized mixing time with volume void fraction.

승속도로 나는 값이다. 그림에서 보는 바와 같이, 본 연구에서의 실험결과를 포함하여, 다양한 조건에서 측정한 결과들이 모두 하나의 그래프로 경향성이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히 본 연구에서 고려한 기포탑은 기존 연구와는 달리 3차원의 시험부 형상에 비교적 낮은 기포분율을 고려한 것이지만, 기존의 연구들과 동일한 경향성을 보이는 것을 확인하였다. 따라서, 기포탑에 의한 혼합성능을 정량적으로 나타내는 mixing time은 체적 기포분율의 역수에 비례하여 짧아진다는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 3차원 기포탑 유동에 의한 액체상의 혼합성능을 정량적으로 분석하기 위한 실험 연구를 수행하였다. 이를 위해, 우선 기포에 대한 물리량을 고속 그림자이미지 기법을 이용하여 측정하였으며, 혼합성능을 측정하기 위해 염료가 시화 기법을 확장, 응용하여 적용하였다. 기포의 여러 물리량들과 염료의 농도분포 사이의 관계를 분석하여 기포분율의 분포가 혼합성능과 가장 밀접한 관계를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 이 관계를 정량적으로 도출하기 위하여 일정하게 주입한 염료가 시험부 내에 균일하게 용해되는데 까지 걸리는 시간을 체적기포분율과 함께 분석한

결과, 기포탑의 혼합성능은 체적기포분율의 역수에 비례하여 증가하는 것을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 정부 재원으로 한국연구재단을 통해 미래창조과학부의 일반연구자지원사업(NRF-2016 RIC1B2012775) 및 원자력연구기반확충사업(NRF-2016M2B2A9A02945068)의 후원을 받아, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## REFERENCE

- 1) Rensen, J., Luther, S. and Lohse, D., 2005, "The effect of bubbles on developed turbulence," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 538, pp.153~187.
- 2) Lee, J. and Park, H., 2017, "Wake structures behind an oscillating bubble rising close to a vertical wall," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 91, pp.225~242.
- 3) Kim, M., Lee, J. H. and Park, H., 2016, "Study of bubble-induced turbulence in upward laminar bubbly pipe flows measured with a two-phase particle image velocimetry," *Experiments in Fluids*, Vol. 57, pp.55~75.
- 4) Delnoij, E., Kuipers, J. A. M. and Swaaij, W. P. M., 1997, "Dynamic simulation of gas-liquid two-phase flow: effect of column aspect ratio on the flow structure," *Chemical Engineering Science*, Vol. 52, pp.3759~3772.
- 5) Rensen, J. V. and Roig, V., 2001, "Experimental study of the unsteady structure of a confined bubble plume," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 27, pp.1431~1449.
- 6) Bouche, E., Cazin, S., Roig, V. and Risso, F., 2013, "Mixing in a swarm of bubbles rising in a confined cell measured by mean of PLIF with two different dyes," *Experiments in Fluids*, Vol. 54, pp.1552.

- 7) Almeras, E., Cazin, S., Roig, V., Risso, F. Augier, F. and Plais, C., 2016, "Time-resolved measurement of concentration fluctuations in a confined bubbly flow by LIF," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 83, pp.153~161.
- 8) Jeong, H. and Park, H., 2015, "Near-wall rising behaviour of a deformable bubble at high Reynolds number," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 771, pp.564~594.