

## 입자와 주위유체와의 상호작용에 관한 연구

최 해 만<sup>†</sup>, 栗原 健\*, 文字 秀明\*, 松井 剛一\*

<sup>†</sup> 한국표준과학연구원, Univ. of Tsukuba

### A Study on the Interaction between Particles and Surrounding Fluid

Hae Man Choi<sup>†</sup>, T. Kurihara, H. Monji, G. Matsui

<sup>†</sup> Fluid Flow Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-600, Korea

\*Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8573, Japan

(Received May 11, 2001; revision received January 7, 2002)

**ABSTRACT:** The fundamental mechanism of a dispersed two-phase flow was investigated. Experiments were carried out to understand how the particles behaves under the influence of the particle size, shape, metamorphoses (bubble) and buoyancy of a single particle which is ascending from the standstill water. Two CCD cameras were employed for image processing of the behavior of the particles and the surrounding flow, which was interpreted with the technique of correlation PIV (Particle Image Velocimetry) and PTV (Particle Tracking Velocimetry), respectively. The experimental results showed that the large density difference between a particle and water caused high relative velocity and induced zigzag motion of the particle. Furthermore, the turbulence intensity of a bubble was about twice the case of the spherical solid particle of similar diameter.

**Key words:** Dispersed two-phase flow(분산 이상류), Particle(입자), PIV(입자영상 유속계), PTV(입자추적 유속계), Image processing(화상처리)

### 1. 서 론

고체입자와 기포가 연속상인 액상과 기상 중을 분산하여 유동하는 흐름을 분산 이상류라고 부른다. 이러한 흐름은 광석, 석탄 등의 파이프 운송 라인, 여러 가지 화학 플랜트, 원자력, 화력발전소 등의 에너지 관련 기기를 비롯하여 여러 곳에서 볼 수 있다.

이 분산 이상류를 구성하고 있는 분산상, 즉 입자는 입자의 크기와 형태, 변형(기포), 부력 등에 의해 영향을 받고 이 요인들이 복잡하게 관련되어 유동하고 있다. Zun<sup>(1)</sup>은 단일 입자운동에서

액상에 속도구배가 존재할 때 기포의 상대속도가 관벽과 관 중심에서 다르기 때문에 기포 주위에 순환 흐름이 생겨 양력을 받으므로 "transverse lift force"가 발생한다고 하였다. Rouhani<sup>(2)</sup>의 "wall-vortex effect"는 관벽 부근에 발생하는 와류의 구심력에 의해 기포가 영향을 받게 된다고 하는 것이다. Tsuchiya and Fan<sup>(3)</sup>는 기포의 하류에서 saddle-point의 존재를 확인하여 고체 하류와 마찬가지로 saddle-point에서의 난류에너지가 생성된다고 서술하고 있다. Matsui and Monji<sup>(4)</sup>는 PTV를 사용하여 고체입자의 크기와 형태, 부력이 입자 움직임에 영향을 미치는 것을 연구하였다. 또 Monji and Matsui<sup>(5,6)</sup>는 PIV를 사용하여 단일입자가 상승할 때 입자의 운동과 주위유체(물)의 흐름구조를 가시화하였다. 그러나 아직 분산 이상류의 상세한 유동구조는 충분히 해명되었

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-42-868-5310; fax: +82-42-868-5028

E-mail address: hmchoi@kriss.re.kr

다고는 말할 수 없다. 그래서 우선 분산 이상류의 기본 특성 파악을 위해 단일입자 운동에 대한 보다 상세한 연구를 행할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 단일입자의 운동에 영향을 미치는 여러 가지 인자 중, 입자의 크기와 형태, 변형(기포), 부력이 입자 움직임에 어느 정도 영향을 미치는가를 파악하고, 동시에 단일입자 주위의 유동구조를 화상계측법의 하나인 PIV(Particle Image Velocimetry)와 PTV(Particle Tracking Velocimetry) 기법으로 가시화하여 입자와 주위유체와의 상호작용을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같으며 입자 주입구, 수직 상승관, 시험관로 및 입자분리 탱크로 구성되어 있다. 수직 상승관은 내경 40 mm, 길이 2m의 아크릴 원관으로 제작하였다. 입자 주입부에서 고체입자는 한 입자씩, 기포는 주사기를 사용하여 주입하였다. 주입부의 하류 30 D(D: 파이프 내경)의 곳에 비디오 카메라로 촬영하기 위한 시험관로가 설치되어 있다. 시험관로에는 water jacket을 설치하여 화상의 찌그러짐을 방지하였다. 액상으로는 물을 사용하였고 흐름이 정지된 상태에서 입자 주입구에 입자를 주입하였다.

실험에 사용한 각 입자는 Table 1과 같으며 구형 고체입자는 액상과 밀도차가 작은 것으로 입자 직경이 다른 것을 3종류(직경 5.6, 7.1, 9.5 mm)와 크기는 같지만 밀도가 다른 2종류(solid\_a, \_b)를 사용하였으며, 비구형 고체입자로는 반구(solid\_c), 편평 타원체(solid\_d)를 사용했다. 기포

Table 1 Specification of particles

| Particles | Diameter d [mm] | Density [kg/m <sup>3</sup> ] | Shape   |
|-----------|-----------------|------------------------------|---|
| Solid     | 5.6             | 860                          | Sphere  |
|           | 7.1             |                              |   |
|           | 9.5             |                              |   |
| Solid_a   | 10              | 57.3                         | Hemisphere (d=10 mm)                                  |
| Solid_b   | 10              | 647                          |   |
| Solid_c   | 7.9             | 955                          |   |
| Solid_d   | 9.4             | 233                          | Oblate ellipsoid                                      |
|           |                 |                              | Major axis length 10.6 mm<br>Minor axis length 4.5 mm |
| Bubble    | 5.7             | 1.18                         | Oblate ellipsoid                                      |
|           | 7.3             |                              |   |
|           | 9.1             |                              |   |
|           | 12.4            |                              | Oblate ellipsoidal cap                                |

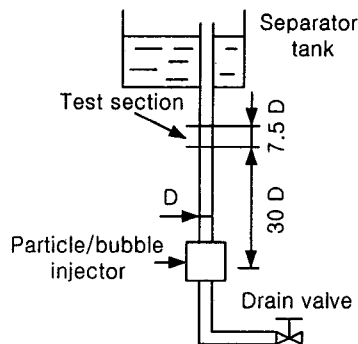


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus (D=40 mm).

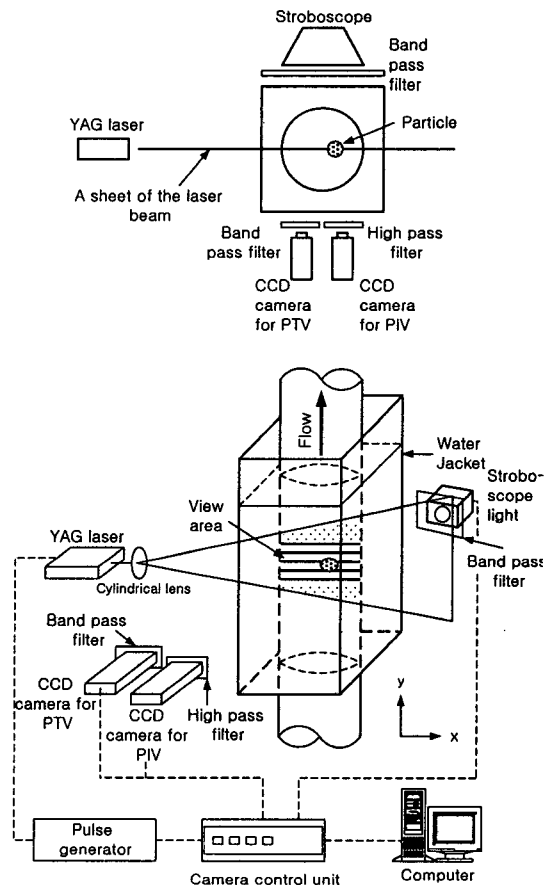


Fig. 2 Schematic of test section and image processing system.

는 공기를 사용하였으며 입자 직경이 다른 4종류 (직경 5.7, 7.3, 9.1, 12.4 mm)를 사용했다. 각 입자에 대해서는 30회씩 실험을 하여 각각의 입자의 크기, 밀도, 변형(기포), 부력이 입자거동에 미치는 영향을 관찰했다.

Fig. 2에 시험관로 및 화상처리시스템의 개략도를 표시하였다. 본 연구에 사용한 PIV는 double pulse laser(25 mJ) 광을 시트 형상으로 하여 1/30 초 간격으로 두 번 시험관로를 비추어 이것을 수직방향에서 CCD 비디오 카메라를 사용하여 촬영했다. 화상의 이미지 분해능은 0.115 mm/pixel이다. 촬영된 화상은 화상처리 포트(디스플레이 메모리; 512×512×8비트×3(RGB))를 통해 컴퓨터로 보내고 화상해석을 하여, 미리 물에 혼합한 추적입자(재질: 폴리프로필렌, 밀도: 1500 kg/m<sup>3</sup>, 직경: 10 μm)의 농도분포의 상호 상관관계를 계산하고 최대 상관관계가 발생하는 지점에서 유체의 이동방향, 이동거리, double pulse의 시간간격을 이용하여 속도 벡터를 산출했다. 입자의 움직임은 PTV로 측정했다. CCD 카메라와 반대쪽에 있는 스트로보는 입자의 윤곽을 측정하는 데 사용하였다. PIV와 PTV 사이의 간섭을 피하기 위해 파장이 다른 범위를 갖는 광학필터들을 각각 2대의 CCD 카메라와 스트로보 앞에 설치하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 입자와 주위흐름의 속도분포와 와분포

각 입자의 형상(PTV)과 그 주위흐름의 화상

(PIV)을 합성하여 순간영상을 가시화한 실험결과 중에서 입자직경이 거의 같은 solid 9.5, solid\_a, bubble 9.1 및 bubble 12.4를 0, 35, 70 ms의 간격에서 주위흐름의 속도분포와 와분포도가 Figs. 3~6이다. 와는 시계방향을 붉게, 반 시계방향을 청색으로 표시하였다.

주위유체와 밀도 차가 작은 구형고체입자 solid 9.5(Fig. 3)는 정지된 물 중에서 수직으로 상승하고 입자의 바로 아래에 그대로 수직방향의 최대 속도값이 측정되었다. 또 입자의 좌우 끝부분에서 수직방향의 강한 대칭적인 와가 발생한다.

주위유체와의 밀도차가 큰 solid\_a(Fig. 4, 레이놀즈수: 3180)에서는 입자가 지그재그 운동을 하여 진행방향이 변하며, t=0 에서 t=35ms에 걸쳐 카르만 와류<sup>(7)</sup> 현상에 의해 와가 분리되는 현상이 보인다. 이 와의 분리에 의해 구형 고체입자와 주위유체 사이의 밀도차가 직선운동에서 지그재그 운동이 되고 와의 방출과 함께 진행방향이 변화되는 움직임을 반복하면서 상승한다.

Bubble 9.1(Fig. 5, 레이놀즈수: 1450)도 solid\_a와 같은 와의 방출이 보여진다. 기포가 편평 고체입자와 같은 모양으로 편평할 때 아래 면의 끝단에 와가 발달한다. 특히 기포가 상승하면서 주위유체로부터 큰 항력을 받아 이 항력에 의해 편평률이 변화되며, 입자 좌측 끝부분에서 와가 방출되면 입자의 좌측은 위쪽으로 상승하고, 아래 쪽이 된 입자의 우측은 다시 입자 우측의 끝단에 와가 생성되면서 입자 우측이 상승한다. 기포가 편평 타원체와 같은 모양으로 편평할 때 기포 아래 면의 끝단에 와가 발달한다. 기포는 이 형상

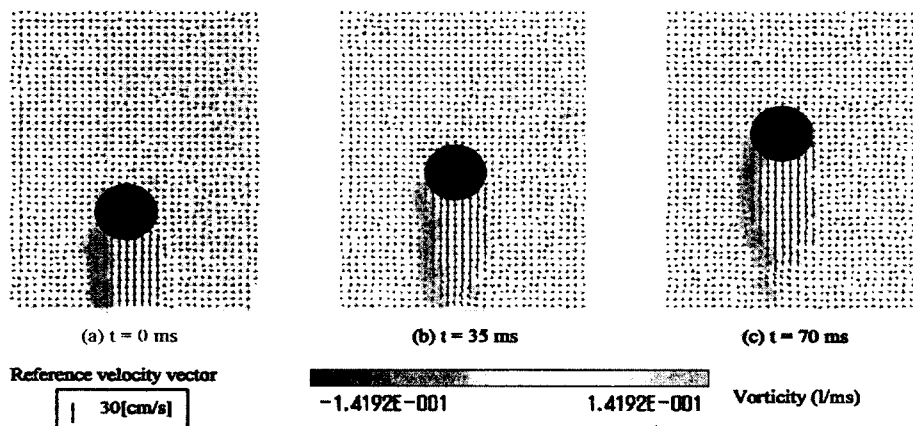


Fig. 3 Average velocity field and vorticity (solid 9.5).

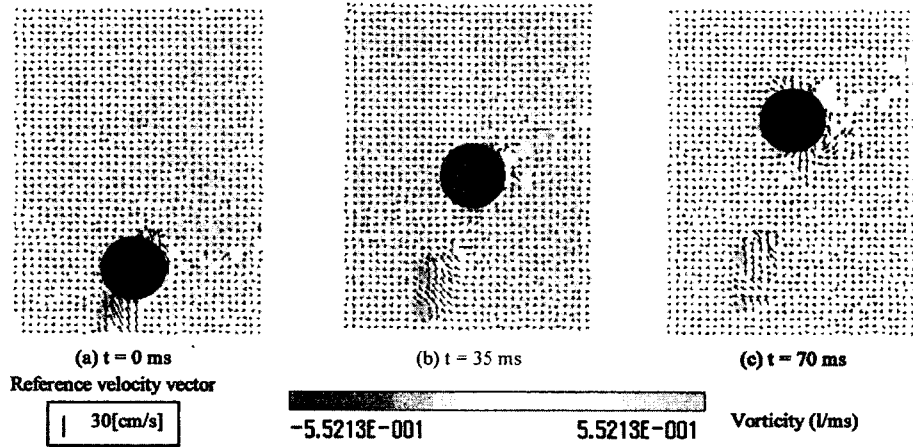


Fig. 4 Average velocity field and vorticity (solid\_a).

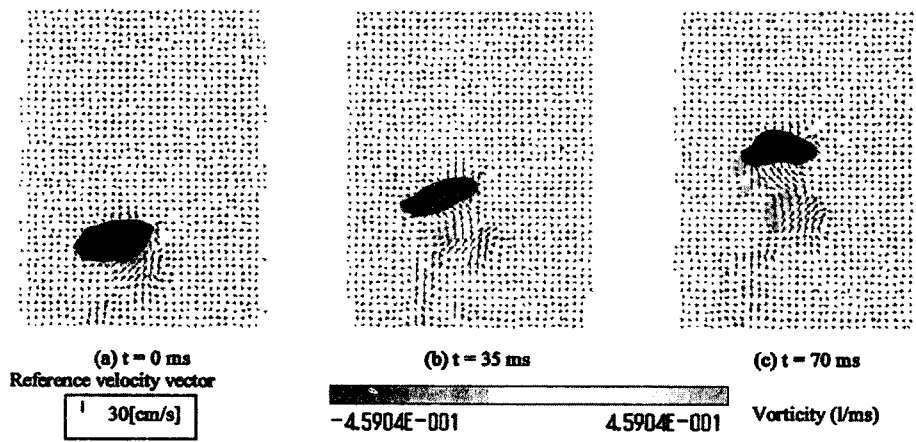


Fig. 5 Average velocity field and vorticity (bubble 9.1).

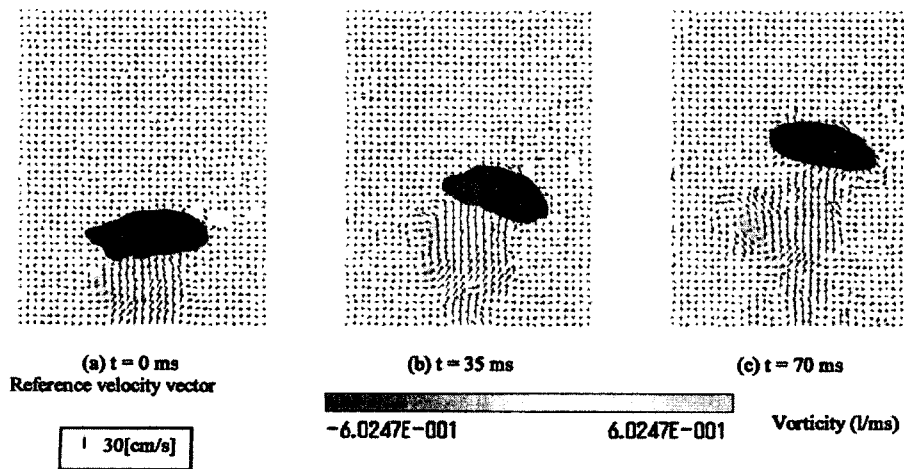


Fig. 6 Average velocity field and vorticity (bubble 12.4).

을 반복하면서 진행방향이 변하는 지그재그 운동을 하고 있고 구형에 가까운 와가 방출된다. 또 Fig. 6(bubble 12.4)과 같이 입자직경이 커지면 레이놀즈수도 커져(레이놀즈수 : 1960) bubble 9.1에 비해 와는 장시간에 걸쳐 그 형태가 유지되고 와의 크기가 크다.

**3.2 입자의 평균 상승속도와 관 단면방향 평균 이동속도**

Fig. 7의 각 입자 상승속도( $V_0$ )는 입자의 중심 좌표에서 30회 반복하여 평균값을 산출했다. 관 단면방향 평균 속도( $V_{0y}$ )의 측정 불확도(95% 신뢰수준)는  $0.94 \times 10^{-2}$ , 반복성은  $2.40 \times 10^{-2}$ 이다. 입자와 주위유체 사이의 밀도차가 작은 경우인 solid 5.6~9.5는 입자직경이 커지면 부력이 커져 상승속도가 증가한다. 형상과 크기가 같은 구형 입자인 solid\_a, solid\_b의 상승속도는 밀도가 작은 solid\_a가 크며, solid\_a의 상승속도는 구형이 아니며 밀도가 큰 다른 고체입자의 상승속도보다 크고, 또한 기포보다 상승속도가 크다. 그러나 구형 고체입자 solid 9.5와 긴 축과 짧은 축을 측정하여 구한 등가직경이 거의 같은 편형 고체입자 solid\_d의 상승속도를 비교하면, 구형과 편형 형태 차이에 의해 입자가 상승할 때 항력을 받아 입자밀도가 작은 solid\_d의 상승속도가 작다. 그러나 bubble 5.7~12.4는 입자직경이 크게 되어도 상승속도는 거의 변하지 않았다. 이것은 기포가 상승할 때 변형되어 큰 항력을 받게 되고 이 항력은 입자직경이 크기에 따른 부력의 효과가 상

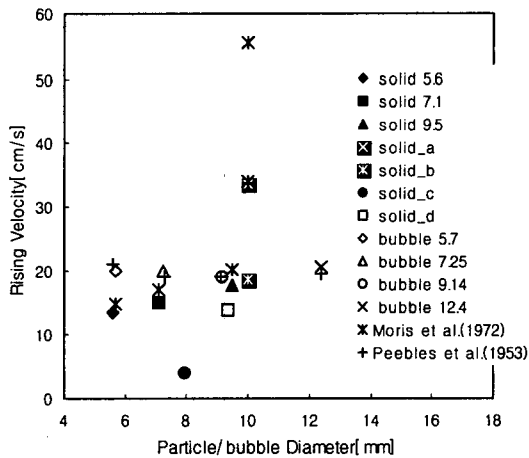


Fig. 7 Rising velocity of particles and bubbles.

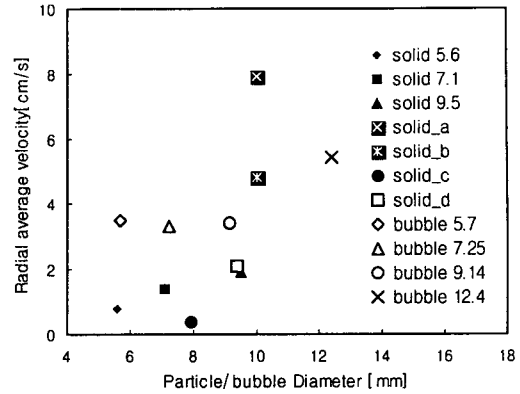


Fig. 8 Radial average velocity.

쇄되어 기포의 상승속도는 변하지 않는 것으로 생각된다.

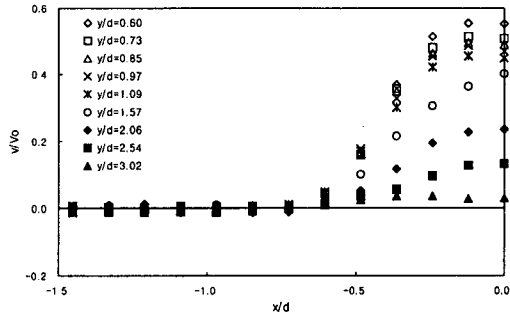
고체입자/기포의 상승속도는 고체입자의 경우 Moris et al.,<sup>(8)</sup> 기포의 경우 Peebles et al.<sup>(9)</sup>의 결과와 비교해 보면 고체입자/기포의 상승속도가 Moris 및 Peebles의 결과보다 느리거나 일치하는 것을 알 수 있다. 이 이유는 고체입자/기포가 파이프 내에서 상승하므로 관벽의 영향에 의해 입자의 속도가 느린 것으로 판단된다. 이 관벽에 의한 느린 상승속도는 입자직경이 클수록 잘 보인다.

Fig. 8은 각 입자의 관 단면방향 이동속도( $U_0$ )는 1/30초 간격에서 입자의 중심위치를 계속하여 속도 평균을 구했다. 평균값은 입자가 측정면 내에 들어와서 나갈 때까지 절대값의 평균을 취한 것이다. 이 속도 평균의 측정 불확도(95% 신뢰수준)는  $4.74 \times 10^{-2}$ , 반복성은  $2.56 \times 10^{-2}$ 이다. 물과 밀도차가 적은 solid 5.6~9.5는 기포와 다른 고체입자에 비해 수직으로 상승하므로 관 단면 이동속도가 작다. Solid\_a와 solid\_b는 관 단면방향 이동속도가 큰 것으로 보아 지그재그 운동을 하고 있다. 반구인 solid\_c는 거의 수직운동을 하여 관 단면 이동속도가 매우 적다.

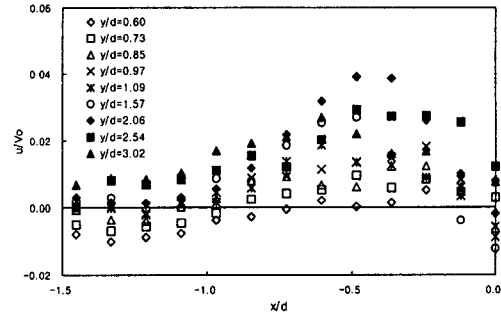
**3.3 입자와 그 하류와의 상호작용**

**3.3.1 입자 하류의 관 축 및 관 단면 방향 속도 분포**

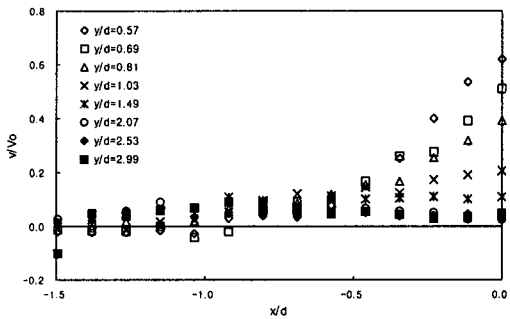
Fig. 9에 Fig. 7에 표시한 입자들을 입자의 상승속도로 무차원화시킨 입자 하류의 관 축 방향의 속도분포  $v/V_0$ ( $v$ : 관 축 방향 속도,  $V_0$ : 입자 평균 상승속도)와 관 단면 방향의 속도분포  $u/V_0$ ( $u$ : 관 단면 방향 속도)를 도시하였다. PTV에서



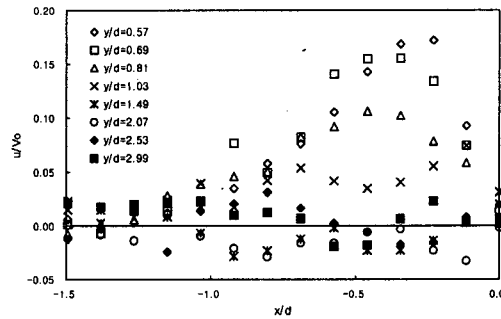
(a) Solid 9.5 (v)



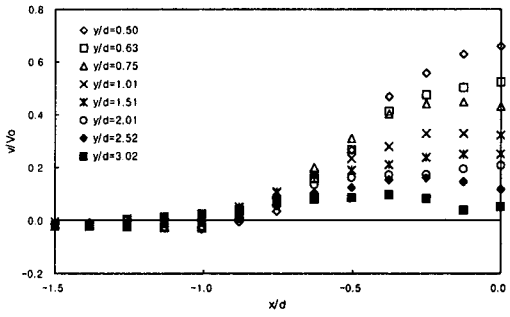
(b) Solid 9.5 (u)



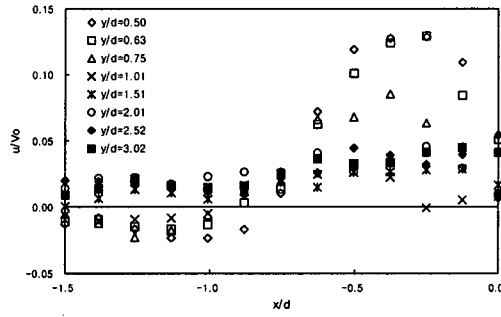
(a) Solid\_a (v)



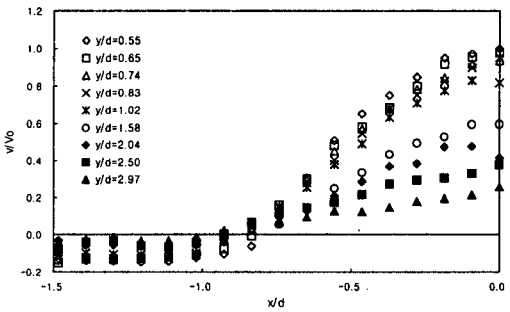
(b) Solid\_a (u)



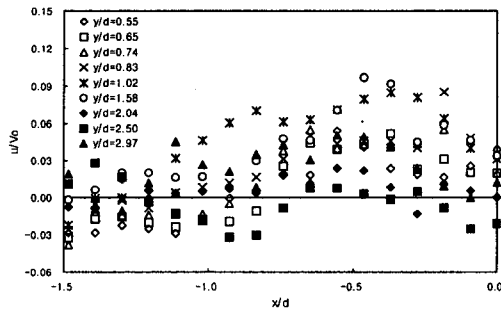
(a) Bubble 9.1 (v)



(b) Bubble 9.1 (u)



(a) Bubble 12.4 (v)



(b) Bubble 12.4 (u)

Fig. 9 Axial (v) and radial (u) velocity distribution in wake.

측정한 입자/기포의 중심을 원점으로 하여 관 단면 방향의 거리가 x축, 관 축 방향이 y축이며 위치는 각각 입자직경(d)으로 무차원화하였다. 모든 입자의 중심에 가장 가까운 지점에서  $v/V_0$ 가 최대값을 표시하고 있다.

Solid 9.5(v)는  $x/d=0, y/d=0.6$ 에서 0.5~0.6 정도의 값을 갖고 있다. Bubble 9.1(v)의 경우에  $y/d=0.6$ 의 입자 중심 바로 아래에서  $v/V_0$ 값이 solid 9.5와 같은 0.5~0.6의 값을 가지고 있다. 한편 bubble 12.4(v)는  $x/d=0, y/d=0.65$ 의 범위에서 0.9 정도로 대단히 큰 값을 갖고 있다. 또  $x/d = -1.0 \sim -1.5$ 에서 정지된 물과 파이프 벽 사이의 상호작용에 의해 다른 입자에 비해 큰 역류가 생기는 것도 알 수 있다.

관 단면 방향의 이동속도는 입자 형태와 입자 하류의 와에 의해 영향을 받는다. Solid 9.5(u)는  $u/V_0$ 가  $y/d=2$ 에서 최대값을 갖는다. 한편 solid\_a에서는 입자에 보다 가까운  $y/d=0.57$ 에서, bubble 9.1은  $y/d=0.5$ 에서 최대값이 나타난다. Solid 9.5(u)의 경우 입자 중심에서 입자직경의 2 배 정도 하류위치에서 입자의 중심 축축으로 당기는 흐름이 발생한다.

3.3.2 입자 하류의 난류강도 분포

Fig. 10에  $y/d=0.6$ 의 입자 하류의 난류강도  $(2u^2+v^2)/2V_0^2$ 을 표시하였다. 주위유체와의 밀도차가 작은 구형 고체입자 solid 9.5는 Fig. 9의  $v/V_0$ 의 범위와 거의 같은 경향을 보이고 있다. 이것은 입자의 관 단면 방향의 이동속도가 작고 관 축 방향의 난류가 지배적이기 때문이다. 밀도차가 작은 고체입자의 하류에 유발되는 흐름은  $y/d=0.6$ 에서 큰 값이 존재한다. 그러나 밀도차

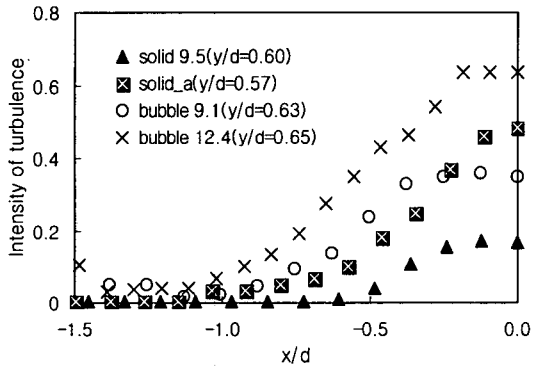


Fig. 10 Turbulence intensity.

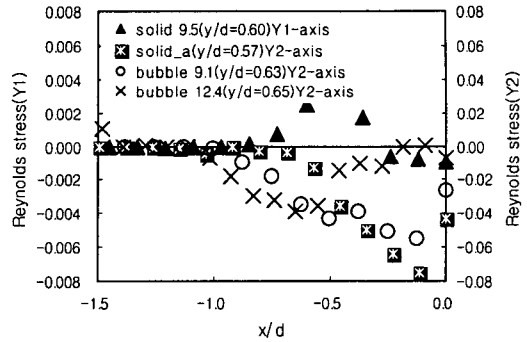


Fig. 11 Reynolds stress.

가 큰 구형 고체입자 solid\_a에서는  $v/V_0$ 의 범위와는 다르다. 그 이유는 solid\_a는 관 단면 방향의 이동범위가 크기 때문에  $x/d$ 의 넓은 범위에 걸친 흐름이 분산되기 때문이다. 또 이 입자의 난류강도의 크기도 상당히 크다.

고체입자와 거의 같은 직경을 갖는 bubble 9.1과 solid 9.5와 비교하면  $y/d=0.6$ 에서, 기포는 고체입자에 비해 지그재그 운동을 가지므로 기포의 난류강도는 고체입자의 약 2배의 값을 갖고 있다.

3.3.3 입자 하류의 평균 레이놀즈 응력 분포

Fig. 11에  $y/d=0.6$ 의 입자 하류의 평균 레이놀즈 응력 분포  $-u'v'/V_0^2$ 를 표시하였다. 각 위치에서 속도와 평균 흐름과의 차이를  $u', v'$ 로 했다. 이 데이터에서 각 위치의 액상에 대하여 평균적인 흐름에 대한 운동량의 생성과 감쇠의 모양, 난류의 변화를 정(+), 부(-)로 알 수 있다.

Solid\_a, bubble 9.1, bubble 12.4과 주위유체와의 밀도차가 작은 구형 고체입자 solid 9.5을 비교하면 solid 9.5의 레이놀즈 응력의 최대값이 다른 입자에 비해 10배 정도 크므로 입자 하류의 변화가 대단히 심한 것을 알 수 있다. Solid\_a와 bubble 9.1은 입자 근방에서 큰 부(-)의 값으로 흐름의 감쇠가 큰 것을 알 수 있다.

4. 결론

수직 원 관내의 정지물 중에서 상승하는 단일 입자의 운동에 대하여 영향을 미치는 여러 가지 인자 중 입자의 크기, 형상, 변형(기포), 부력의 제조건이 단일입자 움직임에 어떤 영향을 미치는지를 분명하게 하였다. 동시에 단일입자의 운동 구조는 영상계측법의 하나인 PIV와 PTV를 사용

하여 가시화하여 입자와 주위유체와의 상호작용을 알아보았다. 그 주된 결과는 다음과 같다.

(1) 고체 입자직경이 커지면 부력이 크게 되어 상승속도가 증가한다. 그러나 기포의 경우 기포의 상승속도는 액상으로부터 많은 저항을 받아 형태가 변형되면서 상승속도가 변하지 않았다.

(2) 액·고상의 밀도차가 증가하면 고체입자의 상승속도가 증가하고 운동형태는 직선 운동에서 지그재그 운동으로 변한다.

(3) 고체입자와 거의 같은 직경을 갖는 기포의 난류강도는 고체입자의 약 2배의 값을 갖고 있다.

### 참고문헌

- Zun, I., 1980, The transverse migration of bubbles influenced by walls in vertical bubbly flow, *Int. J. Multiphase Flow*, 6-6, pp. 583-588.
- Rouhani, Z., 1976, Effect of wall friction and vortex generation on the radial distribution of different phase, *Int. J. Multiphase Flow*, 3-1, pp. 36-50.
- Tsuchiya, K. and Fan, L. S., 1988, Near-wake structure of a single gas bubble in a Two dimensional liquid-solid fluidized bed vortex shedding and wake size variation, *Chem. Eng. Sci.*, 43-5, p. 1167.
- Matsui, G. and Monji, H., 1995, Two-Phase Flow Modelling and Experimentation 1995 (Eds. G. P. Celata and R. K. Shah), (Edizioni ETS), Vol. II, pp. 789-795.
- Matsui, G. and Monji, H., 1998, PIV measurement of flow field around a bubble, 1st European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting, Portoroz, Slovenai.
- Monji, H. and Matsui, G., 2000, Measurement of velocity field and a particle/bubble motion by PIV and PTV, 9th Int. Sym. on Flow Visualization. p. 352-1.
- Karman, Th. V. and Rubach, H., 1912, Ueber den Mechanismus ges Flussigkeits und Luftwiderstandes, *Phy. Zeitschrift*, 13-2, pp. 49-59.
- Moris, S. A. and Alexander, A. J., 1972, An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems, *J. Fluid Mech.*, 55, pp. 193-208.
- Peebles, F. N. and Garber, H. J., 1953, Studies on the Motion of Gas Bubbles in liquids, *Chem. Eng. Prog.*, 49-2, pp. 88-97.