

# 작은 밀도차를 갖는 구형입자의 추종성에 관한 연구

이영호\*·김춘식\*·최민선\*\*

## Study on the Traceability of Spherical Particles with Small Density Difference

*LEE Young-Ho, KIM Choon-Sik, CHOI Min-Seon*

### Abstract

Numerical and experimental study on the traceability of small spherical particles in a flow field were performed when the particles have 2% lower density compared with the fluid.

Equations of single particle motion, including Saffman lift and Basset force are formulated. A flow field for the application of the equations is obtained by numerical calculation of the 2-D cavity flow.

As a result, the center of particle motion deviates greatly from the center of cavity primary vortex, and particles distributed within the secondary eddies disappear by the buoyancy effect.

In experimentation, PIV (Particle Imaging Velocimetry) was adopted for two Re numbers  $3.2 \times 10^3$ ,  $10^4$  and also for two particle sizes range 0.5-0.7 mm, 0.7-0.8 mm in diameter.

The center of particle motion moves right-upward and its velocity component to the gravitational direction reveals buoyancy effect and its effect is greater in case of the larger particle with smaller Re number.

### 기호설명

$C_d$  : 항력계수

$M$  : 입자의 질량

---

\* 한국해양대학 기관학과

\*\* 목포해양전문대학 기관학과

$Re$  : 캐비티내 흐름의 레이놀즈수

$V$  : 입자의 체적

$g$  : 중력가속도

$p$  : 유동압력

$r$  : 입자의 반경

$t$  : 시간

$u$  : 수평속도

$x$  : 수평좌표

$\mu$  : 점성계수

$\nu$  : 동점성계수

#### 첨 자

$l$  : 유체

$p$  : 입자

$x$  : 수평방향

## 1. 서 론

유동장의 특성을 파악하기 위한 가시화수법으로서, 주입입자의 거동을 촬영한 사진 또는 화상을 이용한 트레이서추적법(tracer tracking method)이 이전부터 자주 이용되어 왔다. 입자의 선별방법으로서의 운동에 미치는 여러가지 힘성분의 영향을 무시할 수 있는 작은 구형의 입자를 경험적으로 선택하고 있다. 나아가, 유체측과의 밀도차가 적은 것을 택하여 부력 또는 침강력으로 부터의 영향을 무시하는 수법을 택하여 왔다. 그러나, 사용되는 입자가 다양한 실험조건에 대응하기 위해서는 기본적으로 입자의 추종성(traceability)이 문제로 되며, 추종성 특성은 가시화수법의 신뢰성을 좌우하는 중요한 요인의 하나로 되고 있다.

추종성에 미치는 인자는 대상으로 하는 유동장의 성질에 크게 의존한다. 예를 들면, 경계층 근방에 존재하는 큰 속도구배, 유로면적의 변화에 수반되는 유동장의 가속도, 곡관부에서 나타나는 원심력의 영향 등을 들 수 있다. 이와같은 변동유동장을 대상으로 하는 트레이서추적수법은 입자의 추종성에 관한 상세한 지식에 근거하여 그 적용한계를 명확하게 할 필요성이 있다.

최근에는 계측분야에 고속도처리가 가능한 대용량의 계산기 시스템을 적극적으로 활용하고 있다. 따라서 가시화수법에 있어서도 트레이서추적법에 사용된 다수의 입자의 거동을 화상처리장치를 이용하여 수치적으로 추적하여, 유동장 전체의 속도분포 등을 정량적으로 파악하고자 하는 연구가 활발히 행하여지고 있다. 그러나, 화상처리의 알고리즘의 개발, 응용방법에 우선적으로 중점을 둠으로서 정량적 해석의 신뢰도에 큰 영향을 미칠 수 있는 요인인 입자의 추종성을 무시한

가시화 실험이 빈번히 행해지고 있는 실정이다.

입자의 추종성에 관한 종래의 연구로서는, 트레이서로서 기포를 이용할 때 부력에 의한 상승거동에 관한 계통적인 실험을 행한 Peebles<sup>1)</sup> 등의 연구결과가 있다. 이들은 4종류의 Re수 범위에 있어서 상승속도를 구하고, Re수 증가에 따른 기포형상과 기포상승경로를 실험결과로부터 밝히고 있다.

수소기포법을 이용하여 유동장의 속도를 정량적으로 측정할 때에 수반되는 오차해석의 예가 Schraub<sup>2)</sup> 등에 의해 보고 되었다. 그 주요 내용으로서, 균일한 크기의 기포방출이 중요한 실험조건이며, 속도구배가 심한 곳에서는 수소기포의 상승속도의 영향을 무시할 수 없음을 지적하고 있다. 나아가, 변동유동장에서의 추종성을 조사하기 위해서 부가질량력(added mass force)까지를 포함한 간단한 식을 이용하여 계산하였고, 주위의 변동에 대하여 충분히 추종성이 확보되어지는 입자의 크기를 보고하고 있다.

Okamoto<sup>3)</sup> 등은 수소기포법에 의해 관흐름의 속도측정을 행함에 있어서, 기포의 추종성에 영향을 주는 부력, 기포크기, 가속에 필요한 입구길이, 세션으로부터의 후류(wake), 곡율이 있는 유동장에서의 구심력 등에 대한 검토를 행하고 그 중에서 후류와 구심력의 영향을 무시할 수 없음을 밝히고 있다.

경계층 유동과 같이 주류와 직각방향으로 속도구배를 갖는 유동장을 가시화 할 경우에는 수직방향으로 양력이 생긴다. Saffman<sup>4)</sup>은 이에 관한 해석해를 제시하고 있다.

Minemura<sup>5)</sup> 등은 반경류 펌프내에서 구형 고체입자 및 기포의 궤적과 벽면의 충돌속도 등을 수치해석으로 구하고, 입자직경과 비중 및 토출량의 영향을 검토하였다. 그 결과, 외권 펌프내의 고체입자의 궤적은 유선의 구부러짐에 대하여 직진하는 경향이 강하고, 입자의 비중 및 펌프의 유량이 큰 경우에는, 이 경향이 현저해짐을 밝히고 있다.

본 연구에서는 유동장에 있어서의 입자의 추종성을 정량적으로 조사하기 위해서 종래의 연구결과를 검토한 후, 고려할 수 있는 모든 힘성분이 표현된 입자운동방정식의 정식화를 행하였다. 또한, 실제의 캐비티(cavity)내 유동장에 있어서 실험에 의한 체계적인 검토를 행하였다. 본 연구에서는 추종성에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로서 2%의 밀도차를 고려하였다.

## 2. 입자의 운동방정식

변동흐름장에 위치한 한개의 구형입자에 대한 운동방정식은 여러가지가 제안되고 있으나 과거의 연구결과<sup>6)-14)</sup>를 참조하여 이하와 같이 정리한다. 구형입자의 운동방정식은 입자에 작용하는 여러 힘성분이 선형적으로 가산된다고 하면 식 (1)과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 M \left( \frac{du_p}{dt} \right) &= F_d + F_p + F_b + F_a + F_s + F_B \\
 M &= \rho_p V, \quad V = (4/3) \pi (r_p)^3
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기에서 각 힘성분은 다음과 같이 계산된다. 단 힘의 표시는 간략히 하기 위하여 x방향성분만을 표기한다.

1) 항력  $F_d$ : 입자에 작용하는 항력은 이하의 식으로 구해진다.

$$F_d = C_d \pi (r_p)^2 (\rho_1/2) (\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_1) |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_1|$$

$$C_d = \frac{24}{R_p} + \frac{2}{1 + (R_p)^{1/2}} + 0.4 \quad (2)$$

$$R_p = \frac{2r_p |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_1|}{\nu_1}$$

2) 정압구배에 의한 힘  $F_p$ : 입자주위의 정압구배에 의한 힘성분이다.

$$F_p = V (\partial p / \partial x) \quad (3)$$

3) 체적력  $F_b$ : 중력장에서 발생하는 침강력이나 부력이 해당된다.

$$F_b = V (\rho_p - \rho_1) g_x \quad (4)$$

4) 부가질량력  $F_a$ : 입자의 가속에 따른 부가질량에 작용하는 힘성분이다.

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_1 V \left( \frac{D\mathbf{u}_1}{Dt} - \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} \right) \quad (5)$$

여기에서  $D\mathbf{u}_1/Dt$ 는 유체축의 실질가속도성분을 표시하는 편미분연산자를,  $d\mathbf{u}_p/dt$ 는 질점역학에서의 입자의 가속도를 의미한다.

5) Saffman 양력  $F_s$ : 전단유동장에서 속도구배에 따른 양력계산식이 Saffman에 의해 제시되었다.

$$F_s = 3.23 \mu r_p (v_r)_i \cdot (4r_p^2 G/v)^{1/2}, \quad G = \partial (v_r)_j / \partial x_i \quad (6)$$

6) Basset력  $F_B$ : 입자의 주위가 Stokes흐름인 경우 입자의 운동이력 효과를 나타내는 성분이다.

$$F_B = 6 (r_p)^2 \cdot (\pi \rho_1 \mu_1) \left( \frac{D\mathbf{u}_1}{Dt} - \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} \right) \frac{d\tau}{(t-\tau)^{1/2}} \quad (7)$$

단 본 계산에서는 Stokes흐름이 항상 만족되지 않기 때문에 이항은 생략하였다. 이외에 유동장에 따라서는 원심력, 또는 고속회전하는 입장에 발생하는 Magnus효과 등도 고려를 해서 정확한 입자의 운동방정식을 유도할 필요가 있다.

가시화 실험이 빈번히 행해지고 있는 실정이다.

입자의 추종성에 관한 종래의 연구로서는, 트레이서로서 기포를 이용할 때 부력에 의한 상승거동에 관한 계통적인 실험을 행한 Peebles<sup>1)</sup> 등의 연구결과가 있다. 이들은 4종류의 Re수 범위에 있어서 상승속도를 구하고, Re수 증가에 따른 기포형상과 기포상승경로를 실험결과로부터 밝히고 있다.

수소기포법을 이용하여 유동장의 속도를 정량적으로 측정할 때에 수반되는 오차해석의 예가 Schraub<sup>2)</sup> 등에 의해 보고 되었다. 그 주요 내용으로서, 균일한 크기의 기포방출이 중요한 실험조건이며, 속도구배가 심한 곳에서는 수소기포의 상승속도의 영향을 무시할 수 없음을 지적하고 있다. 나아가, 변동유동장에서의 추종성을 조사하기 위해서 부가질량력(added mass force)까지를 포함한 간단한 식을 이용하여 계산하였고, 주위의 변동에 대하여 충분히 추종성이 확보되어지는 입자의 크기를 보고하고 있다.

Okamoto<sup>3)</sup> 등은 수소기포법에 의해 관흐름의 속도측정을 행함에 있어서, 기포의 추종성에 영향을 주는 부력, 기포크기, 가속에 필요한 입구길이, 세션으로부터의 후류(wake), 곡율이 있는 유동장에서의 구심력 등에 대한 검토를 행하고 그 중에서 후류와 구심력의 영향을 무시할 수 없음을 밝히고 있다.

경계층 유동과 같이 주류와 직각방향으로 속도구배를 갖는 유동장을 가시화 할 경우에는 수직방향으로 양력이 생긴다. Saffman<sup>4)</sup>은 이에 관한 해석해를 제시하고 있다.

Minemura<sup>5)</sup> 등은 반경류 펌프내에서 구형 고체입자 및 기포의 체적과 벽면의 충돌속도 등을 수치해석으로 구하고, 입자직경과 비중 및 토출량의 영향을 검토하였다. 그 결과, 와권 펌프내의 고체입자의 체적은 유선의 구부러짐에 대하여 직진하는 경향이 강하고, 입자의 비중 및 펌프의 유량이 큰 경우에는, 이 경향이 현저해짐을 밝히고 있다.

본 연구에서는 유동장에 있어서의 입자의 추종성을 정량적으로 조사하기 위해서 종래의 연구결과를 검토한 후, 고려할 수 있는 모든 힘성분이 표현된 입자운동방정식의 정식화를 행하였다. 또한, 실제의 캐비티(cavity)내 유동장에 있어서 실험에 의한 체계적인 검토를 행하였다. 본 연구에서는 추종성에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로서 2%의 밀도차를 고려하였다.

## 2. 입자의 운동방정식

변동흐름장에 위치한 한개의 구형입자에 대한 운동방정식은 여러가지가 제안되고 있으나 과거의 연구결과<sup>6)-14)</sup>를 참조하여 이하와 같이 정리한다. 구형입자의 운동방정식은 입자에 작용하는 여러 힘성분이 선형적으로 가산된다고 하면 식 (1)과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 M (du_p/dt) &= F_a + F_p + F_b + F_a + F_s + F_b \\
 M &= \rho_p V, \quad V = (4/3) \pi (r_p)^3
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기에서 각 힘성분은 다음과 같이 계산된다. 단 힘의 표시는 간략히 하기 위하여 x방향성분만을 표기한다.

1) 항력  $F_d$ : 입자에 작용하는 항력은 이하의 식으로 구해진다.

$$F_d = C_d \pi (r_p)^2 (\rho_1/2) (\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_1) |u_p - u_1|$$

$$C_d = \frac{24}{R_p} + \frac{2}{1 + (R_p)^{1/2}} + 0.4 \quad (2)$$

$$R_p = \frac{2r_p |u_p - u_1|}{\nu_1}$$

2) 정압구배에 의한 힘  $F_p$ : 입자주위의 정압구배에 의한 힘성분이다.

$$F_p = V (\partial p / \partial x) \quad (3)$$

3) 체적력  $F_b$ : 중력장에서 발생하는 침강력이나 부력이 해당된다.

$$F_b = V (\rho_p - \rho_1) g_x \quad (4)$$

4) 부가질량력  $F_a$ : 입자의 가속에 따른 부가질량에 작용하는 힘성분이다.

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_1 V \left( \frac{Du_1}{Dt} - \frac{du_p}{dt} \right) \quad (5)$$

여기에서  $Du_1/Dt$ 는 유체층의 실질가속도성분을 표시하는 편미분연산자를,  $du_p/dt$ 는 질점역학에서의 입자의 가속도를 의미한다.

5) Saffman 양력  $F_s$ : 전단유동장에서 속도구배에 따른 양력계산식이 Saffman에 의해 제시되었다.

$$F_s = 3.23 \mu r_p (v_r)_i \cdot (4r_p^2 G/v)^{1/2}, \quad G = \partial (v_r)_j / \partial x_i \quad (6)$$

6) Basset력  $F_B$ : 입자의 주위가 Stokes흐름인 경우 입자의 운동이력 효과를 나타내는 성분이다.

$$F_B = 6(r_p)^2 \cdot (\pi \rho_1 \mu_1) \left( \frac{Du_1}{D\tau} - \frac{du_p}{d\tau} \right) \frac{d\tau}{(t-\tau)^{1/2}} \quad (7)$$

단 본 계산에서는 Stokes흐름이 항상 만족되지 않기 때문에 이항은 생략하였다. 이외에 유동장에 따라서는 원심력, 또는 고속회전하는 입장에 발생하는 Magnus효과 등도 고려를 해서 정확한 입자의 운동방정식을 유도할 필요가 있다.

### 3. 수치계산 결과

2차원 정방형 캐비티내의 유동장에 있어서 입자의 추종성을 수치계산수법에 의해 검토한다. 유동장에 대한 연속의 식과 운동방정식의 결합은 SOLA수법<sup>15)</sup>을 이용하고, 차분격자로서  $100 \times 100$ 의 등간격 정방격자를 이용한다. 모든 변수를 캐비티의 한변의 길이 50mm와 상부벨트의 속도 및 유체밀도로 무차원화 한다. 유동장의 Re수는  $3.2 \times 10^3$ 이다.

Fig. 1은 계산결과 얻어진 단면내 중앙위치의 수평 및 수직방향 속도분포를 표시한다. 이 결과는 Ghia<sup>16)</sup>등의 결과와 일치하며, 계산된 유동장은 신뢰할 수 있는 결과임을 보이고 있다. 이 유동장에 있어서 두가지 직경의 입자를 초기 슬립속도 0으로 부터 방출한 입자의 궤적을 조사하였다. 중력방향은 위로부터 하방향으로 작용한다.

Fig. 2에서 Fig. 4까지는  $\rho_p/\rho_1 = 0.98$ 인 경우의 무차원 시각  $T = 2.2$ 까지의 입자 궤적이다. 유동장의 유선을 겹쳐서 나타내고 있다. 캐비티의 한변의 길이로 무차원화한 입자반경  $r_p = 2 \times 10^{-3}$ 의 경우에는, 입자들이 거의 유선에 따라서 이동한다. 그러나, Fig. 3에서와 같이 반경이 큰  $r_p = 5 \times 10^{-3}$ 의 경우에는 입자 궤적으로 부터 얻어진 와중심은 유체축의 와중심으로 부터 오른쪽 상방으로 벗어나며, 입자궤적과 유선간에 큰 차가 있음을 알 수 있다. 이 결과에서는 체적의 크기에 따른 부력 효과가 현저하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서는 시간경과와 함께 2차와내의 입자수가 감소함을 보여준다.

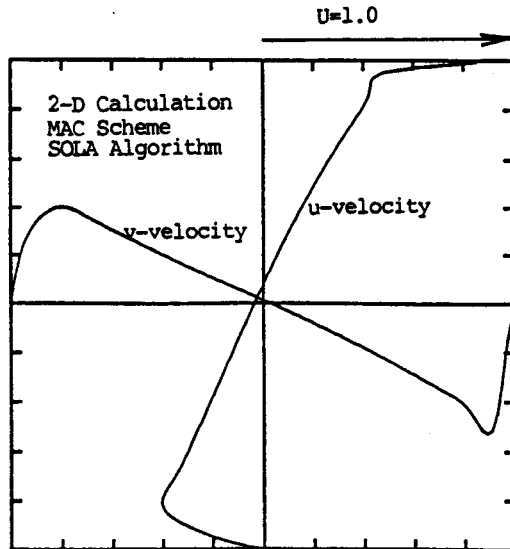


Fig. 1 Representative Velocity Profiles in 2-D Cavity Flow ( $Re = 3.2 \times 10^3$ , Uniform Square Grid Formation =  $100 \times 100$ )

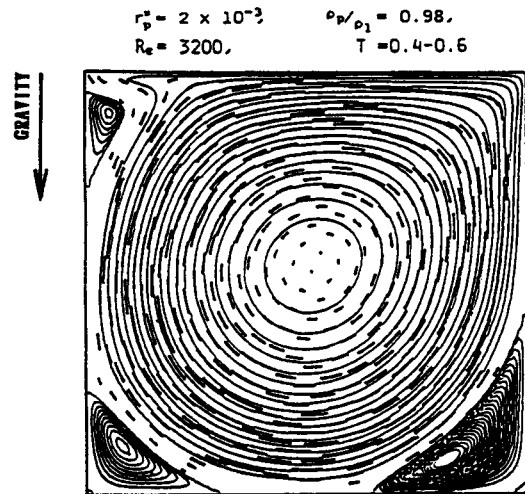


Fig. 2 Trajectories of Smaller Particles

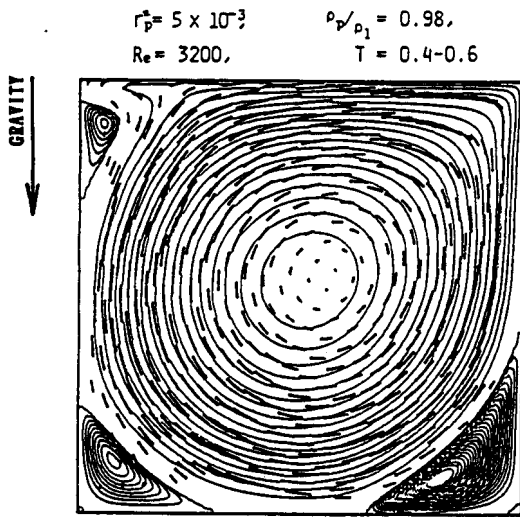


Fig. 3 Trajectories of Larger Particles

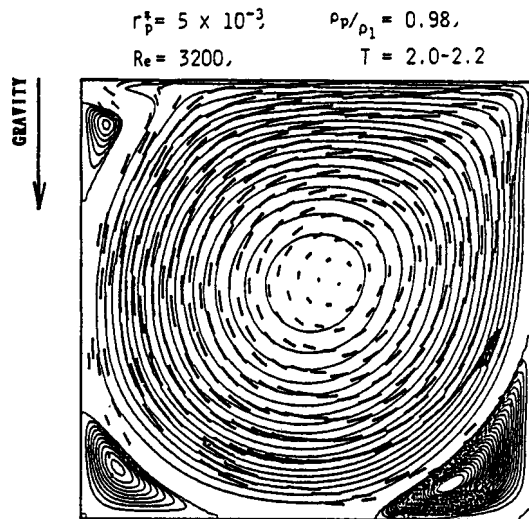


Fig. 4 Trajectories in case of Long Time Ellipse

상기의 계산결과에서 알 수 있듯이 캐비티유동장과 같은 약한 2차와를 수반하는 밀폐 유동장의 가시화실험에서는 특히 밀도차로 부터의 영향이 국소적으로 현저하고, 유동장의 전체적인 변동을 장시간에 걸쳐서 관찰하기 위해서는 추종성이 양호한 입자의 선택이 중요함을 나타내고 있다.

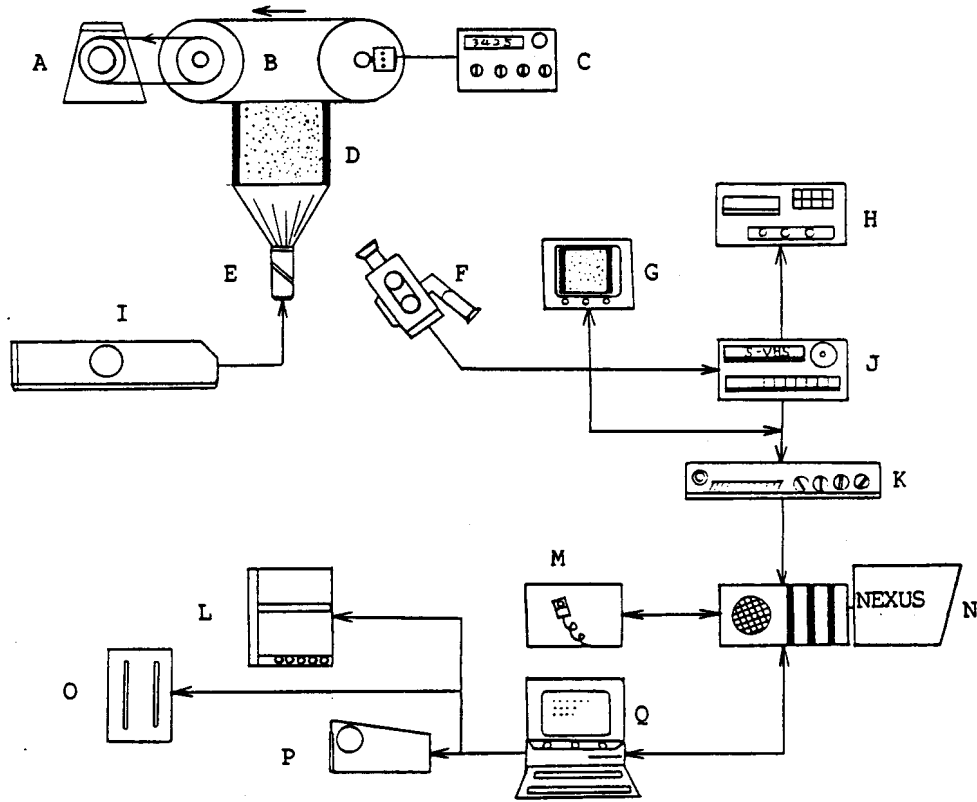
#### 4. 실험결과

Fig. 5는 실험장치의 개략도이다. 연속적으로 구동되는 0.2mmT×160mmB×1462mmL의 스테인레스 벨트는 캐비티내부에 큰 와도(vorticity)를 갖는 전단응력을 공급한다. 직경 0.12-0.25mm의 Nylon12의 구형입자를 트레이서입자로서 선택하였다. 3축 이동대에 부착된 원통렌즈와 신축 광섬유 케이블, 알곤 레이저 발생기로 구성된 조명장치는 2.5mm의 일정한 두께의 시트라이트(sheet light)를 제공한다.

유동장은 비디오테이프에 기록되며, 이 화상은 나중에 연속적인 4개의 화면으로 분리되어 이미지 프로세서에 입력된다. 입력된 화상은 디지털 화상처리수법에 의해 입자크기와 위치로 표시된 디지털정보로서 변환되고, 이후의 데이터처리에 이용된다. 데이터 처리순서를 나타내는 플로우차트를 Fig. 6에 보인다. 입자의 중심(gravity center)계산을 하기위해서 중요한 것은 연속적인 4개의 프레임 화상에서의 동일 입자를 추적하는 수법인 "동정(identification)"이다. 본 연구에서는 T. Kobayashi<sup>17)</sup>등에 의해 제안된 수법을 택하였다.

Fig. 7은 본 연구에서 채택한 캐비티내 흐름의 좌표 정의이다. Z단면은 보통 주류방향을 보여주는 대표단면으로 빈번히 인용되며, 스핀방향으로 중앙위치에 속하는 z=0.5 단면은 수치계산 및 실험에서 자주 대상이 되는 단면이다.





A:SCR DC Motor & Reduction Gear  
 C:Encoder & Digital Tachometer  
 E:Cylindrical Lens & Fiber Line  
 G:Monitor TV  
 I:Argon Laser  
 K:Time Base Corrector  
 M:Digitizer  
 O:External Memory  
 Q:Host Computer

B:Roller & Stainless Belt  
 D:Cavity(100 mm L,B,H)  
 F:TV Camera or CCD Camera  
 H:Color Image Printer  
 J:Video Tape Recorder  
 L:X-Y Plotter  
 N:Image Processor & Monitor  
 P:Laser Printer

Fig. 5 Schematic Arrangement of Experimental Apparatus

Fig. 8부터 Fig. 17까지는 추종성문제를 실험적으로 검토한 결과이다. 캐비티의 스펠 방향의 종횡비(SAR: Spanwise Aspect Ratio)는 1:3.2이다. 중력의 영향은 한쪽방향으로만 작용하기 때문에 밀도차에 의한 속도의 변화는 종횡비에 의해 영향을 받지 않는다고 추정하였다. 이용된 입자는 Nylon12의 백색의 구형 입자이다. 직경은 0.5-0.7mm, 0.7-0.84mm의 두 종류이며, 밀도비  $0.98 \pm 0.005$ 의 가벼운 입자를 사용하였다. 입자의 선별을 위해서는 용기속의 물의 밀도를 분말식

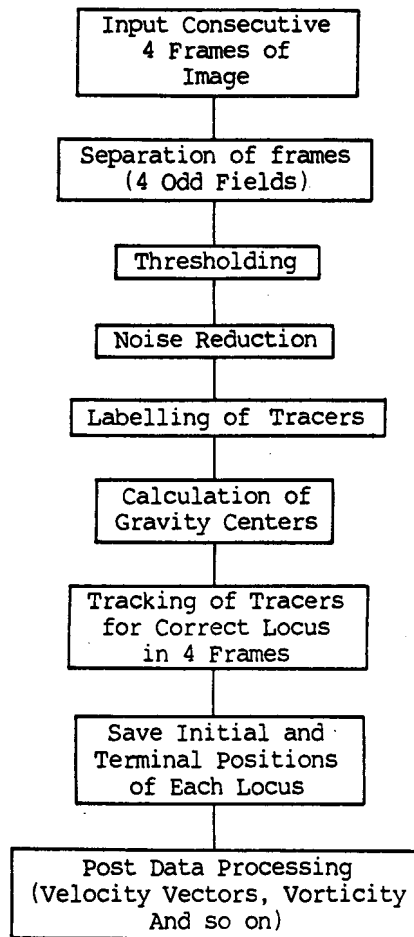


Fig. 6 Flow Chart of Digital Image Processing

염으로 조정하고, 공간에 장시간 부유하고 있는 입자만을 선별하였다. 예비실험에서는 입자의 밀도비가 1.02인 무거운 것에 대해서도 검토하였으나, 유동장이 완전히 발달하기 전에 대부분의 입자가 가라앉아 버렸다. 그 결과, 얻어진 데이터가 극히 적음으로서 무거운 입자에 대해서는 실험을 생략하였다. 또한,  $Re=10^3$ 의 유동장에서는 밀도차에 따른 영향이 크게 나타나서 신뢰성 있는 데이터의 확보가 어려웠다.

Fig. 8은 직경이 0.5-0.7mm인 경우의,  $Re=3.2 \times 10^3$ 의 속도벡터이며, Fig. 9는 같은 직경의  $Re=10^4$ 에서의 입자의 속도벡터분포를 보여준다. Fig. 10과 Fig. 11은 직경이 0.7-0.84mm일 때의 결과이다.  $Re=3.2 \times 10^3$ 에서의 직경이 0.7-0.84mm인 경우에는 그림의 좌측에 속도벡터가 보이지 않는다. 이것은 실험 초기조건에 있어서 정지된 유동장에 균일하게 분포된 입자가 시간과 함께 발달한 유동장에 추종하면서 운동하지만, Fig. 4와 비슷한 경향을 보여 와중심 위치가 우측상방으로 이동하기 때문이다. 이와 같은 결과는 강제와에서의 밀도차를 갖는 입자의 궤적에 관한 기존의 결과<sup>18)</sup>와 일치하고 있으며, 각종의 시간 및 공간크기를 갖는 와흐름을 입자추적법으로 재현하

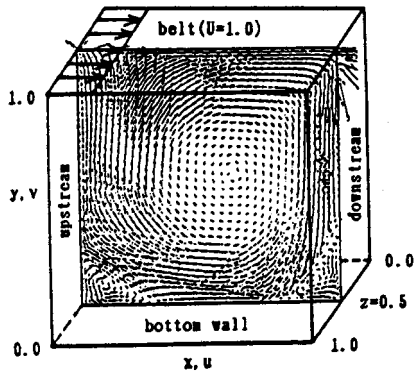


Fig. 7 Schematic Coordinates Definition

Z SECTION (z=0.5)  
(U-V SECTION)

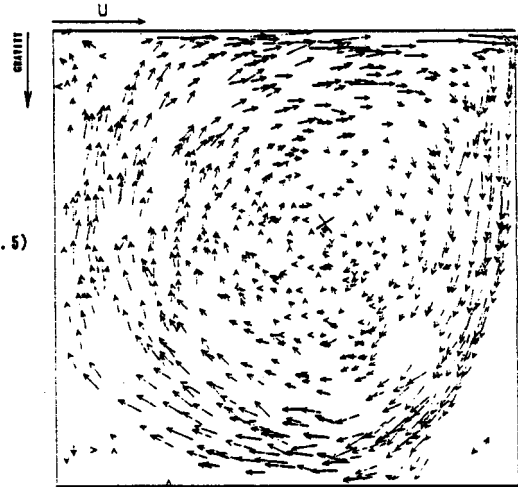


Fig. 8 Distribution of Velocity Vectors ( $Re=3.2 \times 10^3$ ,  
Dia.=0.50-0.71mm, SAR=1:3.2, Density  
Ratio=0.98)

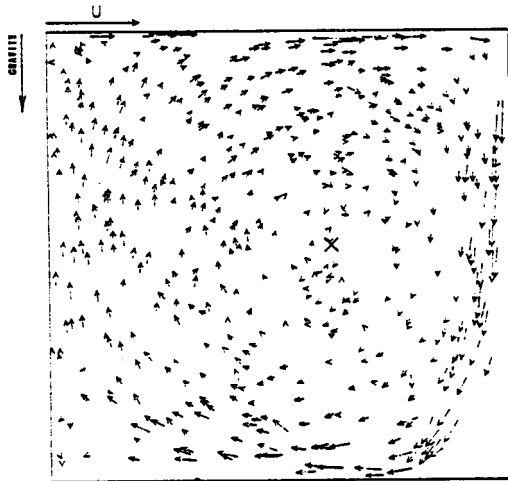


Fig. 9 Distribution of Velocity Vectors ( $Re=10^4$ ,  
Dia.=0.50-0.71mm, SAR=1:3.2, Density  
Ratio=0.98)

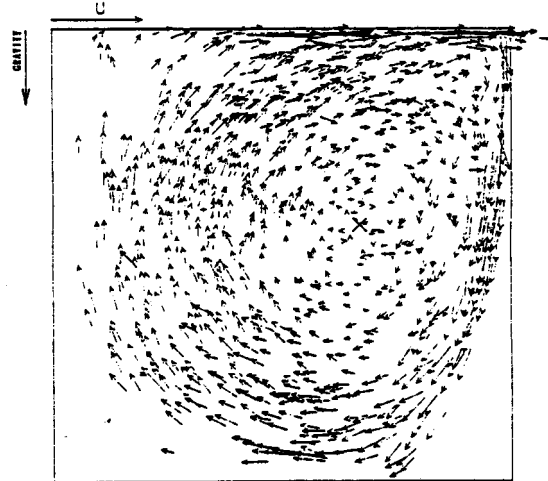


Fig. 10 Distribution of Velocity Vectors ( $Re=3.2 \times 10^3$ ,  
Dia.=0.71-0.84mm, SAR=1:3.2, Density  
Ratio=0.98)

는 경우에는 고려해야 할 문제로 생각된다.  $Re=10^4$ 의 경우는 밀도차에 따른 추종성의 문제가 상대적으로 감소되고 외견상 큰 차이가 보이지 않는다. 입자가 클 수록 와중심 이동이 크게 나타나는 점은 수치해석의 결과와 일치하고 있다. Fig. 12로부터 Fig. 15까지는  $z=0.5$ 단면의 속도분포를 구한 결과이다. 그림의 이해를 위해 Fig. 12에서 상세한 설명을 한다. 예를 들어 속도  $v$ 는  $y=0.4-0.6$ 의 공간에 존재하는 입자의 속도벡터의 크기를 중심선  $y=0.5$ 로부터의 거리로 나타내고 있다. 같은 요령으로 속도  $u$ 는 벨트와 평행한 속도성분을 의미하고,  $x=0.4-0.6$ 의 범위내의 입자

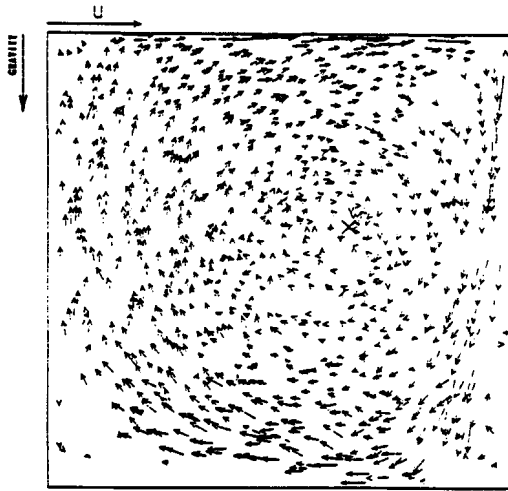


Fig. 11 Distribution of Velocity Vectors ( $Re=10^4$ , Dia.=0.71-0.84mm, SAR=1:3.2, Density Ratio=0.98)

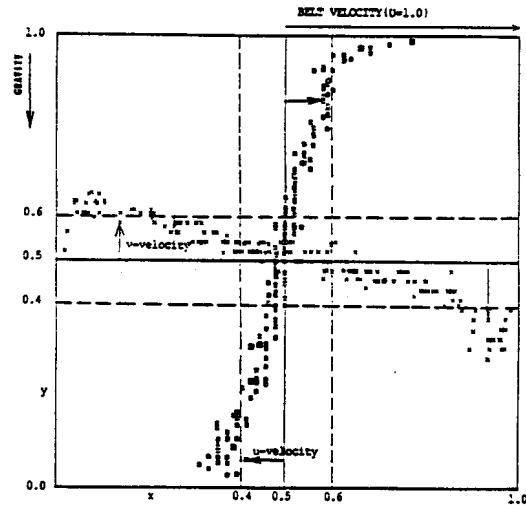


Fig. 12 Velocity Distribution of Central Section ( $Re=3.2 \times 10^3$ , Dia.=0.50-0.71mm, SAR=1:3.2, Density Ratio=0.98)

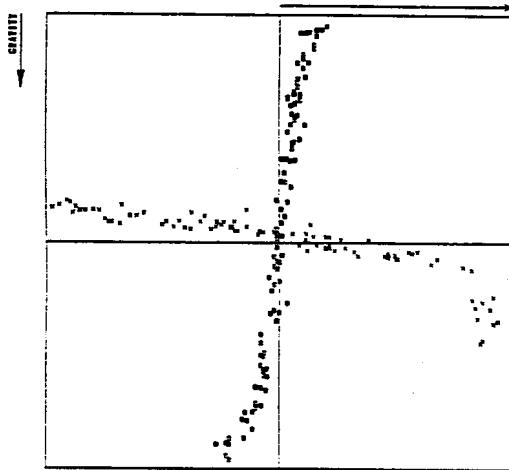


Fig. 13 Velocity Distribution at Central Section ( $Re=10^4$ , Dia.=0.50-0.71mm, SAR=1:3.2, Density Ratio=0.98)

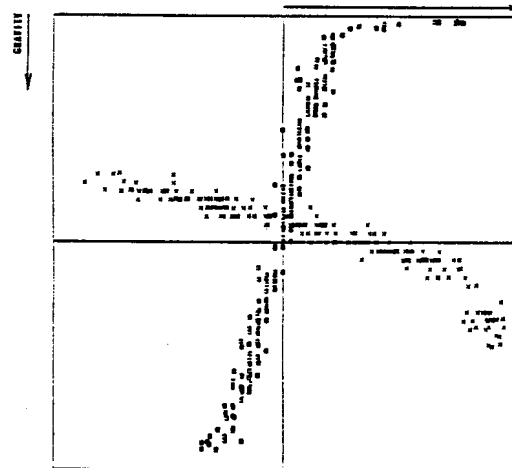


Fig. 14 Velocity Distribution at Central Section ( $Re=3.2 \times 10^3$ , Dia.=0.71-0.84mm, SAR=1:3.2, Density Ratio=0.98)

의 속도벡터 크기를 도시한 결과이다. 이렇게 분포된 속도값에 대하여 적당한 공간격자상에서의 평균조각 및 곡선근사를 행하면 정량적인 비교 검토가 가능하다. Fig. 13부터 Fig. 15까지는 이와 같은 방법으로 도시한 결과이다. 벽면 근처에서 입자의 수가 작은 것은 밀도차에 의한 추종성 문제뿐만 아니라 전단유동장에서의 Saffman효과 등이 관여하고 있다고 생각된다. 입자의 수는 평균적으로 700개 전후이다.

Fig. 16은 밀도차에 따른 속도분포를 종합적으로 나타내고 있다. 기준이 된 속도분포는 직경

0.10-0.25mm의 것으로 밀도비가  $1.00 \pm 0.005$ 인 Nylon12 입자를 이용한 결과이다.  $u$ 속도분포에서는 계측과 유동장의 재현성에 수반하는 오차를 고려하면 밀도차에 의한 특징은 나타나지 않는다고 볼 수 있다. 그러나,  $v$ 속도에서는 입자 크기에 따른 부력의 영향이 현저하게 나타나고 있다. Fig. 17은  $Re=10^4$ 의 경우이지만,  $v$ 속도 분포에서는 상대적인 차가 보다 작은 것을 알 수 있다.  $u$ 속도의 분포에 있어서 하부에 큰 차가 보이는 것은 유동장의 생성에 있어서의 재현성 부족에 의한 것으로 생각된다.

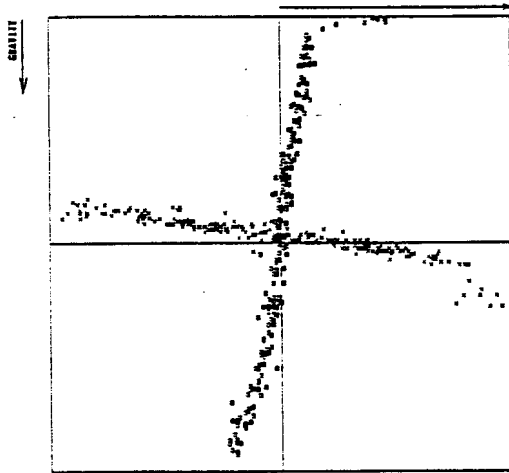
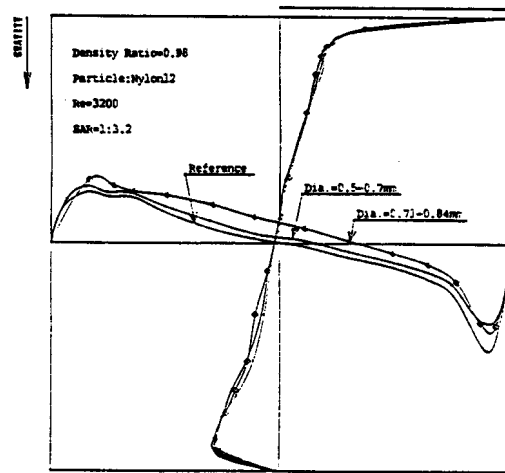
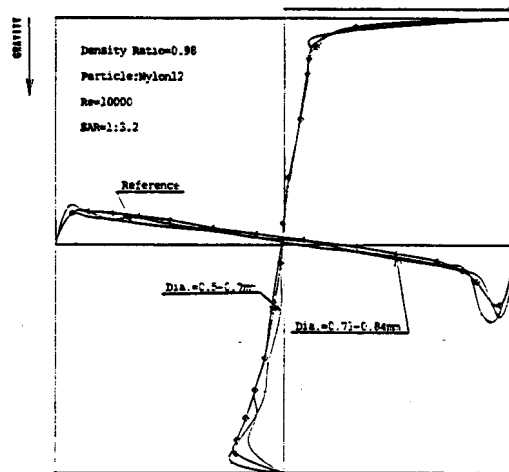


Fig. 15 Velocity Distribution at Central Section  
( $Re=10^4$ , Dia.=0.71-0.84mm, SAR=1:3.2, Density Ratio=0.98)



Dia=0.10-0.25mm of Nylon12,  $Re=3200$ , SAR=1:3.2  
 Dia=0.50-0.71mm of Nylon12,  $Re=3200$ , SAR=1:3.2  
 Dia=0.71-0.84mm of Nylon12,  $Re=3200$ , SAR=1:3.2

Fig. 16 Comparison of Velocity Profiles  
( $Re=3.2 \times 10^3$ , SAR=1:3.2)



Dia=0.10-0.25mm of Nylon12,  $Re=10000$ , SAR=1:3.2  
 Dia=0.50-0.71mm of Nylon12,  $Re=10000$ , SAR=1:3.2  
 Dia=0.71-0.84mm of Nylon12,  $Re=10000$ , SAR=1:3.2

Fig. 17 Comparison of Velocity Profiles( $Re=10^4$ , SAR=1:3.2)

## 5. 고찰 및 결론

이상의 결과를 정리하면, 화상처리에 이용되는 트레이서의 조건으로서는 입자의 크기 및 밀도차가 중요하며, 특히 장시간에 걸쳐 밀폐 유동장을 얻는 경우에 입자의 밀도차에 의한 편향(deviation)이 유동장 전체에서 발생하여 본래의 유체속도와 다른 속도분포가 얻어짐을 알 수 있다. 또한, 입자가 부분적으로 밀집하여 결국 일부의 유동장만이 해석되기도 한다.

본 연구에서의 계산은 2차원의 경우이고, 실험에 있어서도 충분한 종횡비를 가지지 않기 때문에 실제의 3차원의 경우와는 다른 조건하에서의 결과이다. 그러나, 중력이 작용하는 방향에서는 어떠한 경우에라도 문제가 된다고 생각된다.

밀도차가 있어도 이용된 트레이서가 작은 경우에는 이러한 영향을 무시할 수 있지만 화상의 선명도 문제가 새롭게 생긴다. 일반적으로 유체측은 주위의 온도변화에 따라서 밀도가 변함으로서, 어느 일정한 온도 조건으로 선별된 같은 밀도의 입자를 이용해도 결국 유체와의 물성치가 틀림으로서 밀도차가 존재하고 실험의 성패는 유동장의 온도제어문제에 달려있는 경우가 많다. 그러나, 실제의 실험에서는 밀도차가 없는 입자의 선별 및 정밀한 온도의 제어가 어려운 실정이다.

시판하는 입자의 재료는 주로 Nylon12와 Polystyrene의 두가지 종류 이지만, 평균 밀도비가 물과 비교해서 1.02전후의 값을 갖는다. 따라서, 입자의 직경이 큰 경우에는 수반하는 속도의 오차가 무시될 수 없음을 본 연구에서는 잘 나타내고 있다.

## 참고문헌

- 1) F.N. Peebles, H.J. Garber, Studies on the Motion of Gas Bubbles in Liquids, Chem. Eng. Prog, Feb. 1953., p. 88.
- 2) F.A. Schraub, S.J. Kline, J. Henry, P.W. Runstadler Jr, A. Littell, Use of Hydrogen Bubbles for Quantitative Determination of Time-Dependent Velocity Fields in Low-Speed Water Flows, J. Basic Eng., June 1965, p. 429.
- 3) 岡本芳三, 花輪壽一, 龜岡利行, 水素氣泡法による管内流の觀測について, 日本機械學會論文集(B), 37卷 394號, 1971, p. 305.
- 4) P.G. Saffman, The Lift on a Small Sphere in a Slow Shear Flow, J. Fluid Mech., Vol.2, 1965, p. 385.
- 5) 峰村吉泰, 村上光清, 澤田茂, 半徑流ポンプ内の固體粒子の流れ, 日本機械學會論文集(B), 51卷 471號, 1985, p. 3506.
- 6) S. Corrisin, J. Lumley, On the Equation of Motion for a Particle in Turbulent Fluid, Appl. Sci. Res. Sec. A, Vol. 6, 1956, p. 114.
- 7) J.O. Hinze, Turbulenc, McGraw-Hill Co., 1959, p. 352.
- 8) F. Odar, W.S. Hamilton, Forces on a Sphere Accelerating in a Viscous Fluid, J. Fluid Mech., Vol. 18, 1964, p. 302.

- 9) F. Odar, Verification of the Proposed Equation for Calculation of the Forces on a Sphere Accelerating in a Viscous Fluid, *J. Fluid Mech.*, 1966, p. 591.
- 10) R. Clift, J.R. Grace, M.E. Weber, *Bubbles, Drops, and Particles*, Academic Press, 1978.
- 11) F. Odar, Forces on a Sphere Moving Steadily along a Circular Path in a Viscous Fluid, *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, 1968, p. 238.
- 12) F.A. Morrison, Jr., M.V. Stewart, Small Bubble Motion in an Accelerating Liquid, *J. of Applied Mech.*, Sep. 1976, p. 399.
- 13) M.R. Maxey, J.J. Riley, Equation of Motion for a Small Rigid Sphere in a Nonuniform Flow, *Phys. Fluids*, Vol. 26(4), April 1983, p. 883.
- 14) J.T. Kuo, G.Q. Wallis, Flow of Bubbles Through Nozzles, *Int. J. Multi. Flow*, Vol. 14, No. 5, 1988, p. 549.
- 15) 이영호, 2차원각주의 비정상공력특성(SOLA스킴의 재평가), *한국박용기관학회지*, 14권 2호, 1990, p. 48.
- 16) U. Ghia, K.N. Ghia, G.T. Shin, High-Resolutions for Incompressible Flow Using the Navier-Stokes Equations and a Multigrid Method, *J. of Comp. Physics*, Vol. 48, 1982, p. 387.
- 17) T. Kobayashi, T. Saga, K. Sekimoto, Velocity Measurement of Three-Dimensional Flow around Rotating Parallel Disks by Digital Image Processing, *Flow Visualization-1989, ASME FED*, Vol. 85, 1989, p. 29.
- 18) Young-Ho LEE et al., Numerical Analysis of Traceability of Particles to Flow Fields, *Proc. of the 1st KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, Vol. 2, 1988, p. 54.

