

호모지니어스 좌표계를 이용한 3차원 스테레오 PIV 알고리즘의 개발

김미영† · 최장운* · 남구만** · 이영호***
(2002년 10월 9일 접수, 2003년 3월 11일 심사완료)

Development of 3-D Stereo PIV by Homogeneous Coordinate System

Mi-Young Kim, Jang-Woon Choi, Koo-Man Nam and Young-Ho Lee

Key Words: Homogeneous Coordinate System(호모지니어스 좌표계), 3-D Stereo PIV(3차원 스테레오 PIV), Camera Modeling(카메라모델링), Perspective Transform(투영변환), Error Vector(오류벡터).

Abstract

A process of 3-D particle image velocimetry, called here, as "3-D stereo PIV" was developed for the measurement of an illuminated sliced section field of 3-D complex flows. The present method includes modeling of camera by a calibrator based on the homogeneous coordinate system, transformation of the oblique-angled image to the right-angled image, identification of 2-D velocity vectors by 2-D cross-correlation equation, stereo matching of 2-D velocity vectors of two cameras, accurate calculation of 3-D velocity vectors by homogeneous coordinate system, removal of error vectors by a statistical method followed by a continuity equation criterion, and finally 3-D animation as the post processing. An experimental system was also used for the application of the proposed method. Three analog CCD cameras and an Argon-Ion Laser(300mW) for illumination were adopted to capture the wake flow behind a bluff obstacle.

———— 기호설명 ————	
D	: 발산 [-]
DM	: 발산 역치값 [-]
$P(X, Y, Z)$: 입자지상좌표[mm]
D_a, D_b	: 입자의 이미지 좌표 [pixel]
R_U, R_L, R_R	: 투영변환행렬 [-]
UV	: 계의 이미지 좌표[pixel]

uvt	: 동차좌표계 [pixel]
$X Y Z$: 지상 좌표계[mm]
x, y	: 이미지 좌표 [pixel]

1. 서론

PIV⁽¹⁾(Particle Image Velocimetry)계측은 다른 일반적인 속도 계측기법과 비교하여 많은 장점을 제공하고 있다. 현재 세계적으로 많은 연구들이 진행되고 있으며 여러 종류의 시스템들이 개발되어 속도장 측정에 널리 활용되고 있다. 그 중에서도 3차원 PIV^(2,3)는 열유체 유동의 현상을 3차원적으로 해석할 수 있는 가장 효과적인 계측법으로 주목받고 있다. 또한 유동장내의 3차원 속도 성분의 실시간 계측은 단순한 속도 성분뿐만

† 한국해양대학교 대학원 박사과정
E-mail : iitpiv@hotmail.com
TEL : (051)403-1213 FAX : (051)403-0381
* (주)아이아이터 연구원
** (주)아이아이터 연구원
*** 한국해양대학교 기계·정보공학부 교수

아니라 공학적으로 많은 유용한 정보를 제공하고 있다. 3차원 PIV는 3차원 볼륨(volume) PIV^(4,5)와 3차원 스테레오(stereo) PIV⁽⁶⁾로 나누어지는데 전자는 실험 유동장의 전체 볼륨 공간에서 3차원 속도벡터를 획득하는 방법이며 후자는 측정 부위의 한 단면에서 3차원 속도벡터를 획득하는 방법이다. 3차원 스테레오 PIV는 3차원 볼륨 PIV에 비해서 측정시스템의 설치가 용이하며, 알고리즘의 구현이 간단하여 최근 들어 개발 연구와 응용이 활발히 이루어지고 있다. 본 연구에서는 3대의 카메라를 사용한 Angular Method⁽⁷⁾의 3차원 스테레오 PIV 시스템을 구성하고, 알고리즘을 개발하였다. 본 연구에서 채택한 호모지니어스(homogeneous)⁽⁸⁾ 좌표계는 카메라의 사진좌표를 사용하지 않고 영상좌표를 사용하여 영상에 투영된 입자들의 3차원 위치를 계산하므로 기존에 사용되었던 3차원 스테레오 PIV와 비교 할 때 카메라 왜곡보정 및 표정요소등^(9,10)을 구하는 과정이 불필요하며 이에 대한 계산오차를 줄일 수 있고, 또한 영상좌표를 바로 사용하므로 실험과 알고리즘 진행과정에서의 처리시간을 단축할 수 있다. 3차원 스테레오 PIV를 적용하기 위해서 3차원 개방형 순환수조를 제작하고 입구 하단에 계단모형의 장애물을 설치하여 Vortex를 인위적으로 생성하는 가시화 실험을 행하였다. 또한 2 대의 카메라를 사용 했을 때의 속도벡터의 오류벡터의 결과와 3 대의 카메라를 사용하였을 때 속도벡터의 오류벡터의 결과를 비교 검토하였다.

2. 3차원 스테레오 PIV

2.1 알고리즘 처리순서

Fig. 1은 본 연구에서 구성된 3차원 스테레오 PIV 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 2대 이상의 카메라를 사용해서 이미지그래버를 통하여 영상을 획득하고, 얻어진 영상의 좌표점들과 카메라 검정모델의 지상좌표점들을 이용하여 카메라모델링작업을 한다. 취득된 원시영상은 카메라 각도와 위치에 따라 영상의 왜곡이 발생하므로 원시영상을 원래의 실제사물의 크기비로 보정을 행하고, 각각의 카메라에 대해 두 프레임의 연속된 영상을 가지고 상호상관에 의한 동일입자추적으로 2차원 속도벡터를 획득한다. 각각의 카메라 영상들의 2차원 속도벡터들을 이용하여 스테레오

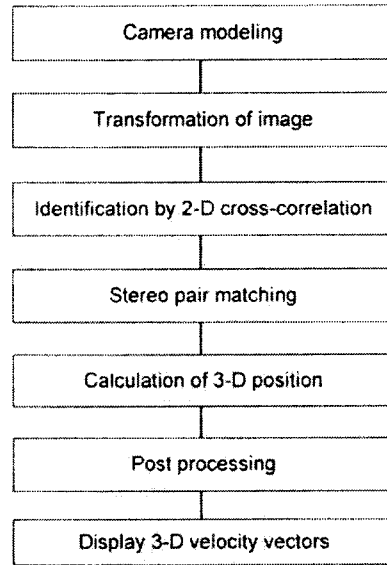


Fig. 1 Flow chart of 3-D stereo PIV

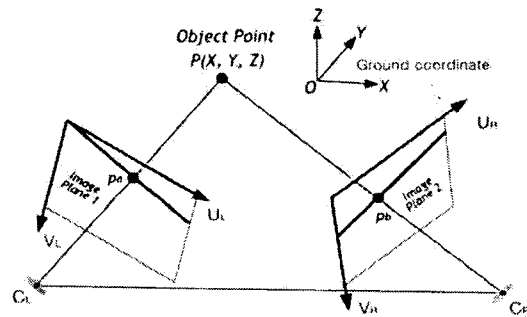


Fig. 2 Homogeneous coordinate system

정합(stereo matching)을 행하고, 최종적으로 3차원 좌표공식에 의하여 3차원 속도벡터를 구해낸다. 후처리 과정에서는 얻어진 속도벡터들의 오류벡터를 제거하고, 3차원 거리역수보간기법을 이용하여 격자점상에 재배치하여 최종속도벡터를 구한다.

2.2 카메라 모델링

3차원 공간에서 투영된 입자에 대한 카메라 모델은 카메라의 기하학적 매개변수(geometric parameter)에 의해 변환행렬로 나타낼 수 있다. 영상으로의 투영과정은 카메라의 병진이동, 회전이동, 원근운동(scaling), 투영변환(perspective transform) 등의 여러 매개변수들로 구성된다. 본 연구에서는 카메라검정모델의 지상좌표계와 영상좌표계로부터 변환행렬을 구하였다. 지상좌표 (X, Y, Z)와

영상좌표 (u, v, t) 의 관계는 식 (1)과 같다. 이는 지상좌표가 회전 및 병진 변환행렬과 투영변환행렬에 의해 영상좌표로 바뀌어지는 과정을 나타낸다.

$$(X, Y, Z, 1) \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & C_{14} \\ 0 & 1 & 0 & C_{24} \\ 0 & 0 & 0 & C_{34} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} = (u, v, 0, t) \quad (1)$$

여기서 (X, Y, Z) 는 지상좌표이며, 지상좌표에 곱해진 첫 번째 행렬은 카메라의 회전 및 병진이동을 나타내는 행렬이며, 두 번째 행렬은 투영면을 $Z=0$ 에 둔 경우의 투영변환행렬이다. 또한 (u, v, t) 는 영상면 점의 호모지니어스 좌표계이다. 카메라로부터 획득한 영상좌표계 (U, V) 와 호모지니어스 좌표계의 관계는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} U &= ut \\ V &= vt \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)의 행렬의 곱을 간단히 하면 3차원 물체를 2차원 영상으로 변환하는 식 (3)의 4×3 크기를 갖는 행렬 R_j 로 나타낼 수 있다. 이 4×3 행렬 R_j 가 찾고자 하는 카메라모델링행렬이다.

$$(X, Y, Z, 1) \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} \end{bmatrix} = (u, v, t) \quad (3)$$

앞의 식을 전개하면 식 (4)로 변환된다.

$$\begin{aligned} u &= XR_{11} + YR_{21} + ZR_{31} + R_{41} \\ v &= XR_{12} + YR_{22} + ZR_{32} + R_{42} \\ t &= XR_{13} + YR_{23} + ZR_{33} + R_{43} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 식 (2)에서 유도된 $u - U \cdot t = 0$, $v - V \cdot t = 0$ 에 대입하면 u, v, t 가 제거되므로 결국 호모지니어스 좌표계는 카메라로부터 얻은 영상면 좌표로부터 변환되며 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} XR_{11} + YR_{21} + ZR_{31} + R_{41} - U(XR_{13} + YR_{23} + ZR_{33} + R_{43}) &= 0 \\ XR_{12} + YR_{22} + ZR_{32} + R_{42} - V(XR_{13} + YR_{23} + ZR_{33} + R_{43}) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Fig. 2는 호모지니어스 좌표계를 나타낸 그림이며, 영상좌표 p_a, p_b 와 그에 대응하는 물체의 지

상좌표 $P(X, Y, Z)$ 를 알고 있다면 식 (5)로부터 R_{11} 에서 R_{43} 까지 12개의 카메라모델링행렬의 요소(element)들을 구할 수 있다. 12개의 요소들을 구하기 위해서는 12개의 방정식이 필요하나 식 (5)는 호모지니어스 행렬로부터 유도된 식이므로 R_{43} 을 임의의 수 1로 둘 수 있다. 그러면 11개의 미지수를 갖게 되므로 11개의 연립방정식이 필요하다. 최소자승법으로 11개의 연립방정식을 풀어서 최종해를 구해낸다. Fig. 3은 카메라모델링실험을 위하여 깊이 방향(카메라방향)의 이송정도가 0.01mm인 카메라검정모델을 보여준다. 이 모델은 크기가 가로100mm x 세로100mm인 얇은 금속평판이며, 여기에 10mm씩 등간격(가로9개 x 세로9개)으로 직경이 0.3mm인 원을 정도 높게 그려 넣었다. 깊이 방향으로 회전트레버싱 손잡이를 이용하여 1mm씩 9회 움직여서 투영변환식을 구하는데 사용되는 지상좌표를 얻는다. 따라서 기준점은 729개(가로9 x 세로9 x 깊이9)이다. 기준점들의 3차원 좌표값들과 영상에 투영된 2차원 좌표값들을 대상으로 앞에서 언급한 투영변환식을 풀어서 11개의 행렬값을 구해낸다.

2.3 영상의 왜곡보정

Fig. 4의 (a)와 같이 획득된 영상은 실제 측정단면의 크기를 재현함에 있어서 왜곡이 발생함으로 식 (6)의 투영변환식을 사용하여 영상좌표와 측정단면의 지상좌표 사이의 왜곡보정 변환계수를 구하여 왜곡된 원시영상을 보정한다.

$$X = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_4x + b_5y + 1}, Y = \frac{b_6x + b_7y + b_8}{b_4x + b_5y + 1} \quad (6)$$

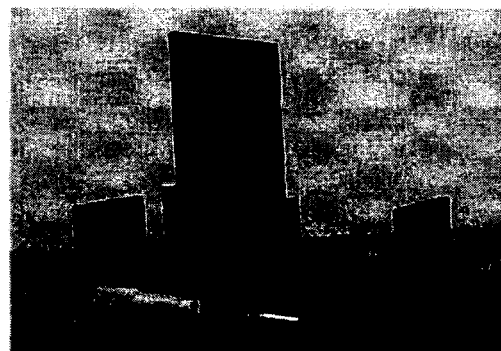


Fig. 3 Camera calibrator

여기서 $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8$ 는 변환계수이며 최소자승법⁽¹¹⁾에 의해서 구한다. x, y 는 영상좌표이고, X, Y 는 측정단면의 지상좌표이다. 변환계수를 구하기 위해서 최소 4개이상의 지상좌표와 영상의 좌표를 사용한다. N개의 영상좌표 x, y 와 그에 대응하는 지상좌표 X, Y 를 알고 있다면 식 (6)으로부터 식 (7)과 같은 관측방정식을 세울 수 있다. 식 (7)를 최소자승법에 의하여 구함으로써 변환계수들을 구한다.

$$TB = Z \quad (7)$$

여기서,

$$T = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & -x_1 X_1 & -y_1 X_1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & 1 & -x_N X_N & -y_N X_N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -x_1 Y_1 & -y_1 Y_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -x_N Y_N & -y_N Y_N & x_N & y_N & 1 \end{bmatrix}$$

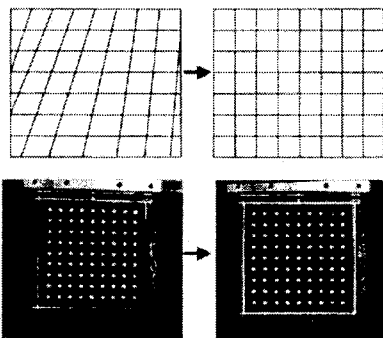
$$B = [b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_8]^T$$

$$Z = [X_1 \quad \dots \quad X_N \quad Y_1 \quad \dots \quad Y_N]^T \text{ 이다.}$$

Fig. 4의 (a)는 왜곡된 원시영상과 (b)는 투영 변환식 (7)을 사용하여 변환된 영상을 나타내고 있다.

2.4 스테레오 정합 및 3차원 좌표계산

두 대의 카메라로 촬영한 영상에 대해 카메라 모델링행렬을 알고, 3차원 좌표가 투영된 점의 동일좌표를 안다면 공간상에서 3차원 위치정보의 추출은 가능하게 된다. 3차원 스테레오 PIV의 스테레오 정합^(12~14)의 원리는 우선, 각각의 카메라에 대하여 연속된 두프레임을 가지고 상호상관식⁽¹⁾



(a) Oblique-angled image (b) Transformed image

Fig. 4 Transformation of image

을 이용하여 동일입자 추적하여 2차원 속도벡터를 구하고, 각 영상에서 얻어진 두 개의 속도벡터를 조합하여 3차원 좌표공식을 사용하여 3차원 속도벡터를 구해낸다. 호모지니어스 좌표계를 이용한 3차원 좌표공식은 식 (8)과 같다.

$$[F] * [X] = [D] \quad (8)$$

여기서,

$$[F] = \begin{bmatrix} R_{L11} - R_{L13} U_L & R_{L21} - R_{L23} U_L & R_{L31} - R_{L33} U_L \\ R_{L12} - R_{L13} U_L & R_{L22} - R_{L23} U_L & R_{L32} - R_{L33} U_L \\ R_{R11} - R_{R13} U_R & R_{R21} - R_{R23} U_R & R_{R31} - R_{R33} U_R \\ R_{R12} - R_{R13} U_R & R_{R22} - R_{R23} U_R & R_{R32} - R_{R33} U_R \end{bmatrix}$$

$$[X] = (X, Y, Z)^T$$

$$[D] = \begin{bmatrix} R_{L13} U_L - R_{L11} \\ R_{L13} V_L - R_{L12} \\ R_{R13} U_R - R_{R11} \\ R_{R13} V_R - R_{R12} \end{bmatrix} \text{ 이다.}$$

R_{L_i}, R_{R_i} 는 카메라변환행렬을 의미한다. 4개의 선형독립방정식으로 이루어진 식 (8)을 최소자승법⁽¹¹⁾에 의해 풀면 3차원 좌표 (X, Y, Z)를 구할 수 있다. 3차원 속도벡터를 구하기 위해서는 기본적으로 2대의 카메라를 사용하지만, 본 연구에서는 속도벡터의 정확도를 높이기 위해서 3대의 카메라를 사용하여 3차원 속도벡터를 구하였다. Fig. 5는 3대의 카메라를 사용한 스테레오 정합 방법을 나타낸다.

2.5 오류벡터 처리

PIV를 사용하여 얻어진 속도벡터는 부정확한 카메라검정 및 스테레오 정합, 입자의 겹침, 각각의 카메라에서 확보한 유효입자 위치의 상이 등으로 인하여 반드시 오류벡터가 발생한다. 이와 같은 속도벡터를 효과적으로 제거하기 위하여 본 연구에서는 2단계의 기법을 적용하였다. 우선, 식 (9)를 이용하여 통계적인 방법으로 오류벡터를 제

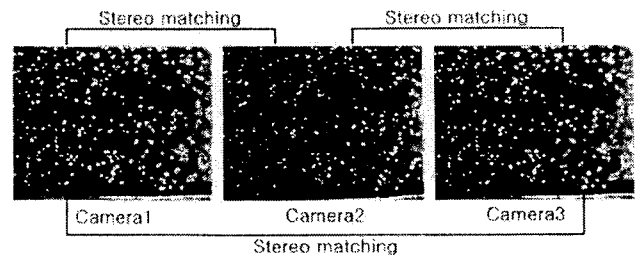


Fig. 5 Stereo matching of three cameras

거한다.

$$S = \left[\sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})^2 / (N-1) \right]^{1/2} \quad \bar{X} = \sum_{k=1}^N X_k / N \quad (9)$$

여기서, S 는 표준편차, N 은 측정계수, X_k 는 측정된 속도값이고, \bar{X} 는 참조된 주변 속도값들의 평균값이다. $\sigma = |X_k - \bar{X}|$ 를 구하여 S 와 τ 값을 곱한 값을 비교하고, $\sigma \geq \tau S$ 를 만족하는 X_k 를 오류벡터로 정하였다. 본 연구에서는 측정치의 주위 참조속도값 수 N 을 8로 하였고, τ 의 값으로는 0.7~1.2 사이의 값을 취하여 오류벡터를 검출하였다. 그러나 식 (9)의 통계적인 방법만으로는 완벽하게 오류벡터를 제거할 수는 없다. 따라서 이러한 속도벡터를 가지고 보간을 행하면 잘못된 벡터값이 주변으로 전파된다. 이를 방지하기 위하여 PIV에 의해 계산된 속도벡터 분포에 주목하여 국소적인 흐름의 연속성을 기본으로 하는 알고리즘을 확장하여 오류벡터를 정도 높게 검출할 수 있는 방법을 채택하였다. "속도벡터가 오류벡터이면 국소적인 흐름의 연속성이 파괴된다"라는 전제조건 하에서 주목하고 있는 격자점 근방 영역의 속도정보로부터 속도의 공간 변화량을 고차정도의 차분식으로 계산하고 이 값을 이용하여 오류벡터를 검출한다. 격자점 $P(i, j, k)$ 의 주변흐름에 대하여 2차정도의 편차 차분식으로 연속의 식을 근사적으로 표현한다. 전진차분과 후퇴차분을 사용하면 x,y방향의 속도의 변화량은 식 (10)으로 표현된다. 검출방법은 점 P 의 벡터를 포함함으로써 흐름의 연속성이 만족되지 않는 경우, 즉, 식 (10)의 D 값이 식 (11)의 역치 DM 을 넘을 때에는 점 P 의 속도벡터는 오류벡터로 판단한다. 식 (10)과 식 (11)은 x 방향에 대한 것만 나타내며 z방향은 편의상 생략한다.

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_f &= \frac{-3u(i, j, k) + 4u(i+1, j, k) - u(i+2, j, k)}{2\Delta x} \\ \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_b &= \frac{u(i-2, j, k) - 4u(i-1, j, k) + 3u(i, j, k)}{2\Delta x} \\ \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} &= \text{Min} \left\{ \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_f, \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_b \right\} \\ D(i, j, k) &= \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_{\min} + \left[\frac{\partial w}{\partial z} \right]_{\min} \right| \quad (10) \end{aligned}$$

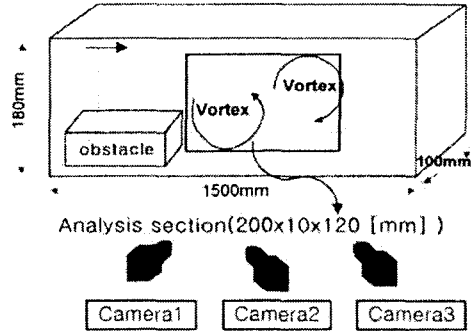


Fig. 6 Definition of measuring region

Table 1 Experiment condition

Flow	Water
Camera	SONY XC-77RR (768x493)
Camera number	3
Particle	Nylon12(110 μ m)
Illuminator	Argon-Ion Laser 300mW
Water flow size	1500Hx100Vx180D[mm]
Test section	200Hx10Vx120D[mm]

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{DM} &= \left| \frac{u(i-2, j, k) - 8u(i-1, j, k)}{12\Delta x} \right| \\ &\quad - \left| \frac{u(i+2, j, k) - 8u(i+1, j, k)}{12\Delta x} \right| \\ DM(i, j, k) &= \left\{ \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{DM} \right| + \left| \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_{DM} \right| + \left| \left[\frac{\partial w}{\partial z} \right]_{DM} \right| \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

3. 실험장치 및 방법

3차원 스테레오 PIV 알고리즘을 적용하기 위하여 Fig. 6과 같이 PIV 계측시스템을 구성하였다. 개방형 3차원 순환유동장에 계단식모형의 장애물을 설치하였다. 설치된 장애물에 의해서 인위적인 vortex를 형성시켜 측면에서 유동장을 촬영하더라도 3차원성이 충분히 존재하도록 하였다. Table 1은 실험조건을 나타낸다. 입자의 투입은 산란성이 있는 직경이 110 μ m인 나일론입자를 사용하였다. 조명(Argon-Ion Laser 300mW)은 유동장

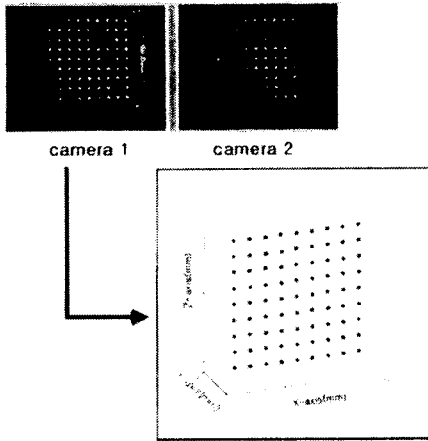


Fig. 7 3-D position of calibration image

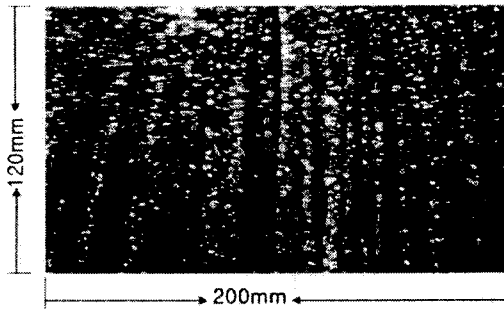


Fig. 8 Original image of camera

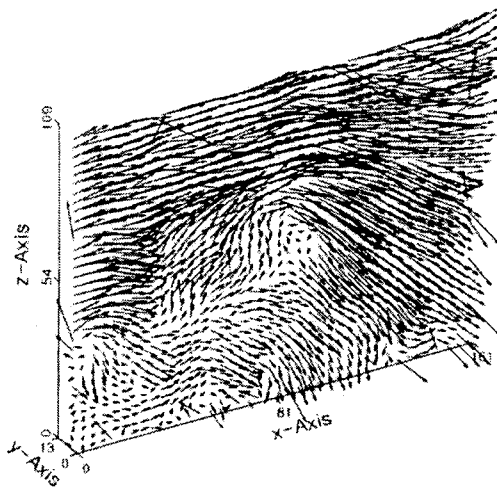


Fig. 9 Velocity Vectors using two images

전체에 대해 촬영단면에서 10mm 폭으로 투과시켰으며, 카메라 위치는 3대의 카메라가 동시에 한 측면을 바라보게 하며 3대의 카메라 사이의 각도는 임의로 조정할 수 있게 하였다.

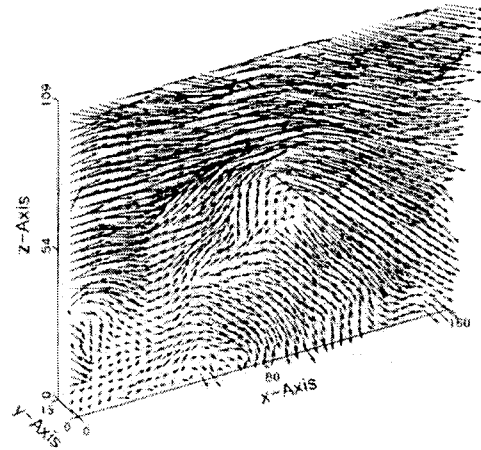


Fig. 10 Velocity Vectors using three images

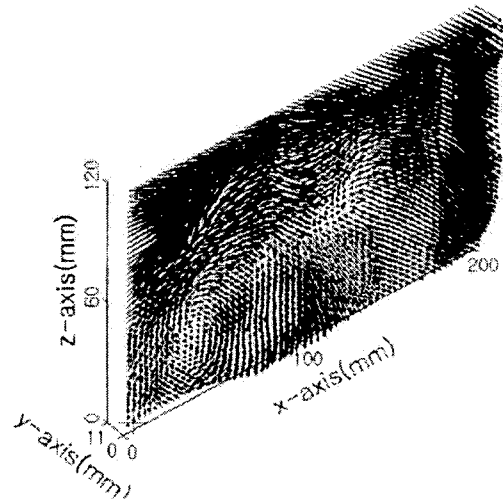


Fig. 11 Velocity vectors

4. 처리결과

카메라로 촬영한 영상들은 이미지보드를 통해 동시에 컴퓨터로 저장되며, 연속하는 두 프레임의 영상을 사용하여 3차원 스테레오 PIV 알고리즘에 적용하였다. Fig. 7은 카메라검정모델의 영상좌표점들을 사용하여 스테레오 정합과 호모지니어스 좌표계를 이용하여 획득한 3차원 데이터이다. 본격적인 실험에 앞서 카메라검정모델을 사용하여 검증함으로써 실험의 오차를 줄일 수 있다. Fig. 8은 실험유동장의 원시영상이며 Fig. 9는 2대의 카메라를 사용해서 3차원 속도벡터를

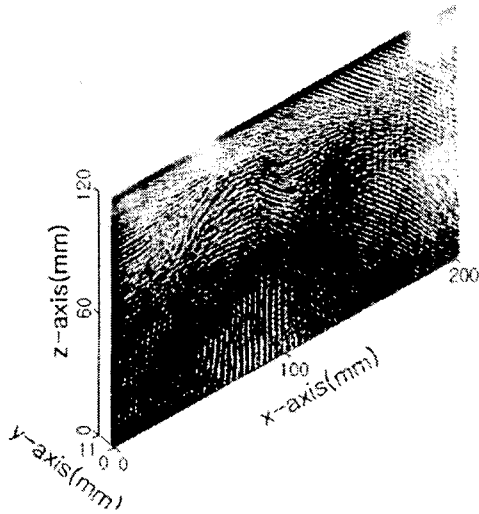


Fig. 12 Kinetic energy & velocity vectors

구한결과이며 Fig. 10은 Fig. 9와 동일한 조건에서 3대의 카메라를 사용하여 3차원 속도벡터를 구한 결과이다. 2대의 카메라를 사용하여 속도벡터를 구한 Fig. 9에서는 오류벡터가 31개로 나타났고, 3대의 카메라를 사용하여 속도벡터를 구한 Fig. 10에서는 오류벡터가 13개로 나타났다. 여러 영상에 대해 2대의 카메라를 사용하여 속도벡터를 검출하고, 동일한 조건에서 3대의 카메라를 사용하여 속도벡터를 검출한 결과 모두 3대의 카메라를 사용하였을 경우에 2대의 카메라를 사용하였을 때 보다 속도벡터의 오류벡터 수가 감소함을 알 수 있었다. Fig. 11는 3차원 스테레오 PIV 알고리즘에 적용하여 구한 3차원 단면상의 속도벡터이다. Fig. 12은 3차원 단면상의 운동에너지를 표현한 그림이다.

5. 결론

본 연구에서는 본격적인 3차원 유동장의 한 단면상의 속도벡터를 PIV로 계측하기 위하여 호모지니어스 좌표계와 상호상관식을 이용한 2프레임의 3차원 스테레오 PIV 기법을 제안하였다. 영상 좌표를 사용하여 3차원 위치 정보를 획득함으로써 카메라 보정에 관한 오차를 줄일 수 있었다. 영상보정 작업을 행하여 각각의 카메라에 대하여 임의의 각도에서 촬영하더라도 스테레오 정합을 행할 수 있게 하였다. 3대의 카메라를 이용한 3차원 속도벡터를 구하는 기법을 개발하였으며, 2

대의 카메라를 이용하여 3차원 속도벡터를 구하는 것 보다 정도 높게 3차원 속도벡터를 획득하였다. 또한, 오류벡터의 제거에는 통계적인 방법과 함께, 연속의 방정식을 최대한 만족하도록 하는 기법을 제시하였다. 제안된 기법을 유동장에 적용하기 위하여, 개방형 순환수조에 계단모형의 장애물을 설치하여 후류를 발생시켰으며, 3대의 아날로그카메라 및 아르곤 이온 레이저를 이용하여 영상을 확보하였고, 3차원 유동장의 한 단면에서의 깊이 방향의 속도성분을 갖는 속도벡터를 연속적으로 획득하였다. 향후에는 3차원 스테레오 PIV 계측에 수반하는 불확실성 성분에 대한 체계적인 고찰과 함께, 본격적인 3차원 유동장에 대한 적용례를 보고 할 예정이다.

후 기

이 논문은 한국해양대학교 BK사업단의 지원을 받았음.

참고문헌

- (1) Kim, Y. H., 1996, "A Study on PIV Measurement by Correlation Method," Master Thesis of Korea Maritime University.
- (2) Kobayashi, T., Saga, T. and Sekimoto, K., 1989, "Velocity Measurement of Three-Dimensional Flow around Rotating Parallel Disks by Digital Image Processing," ASME FED-Vol. 85, pp. 29~36.
- (3) Kasagi, N. and Nishino, K., 1991, "Probing Turbulence with Three Dimensional Particle Tracking Velocimetry," *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, Vol. 4, pp. 601~612.
- (4) Kim, M.Y. and Lee, Y.H., 2001, "Development of High-resolution 3-D PIV Algorithm by Cross-correlation," *Pro. of the KSME Fall Annual Meeting B*, pp. 410~416.
- (5) Kim, M.Y., Choi, J. W, and Lee, Y.H., 2002, "Development and Application of High-resolution 3-D Volume PIV System by Cross-correlation," *Proceeding of the 2nd National Congress on Fluids Engineering*, pp. 507~510.
- (6) Arroyo, M. P. and Greated, C.A., 1991,

- "Stereoscopic Particle Image Velocimetry," *Meas. Sci. Tech.* 2, pp. 1181~1186.
- (7) Lawson, N.J. and Wu, J., 1997, "Three-dimensional Particle Image Velocimetry: Experimental Error Analysis of a Digital Angular Stereoscopic System," *Measurement Science & Technology*, Vol. 8, No. 12, pp. 1455~1464.
- (8) Schenk T. and Toth C. K., 1992. "Computer Vision and Digital Photo-grammetry," *ITC Journal*, pp. 34~38.
- (9) Moon, B.S, 1993, "A Study on the Geometric Correlation of a CCD Camera Scanner using the Exterior Orientation Parameters," Master Thesis of Gyeong Sang National University.
- (10) El-Hakim, S.F., 1986, "Real Time Image Metrology with CCD Cameras," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 52, pp. 1757~1766.
- (11) Lee, K. S, 1999, "Numerical Methods for Engineers," Won-Hwa, pp. 66~69, pp. 259~275.
- (12) Schenk T. and Toth C. K., 1992, "Computer Vision and Digital Photo-grammetry," *ITC Journal*, pp. 34~38.
- (13) Schenk T. and Toth C. k., 1992, "Conceptual Issues on Softcopy Photo-grammetric Workstations," *PE&RS*, Vol. 58, No. 1, January, pp. 101~110.
- (14) Gerara Medioni and Ramakant Nevatia, 1982, "Segment-Based Stereo Matching, Computer Vision," *Graphics and Image Processing*, Vol. 3, pp. 12~18.