

# MOFIA에 의한 두개 입자/기포간 상호작용에 관한 연구

최 해 만, 文字 秀明\*, 松井 剛一\*\*

한국표준과학연구원 유체유동그룹, \*Univ. of Tsukuba \*\*Kinki Univ.

## Characterization of Interaction between Two Particles/Bubbles Flow with Moving Object Flow Image Analyzer System

Hae Man Choi, Hideaki Monji\*, Goichi Matsui\*\*

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

\*\*Department of Mechanical Engineering and Biomimetics, Kinki University, Uchita 649-6493, Japan

(Received April 14, 2004; revision received November 17, 2004)

**ABSTRACT:** This paper deals with interaction between two bubbles or particles and flow around them, visualized by a moving object flow image analyzer(MOFIA) consisting of a three-dimensional (3D) moving object image analyzer(MOIA) and two-dimensional particle image velocimetry(PIV). The experiments were carried out for rising bubbles or particles of various densities, sizes, and/or shapes in stagnant water in a vertical pipe. In the MOFIA employed, 3D-MOIA was used to measure particles or bubbles motion and PIV was used to measure fluid flow. The experimental results showed that the interaction was characterized by the shape, size and density of two particles or bubbles.

**Key words:** MOFIA(이동물체-유동화상 해석시스템), 3D-MOIA(3차원-이동물체 화상 해석시스템), PIV(입자영상 유속계), Particles/bubbles motion(입자/기포 운동)

### 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 입자

는 크기와 형태, 변형(기포), 부력 등이 다양하며 이러한 요인들이 상호 작용하여 복잡한 유동을 형성한다. Zun<sup>(1)</sup>은 단일 입자운동에서 액상에 속도 기울기가 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>가 발표한 "wall-vortex effect"는 관벽 부근에 발생하는 와의 구심력에 의해 기포의 움직임이 영향을 받게 된다고 하는 것이다. Matsui and Monji<sup>(3)</sup>는 PTV를 사용하여 입자의 크기, 밀도, 형태 및 부력이 고체입자와 기포 움직임에 어떠한 영향을 미치는지 연구하였다. Murai et al.<sup>(4)</sup>은 3D-PTV를 사용하여 기포간 주위의 속도분포를 측정하였다. 또

† Corresponding author

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

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

Matsui and Monji<sup>(5)</sup>는 PIV를 사용하여 단일입자/기포가 상승할 때 주위 유체(물)의 속도분포를 2차원으로 가시화 하였다.

입자와 주위유체, 입자와 입자, 입자와 파이프벽 사이의 상호관계를 파악하기 위해서 주위유체의 속도분포와 기포/입자의 움직임 등 분산 이상류의 기본특성을 알아야 한다. MOFIA<sup>(6)</sup> (Moving Object Flow Image Analyzer)는 입자간의 움직임과 입자주위의 속도분포를 파악하는데 유용하다. MOFIA는 입자/기포 주위유체의 속도분포를 측정하는 PIV(Particle Image Velocimetry)와 입자/기포의 움직임을 측정하는 3D-MOIA(Three-Dimensional Moving Object Image Analyzer)로 구성되어 있다. Monji et al.<sup>(7)</sup>와 Choi et al.<sup>(8~11)</sup>은 Hybrid PIV와 MOFIA<sup>(12,13)</sup>를 사용하여 입자/기포의 움직임을 측정하고 단일입자/기포와 주위 유체와의 상호작용을 밝혀 냈다. 그러나 입자와 입자간의 상호작용에 관한 실험 연구논문은 거의 없다.

따라서 본 연구에서 분산 이상류의 기본특성을 연구하기 위해 2개의 입자를 사용하여 중요변수인 입자의 크기와 형태, 변형(기포), 부력이 입자 움직임이 주위유체에 어느 정도 영향을 미치는가를 파악하기 위해, MOFIA로 가시화 하여 입자와 입자간 상호작용 및 입자와 주위유체와의 상호작용을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같으며 입자 주입부, 수직 상승관, 시험부 및 입자 분리

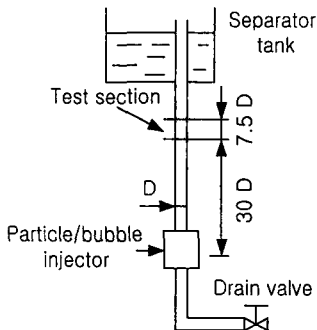


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus(D=40 mm).

Table 1 Specification of particles and bubbles employed

Particles /bubbles	Diameter or equivalent diameter[mm]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Shape
Solid	5.6	860	Sphere
	7.1		
	9.5		
Solid_a	10	57.3	Oblate ellipsoid Major axis length 10.6 mm Minor axis length 4.5 mm
Solid_b	10	647	
Solid_oblate	9.4	233	
Bubble	8.0	1.205	Oblate ellipsoid
	9.0		
	10.0		

탱크로 구성되어 있다. 입자 주입부의 위쪽인 하류 30 D(D: 파이프 내경)에 비디오 카메라로 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 두 입자씩, 기포는 2개의 주사기를 사용하여 주입하였다. 액상에 주입된 고체입자/기포는 처음에는 속도가 0이나 부력의 영향으로 상승하여 시험부를 일정한 속도로 통과한다. 시험부에 설치된 MOFIA 시스템을 사용하여 입자의 움직임과 액상의 속도분포를 동시에 측정하였다.

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 고체 입자로는 편평 타원체(solid\_oblate)를 사용했다. 기포는 공기를 사용하였으며 입자직경이 다른 3종류(직경 8.0, 9.0, 10.0 mm)를 사용했다. 각 입자에 대해서는 20회씩 실험을 하여 각각 입자의 크기, 밀도, 변형(기포), 부력이 입자거동에 미치는 영향을 관찰했다.

Fig. 2에 시험부 및 MOFIA 시스템의 개략도를 표시하였다. 시험부에는 water jacket을 설치하여 화상의 찌그러짐을 방지하였다. 시험부에는 double pulse laser(25 mJ)를 시트 형상으로 하여 1/70초 간격으로 두 번 비추었다. 시험부 수직방향에서 2대의 CCD 비디오 카메라를 사용하여 입자의 움직임을 촬영했다. 화상의 분해능은 0.05

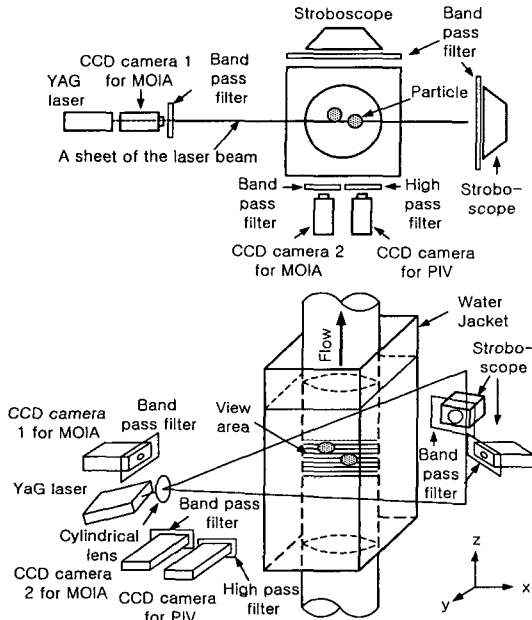


Fig. 2 Schematic of test section and MOFIA system.

mm/pixel이다. 촬영된 화상은 화상처리 포트를 통해 컴퓨터로 보내고 화상해석을 하였는데 미리 물에 혼합한 추적입자(재질: 폴리프로필렌, 밀도: 1500 kg/m<sup>3</sup>, 직경: 10 μm)의 농도분포의 상호상관을 계산하고 최대 상관값이 발생하는 지점에서 유체의 이동방향, 이동거리, double pulse의 시간간격을 이용하여 속도분포 벡터를 계산했다.

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

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 주위유체의 흐름장

MOFIA 시스템을 사용하여 각 입자의 3차원 형상(3D-MOIA)과 주위흐름의 화상을 합성하여

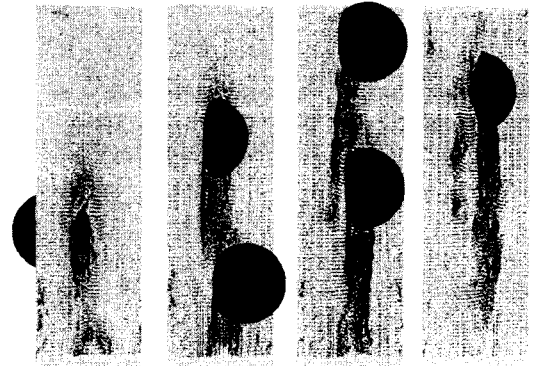


Fig. 3 Particles motion and velocity field (Solid\_9.5).

가시화 한 실험 결과 중에서 입자 직경이 거의 같은 Solid\_9.5, Solid\_oblate 및 Bubble\_10을 70 ms 간격에서 주위흐름의 속도분포와 와분포도가 Fig. 3~5이다. 와도는 유체의 와운동의 세기와 그 축 방향을 나타내는 벡터를 말한다. 양의 소용돌이도는 반시계 방향으로 회전하고, 음의 소용돌이도는 시계방향으로 회전한다. 와 발생의 메카니즘은 정지 유체내에 입자가 이동할 때, 또는 정지된 입자에 유체가 이동할 때 입자와 정지 유체와의 경계층과 유동장간의 상호작용에 기인하여 발생한다.

주위유체와 밀도차가 작은 구형고체입자 Solid\_9.5(Fig. 3)는 단일입자와 같이 수직으로 상승하고 앞에서 상승하는 입자(앞의 입자)가 통과한 후 뒤에서 상승하는 입자(뒤의 입자)가 앞의 입자의 궤적을 추종하는 현상이 관찰되었다. 뒤의 입자는 앞의 입자의 후류의 영향을 받아 입자의 운동이 변화하였다. 또 앞의 입자는 뒤의 입자가 존재하기 때문에 앞의 입자의 후류의 흐름에 영향을 주어 와 방출과 함께 앞의 입자의 운동이 변화를 주었다. 즉 2개의 입자는 상호 작용하면서 상승한다.

편평 고체입자 Solid\_oblate(Fig. 4)는 구형고체입자보다 후류의 영향이 강해서 입자주입으로 입자 주입 후 곧 뒤의 입자는 앞의 입자를 뒤 따라 붙어 2개의 입자가 마치 1개의 입자와 같이 일체로 되어 상승한다.

Bubble\_10.0(Fig. 5)는 관 중앙부분을 통과한다. 뒤의 기포가 앞의 기포의 후류의 영향을 받아 앞 기포를 쫓아간다. 2개의 기포가 수직 방향에 직렬 상승하는 경우, 앞의 기포보다도 뒤의 기포의

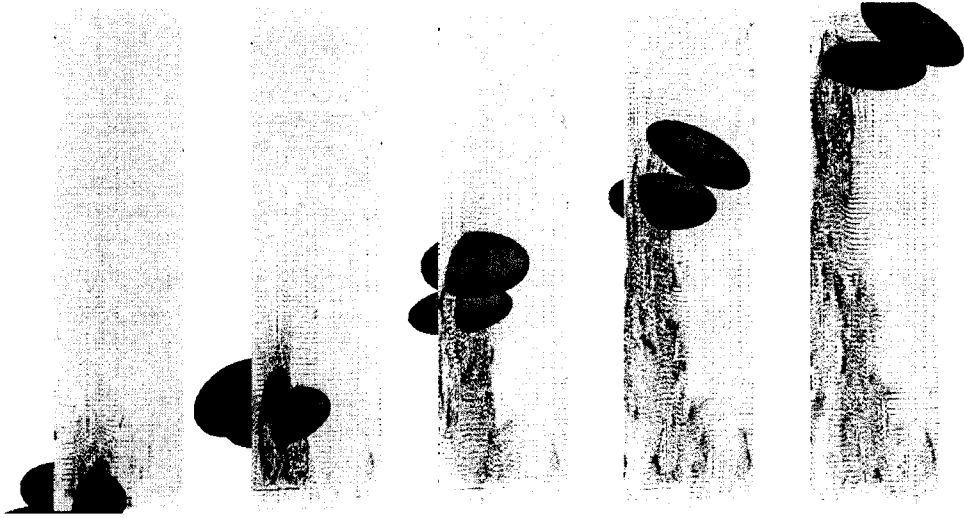


Fig. 4 Particles motion and velocity field (Solid\_oblate).

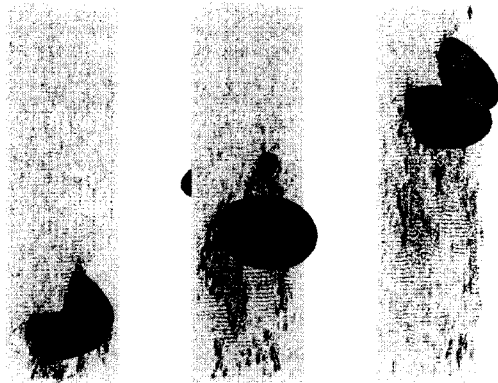


Fig. 5 Bubbles motion and velocity field (Bubble\_10).

상승속도가 증가하여 서로 접촉한다는 Murai et al.<sup>(4)</sup>의 결과와 일치한다. 뒤의 기포가 앞의 기포를 따라잡는 현상은 와도적인 현상이고, 기포 주입 후 많은 기포들이 뒤의 기포가 앞의 기포에 뒤 따라 붙고 그 후 거의 병렬로 나란히 상승한다. 기포들이 병렬로 나란히 상승하지만 때에 따라 그 위치를 변화시키고 서로 붙어서 상승한다. 병렬로 나란히 상승하는 기포의 후류는 단일입자의 후류에 비교해 교란이 심하다.

이러한 2개 기포의 운동은 2개의 기포가 수평면내에 나란히 병렬 상승하는 경우에는 기포간의 간격에 흐르는 유체의 점성에 의하여 압력손실이

발생하여 그 결과 입자간의 간격 흐름이 감소되어 서로 반발한다. 경사배치로 상승하는 2개의 기포는 수평방향에서는 반발하고, 수직방향에서는 서로 잡아당기는 것 같은 상대속도를 가져 2개의 기포는 충돌하지 않고 나선운동을 한다.

### 3.2 입자/기포의 중심 궤적

Fig. 6은 solid\_9.5(a), solid\_oblate(b), bubble\_10(c) 3종류 입자/기포의 파이프 관 단면(x-y면) 통과위치 및 입자/기포중심의 궤적을 표시하고 있다. 점은 입자/기포가 시험부에 들어왔을 때의 시작점이다. 실선은 앞의 입자이고 점선은 뒤의 입자를 나타내고 있다. 입자/기포의 이미지는 3D-MOIA를 사용하여 5 ms 간격으로 촬영하여 분석하였다.

입자/기포가 직선운동을 하면, 관 단면에서 본 입자/기포의 궤적은 점 또는 짧은 선으로 되고, 나선운동은 원이나 타원으로 나타내며, 지그재그 운동은 특이점이 생기거나 선들이 겹친다.

Solid\_9.5(a)는 관 횡단면의 궤적은 반원을 나타내고 있어 나선운동을 하고 있다. 입자경이 크면 부력이 증가하여 상승속도가 빠르게 되어 와방출이 일어나기 때문이다. 단일입자의 경우는 관 횡단면의 궤적은 1점 또는 직선을 나타내는 것에 반해 2개의 입자를 주입하면 입자와 입자간

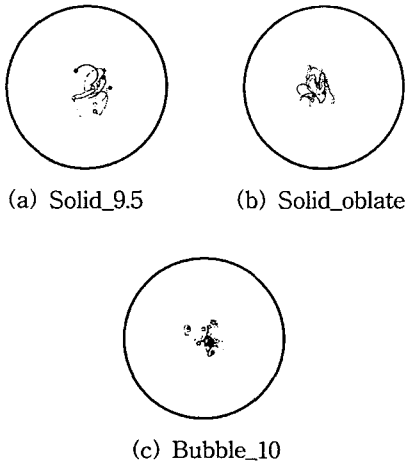


Fig. 6 Trajectories of particles/bubbles(x-y).

상호작용에 의해 나선운동을 하고 단일입자의 경우보다 복잡한 운동을 하고 있다.

Solid\_oblate(b)는 단일입자의 경우 지그재그 운동에 가까운 궤적을 나타내었다. 그러나 2개의 편평 고체입자인 경우 직선, 원, 규칙이 없는 곡선을 나타내고 있다. 2개의 편평 고체입자는 후류의 영향이 강하고 일체로 되어 상승한다. 따라서 입자간 상호작용에 의해 운동이 크게 변한다.

Bubble\_10(c)는 단일기포의 경우 지그재그 운동 또는 나선운동을 하면서 관 중앙을 상승한다. 그러나 2개의 기포는 그러한 운동과는 다른 궤적을 나타내고 있다. 이 다른 궤적은 입자와 입자간 상호작용에 의해 입자의 운동이 변화했다. 2개의 기포의 경우 나선운동에서 벗어난 궤적이 증가한다. 또 단일기포는 관 중앙부근을 상승하지만, 2개의 기포는 병렬, 종렬 및 경사로 위치하여 상승한다. 따라서 2개의 기포는 관 횡단면의 기포통과 위치가 관벽 부근까지 이동하면서 상승한다.

3.3 입자/기포의 상승속도

각 입자의 상승속도는 3D-MOIA에 의해 측정하였다. 3D-MOIA의 측정 불확도(95 % 신뢰수준)는  $9.8 \times 10^{-3}$ 이며, 단일입자의 상승속도의 최대 표준편차는 0.24, 2개의 입자의 평균 상승속도의 최대 표준편차는 0.21이다.<sup>14)</sup>

고체입자의 상승속도를 실험한 결과를 Fig. 7

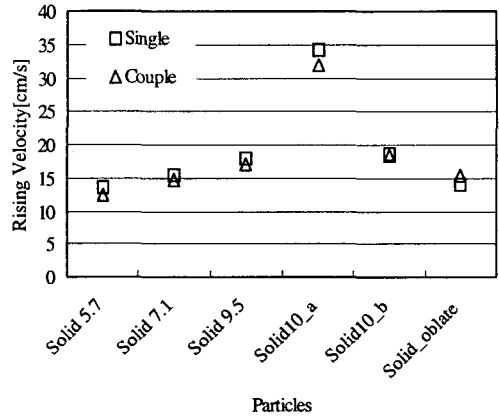


Fig. 7 Rising velocity(particles).

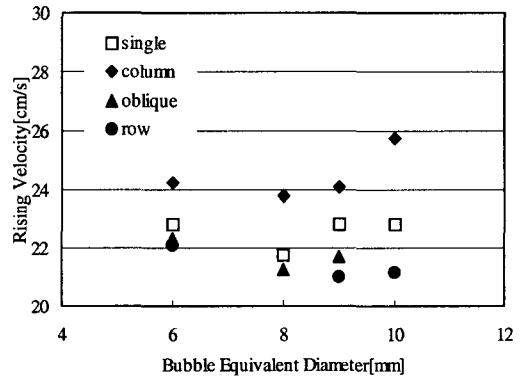


Fig. 8 Rising velocity(bubbles).

에 표시하였다. 단일 고체입자와 2개의 고체입자의 상승속도를 비교하였다. 2개의 고체입자의 상승속도는 각각의 상승속도의 평균값을 채용했다. 구형고체입자에서 액상과 밀도차가 작은 단일입자는 상승속도가 2개의 입자의 평균 상승속도보다 최대 1.2 cm/s 크다. 그러나 액상과 밀도차가 있는 고체입자는 단일입자의 상승속도가 3 cm/s 크다. 편평 고체입자에서는 2개의 입자의 경우가 단일입자보다 1.1 cm/s 크다. 이 이유는 2개의 구형고체입자는 경사로 배치되어 상승하여 입자속도가 감소하지만, 편평 고체입자는 서로 접촉하면서 상승방향이 종렬로 위치하여 2개의 입자체적이 주위유체로부터 받는 저항이 작아서 상승속도가 증가하였다.

Fig. 8은 기포의 상승속도이다. 시험부를 통과

치의 3가지 배치형태로 분류하여 2개의 기포의 상승속도의 평균값과 단일기포의 상승속도를 비교했다.

종렬 및 횡렬 등의 공간배치는 화상의 재구성을 한 후 필자가 판단한 것이므로 주관이 들어가서 정량적인 판단은 아니지만 위치관계에 의한 상승속도의 정성적인 평가는 가능하다. 또 그림에서 하나의 등가직경에 대하여 단일기포 상승속도, 종렬, 횡렬 및 경사의 각 배치에 대한 상승속도를 표시하였다.

Fig. 8에서 종렬 배치된 기포의 상승속도는 단일기포의 평균 상승속도(23.3 cm/s)에 비교해 1.5 ~ 3.1 cm/s 크고, 병렬배치는 단일기포보다 1.1 ~ 2 cm/s 작다. 또 2개의 입자는, 경사배치에서는 상승속도는 종렬과 병렬배치의 중간이고 단일기포의 상승속도와 거의 같거나 작은 경향(최대 1.8 cm/s)을 보이고 있다.

단일기포와 2개의 기포의 상승속도를 비교해보면 단일기포는 시험부의 관 중앙을 통과하는 것에 대하여 2개의 기포는 병렬로 배치되어 2개의 기포의 투영면적의 증가에 의해 주위유체로부터 항력을 받고 관벽의 영향으로 병렬 또는 경사 배치된 2개의 기포의 경우의 상승속도는 단일기포와 비교해 보면 작다.

#### 4. 결론

수직관내의 정지된 물 층을 상승하는 2개의 고체입자/기포에 대하여, 그 운동에 영향을 미치는 여러 가지 인자 중, 입자의 크기와 형태, 변형 및 부력의 영향 등 제 조건을 변화시켜, 이러한 인자들이 입자 운동에 어떠한 영향을 미치는가를 명확하게 하기 위한 실험을 하였다. 2개의 고체입자/기포 주위의 유동구조를 구축한 MOFIA (Moving Object-Flow Image Analyzer) 시스템을 이용하여 가시화하였고 입자간의 상호작용을 조사하였다. 그 주된 결과는 다음과 같다.

- (1) 구형고체입자는 경사배치로 상승하고 상승속도는 단일입자보다 작다. 뒤의 입자는 앞의 입자의 후류의 영향으로 앞의 입자의 궤적에 추종하고, 나선운동을 한다. 뒤의 입자에 의해 영향을 받아 앞의 입자도 나선운동을 한다.
- (2) 편평 고체입자는 접촉하면서 종렬로 상승한다. 상승속도는 단일입자 보다도 크다.

- (3) 2개의 기포는 입자 및 관벽 등의 영향으로 횡, 경사 및 종로 배치되어 상승한다. 2개의 기포의 상승속도는 2개 기포의 배치에 따라 다르다.

#### 참고문헌

1. Zun, I., 1980, The transverse migration of bubbles influenced by walls in vertical bubbly, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 6, No. 6, pp. 583-588.
2. Rouhani, Z., 1976, Effect of wall friction and vortex generation on the radial distribution of different phase, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 3, No. 1, pp. 36-50.
3. Matsui, G. and Monji, H., 1995, Behavior of a single particle/droplet/bubble in vertical liquid flow, *Two-Phase Flow Modelling and Experimentation*, pp. 789-795.
4. Murai, Y., Ishikawa, M., Ashihara, M., Kinugawa, K., and Yamamoto, F., 2003, 3-D PTV measurement of bubble-bubble interaction appearing in a free-rising bubbly flow, *Transactions of the Visualization Society of Japan*, Vol. 23, No. 1, pp. 1-8
5. 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*
6. Matsui, G., 2000, *Moving Object Flow Image Analyzer (Patent No. 2000-104085)*
7. Monji, H., Matsui, G., Kurihara, T., and Choi, H. M., 2000, Measurement of velocity field and a particle/bubble motion by PIV and PTV, 9th. *Int. Sym. on Flow Visualization. CD-ROM*
8. Choi, H. M., Kurihara, T., Monji, H., and Matsui, G., 2002, Measurement of particle/bubble motion and turbulence around it by hybrid PIV, *Flow Measurement & Instrumentation*, Vol. 12, Issues 5-6, pp. 421-428.
9. 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

- 10 Choi, H. M., Kurihara, T., Monji, H., and Matsui, G., 2002, A study on the interaction between particles and surrounding fluid, *Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 108-115.
11. Choi, H. M., Terauchi, T., Monji, H., and Matsui, G., 2002, Flow characteristics in a particle/bubble motion with hybrid PIV, *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 5, No. 1, pp. 7-12.
- 12 Matsui, G., Monji, H., Terauchi, T., and Choi, H. M., 2002, Simultaneous visualization and image analysis of particle/bubble behavior (position, shape and attitude) and surrounding flow, *Journal of JSEM*, Vol 2, No. 3, pp. 189-194
- 13 Choi, H. M., Terauchi, T., Monji, H., and Matsui, G., 2002, Visualization of bubble-fluid interaction by a moving object-flow image analyzer system, *Annals New York Academy of Science*, Vol. 972, pp. 235-241.
14. Choi, H. M., 2003, Interaction between Particle/Bubble Motion and Surrounding Fluid with Visualization Image Analysis, Ph. D. thesis, University of Tsukuba