⊙ 研究論文

PIV를 이용한 3차원 속도계측에 의한 유동장의 공간 및 벽면압력 분포 추정에 관한 연구

도 덕 희* · 이 영 호*

A Study on Estimation of Inner and Wall Pressure Distribution by 3-Dimensional Velocity Measurement using PIV

D. H. Doh · Y. H. Lee

Key words : Flow Measurement(유체계측), Instantaneous Three-Dimensional Velocity Components(순시 3차원 속도성분), Digital Image Processing(디지탈 화상처리), Stereoscopic Photogrammetry(스테레오 사진법), Mixing Tank(교반탱크)

Abstract

A flow measurement system which is able to measure the instantaneous three-dimensional velocity components and the pressure distribution of fluid flows is developed using a digital image processing system and the stereoscopic photogrammetry. This system consists of two TV cameras, a digital image processor, and a 32-bit microcomputer. The capability of the developed system is verified by a preliminary test in which three-dimensional displacements of moving particles arranged on a rotating plate are tracked automatically. The constructed system is applied to the measurement of the flow in a mixing tank. Three-dimensional velocity is obtained through the measurement and spatial pressure distribution is also obtained. The measurement uncertainty of this system is evaluated quantitatively. The present technique is applicable to the measurement of an unsteady fluid phenomenon, especially to the measurement of three-dimensional velocity field of a complex flow.

1. 서 론

유체공학에 관련된 실험에서 대상유동장의 속도와 압력을 정량적으로 계측하여 정상 및 비정상의 유동특성을 규명하는 연구의 대부분이 CFD의 연구결과를 참고해 왔으며 실험 자체만을 통한 유

* 한국해양대학교 이공대학 기계 · 냉동 · 자동차공학부(원고접수일 : 97년 12월)

동의 역학적 연구는 거의 전무한 상태이다. 특히 스케일이 큰 조직구조의 발생으로부터 소멸에 이르기까지의 메커니즘을 파악하기 위해서는 유동장의 공간적인 속도와 압력을 동시에 계측할 수 있는 방법이 필요하게 된다. 종래의 대표적인 난류계측법인 열선 · 열막유속계 혹은 레이져도플러 유속계는 원칙적으로는 유동장의 한 점에서의 속도를 측정하는 방법이기 때문에 공간구조에 관한 정보를 직접 얻기가 어렵다. 또한 속도벡터의 3 성분의 측정에 관해서도, 열선 · 열막유속계에 있어서는 프로브의 제작과 교정에, 그리고 레이져도플러 유속계에서는 광학계의 조정 · 이송 등에 많은 노력이 필요하게 되어 계측상의 커다란 제약이 되고 있다.

한편 유동장의 가시화기법은 비교적 용이하게 유동장의 공간구조를 파악할 수 있다는 장점을 가지고 있지만 측정결과는 일반적으로 정성적인 것에 의존해 왔다. 그러나 최근 급변하고 있는 전자기기 및 화상처리기기의 발전에 힘입어 디지털 화상처리기술에 의거한 데이터의 정량적 처리가 정교하게 이루어지고 있다.[1)-4)]

유동장의 공간 및 벽면압력분포를 추정하기 위해서는 유동장의 전역에 걸쳐서 속도계측을 해야 한다. 이를 위하여 개발된 계측법이 PIV(Particle Imaging Velocimetry)이다. PIV는 유체와 동일비중의 추적입자를 유동장에 투입하여 이들 추적입자를 가시화한 후 디지털화상처리함으로써 유동장의 전역에 걸쳐서 속도를 계측하는 방법이다. 그런데 지금까지의 연구[5)-7)]는 2차원적인 것이어서 이들 방법을 복잡한 유동장의 속도계측에 이용하여 얻은 결과로부터 3차원적인 정보(공간적인 속도 및 압력분포)를 얻어내기 란 쉽지가 않다. 더군다나 공학적으로 중요도가 높은 벽면난류, 분류, 박리류 등 난류유동장의 물리적 기구에 중요한 역할을 하는 다양한 크기의 와동성분의 역학적인 특성을 이해하기 위해서는 속도의 3성분과 공간압력분포의 정량적인 계측이 동시에 이루어져야 하며 이들 결과들의 역학적인 관계가 동시에 검토되어야 할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 유동장의 내부 및 고체벽면에서의 압력분포를 공간적 및 정량적으로 계측할 수 있는 3차원 PIV계측시스템을 구축한 후 이를 복잡한 유동장의 계측에 실제로 적용하는 것을 연구의 목적으로 한다.

구축된 3차원 PIV계측시스템이 유동장의 3차원 속도계측에 적용이 가능함을 확인하기 위하여 회전 원판 위에 3차원적으로 설치되어 회전하고 있는 점들의 계측을 통하여 본 계측법의 타당성을 확인한 후 이를 교반탱크내의 유동장 계측에 적용하여 탱크내의 속도 및 압력분포추정을 하고 계측시스템에 있어서의 오차해석을 통하여 본 계측시스템의 유효성 및 타당성을 검토한다.

2. 3차원 입자영상유속계(3-D Particle Imaging Velocimetry)

2.1 3차원속도 계측원리

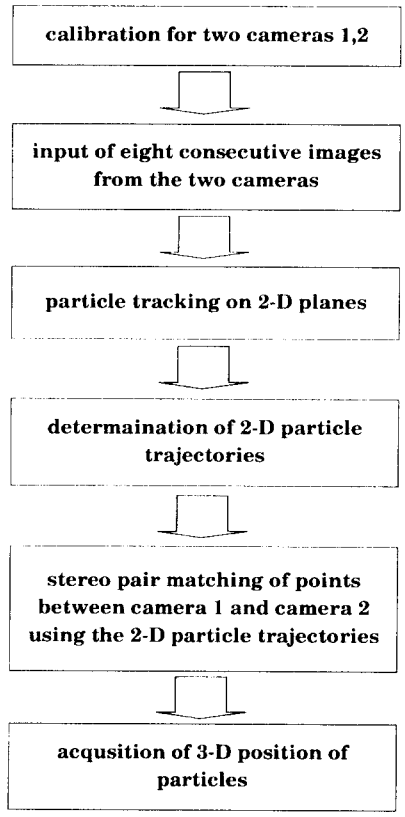


Fig. 1 Procedure of 3-D measurement system.

Fig. 1은 본 연구에서 구축된 3차원 속도계측 알고리듬의 흐름도를 나타낸다. 유동장의 공간의 압력분포는 계측된 3차원 속도데이터를 이용하여 6장에서 후술하는 방법으로 얻어내어 진다. 추적입자의 3차원속도를 계측하기 위해서는 2대의 카메라의 지상좌표계에 대한 위치교정작업이 필요하다. 즉, 지상좌표계에 대한 각각의 카메라의 3차원 위치 및 자세를 구하여야 한다. 교정작업에 기준이 되는 절대 지상좌표계는 기지의 3차원 기준점을 이용한다. 프로펠러로 교반된 유동장의 계측을 실시하기 전에 먼저 이 기준점을 유동장의 계측영역에 설치를 하여 2대의 카메라에 대한 교정작업을 실시한다. 다음에 이 기준점을 제거한 후 형성된 유동장내의 추적입자들의 3차원 속도를 구하기 위하여 설치된 두 대의 카메라를 통하여 연속된 4장의 이미지를 이미지그래버에 받아들인다. 이들 4장의 프레임이미지를 8장의 피일드이미지로 분리시킨 후 이들에 대하여 이미지상에 나타난 입자들의 중심을 구하여 8시각추적법[5]을 적용시킴으로써 2대의 카메라에 대한 2차원 경로들을 결정한다. 그 다음 각 카메라에 대해 결정된 2차원 경로들에 대하여 스테레오매칭법을 이용하여 동일한 경로를 결정한다. 이들 각 카메라에 대한 2차원경로의 사진좌표와 후술하는 카메라 교정작업에서 구한 카메라의 3차원위치 및 자세를 이용하여 추적입자들에 대한 3차원속도를 구한다.

2.2 카메라 교정과 3차원 위치결정 원리

Fig. 2는 절대좌표계(X, Y, Z)와 카메라좌표계($\underline{X}$, $\underline{Y}$, $\underline{Z}$) 및 사진좌표계(x, y)의 관계를 나타낸다. 그림에 나타낸 바와 같이 추적입자 P는 카메라좌표계에서는 p1, p2점에 해당된다. 투영중심, 사진상 및 지상의 추적입자가 일직선상에 있다는 공선(共線)조건으로부터 다음 식 (1)이 성립된다.

$$x = -c\frac{a_{11}(X-X_0)+a_{12}(Y-Y_0)+a_{13}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0)+a_{32}(Y-Y_0)+a_{33}(Z-Z_0)}+\triangle x$$

$$y = -c\frac{a_{21}(X-X_0)+a_{22}(Y-Y_0)+a_{23}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0)+a_{32}(Y-Y_0)+a_{33}(Z-Z_0)}+\triangle y \quad (1)$$

$$a_{11}=\cos\phi\cos\kappa,\ a_{12}=-\cos\phi\sin\kappa$$

$$a_{13}=\sin\phi$$

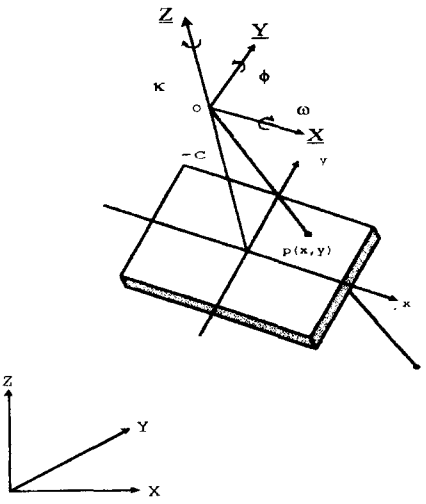


Fig. 2 Photogrammetric coordinate system.

$$a_{21}=\cos\omega\sin\kappa+\cos\omega\sin\phi\cos\kappa$$
$$a_{22}=\cos\omega\cos\kappa-\sin\omega\sin\phi\sin\kappa$$
$$a_{23}=-\sin\omega\cos\phi$$
$$a_{31}=\sin\omega\sin\kappa-\cos\omega\sin\phi\cos\kappa \quad (2)$$
$$a_{32}=\sin\omega\cos\kappa+\cos\omega\sin\phi\sin\kappa$$
$$a_{33}=\cos\omega\cos\phi$$

$$\triangle x=x_0-\bar{x}(k_1r^2+k_2r^4),$$
$$\triangle y=y_0+\bar{y}(k_1r^2+k_2r^4)$$

$$r^2=(x^2+y^2)/c^2$$
$$\bar{x}=x-x_0, \quad (3)$$
$$\bar{y}=y-y_0$$

이때, 회전행렬 a_{ij} 는 식 (2)와 같으며 카메라렌즈의 왜곡에 의한 수정량 Δx, Δy 는 식 (3)과 같다. 여기서, (X, Y, Z)는 대상물 P의 절대좌표, (X_0 , Y_0 , Z_0) 는 투영중심의 절대좌표, c는 화면거리, (x, y)는 대응하는 사진상의 사진좌표이며 (x_0 , y_0)는 카메라 주점위치의 이동량을 나타낸다.

추적입자의 3차원위치 P(X, Y, Z)를 계산하기 위하여 카메라의 3차원위치 및 자세를 전술한 사진측량법에 의해 구해야 하는데 여기서는 알고 있는 기준점의 3차원의 절대좌표와 이에 대한 사진좌표를 이용하여 식(1), (2), (3)에 대한 최소자승법과 집목한 축차근사해법[9]으로부터 카메라의 외부

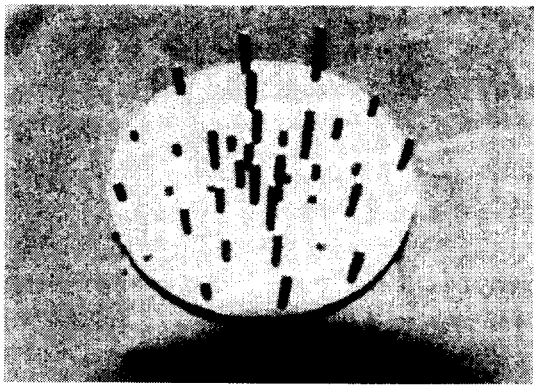


Fig. 3 Basic landmarks for the rotating plate.

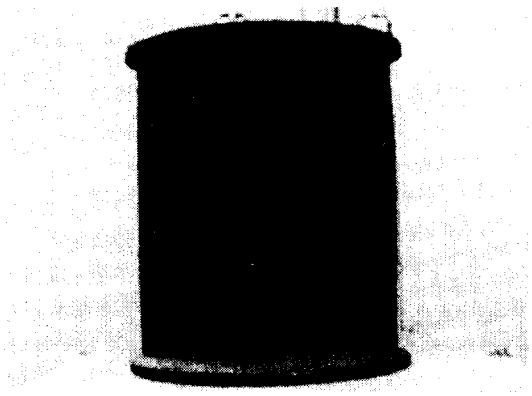


Fig. 4 Basic landmarks for the mixing tank.

파라메타(X_0, Y_0, Z_0, ω, ϕ, κ)와 내부파라메타 (c, x_0, y_0, k_1, k_2)를 구하였다.

본 연구에서는 교정을 위하여 Fig. 3, Fig. 4와 같이 3차원좌표 값이 이미 알려져 있는 36개의 기준점과 42개의 기준점을 이용한다. Fig. 3은 3차원 계측시스템의 검정을 위하여 사용되며 이들 점은 일정속도로 회전을 하게된다. Fig. 4는 교반탱크내의 유동장을 계측하기 위하여 사용된 카메라 교정용 기준점을 나타내는데 탱크내의 한 점을 기준으로 하여 측정 영역내에 직각 좌표계로 225[mm] x 225[mm] x 250[mm]의 범위 내에서 3차원적으로 배치되어 있다. 추적입자의 3차원 위치결정은 스테레오사진법[10]에 의해 구한다. 카메라의 교정작업은 절대좌표계(지상좌표계)에서 측정영역내에 3차원적으로 배치되어 있는 이들의 기준점을 추적입자로 가정하여 실시한다.

2.3 추적입자의 3차원 속도계측

2대의 카메라에 대한 교정작업이 끝나면 추적입자의 시간 연속적인 추적을 위하여 4장의 프레임화상(frame image)을 카메라를 통해 컴퓨터내장의 이미지그래버로 입력시킨다. 입력된 4장의 프레임화상은 다시 8장의 필드화상(field image)으로 보간 분리시킨다. 추적입자의 3차원속도는 추적입자의 시간별 도심좌표이동으로부터 구해진다. 추적입자의 도심좌표는 어떤 기준농도치(threshold value)로부터 화상의 농도를 이진화(binarization)한 뒤, 그 입자들의 형상에 대한 도심좌표를 계산하므로써 구해진다. 동일 입자를 추적하기 위하여 전술한 8시각추적법[8]을 도입했다. 위에서 결정된 2차원이동경로의 정보와 각 시각에서의 추적입자의 도심좌표정보와 삼각측량법의 원리를 적용하여 추적입자의 3차원궤적을 추적한다.

Fig. 5는 위치와 기울기가 서로 다른 2대의 카메라로 촬영했을 때의 관계를 나타낸다. 지상좌표계의 좌표가 (X, Y, Z) 인 표적 P를 투영중심 O_1(X_{01}, Y_{01}, Z_{01}), 3축의 기울기각도가 (ω_1, ϕ_1, κ_1)인 카메라1과 투영중심 O_2(X_{02}, Y_{02}, Z_{02}), 3축의 기울기각도가(ω_2, ϕ_2, κ_2)인 카메라2로 촬영했을 때, 입력된 상은 투영중심으로부터 화면거리만큼 떨어진 평면상에 투영된 것과 같다. 전 절에서와 같이 카메라의 파라메타가 구해지면, 투영중심, 사진상, 피사체간의 공선조건식이 결정되므로 이것을 이용하여 피사체의 3차원좌표를 다음과 같이 결정한다.

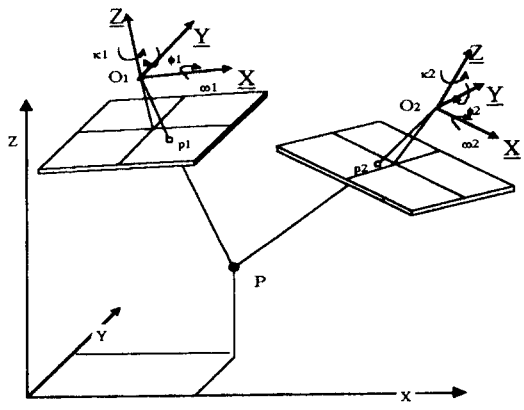


Fig. 5 Principle of 3 - D photogrammetry

서로 다른 위치로부터 한 조의 입체사진을 촬영해서 각각 독립으로 카메라의 교정작업을 실행한다. 식 (1)을 변형하면 대응하는 한 조의 사진좌표계(x, y)로부터 절대좌표계 (X, Y, Z)로의 변환은 식(4)와 같이 된다. 대응하는 사진좌표 $p_1(x_1, y_1)$, $p_2(x_2, y_2)$를 식(4)에 의해 사진좌표계로부터 절대좌표계로 변환한 후, 관측방정식을 세워서 계산하면 구해지는 3차원의 좌표는 식(5)로 표시된다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \left[\begin{pmatrix} X_{01} - X_{02} \\ Y_{01} - Y_{02} \\ Z_{01} - Z_{02} \end{pmatrix} + t_1 \begin{pmatrix} Xp_1 - X_{01} \\ Yp_1 - Y_{01} \\ Zp_1 - Z_{01} \end{pmatrix} + t_2 \begin{pmatrix} Xp_2 - X_{02} \\ Yp_2 - Y_{02} \\ Zp_2 - Z_{02} \end{pmatrix} \right] \tag{5}$$

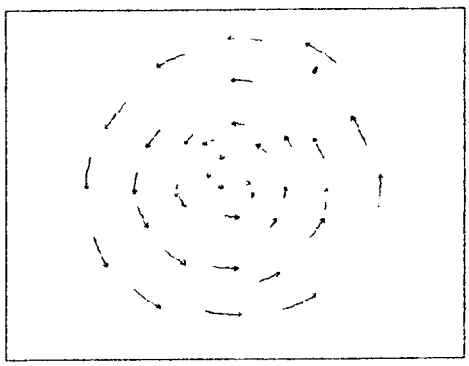
이때 $(X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi})(i=1, 2)$는 제1카메라와 제2카메라의 좌표변환후의 사진상이며, 미지변수(t_1, t_2)는 좌변과 우변의 차가 최소가 되도록 하는 최소자승법에 의하여 구한다.

3. 회전원판의 계측

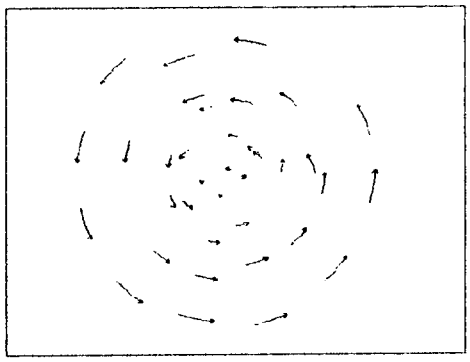
Fig. 3과 같이 원판 상에 배치되어 있는 36개의 기준점을 일정의 속도로 회전시켜 구축된 3차원 계측시스템으로 계측한 결과와 원판회전속도와 비교함으로써 계측시스템을 검정하였다. 회전원판 상에는 직경 8[mm] 인 핀이 두께 25[mm]인 회전원판 상에 수직으로 설치된다. 각 핀들은 3차원적으로 배치되어 있으며 Fig. 3의 원판의 중점을 절대좌표 (X, Y, Z)의 원점 (0, 0, 0)으로 하여 가로의 정방향을 X축방향, 세로의 정방향을 Z축방향, 원판의 수직방향을 Y축방향으로 정의하였다. 또한 핀의 식별을 쉽게 하기 위하여 핀의 말단 부에 흰색의 도료를 발랐다. 3차원계측을 하기 위해서는 2대의 카메라에 대하여 교정을 하여야하는데 이를 위해 원판이 정지되어 있는 상태에서 이들 기준점들을 2대의 CCD카메라(Sony, SSC-M370)의 이미지를 이미지그래버(Ditect, DT-64)로 불러들인다. 이미지그래버에 기록된 각각의 화상들에 대하여 어떤 기준값을 기준으로 2치화(0 or 1)를 행한 뒤 입자형태의 기준점들의 사진상에 대한 도심좌표를 구한다. 이들의 도심좌표는 각각의 카메라에 있어서의 사진좌표로 인식된다. 즉 제1카메라에서 찍은 기준점들의 사진상은 제1사진좌표, 제2카메라에서 찍은 사진상은 제2사진좌표의 데이터로서 사용된다. 이 사진좌표들과 기준점의 3차원위치의 정보를 이용하여 전술한 카메라의 교정작업을 통하여 카메라의 파라메타를 구한다. 그 다음 유동장의 유속을 3차원적으로 계측하는 것과 같은 운동을 재현하기 위하여 Fig. 3의 원판을 회전시켜서 원판 위에 3차원적으로 배치되어 있는 36개의 핀들의 속도벡터를 계측하는 실험을 하였다. 카메라의 파라메타를 구할 때와 같은 실험조건하에서 원판의 회전속도를 20[rpm]과 45[rpm]만큼 회전시켜 각각 3차원속도벡터를 계측하였다.

먼저 각 rpm으로 회전하고 있는 원판의 이미지를 2대의 CCD카메라로 4장 연속적으로 이미지보오드에 기록한다. 기록작업이 끝나면 각각의 카메라에 대하여 4 frame씩 불러 들여 8장의 field보간의 화상으로 만든다. 이렇게 만들어진 8장의 이미지에 대해 2치화를 실행하여 2치화 입자화상에 대한 입자들의 도심좌표를 구한다. 이들 8시각분에 대한 36개의 입자상에 대한 도심좌표들에 대하여 8시각추적법[8]을 이용하여 각 카메라에 있어서의 2차원 경로를 찾는다. 이들 경로로부터 동일한 2차원 경로의 조를 결정함으로써 3차원 경로를 결정한다. 2차원의 경로를 찾는 방법은 Kobayashi 등[2]의 방법인 어느 한 입자에 대하여 이동경로가 복수로 여겨질 수 있는 경우에는 각 시각간의 이동거리의 분산이 최소인 경로를 선택하는 방법을 도입하였다.

Fig. 6은 원판의 회전수가 20[rpm]일 때 각 카메라에 대해 2차원추적한 결과를 나타낸다. 이의 결과를 토대로 3차원경로 즉 3차원속도벡터를 구하게 된다. 추적입자의 3차원속도는 추적입자의 좌표이동거리에 영상기록 시간간격을 나눔으로서 구해진다. 이때 3차원의 경로쌍을 결정함에 있어서 스테레오매칭법[8]을 도입하였다. 스테레오매칭 작업이 끝난 후 각 카메라의 이미지에 대하여 대



(camera 1)



(camera 2)

Fig. 6 Measured 2 - D trajectory.

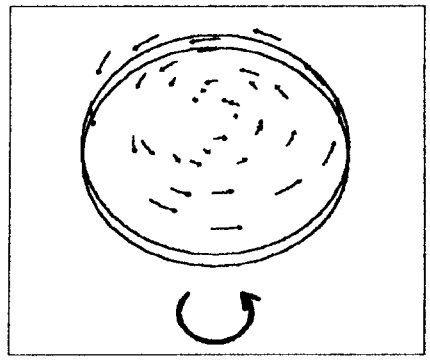


Fig. 7 Measured 3 - D velocity vectors. (20rpm)

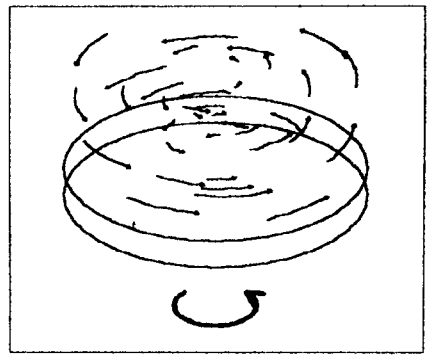


Fig. 8 Measured 3 - D velocity vectors. (45rpm)

응이 되는 입자들의 사진좌표를 이용하여 3차원 위치를 계산하였다. 또한 앞에서 구한 2차원의 경로정보는 3차원의 대응작업을 간소화하기 위하여 이용된다.

Fig. 7은 회전원판이 20[rpm]일 때 원판 위에 3차원적으로 설치되어 있는 핀들의 속도추적결과를 나타내며 Fig. 8은 회전원판이 45[rpm]일 때 핀들의 3차원 속도추적결과를 나타낸다. 이들 그림으로부터 3차원의 속도벡터가 재현되고 있음을 알 수가 있다. 동일 회전수로 회전시켰을 때의 속도와 각 반경에 설치된 핀들에 대한 3차원속도 계측결과속도와의 절대치 최대 차이가 0.5rpm 정도였으며 이는 입자들을 제대로 추적하였음을 의미한다. 다시말하면 본 계측시스템이 3차원 속도계측에 유효함을 알 수가 있다.

4. 교반탱크내 유동장의 3차원 속도계측

Fig. 9는 교반탱크내 유동장의 3차원 계측을 위한 실험장치의 사진을 나타내며 Fig. 10은 전 절에서 구축한 3차원 계측시스템을 구성한 개략도이다. 실험의 순서는 다음과 같다.

직경이 300[mm]이며 높이가 460[mm]인 아크릴제의 원통형 교반탱크내에 430[mm] 선까지 20[℃]의 물을 채운 후 두 대의 카메라에 대한 교정을 하기 위하여 Fig. 4에 나타나 있는 42개의 기준점들을 물이 채워진 교반탱크내의 중심선상의 한 점을 기준으로 설치한 후 카메라의 파라메터를 구한다. 이때 용기의 매질로 인한 굴절의 영향은 식(3)의 카메라렌즈의 왜곡 수정량과 같은 비선형적인 양이므로 정확하게 추정하기는 어려우나 렌즈의 왜곡을 계산할 때 포함된 것으로 간주하였다.

그 다음 Fig. 11의 형상을 가진 프로펠러를 수면

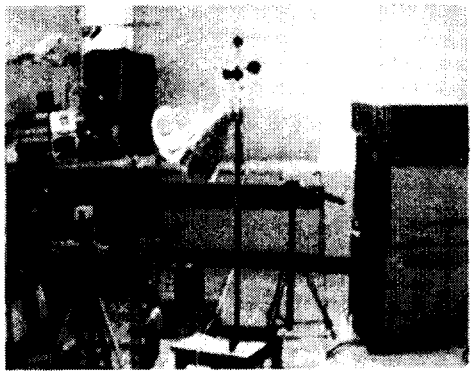


Fig. 9 Measurement system for the mixed flow.

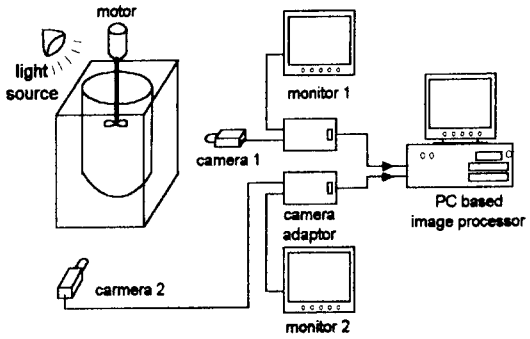


Fig. 10 Schematics of measurement system.

에서 140[mm] 아래에 설치(탱크바닥으로부터 290[mm]의 높이)하여 탱크상부에서 보았을 때 반시계방향으로 200rpm으로 회전시켜 유동장을 형성한다. 그 다음 추적입자(나일론 12, 비중 1.02, 직경 1.0mm)를 주입시켜 2대의 CCD카메라(SSC-M370)로 이미지그래버에 입력시킨다. 입력된 화상에 대해 호스트콤퓨터로 이진화 및 패턴인식의 처리를 한 후 입자들의 중심위치를 구한다. 그 다음 전술한 3차원 속도계측법에 의하여 3차원 속도를 구했다. 측정영역은 탱크바닥으로부터 157mm 의 높이 위치를 기준으로 하여 상부 210mm 까지 계측하였다. 이때 광원은 수은등(250W)을 이용하였다.

Fig. 12는 Fig. 6에서 설명되었던 바와 같이 각 카메라에 대한 추적입자들의 속도벡터를 7/60초 동안에 움직인 2차원 유적을 나타내고 있다. 이들 유적들의 입자중심좌표를 이용하여 3차원 좌표

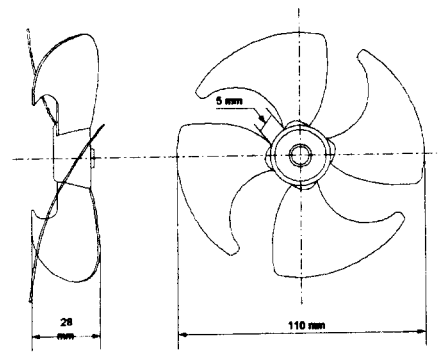
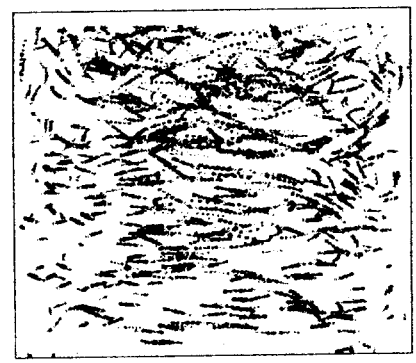


Fig. 11 Used propeller.



(camera 1)

(camera 2)

Fig. 12 2-D trajectory for eight consecutive image frames.

및 속도벡터가 구해진다. Fig. 13은 구축된 계측시스템으로 100회 정도 계측하여 얻어낸 약 20,000개의 3차원 속도벡터를 나타낸다. 한번의 실험으로 150개에서 200개정도의 속도벡터를 얻어 낼

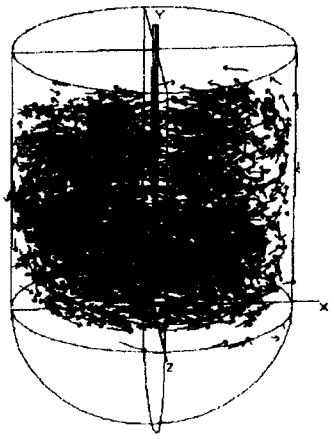


Fig. 13 Measured 3 - D velocity vectors.

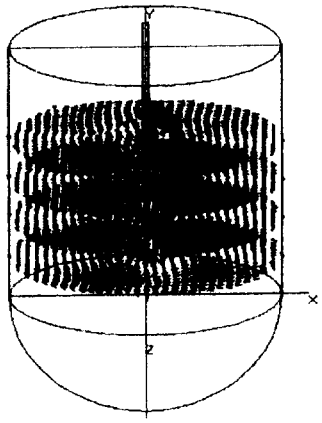


Fig. 14 Interpolated 3 - D velocity vectors in a tank

수 있다.

수많은 3차원 벡터들이 겹쳐져 있어서 유동의 대규모 구조를 이해하기란 쉽지가 않다. 유동장의 구조를 파악하기 위하여 가중함수법을[11] 도입하여 균일한 3차원 격자상에서 보간을 하였다.

Fig. 14는 탱크의 중심바닥면으로부터 200mm, 250mm, 300mm 및 350mm에 있어서의 보간 결과를 실제 교반탱크상에 나타낸 그림이다. Fig. 15, Fig. 16, Fig. 17 및 Fig. 18는 Fig. 14를 원통형좌표계(RθZ)로 변환한 각 단면에 있어서의 3차원 속도벡터를 각각 나타낸다. 변환하기 전의 직각좌표계 X, Y, Z 는 Fig. 14와 같다. 그림상의 화살표의 길이는 10 cm/sec의 속도를 나타낸다. 이들 그림들로부터 알 수 있는 것은 유동장이 정상상태에 도달되었을 때 프로펠러와 같은 방향으로 유동장이 전체적으로 회전을 하고 있음을 알 수

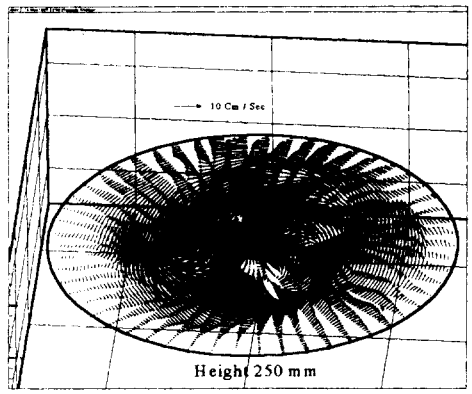


Fig. 16 3 - D velocity vectors(Z= 250 mm).

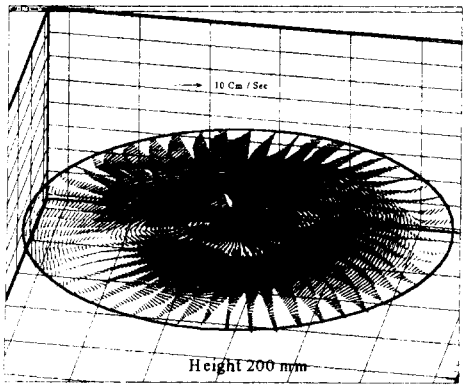


Fig. 15 3 - D velocity vectors(Z= 200 mm).

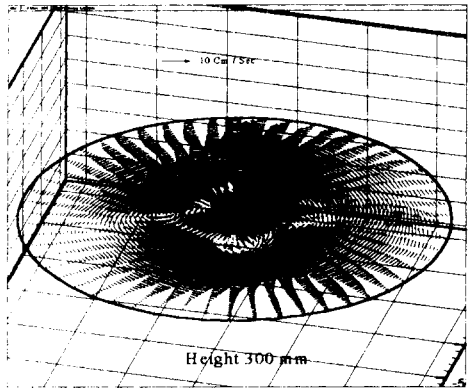


Fig. 17 3 - D velocity vectors(Z= 300 mm).

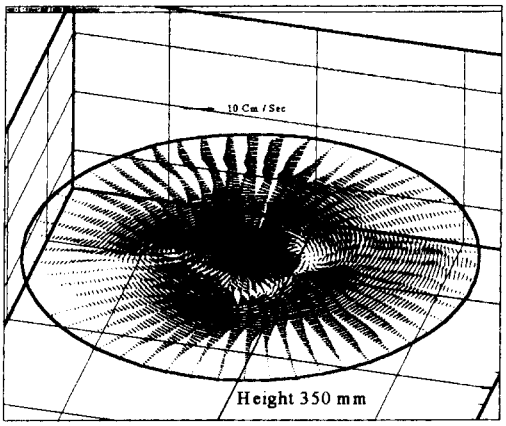


Fig. 18 3 - D velocity vectors(Z= 350 mm).

있으며 각 단면에 있어서의 유동의 구조가 각각 다름을 알 수가 있다. 또한 프로펠러가 회전하고 있는 주위에는 유동의 조직적인 구조가 주기적으로 4군데 나타나 있음을 알 수가 있다. 이는 다른 계측방법으로 계측할 수 없는 단점을 극복하고 있음을 시사한다.

Fig. 19는 탱크의 중심선을 통과하면서 평행인 임의의 단면상에서의 속도분포를 나타낸다. 이는 탱크바닥으로부터 157mm의 위치를 기준면으로 하여 210mm까지(탱크바닥에서 367mm의 높이)의 3차원 속도 계측결과를 나타내고 있다. 프로펠러(직사각형 표시부)의 위치로부터 약 65mm 아래면을 기준으로 상하에 4개의 대칭와류가 발생

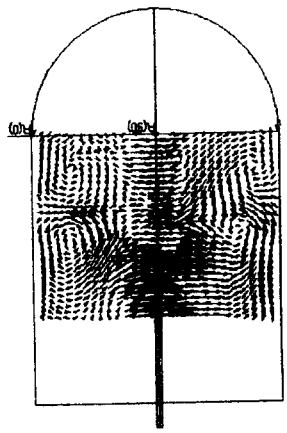


Fig. 19 3 - D interpolated velocity vectors (R - Z plane).

하고 있으나 완전 대칭이 아님을 알 수가 있다.

이는 프로펠러가 회전할 때에 약간의 회전축이 흔들렸기 때문으로 판단된다. 이들로부터 본 연구에서 구축한 계측시스템으로 계측한결과 교반탱크내의 유동장의 수평단면과 수직단면의 특징적인 3차원 속도벡터를 충분히 재현하고 있음을 알 수 있다.

5. 오차해석

오차해석의 표기법은 ANSI/ASME[12]에 의한다. 3차원 속도의 계측에 있어서의 오차의 요소로서는 입자의 3차원위치를 계산할 때의 오차, 입자의 추종성에 기인한 오차, 이동거리의 오차, 계측시간간격의 오차로 나누어 질 수 있다.

입자의 3차원위치를 계산할 때의 오차의 원인으로서는 카메라파라메타의 설정오차, 사진좌표 측정시의 오차, 측면의 아크릴 판에 의해 생기는 굴절의 영향 등이 생각될 수 있으나 이들 오차가 구해지더라도 입자의 3차원위치와 이들 오차원인과의 사이에는 단순한 함수관계가 성립하지 않으므로 오차전파의 식으로부터 오차를 검정하기란 쉽지 않다. 따라서, 미리 계측되어 있는 Fig. 4의 기준점의 절대좌표와 이 절대좌표로부터 구한 카메라파라메타를 사용해서 재차 계산한 기준점의 위치를 비교하는 것으로 오차를 구하는 것으로 3차원 위치계산에서의 오차로 하였다. Table 1은 그들의 값에 대한 비교를 나타낸다. 기준점 42개의 점에 대한 값을 비교함에 있어서 KjnX, KjnY 및 KjnZ는 기준점의 절대좌표를 의미하며 CalcX, CalcY, 및 CalcZ는 구축된 시스템으로 계측한 결과를 의미한다. 계측치를 참값으로 했을 때의 표준편차 σ_x, σ_y, σ_z는 각각 0.38mm, 0.28mm, 0.45mm 였다. 이들의 오차는 우연오차(random error)로 볼 수 있으므로 X, Y, Z좌표에 대한 위치계측의 불확실성(measurement uncertainty)은 다음 식 (6)으로 된다.

$$\begin{aligned} &\text{X방향 } S_{1X}=\sigma_x=0.38 \text{ mm} \\ &\text{Y방향 } S_{1Y}=\sigma_y=0.28 \text{ mm} \\ &\text{Z방향 } S_{1Z}=\sigma_z=0.45 \text{ mm} \end{aligned} \tag{6}$$

Table 1 Measurement results for the basic landmarks.

NO	CalcX	KjnX	CalcY	KjnY	CalcZ	KjnZ	dx	dy	dz
1	89.74	90.00	222.07	221.40	45.00	45.00	0.26	0.67	0.00
2	89.02	90.00	214.12	213.89	0.17	0.00	0.98	0.24	0.17
3	44.56	45.00	212.45	212.24	44.52	45.00	0.44	0.21	0.48
4	44.82	45.00	211.30	210.70	88.47	90.00	0.18	0.60	1.53
5	44.71	45.00	213.51	212.93	89.08	90.00	0.29	0.58	0.92
6	89.18	90.00	202.92	202.94	0.40	0.00	0.82	0.02	0.40
7	0.31	0.00	201.47	201.27	44.41	45.00	0.31	0.20	0.59
8	44.38	45.00	195.46	195.18	89.26	90.00	0.62	0.28	0.74
9	44.60	45.00	190.97	190.86	0.03	0.00	0.40	0.11	0.03
10	89.37	90.00	183.35	183.44	44.87	45.00	0.63	0.09	0.13
11	89.22	90.00	182.62	182.65	44.30	45.00	0.78	0.03	0.70
12	0.16	0.00	174.41	174.32	45.00	45.00	0.16	0.09	0.00
13	44.54	45.00	167.01	166.88	0.17	0.00	0.46	0.13	0.17
14	0.08	0.00	161.85	161.88	89.21	90.00	0.08	0.03	0.79
15	44.59	45.00	163.79	163.62	89.32	90.00	0.41	0.17	0.68
16	44.82	45.00	155.02	154.79	45.06	45.00	0.18	0.23	0.06
17	44.50	45.00	148.39	148.46	44.43	45.00	0.50	0.07	0.57
18	0.14	0.00	138.82	138.64	0.09	0.00	0.14	0.18	0.09
19	45.00	45.00	133.43	133.25	44.94	45.00	0.00	0.18	0.06
20	45.11	45.00	121.28	121.10	44.66	45.00	0.11	0.18	0.34
21	89.96	90.00	119.75	119.67	45.23	45.00	0.04	0.08	0.23
22	44.74	45.00	111.54	111.18	0.06	0.00	0.26	0.36	0.06
23	0.17	0.00	114.16	113.75	89.65	90.00	0.17	0.41	0.35
24	0.03	0.00	99.70	99.52	45.07	45.00	0.03	0.18	0.07
25	89.93	90.00	90.83	90.67	45.18	45.00	0.07	0.16	0.18
26	44.86	45.00	89.38	88.97	0.06	0.00	0.14	0.41	0.06
27	45.10	45.00	84.96	84.50	45.48	45.00	0.10	0.46	0.48
28	89.54	90.00	79.28	78.94	0.19	0.00	0.46	0.34	0.19
29	0.05	0.00	62.83	62.89	89.86	90.00	0.05	0.06	0.14
30	89.86	90.00	49.59	49.60	45.25	45.00	0.14	0.01	0.25
31	45.20	45.00	58.14	57.89	45.35	45.00	0.20	0.25	0.35
32	45.17	45.00	34.35	34.67	44.99	45.00	0.17	0.32	0.01
33	45.21	45.00	52.50	52.34	90.11	90.00	0.21	0.16	0.11
34	44.95	45.00	26.50	26.71	90.59	90.00	0.05	0.21	0.59
35	0.16	0.00	45.22	45.18	45.19	45.00	0.16	0.04	0.19
36	44.93	45.00	47.31	47.00	90.34	90.00	0.07	0.31	0.34
37	90.56	90.00	33.64	33.51	0.20	0.00	0.56	0.13	0.20
38	45.15	45.00	8.25	8.69	89.85	90.00	0.15	0.44	0.15
39	0.17	0.00	31.37	31.27	90.41	90.00	0.17	0.10	0.41
40	0.15	0.00	4.83	5.18	0.11	0.00	0.15	0.35	0.11
41	90.70	90.00	7.83	8.01	45.48	45.00	0.70	0.18	0.48
42	90.40	90.00	0.35	0.00	45.22	45.00	0.40	0.35	0.22
						average :	0.29	0.23	0.32
						deviation :	0.38	0.28	0.45

입자의 추종성에 기인한 오차의 요소로서는 입자의 유체와의 비중차에 따른 상승 및 침강속도의 오차, 원심력의 작용에 따른 오차, 진동장에 있어서의 입자의 추종성오차 등을 들 수 있다. 입자의 유체와의 비중차에 따른 상승 및 침강속도의 오차는 문헌(13)에 의하면 입자의 상승 및 침강속도는 입자의 형이 직경 d인 구형이라고 가정하면 다음 식으로 주어진다.

$$10^{-1} < Re_p = \frac{du_s}{\nu_f} < 2 \quad \text{일때}$$

$$u_s = \frac{1}{18}\left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1\right) g \frac{d^2}{\nu_f} \tag{7}$$

$2 < Re_p < 500$ 일때

$$u_s = \left(\frac{4}{225}\left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1\right)^2 g^2 \frac{1}{\nu_f}\right)^{1/3} d \tag{8}$$

$500 < Re_p < 10^5$ 일때

$$u_s = \left\{3.03\left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1\right) g\, d\right\}^{1/2} \tag{9}$$

여기서 ρ_p는 입자의 밀도, ρ_f는 물의 밀도, d는 입자직경, ν_f는 상온의 물의 동점성계수, 입자의 비중이 1.02이므로 (7)식에 대입하면 u_s=11.9mm /sec이고 이때 Re_p=11.8이므로 계산된 Re_p는 식 (7)의 범위가 아니므로 식 (8)에 대입해서 계산하면 u_s=9.4mm/sec이고 Re_p=9.3이며 Re_p는 식 (7)의 범위에 있음으로 입자의 침강속도 u_s는 9.4mm 이다. 입자의 침강속도를 구할 때의 시간간격은 1/20sec 이므로 이 시간동안에 이동거리는 0.47mm이다. 이 오차는 편향오차(biased error) 이므로 B_{1Y}=0.47mm이다. 그리고 추적입자의 원심력에의한 영향은 거의 없는 것으로 하였다[13]. 이상에서 X, Y, Z방향의 이동거리의 불확실성 U_{RSSX}, U_{RSSY}, U_{RSSZ}[12]는 다음 식 (10)과 같이 된다. 한편 입자의 추종성에 의한 오차는 입자의 직경과 비중에 관계가 있는데 본 연구에서는 사용한 입자(비중이 1.02, 직경이 1.0mm)에 의한 영향이 다른 영향요소보다 적음을 참고문헌 (10)에서는 언급을 하고 있다. 이에 본 연구에서는 무시하기로 한다.

$$\begin{aligned} U_{RSSX} &= 1.96 \cdot S_{1X} &&= 0.74\,[\mathrm{mm}] \\ U_{RSSY} &= [\, B^2 + (1.96 \cdot S_{1Y})^2 \,]^{1/2} &&= 0.72\,[\mathrm{mm}] \\ U_{RSSZ} &= 1.96 \cdot S_{1Z} &&= 0.88\,[\mathrm{mm}] \end{aligned} \tag{10}$$

이동거리의 불확실성을 URSSL이라면 URSSL은 다음 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} U_{RSSL} &= [\, U_{RSSX}^2 + U_{RSSY}^2 + U_{RSSZ}^2 \,]^{1/2} \\ &= 1.36\,[\mathrm{mm}] \end{aligned} \tag{11}$$

따라서 속도크기의 오차는 교반탱크내의 유속이 빠른 부분과 느린 부분이 상대적으로 다르며 본 실험에서 계측된 최고유속의 크기가 500mm(1/20sec동안)정도이며 최저유속의 크기가 100mm정도였기 때문에 이들로부터 속도계측의 상대오차는 수% 이내임을 알 수 있다.

교정작업에 쓰여졌던 기준점자체에 대한 제작상의 정밀도가 많이 떨어져 있었기 때문에 실제 측정자체에 대한 계측의 불확실성이 증가하였음을 알 수가 있으며 기준점의 제작정도 및 조립정도를 더욱 정교히 하면 불확실성은 보다 적게 평가 될 수 있다. 또한 Z축의 위치측정에 대한 불확실성이 큰 것은 카메라의 시선각이 Z축과 평행한 까닭이며 이는 카메라의 배치조정에 의하여 줄어질 수 있는 량이다.

6. 3차원 압력분포

$$\Delta^2 p = S \tag{12}$$

$$\begin{aligned} S = 2\rho\Big\{&\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial t}{\partial y}\right) - \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) - \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) \\ &- \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right) - \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)\Big\} \end{aligned} \tag{13}$$

구축된 계측시스템으로부터 얻어낸 공간의 속도분포로부터 압력분포를 얻고자 하는 탱크내의 수평 단면상의 속도벡터를 추출하여 압력분포를 계산할 수 있다. 정상 비압축성흐름을 기술하는 기초방정식은 연속의 식과 Navier - Stokes방정식에서 유동장이 정상적일때의 계측한 속도벡터로부터 압력을 계산하기 위한 ($\zeta - \phi$)계의 압력에 관한 프와송방정식은 식 (12) 및 식 (13)으로 표시된다.

계측으로부터 얻어진 속도값으로부터 프와송방정식을 44 x 44 x 30 격자상에 반복계산에 의하여 압력값을 얻어내었다. 또한 탱크벽면의 압력을 구함에 있어서 벽면에서의 속도 값은 계측으로부터 얻을 수가 없으므로 경계조건은 원칙적으로 부착조건(no - slip)을 적용한 후 프와송방정식을 풀 때 벽면의 가상격자에서의 압력 값은 구배가 없음을 적용하였다. Fig. 20, Fig. 21, Fig. 22, 및 Fig. 23은 전술한 탱크의 바닥면으로부터 200mm, 250mm, 300mm, 350mm의 높이에 있는 단면상

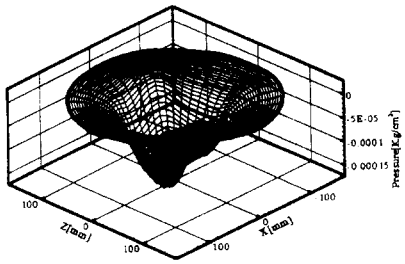


Fig. 20 Pressure distribution(Y=200mm)

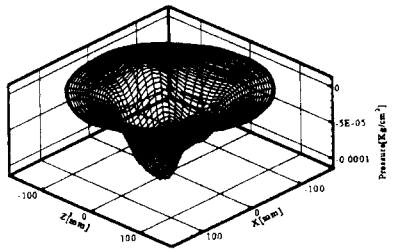


Fig. 21 Pressure distribution(Y=250mm)

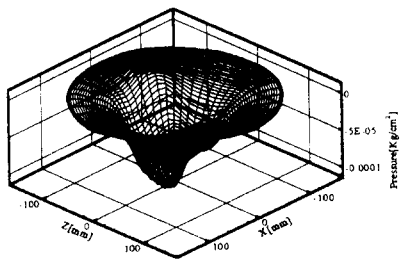


Fig. 22 Pressure distribution(Y=300mm)

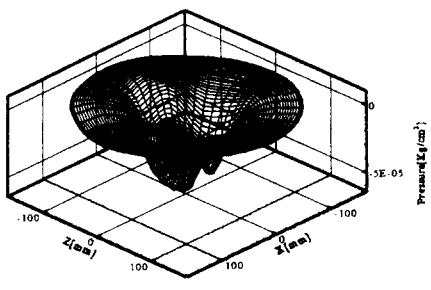


Fig. 23 Pressure distribution(Y=350mm)

의 압력값을 원통형단면으로 변환시켰을 때의 압력분포를 나타낸다. 각 단면에 있어서 탱크중심부의 압력이 벽면 쪽의 압력보다 낮으며 또한 아래부분으로 갈수록 단면의 중심부의 절대치의 값이 음의 방향으로 작아지는 것은 프로펠러의 회전에 의한 원심력의 작용으로 부압이 걸리기 때문이다. 이는 실험과정에서 탱크중심부에 오목한 와가 발생하는 것을 눈으로 확인할 수 있는 점으로부터 압력 값의 분포가 타당한 결과임을 알 수 있다. 또한 탱크의 상부단면일수록 단면상에 있어서의 압력의 분포가 고르지 못함을 알 수 있다.

Fig. 24 및 Fig. 25는 Fig. 19의 단면상에서의 벽면압력을 표시한 그림이다. Fig. 24는 좌측벽면에 대한 압력분포를 Fig. 25는 우측벽면에 대한 압력분포를 나타낸다. 그림에서 가로축은 탱크바닥으로부터 높이를 의미한다. 프로펠러는 탱크바닥으로부터 235mm의 높이 프로펠러가 있는 단면의

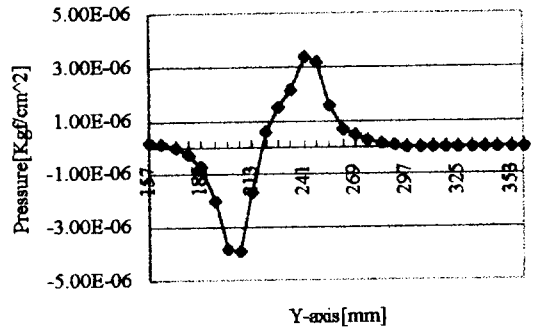


Fig. 24 Pressure distribution.(left wall of tank, X=-150mm)

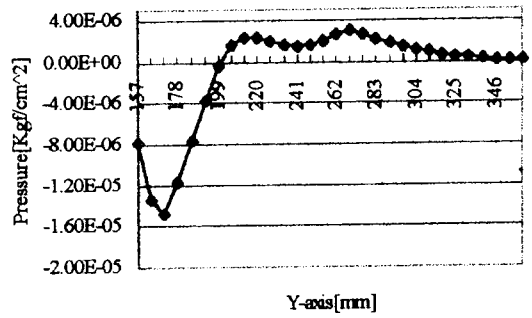


Fig. 25 Pressure distribution.(right wall of tank, X=150mm)

하부의 단면을 전후로 하여 벽면압력이 양과 음으로 변동하고 있음을 알 수 있으며 탱크가 대칭일지라 할지라도 벽면의 압력분포가 서로 상사하지 않는 것은 프로펠러의 회전이 매끄럽지 못함에 기인한 것으로 판단된다.

이로부터 본 연구에서 개발된 계측법을 이용하면 유동장의 공간 및 벽면압력분포의 추정이 가능함을 알 수 있으며 이는 지금까지의 다른 압력계측법들이 안고 있는 계측한계의 극복을 의미한다.

7. 결 론

2대의 비 측정용 CCD카메라와 디지털 화상처리를 이용하여 유동장의 공간압력분포와 벽면압력분포를 추정할 수 있는 3차원 영상유속계측시스템(3 - D PIV: 3 - D Particle Imaging Velocimetry)을 구축하는 과정에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

회전 원판 상에 3차원적으로 배치된 추적입자들을 개발된 계측시스템으로 계측한 결과와 원판 회전수를 비교함으로써 본 계측법의 3차원 계측에 타당성이 있음을 확인하였다.

본 연구에서 개발된 계측시스템에 대한 계통적 오차해석을 통하여 본 계측의 유효성을 입증하였다.

본 연구에서 구축된 계측시스템을 교반된 유동장의 계측에 적용하여 유동장의 공간압력분포 및 벽면압력분포의 추정법을 제시하여 교반탱크 내의 유동특성을 이해할 수 있었다.

본 계측법은 완전 비 접촉계측으로 측정대상물에 계측으로 인한 영향을 미치지 않으면서 유동장 전체의 3차원 속도성분을 동시에 계측할 수 있으므로 3차원 유동장의 압력 및 속도에 관련된 물리적 기구예측 및 해석에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(ME96 - B - 12)에 의하여 연구되었으므로 이에 관계자 여러분에게 사의를 표합니다.

참고문헌

1) J. P. Schon, "New techniques for flow visualization measurement of velocity and concentration", von Karman Inst. *Fluid Dyn. Lecture Series*, pp.1 - 12., 1986.

2) T. Kobayashi, T. Saga, S. Segawa, and K. Kanda, "2-次元流動場の實時間畵像計測システムの開發", 日本機械學會誌(B), Vol.55, No.509, pp.107 - 115, 1989.

3) Y.H. Lee, Y. Matsumoto, T. Kobayashi, and Saga, T., "Velocity measurement in a cavity flows by PIV", *Proc. of 2nd KSME - JSME Fluids Eng. Conference*, Vol.1, pp.293 - 298, 1990.

4) M. Kawahashi and K. Hosoi, "Dual - beam sweep laser speckle velocimetry", *Exp. in Fluid*, Vol. 8, pp.109 - 111, 1991.

5) R.J. Adrian, "Particle - imaging techniques for experimental fluid mechanics", *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp.261 - 304, 1991.

.6) Buchhave,P. 1992, "Particle image velocimetry - status and trends", *Exp. Themal and Fluid Science*, Vol.5, pp.586 - 593.

7) A. Kaga, K. Yamaguchi, Y. Inoue, and A. Kondo, "Airflow measurement using pattern tracking", *Proc. International Workshop on PIV - Fukui'* 95, pp.159 - 166, 1995.

8) D. H. Doh, T. Kobayashi, T. Saga, "A new consideration for measuring temperature and velocity ;Particle Imaging Thermometry and Velocimetry", *Proc. 3rd JSME - KSME Fluids Engineering Conference*, pp.154 - 159, 1994.

9) 東京大學出版會, "最小自乘法による實驗データ解析", 1983.

10) D. H. Doh, "A Study on three - dimensional particle imaging thermometry and velocimetry using liquid crystal", Ph.D. Thesis, The Univ. of Tokyo, 1995.

11) C. Agui, J. Jimenez, "On the performance of the particle tracking", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.185, pp.447 - 468, 1987.

12) ASME, "Measurement uncertainty for fluid flow in closed conduits", *ANSI/ASME MFC - 2M - 1983*, 1983.

13) 流れの可視化學會, "流れの可視化ハンドブック", 朝倉書店, p. 158, 1986.