

◎ 논문

Hybride PIV에 의한 단일입자/기포운동에 관한 연구

최해만^{***} · 寺内強^{**} · 文字秀明^{**} · 松井剛一^{**}

Flow Characteristics in a Particle/Bubble Motion with Hybride PIV

Hae-Man Choi^{***}, T. Terauchi^{**}, H. Monji^{**}, G. Matsui^{**}

Key Words: Dispersed Two-phase Flow (분산 이상류), Particle/bubble Motion (입자/기포 움직임), 3D-PTV (3차원 입자 추적 유속계), PIV (입자 영상 유속계), Trajectory (궤적)

ABSTRACT

As the first step to investigate the fundamental mechanism of a dispersed two-phase flow, we studied the detailed interactions between bubble or particle motion and flow around it. Experiments were carried out with a rising bubble or particle in stagnant water in a vertical pipe. Particles with different densities, and/or different shapes were used for comparison with a bubble. We adopted 3D-PTV (Three-Dimensional Particle Tracking Velocimetry) for measuring the bubble or particle motions, and PIV (Particle Image Velocimetry) for measuring the water flow simultaneously (Hybrid PIV). The experimental results showed that the oblate spheroidal solid particle rose along the longer axis direction at the point that the inclination of the longer axis reached the maximum, and the inclination direction changed after moving. The bubble moved to the direction that the spheroid's projected width grew up to the largest, and the minor axis of the oblate spheroidal body of the bubble was parallel to the moving direction. The trajectory of the center of the particle/bubble which was measured with 3D-PTV, was marked on the section (x-y) of the pipe. It exhibited the pattern of the particle/bubble motion.

1. 서 론

고체입자와 기포가 액체와 기체에 고르게 분포하여 이동하는 흐름을 분산 이상류라고 부른다. 이러한 흐름은 광석, 석탄 등의 파이프 운송라인, 화학 플랜트, 원자력, 화력발전소 등의 에너지 관련 기기에서 발생한다. 이와 같은 기기의 안전성 향상과 효율화를 위해

분산 이상류의 미시적인 유동구조를 파악하는 것은 중요한 연구분야이다.

분산 이상류를 구성하고 있는 분산상, 즉 입자는 크기와 형태, 변형 (기포), 부력 등이 다양하며 이러한 요인들이 상호 작용하여 복잡한 유동을 형성한다. Zun⁽¹⁾은 단일 입자운동에서 액상에 속도 기울기가 존재할 때 기포의 상대속도가 관벽과 관 중심에서 다르기 때문에 기포 주위에 순환 흐름이 생겨 횡 방향 양력 (transverse lift force)이 발생한다고 하였다. Matsui와 Monji⁽²⁾는 PTV를 사용하여 입자의 크기, 밀도, 형태 및 부력이 고체입자와 기포 움직임에 어떠한 영향을

* 한국표준과학연구원 유체유동그룹

** Tsukuba 대학 기능공학계

E-mail : hmchoi@kriss.re.kr

미치는지 연구하였다. Fujiwara et al.⁽³⁾은 PIV를 사용하여 단일 기포 주위 흐름의 속도분포를 측정하였다. 또 Matsui와 Monji⁽⁴⁾는 PIV를 사용하여 단일입자/기포가 상승할 때 주위 유체(물)의 속도분포를 2차원으로 가시화 하였다.

기포와 주위유체, 기포와 기포, 기포와 파이프 벽 사이의 상호관계를 파악하기 위해서는 주위유체의 속도분포와 기포/입자의 움직임등 분산 이상류의 기본특성을 알아야 한다. Hybride PIV는 기포의 움직임과 기포 주위의 속도분포를 파악하는데 유용하다. Hybride PIV는 입자/기포 주위유체의 속도분포를 측정하는 PIV와 입자/기포의 움직임을 측정하는 PTV로 구성되어 있다. Monji et al.⁽⁵⁾와 Choi et al.^{(6),(7)}은 2차원 Hybride PIV를 사용하여 입자/기포의 움직임을 측정하고 입자/기포와 주위유체 사이의 상호작용을 밝혀냈다. 그러나 이들은 2차원 PTV를 사용하였으므로 나선형 운동이나 지그재그 운동을 하는 입자의 3차원 운동을 측정할 수가 없었다.

따라서 본 연구에서 분산 이상류의 기본특성을 연구하기 위해 중요변수인 입자의 형태, 변형(기포), 부력이 입자 움직임이 주위유체에 어느 정도 영향을 미치는지를 파악하기 위해, 입자/기포의 움직임은 3D-PTV⁽⁸⁾ (Three-Dimensional Particle Tracking Velocimetry)로, 주위유체의 속도분포는 PIV(Particle Image Velocimetry)로 가시화 하여 입자/기포와 주위유체 사이의 상호작용을 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같으며 입자주입부, 수직 상승관, 시험부 및 입자 분리 탱크로 구성되어 있다. 입자 주입부의 위쪽인 하류 30 D (D : 파이프 내경)에 비디오 카메라로 입자와 유체의 움직임을 촬영하기 위한 시험부를 설치하였다. 수직 상승관은 내경 0.04 m, 길이 2 m의 아크릴 원관으로 제작하였다.

액상으로는 물을 사용하였고 흐름이 정지된 상태에서 입자 주입부에 입자를 주입하였다. 입자 주입부에서 고체입자는 한 입자씩, 기포는 주사기를 사용하여 주입하였다. 액상에 주입된 고체입자/기포는 처음에는 속도가 0이나 부력의 영향으로 상승하여 시험부를 통과한다. 시험부에 설치된 Hybride PIV를 사용하여 입자의 움직임과 액상의 속도분포를 동시에 측정하였다.

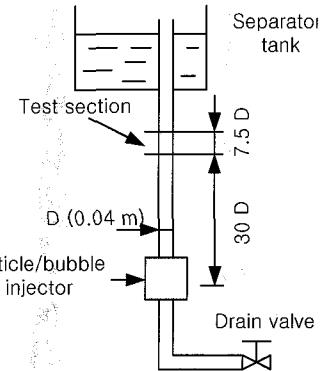


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specification of particles and bubble employed

Particles/ Bubble	Diameter or Equivalent Diameter [mm]	Density [kg/m³]	Shape
Solid_9.5	9.5	860	Sphere
Solid_10b	10	57.3	
Solid_ oblate	9.4	233	Oblate Spheroid Major axis length 10.6 mm Minor axis length 4.5 mm
Bubble_9.1	9.1	1.18	Oblate Spheroid

실험에 사용한 각 입자는 Table 1과 같으며 구형 고체입자는 액상과 밀도차가 작은 것으로 직경 9.5 mm와 크기는 같지만 밀도가 다른 solid_10b를 사용하였으며, 비구형 고체 입자로는 편평 타원체 solid_oblite를 사용했다. 기포는 공기를 사용하였으며 입자직경을 9.1 mm로 주사기의 부피로부터 측정하여 조절하였다.

Fig. 2에 시험부 및 Hybride PIV의 개략도를 표시하였다. 시험부에는 water jacket을 설치하여 화상의 찌

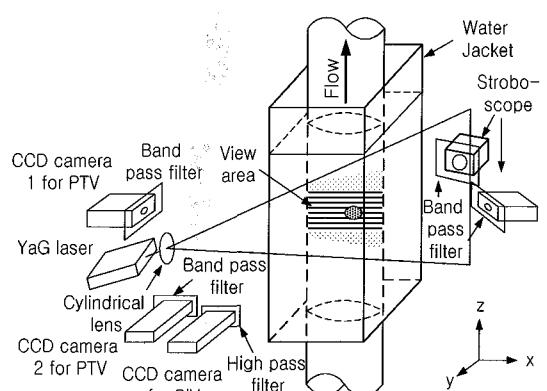


Fig. 2 Schematic of test section and Hybride PIV

그라짐을 방지하였다. 시험부에는 double pulse laser (25 mJ)를 시트 형상으로 하여 5 ms 간격으로 두번 비추었다. 시험부 수직방향에서 2대의 CCD 비디오 카메라를 사용하여 입자의 움직임을 촬영했다. 화상의 분해능은 0.05 mm/pixel이다. 촬영된 화상은 화상처리 포트 (디스플레이 메모리 ; 512×512×8비트×3 (RGB))를 통해 컴퓨터로 보내고 화상해석을 하였는데 미리 물에 혼합한 추적입자 (재질: 폴리머, 밀도: 1500 kg/m³, 직경: 10 μm)의 농도분포의 상호 상관관계를 계산하고 최대 상관관계가 발생하는 지점에서 유체의 이동방향, 이동거리, double pulse의 시간간격을 이용하여 속도 벡터를 계산했다.

입자가 이동한 궤적은 3D-PTV로 측정했다. 2대의 CCD 카메라와 반대쪽에 있는 스트로보는 입자의 운동을 측정하는데 사용하였다. 고체입자/기포의 3차원 위치는 2대의 CCD 카메라에서 촬영된 화상을 해석하여 결정하였다. 기포의 형태는 3차원 편평 타원체로 모델링 했다. PIV와 3D-PTV 사이의 간섭을 피하기 위해 파장이 다른 광학필터를 각각 3대의 CCD 카메라와 2대의 스트로보 앞에 설치하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 입자의 움직임과 주위흐름의 속도분포

Hybride PIV를 사용하여 각 입자의 3차원 형상 (3D-PTV)과 주위흐름의 화상을 합성하여 입자 직경이 약 10 mm인 solid_9.5, solid_oblate와 bubble_9.1을 70 ms 간격의 주위흐름의 속도분포와 입자의 움직임을 가시화 한 것이 Fig. 3~5이다. 그림 중 원쪽 그림은 PTV 카메라 1을 사용하여 y-z 면의 입자운동을 나타낸 것이다. 가운데 선은 레이저 sheet이다. 오른쪽 그림은 PTV 카메라 2에서 찍은 x-z 면의 입자의 움직임과 PIV로 촬영한 흐름의 속도분포이다. PIV는 70 ms 간격으로, PTV는 5 ms 간격으로 촬영하였다.

주위유체와 밀도차가 작은 구형고체입자 solid_9.5 (Fig. 3)는 정지된 물 중에서 수직으로 상승하고 입자의 바로 아래에 그대로 수직방향의 최대 속도값이 측정되었다. 이것은 밀도차가 작은 구형고체입자는 직진하면서 상승하기 때문에 입자 아래에 주위에 비해 큰 상승류가 발생한다.

Fig. 4의 편평 타원체 (solid_oblate)에서는 입자의 좌우 끝 부분 보다 떨어진 지점까지 와가 보인다. 입자 위 끝 부분에 주위 액상보다도 큰 속도 벡터가 보이는

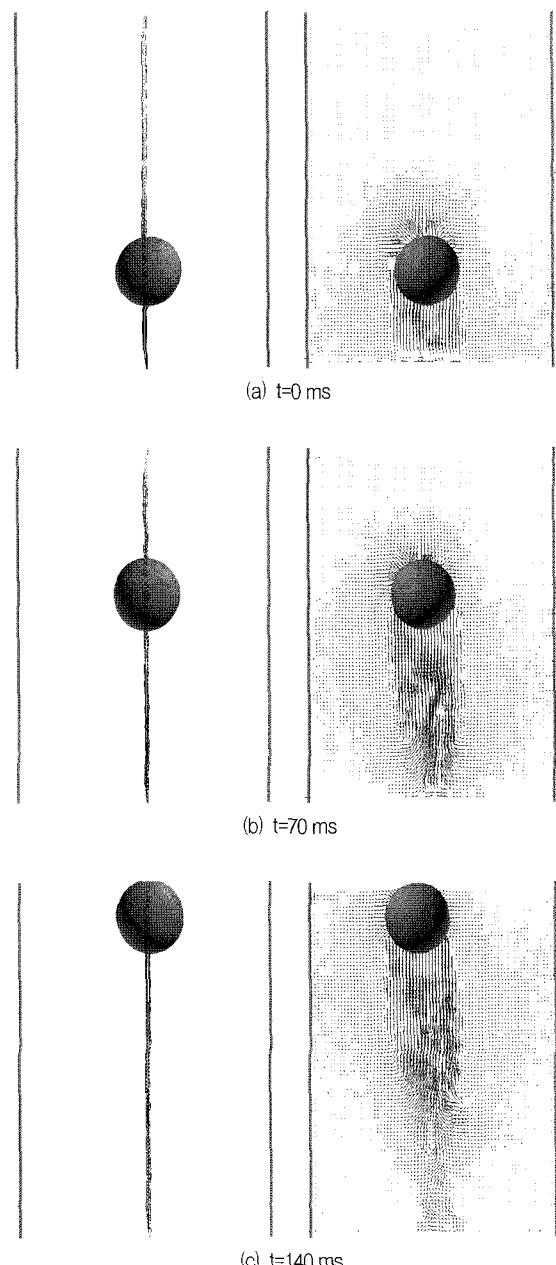
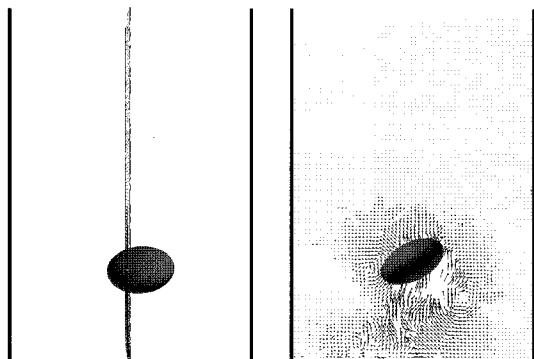
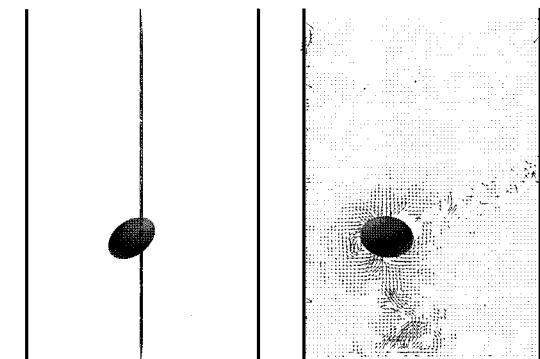


Fig. 3 Particle motion and velocity field (solid_9.5)

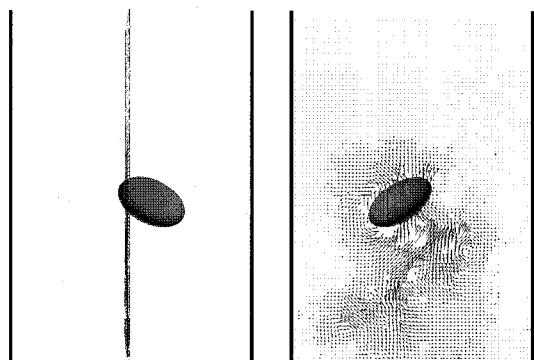
것은 이 위치에서 입자가 주위유체로부터 큰 항력을 받기 때문이라고 판단된다. 그리고 Fig. 4(a)와 같이 입자 좌측 끝 부분에서 와가 방출되면 입자의 좌측은 위쪽으로 상승하고, 아래쪽이 된 입자의 우측은 다시 입자 우측의 끝단에 와가 생성되면서 입자 우측이 상승 한다. 편평 타원체는 이 형상을 반복하면서 경사방향으로



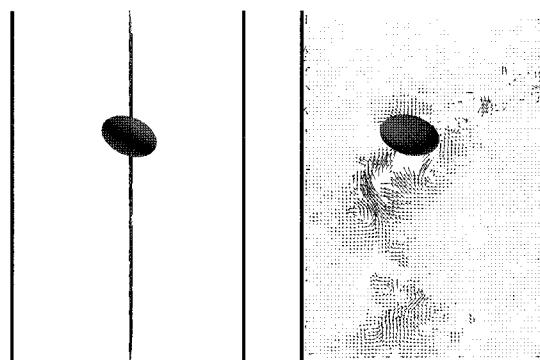
(a) $t=0$ ms



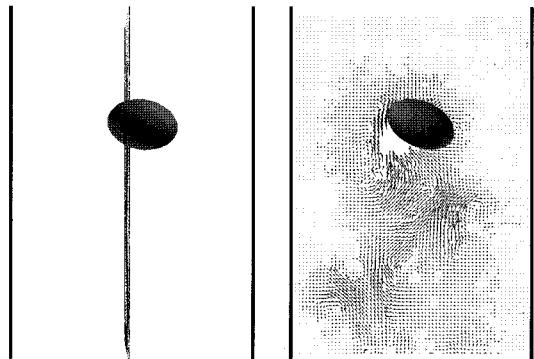
(a) $t=0$ ms



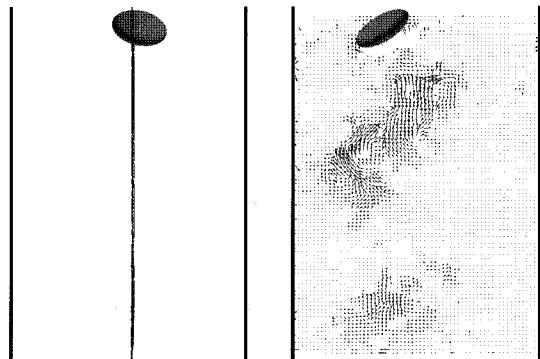
(b) $t=70$ ms



(b) $t=70$ ms



(c) $t=140$ ms



(c) $t=140$ ms

Fig. 4 Particle motion and velocity field (Solid_oblade)

이동하면서 상승한다. Fig. 4(c) $t=140$ ms에서 입자 좌우의 끝 부분에서 생성된 와의 형태가 잘 보인다. 이와 같이 규칙적인 카르만 와류가 방출되면서 편평 타원체가 위 방향으로 상승하고 있는 것을 알 수 있다.

Bubble 9.1 (Fig. 5)도 solid_oblade와 같은 와의 방출이 보여진다. 기포가 편평 타원체와 같은 모양으로 편

Fig. 5 Bubble motion and velocity field (Bubble_9.1)

평할 때 기포 아래 면의 끝단에 와가 발달한다. 특히 기포가 상승하면서 주위 유체로부터 큰 항력을 받게 되고 이 항력에 의해 편평율이 변화되며 진행방향이 변하는 나선형 운동을 하고 있다. 이 입자/기포의 움직임과 주위흐름의 속도분포는 Monji et al.⁽⁵⁾와 Choi et al.^{(6),(7)}가 2차원 Hybride PIV를 사용하여 측정한 결과와 같다.

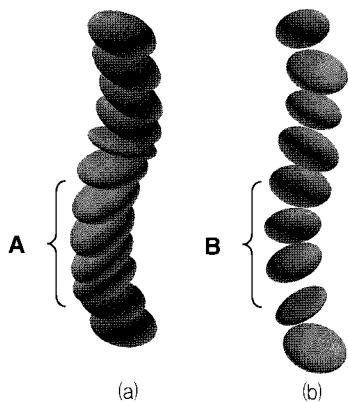


Fig. 6 Comparison between solid_oblade (a) and bubble_ 9.1 (b) motions at every 25 ms.

Fig. 3~5에서 70 ms간격으로 흐름의 속도분포와 입자의 움직임을 얻었다. 그러나 70 ms 간격은 상승하는 입자/기포의 움직임을 분석하기에는 충분하지 않다. 따라서 입자/기포의 움직임을 자세히 알기 위하여 Fig. 6과 같이 편평 타원체 ((a)solid_oblade)와 기포 ((b)bubble_9.1)를 각각 25 ms 간격으로 표시하였다. 편평 타원체 상승속도는 0.14 m/s 이고, 기포의 상승속도는 0.19 m/s 이다. 두 입자의 상승은 나선형 형태로 운동하지만 자세히 관찰하면 서로 다른 운동을 하고 있는 것을 알 수 있다.

편평 타원체 (A 구간)는 타원체의 장축의 경사가 최대로 되는 곳에서 장축 방향으로 미끄러지면서 이동을 하고 이동 후 축의 경사방향이 변화한다. 반면에 기포 (B 구간)는 경사방향과 진행방향이 동시에 일어나 타원체의 투영면적이 최대로 되는 방향으로 움직이고, 기포의 짧은 축은 주위유체의 항력 때문에 움직이는 방향과 평행하다.

편평 타원체는 정지된 물 중에서 상승할 때 타원체의 투영면적이 최대로 되는 방향 (단축 축 방향)과 타원체의 투영면적이 최소로 되는 방향 (장축 축 방향)으로 이동한다. 한편 기포는 진행방향의 반대방향에서 물에 의해 항력을 받는다. 그 항력에 의해 진행방향이 역돌리면서 타원체의 투영면적이 최대가 되는 방향으로 이동하는 움직임을 갖으면서 타원체의 짧은 축은 움직이는 방향과 평행하다. 즉 편평 타원체와 기포는 와를 방출하면서 축의 경사방향으로 변화하는 공통점이 있지만 상승 구조는 전혀 다르다. 이 편평 타원체와 기포의 움직임의 차이는 기포 형상이 항력에 의해 쉽게 변형되기 때문이다.

3.2 입자/기포의 중심궤적 운동

Fig. 7은 (a)solid_9.5, (b)solid_10b, (c)solid_oblade, (d)bubble_9.1 4종류 입자/기포의 파이프 관 단면 ($x-y$ 면) 통과위치 및 입자/기포중심의 궤적을 표시하고 있다. 검은 점은 입자/기포가 시험부에 들어왔을 때의 시작점이다. 그림은 20회 측정한 단일입자/기포의 실험 중, 5회의 입자/기포의 투영궤적을 표시하였다. 입자/기포의 이미지는 3D-PTV를 사용하여 5 ms간격으로 촬영하여 분석하였다.

입자/기포가 직선운동을 하면, 관 단면에서 본 입자/기포의 궤적은 점 또는 짧은 선으로 되고, 나선운동은 궤적이 원이나 타원으로 나타내며, 지그재그 운동은 궤적이 직선으로 나타난다.

(a)solid_9.5는 관 중심 부근을 많이 통과하고 있고, 입자의 궤적은 점 (3, 4)이나 곡선 (1, 2, 5)을 나타내고 있어 입자가 직선 및 경사운동을 하고 있다. (b)solid_10b의 궤적은 곡선 (1, 2, 3) 및 직선 (4, 5) 궤적으로 운동하므로 나선형 및 지그재그 운동을 하고 있고, (c)solid_oblade은 입자가 중심부근을 통과하고 있고 입자궤적이 타원이므로 나선형 운동을 하고 있다. (d)bubble_9.1의 거동은 대부분의 입자가 관 중심을 통과하고, 입자의 궤적도 원에 가까우므로 나선형 운동을 하고 있다.

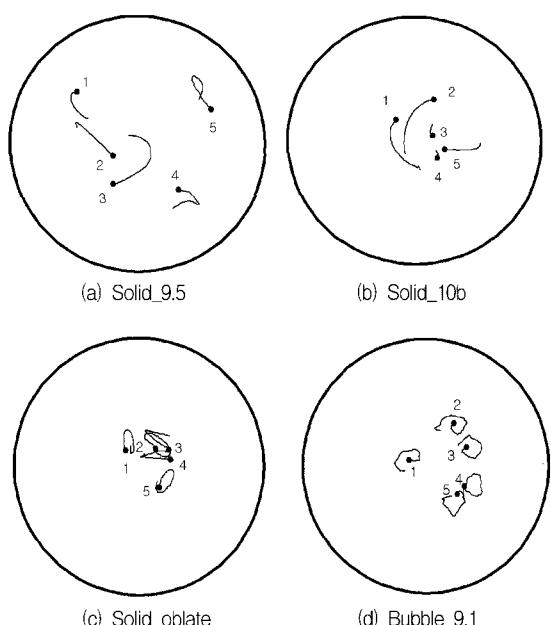


Fig. 7 Trajectories of particles/bubble ($x-y$)

4. 결 론

수직 원 관내의 정지유체 중에서 상승하는 단일 입자의 운동에 대하여 영향을 미치는 입자의 형상, 변형(기포), 부력 등의 제 조건이 단일입자/기포 움직임에 어떤 영향을 미치는지를 확인하였다. 동시에 단일입자/기포의 유동구조는 영상계측법의 하나인 Hybride PIV를 사용하여 가시화하여 입자/기포 움직임과 주위유체 사이의 상호 작용을 알아보았다. 그 주된 결과는 다음과 같다.

- 1) 편평 타원체는 장축의 경사가 최대로 되는 곳에서 장축 축 방향으로 미끄러지면서 이동을 하고 이동 후 축의 경사방향이 변화한다. 기포는 경사방향과 진행방향의 변화가 동시에 일어나 타원체의 투영면 적이 최대로 되는 방향으로 움직인다. 이와 같이 서로 다른 거동의 이유는 기포가 주위유체의 항력에 의해 변형되기 때문이다.
- 2) 구형고체입자 (solid_10b)와 편평 타원체의 통과위치는 관 중심을 많이 통과하고, 고체입자 (solid_9.5)는 직선운동 및 경사운동을, 편평 타원체 및 기포는 나선형운동을 하고 있다.

참고문헌

- (1) Zun, I. 1980, "The transverse migration of bubbles influenced by walls in vertical bubbly flow," Int. J. Multiphase Flow, 6-6, pp. 583~588.
- (2) Matsui, G. and Monji, H., 1995, "Behavior of a Single Particle/Droplet/Bubble in Vertical Liquid Flow," Two-Phase Flow Modelling and Experimentation 1995(Eds. G. P. Celata and R. K. Shah), (Edizioni ETS), pp. 789~795.
- (3) Fujiwara, A., Tokuhiro, A., Hishida, K. and Maeda, M., 1998, "Investigation of Oscillatory Bubble Motion Using a Dual Shadow Technique and its Surrounding Flow Field by LIF-PIV," Proc. 3rd Int. Conf. Multiphase Flow, ICMF'98, Lyon, France, (CD-ROM).
- (4) Matsui, G. and Monji, H., 1998, "An Image Processing Study of Bubble Behavior in Upward Bubble Flow," Proc. 3rd Int. Conf. Multiphase Flow, ICMF '98, Lyon, France, (CD-ROM).
- (5) Monji, H., Matsui, G., Kurihara, T. and Choi, H. M., 2000, "Measurement of Velocity Field and a Particle/Bubble Motion by PTV and PIV," 9th. Int. Sym. on Flow Visualization, (CD-ROM).
- (6) Choi, H. M., Kurihara, T., Monji, H. and Matsui, G., 2000, "Measurement of Particle/Bubble Motion and Turbulence around it by Hybrid PIV," Proc. of Second Japanese-European Two-Phase Flow Group Meeting, (CD-ROM).
- (7) Choi, H. M., Kurihara, T., Monji H. and Matsui G., 2000, "A Study on the Interaction between Particles and Surrounding Fluid," Proc. of the SAREK 2000 Summer Annual Conf., Vol. 1, pp. 298~302.
- (8) Monji, H. and Matsui, G., 1996, "Gas-Phase Characteristics in Sliding Bubble Flow Obtained by Image Processing," Proc. of the Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics (Supplement), pp. 155~162.