

고해상도 3차원 상호상관 PIV 알고리즘 개발

김미영* · 최장운* · 이현* · 이영호**

Development of High-resolution 3-D PIV Algorithm by Cross-correlation

Mi-Young Kim, Jang-Woon Choi, Hyun Lee and Young-Ho Lee

Key Words: 3-D PIV(3차원 PIV), epipolar line(에피폴라선), stereo matching(스테레오 정합), collinearity equation(공선조건식), binarization(이진화), identification(동일입자추적), cross-correlation(상호상관)

Abstract

An algorithm of 3-D particle image velocimetry(3D-PIV) was developed for the measurement of 3-D velocity field of complex flows. The measurement system consists of two or three CCD camera and one RGB image grabber. In this study, stereo photogrammetry was applied for the 3-D matching of tracer particles. Epipolar line was used to detect the stereo pair. 3-D CFD data was used to estimate algorithm. 3-D position data of the first frame and the second frame was used to find velocity vector. Continuity equation was applied to extract error vector. The algorithm result involved error vector of about 0.13 %. In Pentium III 450MHz processor, the calculation time of cross-correlation for 1500 particles needed about 1 minute.

1. 서 론

유체역학에 관련된 기계나 기기의 설계 또는 성능향상을 위한 제반과정에서 가장 기본이 되는 것은 수반하는 유체의 거동을 파악하는 것으로 PIV(Particle Image Velocimetry)⁽¹⁾계측은 다른 일반적인 속도계측 기법과 비교하여 많은 장점을 제공하고 있다. 그러나 지금까지 개발된 PIV계측 기법들 중의 대부분은 유동장에 대한 2차원 계측에 관한 것이기 때문에 공학상 실용적인 3차원성이 강한 유동장의 적용에는 한계를 가지고 있었다. 이를 극복하기 위하여 3차원 PIV의 개발이 요구 되어왔다.

3차원 PIV는 열유체 유동의 현상을 3차원적으로 해석할 수 있는 가장 효과적인 계측법으로 주목받고 있으며 유동장내의 3차원 속도성분의 실시간 계측은 단순한 속도성분 뿐만 아니라 공학적으로 유용한 보다 많은 정보를 제공하고 있다. 최근에는 디지털 화상처리 장비들의 발달로 3차원 이미지 데이터 분석을 위한 작업과정도 간편해졌으며, 이로 인한 유동장의 3차원 PIV계측에 관한 연구^{(2),(3)}도 진행되고 있다. Hassan과 Murai⁽⁴⁾는 기포가 발생하는 유동의 계측에 3차원 PIV를 적용하였고, Nishino⁽⁵⁾는 3차원 PIV 계측 기법을 이용하여 로켓 내부의 미소중력 유동을 계측하였다. 지금까지의 관련연구에서는 원리적으로 3차원 속도계측을 행하기 위하여 두 대 이상의 카메라를 사용한 3차원 계측시스템을 구성하였다. 그리고 단면이탈 속도성분을 구할 수 있는 카메라 각도 및 계측대상의 기하학적인 배치에 따른 투영방정식을 구하였으며 영상왜곡보정

* 회원, (주)아이아이티 연구원

** 회원, 한국해양대학교 기계정보 공학부

에 관한 내용을 포함하고 있다. 3차원 속도계측의 기초는 영상정합(image matching)이며 영상정합은 최종 계산된 3차원 속도의 정확도에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 실시간 3차원 속도계측 시스템을 구성하기 위하여 영상정합 기법 개발 및 개선에 관한 체계적인 연구와 3차원 공간상에서의 속도벡터 추출 알고리즘 개발이 필요하다.

본 연구에서는 2대 이상의 카메라를 사용한 3차원 PIV 시스템을 구성하고 CCD카메라의 검정 및 표정요소(orientation parameter)를 구하기 위한 입체영상의 기하학적인 특징과 CCD카메라 검정법에 관한 연구를 수행하였다. CCD카메라의 표정요소를 계산하기 위하여 입체모형을 제작하였으며 입체영상의 기하학적인 특징을 구하고 영상왜곡을 보정하기 위하여 해석사진측량 분야에서 비측정용 카메라(nonmetric or ordinary camera) 검정에 사용되어 왔던 수학적 모델을 이용하였다.

3차원 공간상에서 연속하는 2개의 영상으로부터 속도를 검출하기 위하여 고해상도 3차원 상호상관 PIV 알고리즘을 개발하여 3차원공간 상에서 속도벡터를 추출하였다. 고해상도 3차원 상호상관 PIV는 대부분의 3차원 PIV기법인 2차원 상에서 동일입자를 추적하여 속도벡터를 검출한 후 스테레오 정합(stereo matching)을 행하는 방법과 달리 3차원 공간상에서 상호상관값을 구하여 동일입자를 추적하기 때문에 오류벡터의 발생을 줄일 수 있다. 3차원 PIV 알고리즘은 대개의 경우 여러 장의 영상을 사용하여 속도벡터를 검출하기 때문에 추적입자 이동경로의 곡률이 큰 경우에는 유효벡터수가 감소하고, 계측정도가 떨어지는 문제점이 있었지만 본 연구에서 개발한 알고리즘을 적용하면 두 장의 영상만을 가지고 동일입자를 검출하기 때문에 3차원성이 강한 고속 유동장에도 효과적으로 속도벡터를 검출할 수 있었다. 개발된 알고리즘의 검증용 위하여 덮개 구동형 밀폐 캐비티 유동장에 대한 CFD 데이터를 이용하였다.

2. 3차원 PIV 알고리즘 개발

2.1 처리순서

Fig.1은 본 연구에서 구성된 3차원 속도계측 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 먼저 2대 이상의 카메라를 사용해서 이미지그래버를 통하여 영상을 획득하고, 얻어진 영상좌표를 공선조건식^{(6),(7)}을 만족하기 위해 사진좌표로 바꾼다. 그리고 각각의 카메라의 회전행렬요소, 카메라 중심위치를 계산한다. 다음으로 2대 이상의 카메라 영상간의 스테레오 정합⁽⁸⁾을 실시한다. 스테레오 정합을 보다 정확하고, 계산속도를 빠르게 하기 위하여 에피폴라선(epipolar line)을 구한다. 이렇게 얻어진 3차원 위치값, 즉 3차원 공간상의 시점과 종점 위치값을 가지고 3차원 상호상관 PIV 알고리즘으로 속도벡터를 추출한다. 후처리 과정에서는 얻어진 속도벡터들의 오류벡터를 제거하고, 거리역수보간을 이용하여 격자점상에 재배치하며, 3차원 격자상에서 연속의 방정식을 적용하고, 연속의 방정식을 만족하지 못하는 벡터는 오류벡터로 간주하여 제거 작업을 실시한다. 제거된 자리의 속도벡터는 주위값을 참조한 보간기법을 이용하여 구한다.

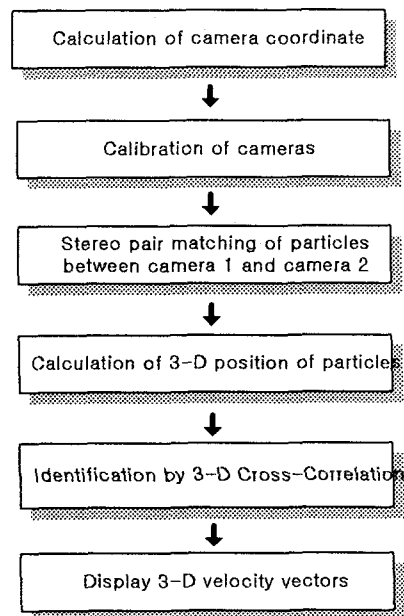


Fig.1 Flow chart of 3-D PIV

2.2 3차원 렌즈검정 모형식

CCD카메라는 영상에 대한 검정용 계수나 사진지표(camera fiducial mark)가 존재하지 않으므로 본 연구에서는 3차원 렌즈 검정 모형식을 사용하여 대상물에 따라 초점거리가 변하는 CCD카메라에 대한 검정^{(9),(10)}을 수행하였다. 가시화된 입자의 3차원 위치를 결정하고, 수학적 모형을 적용시킬 때 다루어지는 기본적인 방법은 공선조건(collinearity equation)에 의한 단 사진의 후방교선 및 표정법(single photo resection & orientation)으로 기하학적인 관계는 Fig.2 와 같다. 카메라의 함수모형은 영상점과 렌즈중심 및 대상점이 일직선을 이룬다고 가정하는 공선조건식을 근거로 한다. 또한 공선조건식을 사용한 카메라중심 위치와 회전각을 알기 위해서는 Fig.3 처럼 유동장 전체에 대한 기지(known)의 3차원 좌표값이 최소 6개가 필요하다. 기지의 데이터가 많으면 많을수록 카메라보정 정도가 높아진다.

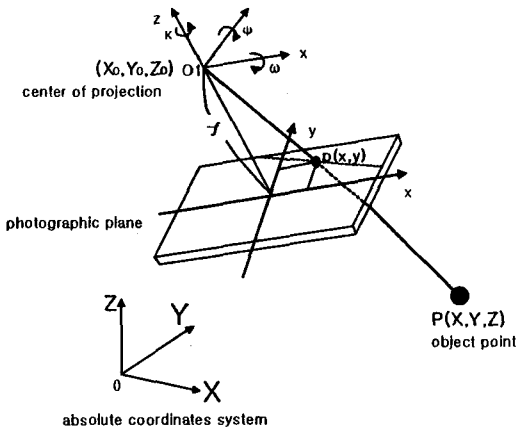
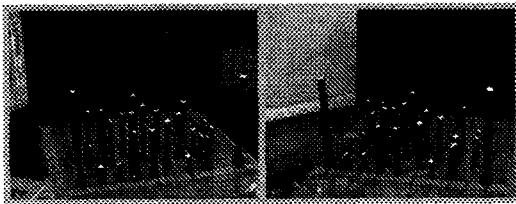


Fig.2 Definition of camera parameters



(a) camera 1 (b) camera 2

Fig.3 Calibration image

2.3 공선조건식에 의한 카메라 파라메타 결정

투영중심 (X_0, Y_0, Z_0) , 지상좌표 (X, Y, Z) 및 사진좌표 (x, y) 가 일직선상에 있다는 공선조건식을 이용하여 Fig.4에서와 같이 카메라1의 투영중심 $O_1(X_{01}, Y_{01}, Z_{01})$ 과 회전각 $\omega_1, \phi_1, \kappa_1$ 을 그리고 카메라2의 투영중심 $O_2(X_{02}, Y_{02}, Z_{02})$ 과 회전각 $\omega_2, \phi_2, \kappa_2$ 을 구한다. 공선조건식은 다음과 같다.

$$x = -f \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \quad (1)$$

$$y = -f \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \quad (2)$$

$$F = -f \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} - x = 0 \quad (3)$$

$$G = -f \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} - y = 0 \quad (4)$$

여기서 f 는 초점거리, a_{ij} 는 아래식(5)와 같이 정의된 회전행렬의 요소이다.

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos \phi \cos \kappa \\ a_{12} &= -\cos \phi \sin \kappa \\ a_{13} &= \sin \phi \\ a_{21} &= \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa \\ a_{22} &= \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa \\ a_{23} &= -\sin \omega \cos \phi \\ a_{31} &= \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa \\ a_{32} &= \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa \\ a_{33} &= \cos \omega \cos \phi \end{aligned} \quad (5)$$

2.4 스테레오 정합

Fig.4와 같이 3차원 위치의 물체를 2대의 카메라로 촬영하였을 경우 각각의 카메라에 실제사물의 상이 찍히게 된다. 앞에서 언급하였듯이 공선조건식은 카메라의 투영중심과 사진좌표와 실제

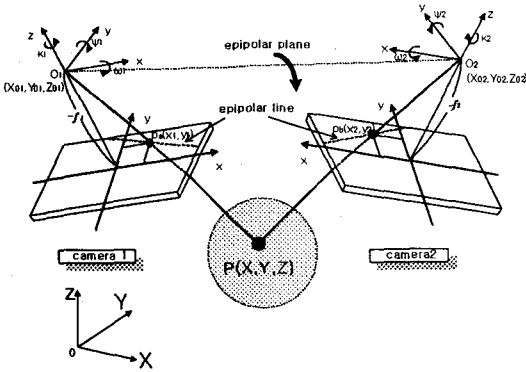


Fig.4 Stereo pair matching

사물의 좌표값이 일직선상에 있다는 가정이므로 식(3)과 식(4)를 이용해서 카메라의 투영중심과 3차원 공간상에서의 사진좌표값 (P_a, P_b)의 위치를 구할 수 있고, 동일한 물체를 촬영하였기 때문에 각각의 카메라투영중심과 사진좌표값을 연결한 직선 $O_1 - p_a$ 와 직선 $O_2 - p_b$ 는 실제 지상좌표 $P(X, Y, Z)$ 에서 만난다는 원리를 이용해서 동일 입자를 찾을 수 있다. 또한 카메라1에서 임의의 입자를 선택하였을 경우에 그 입자는 반드시 카메라2의 에피폴라선상에 존재하며 이러한 에피폴라선⁽¹¹⁾을 구함으로써 동일입자를 찾기 위한 탐색 영역을 줄이고 정도 높게 동일입자를 찾을 수 있다.

2.5 3차원 좌표계산

2대 이상의 카메라 영상에서 동일입자가 추적되면 공선조건식을 사용하여 실제사물의 3차원 위치 값을 찾을 수 있다. 후방교선법에 의해서 2대 이상의 카메라 파라메타 (X_0, Y_0, Z_0 : 투영중심, ω, ϕ, κ : 회전각)를 구한다. 공선조건식에 의해서 투영중심 (X_0, Y_0, Z_0)와 회전행렬요소 (ω, ϕ, κ) 및 지상좌표 (X, Y, Z)를 알면 사진좌표 (x, y)의 3차원 공간상에서의 좌표 (X_C, Y_C, Z_C)을 얻을 수 있다. 관계식은 식(6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_C - X_0 \\ Y_C - Y_0 \\ Z_C - Z_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

회전행렬 R 이 직교행렬(orthogonal matrix)이므로 식(6)은 식(7)과 같이 변환된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_C - X_0 \\ Y_C - Y_0 \\ Z_C - Z_0 \end{bmatrix} &= R^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = R^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}x + a_{21}y - a_{31}f \\ a_{12}x + a_{22}y - a_{32}f \\ a_{13}x + a_{23}y - a_{33}f \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

공선조건식을 이용하여 식(8)을 구한다.

$$\frac{X - X_0}{X_C - X_0} = \frac{Y - Y_0}{Y_C - Y_0} = \frac{Z - Z_0}{Z_C - Z_0} \quad (8)$$

식(7)과 식(8)로부터 식(9)와 식(10)을 구한다.

$$X = (Z - Z_0) \frac{a_{11}x + a_{21}y - a_{31}f}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}f} + X_0 \quad (9)$$

$$Y = (Z - Z_0) \frac{a_{12}x + a_{22}y - a_{32}f}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}f} + Y_0 \quad (10)$$

2.6 3차원 상호상관

고해상도 3차원 상호상관 PIV는 전 영역에 대하여 이진화(binazition)를 행하여 3차원 공간으로부터 입자를 검출한 후, 개개의 입자에 대하여 동일입자를 추적한다. 두 프레임의 영상 데이터 사이의 상관값을 추정하기 위하여 상호상관식(11)을 이용한다.

C_{ig} 는 무차원 상관계수이며, 0~1값을 가진다.

$f(i, j, k)$, $g(i+P, j+Q, k+R)$ 는 상관영역에서 이진화를 행한 값이고, P, Q, R 는 제 2 프레임의 좌표값 (i, j, k)에서 상관영역의 중심이 이동한 거리이며 최대이동 거리 이하의 값을 가진다.

$$C_{ig} = \frac{\sum_{i=L}^L \sum_{j=M}^M \sum_{k=N}^N f(i, j, k)g(i+P, j+Q, k+R)}{\sqrt{\sum_{i=L}^L \sum_{j=M}^M \sum_{k=N}^N f(i, j, k)^2 \cdot \sum_{i=L}^L \sum_{j=M}^M \sum_{k=N}^N g(i+P, j+Q, k+R)^2}} \quad (11)$$

속도벡터를 구하기 위하여 우선 3차원 전체 공

간을 이진화한다. 제 1 프레임과 제 2 프레임의 3차원 공간에 대하여 입자가 존재하는 위치값은 1을, 존재하지 않는 위치값은 0을 주어 3차원공간 전 영역을 이진화 한다. 동일입자를 찾기 위하여 제 1 프레임의 하나의 입자도심을 속도벡터의 시점으로 하고 이를 중심으로 적절한 크기의 $L \times M \times N$ 의 상관영역(Correlation Area Size, CAS)을 설정한다. 제 1 프레임과 동일한 위치의 제 2 프레임 상에서 미리 예측한 입자의 최대이동거리(Searching Area Radius, SAR)이내에 있는 입자의 도심을 중심으로 제 1 프레임과 같은 크기의 상관영역을 설정한다. 식(11)을 이용하여 최대 상관값(C_{fg})을 가지는 제 2 프레임의 입자의 도심을 속도벡터의 종점으로 한다. 이러한 과정으로 제 1 프레임상의 모든 입자에 대하여 동일입자를 추적한다.

3. 알고리즘 적용

3.1 밀폐 캐비티 유동장

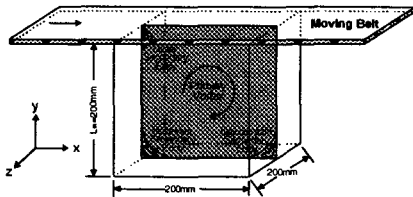


Fig.5 Closed cavity flow

Table 1 Condition of closed cavity flow

Particle Number	1500
U	5mm/sec
L	200mm
T	20° C
ν	$1 \times 10^{-6} (m^2/sec)$
Re	1000

3차원 고해상도 상호상관 PIV 알고리즘을 평가하기 위하여 SOLA 알고리즘을 적용하여 3차원 밀폐 캐비티 유동장⁽¹²⁾(Fig.5)에 대한 CFD 데이터를 획득하였다. 계산조건은 Table 1과 같다.

3차원 밀폐 캐비티 흐름의 CFD 데이터를 알고리즘 처리 순서에 따라 처리한 결과와 원래의 CFD 데이터를 비교하여 알고리즘 성능을 평가하였다.

3.2 처리결과

본 연구에서는 3차원 공간상에 존재하는 1500개의 CFD 데이터를 2대의 카메라로 촬영한 것과 같은 효과를 얻어내도록 하기위하여 영상처리방법을 사용하였고, Fig.6과 Fig.7은 처리된 2차원 영상을 보여준다. 고해상도 3차원 상호상관 PIV 알고리즘을 적용하여 속도벡터를 얻어냈다. 상관영역인 CAS는 $40 \times 40 \times 40 (mm)$ 로 설정하였고, 시점과 종점의 최대이동거리인 SAR은 $10 (mm)$ 로 설정하여 처리하였다. 1500개의 입자에 대한 상관계수의 계산 시간은 펜티엄III 450MHz에서 약1분이 걸렸으며 전체유동장에서의 속도분포는 최소 $0.1 (mm/sec)$ 에서 최대 $1.8 (mm/sec)$ 로 나타났다. Fig.8은 2대의 카메라상에 찍힌 점들을 스트레오 정합한 결과이다. Fig.9는 계산된 CFD 데이터의 속도벡터이고, Fig.10은 본 연구에서 개발한 알고리즘을 사용하여 얻어낸 속도벡터의 결과이다. CFD 데이터에 의해서 얻어진 속도값 ($V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$)을 이론치라 하고, 알고리즘에 의해서 계산된 속도값을 실측치라 정의했을 때 두 유동장의 속도벡터를 비교하여 오차를 얻는 식은 아래와 같다.

$$\text{오차} = \frac{\sum \text{실측치} - \sum \text{이론치}}{\sum \text{이론치}} \times 100 (\%) \quad (12)$$

그결과 1500개의 속도벡터에 대하여 구해진 오차는 0.13%로 나타났다. 여기서 2개 오류벡터가 발생하였으며 그 판별식으로서 연속의 방정식인 식(13)을 이용하였다.

$$D = -\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

여기에서 D 가 0.1보다 큰 속도벡터는 오류벡터로 간주하고 제거하였다. Fig.11은 Fig.10을 3차원 거리역수 보간기법^{(13),(14)}을 이용해서 격자점상에 $10 \times 10 \times 10$ 크기로 재 배치한 것이다.

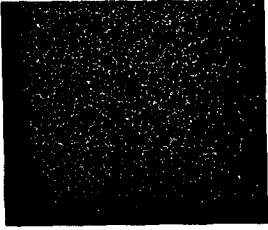


Fig.6 Camera 1 image

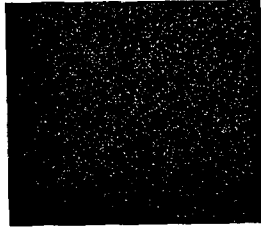


Fig.7 Camera 2 image

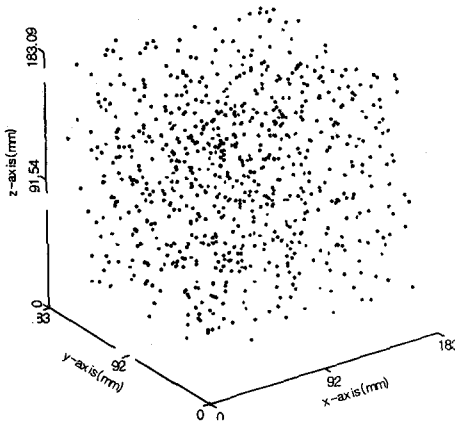


Fig.8 Stereo matching data

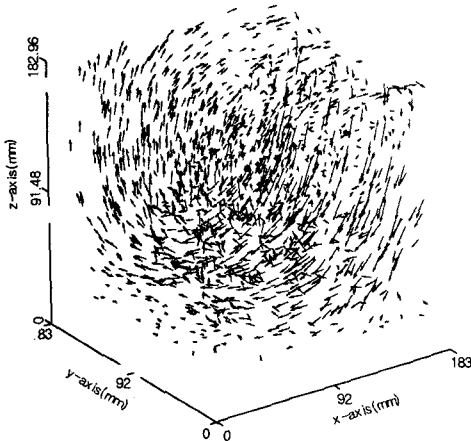


Fig.9 Velocity vectors by CFD data

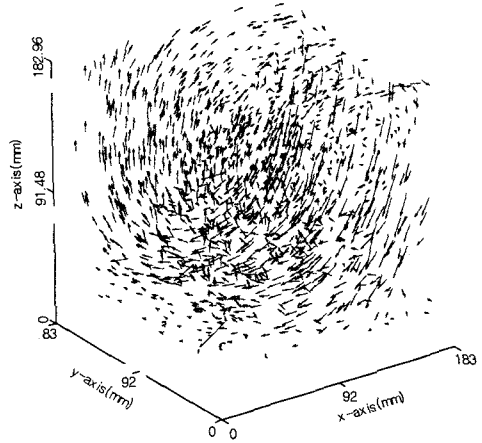


Fig.10 Velocity vectors by 3D-PIV

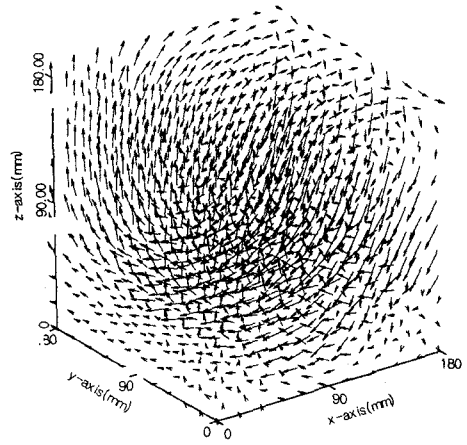


Fig.11 Interpolated 3-D velocity vectors

4. 결론

본 연구에서 개발한 고해상도 3차원 상호상관 PIV 알고리즘은 3차원 공간상의 데이터를 가지고 동일입자를 추적하여 속도벡터를 구하였기 때문에 3차원 속도벡터를 보다 정확하게 얻어낼 수 있었다. 또한 1500개의 데이터 전부의 시점과 종점 위치값을 계산하여 상호상관값에 의해 속도

벡터를 추출하므로 유효벡터의 손실없이 1500개 데이터 모두의 속도벡터를 찾아냈고, 3차원 PIV에서 문제되던 속도벡터의 회복률은 원리적으로 100%의 값을 얻을 수 있었다. 두 개의 연속된 영상을 사용하여 속도벡터를 추적하므로 다중 영상을 사용해서 속도벡터를 찾는 3차원 PIV와 달리 추적입자의 이동경로의 곡률이 큰 경우와 같은 고속 유동장에도 효과적으로 속도벡터를 검출할 수 있었다.

본 연구에서 개발한 고해상도 3차원 상호상관 PIV는 계측오차 해석결과 1500개의 속도벡터에 대하여 0.13%의 낮은 오차를 나타내어 계측의 신뢰성을 크게 확보할 수 있었다. 계산 시간 면에서는 상호상관값을 구하는 알고리즘을 최적화 하여 1500개의 속도벡터를 모두 찾아내는데 걸리는 시간은 펜티엄III 450MHz 기준에서 약1분 정도로 매우 빠르게 나타났다. 향후에는 실제 3차원 유동장에 적용하여 보다 개선된 알고리즘을 개발할 예정이다.

후기

CFD데이터 처리를 도와준 한국해양대학교 대학원 강신정군에게 깊은 감사를 표합니다.

참고문헌

- (1) 이영호, 최장운, 1996, "PIV의 분류 및 원리(해설)", 대한기계학회지 제36권12호, pp. 1146-1162.
- (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) Okamoto K, 1995, "Three-Dimensional Tracking Algorithms: Velocity Vector

- Histogram and Spring Model", Processing of the International Workshop on PIV-Fukui'95, pp. 21-31.
- (4) Hassan YA, 1997, "Multiphase flow measurement using three-dimensional PIV", Proc. Intl. Conference on Fluid Eng. Tokyo Jpn, Vol. 3, pp. 813-818.
- (5) Nishino K., Kasagi N. and Hirata M., 1989, "Three-Dimensional Particle Tracking Velocimetry Based on Automated Digital Image Processing", J.Fluids Eng., ASME, vol. 111, pp. 384-391.
- (6) Schenk T. and C. K. Toth, 1992, "Computer Vision and Digital Photo-grammetry", ITC Journal, pp. 34-38.
- (7) Schenk T. and C. k. Toth, 1992, "Conceptual Issues on Softcopy Photo-grammetric Workstations", PE&RS, Vol. 58, No.1, January, pp. 101-110.
- (8) Gerara Medioni and Ramakant Nevatia, 1982, "Segment-Based Stereo Matching, Computer Vision", Graphics and Image Processing, Vol. 3, pp. 12-18.
- (9) 문명상, 1993, "외부표정요소를 이용한 CCD 카메라 스캐너의 기하왜곡 보정기법 연구", 경상대학교 석사논문.
- (10) 이석군, 1998, "CCD 사진기와 객체지향기법을 이용한 근거리 수치 사진 측량에 관한 연구", 연세대학교 박사논문.
- (11) Cho W. and T. Schenk, 1992, "Resampling Digital Imagry to Epipolar Geometry. 17th ISPRS Commission IV", Washington D.C.,
- (12) Young-Ho, Lee, 1991, "A Study on Flow Characteristics of Three-Dimensional Cubic Cavity by Particle Image Velocimetry", Univ. of Tokyo, Doctoral Thesis.
- (13) 최장운, 이영호, 1996, "PIV에서의 보간기법의 평가에 관한 연구", 한국박용기관학회지 제20권4호, pp.90-100.
- (14) 김미영, 1999, "PIV에서 보간기법의 평가에 관한 연구", 한국해양대학교 석사논문.