

## 3차원 스테레오 PIV 개발

김미영<sup>†</sup> · 최장운 · 남구만 · 이영호<sup>\*\*\*</sup>

### Development of 3-D Stereo PIV

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

#### Abstract

A process of 3-D particle image velocimetry, called here, as "3-D stereo PIV" was developed for the measurement of a 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 oblique-angled image to transformed 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 and finally 3-D animation as the post processing. In principle, as two frame images only are necessary for the single instantaneous analysis of a section field of 3-D flow, more effective vectors are obtainable contrary to the previous multi-frame vector algorithm. 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.

**Key Words:** homogeneous coordinate system(호모지니어스 좌표계), 3-D stereo PIV (3차원 스테레오 PIV), camera modeling(카메라모델링), perspective transform(투영변환), error vector (오류벡터).

#### 1. 서 론

PIV(Particle Image Velocimetry)계측은 다른 일반적인 속도 계측기법과 비교하여 많은 장점을 제공하고 있다. 그 중에서도 3차원 PIV는 열유체 유동의 현상을 3차원적으로 해석할 수 있는 가장 효과적인 계측법으로 주목받고 있다. 3차원 PIV는 3차원 볼륨(volume) PIV<sup>(1)</sup>와 3차원 스테레오(stereo) PIV<sup>(2)</sup>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 계측시스템의 설치가 용이하며, 알고리즘의 구현이 간단하여 최근 들어 개발 연구와 응용이 활발히 이루어지고 있다. 본 연구에서는 3대의 카메라를 사용한 Angular Method<sup>(3)</sup>의 3차원 스테레오 PIV 시스템을 구성하고, 알고리즘을 개발하였다. 본 연구에서 채택한 호모지니어스(homogeneous)<sup>(4)</sup> 좌표계는 카메라의 사진좌표를 사용하지 않고 영상 좌표를 사용하여 영상에 투영된 입자들의 3차원 위치를 계산하므로 카메라 왜곡보정 및 표정요소 등<sup>(5),(6)</sup>을 구하는 과정이 불필요하며 이에 대한 계산오차를 줄일 수 있다. 3차원 스테레오 PIV를 적용하기 위해서 3차원 개방형 순환수조를 제작하고 입구 하단에 계단모형의 장애물을 설치하여 Vortex를 인위적으로 생성하는 가시화 실험을 행하였다.

<sup>†</sup> 한국해양대학교 기계공학과 박사과정

E-mail : miyoung@iitpiv.com

\* (주)아이아이티 책임연구원

\*\* (주)아이아이티 연구원

\*\*\* 한국해양대학교 기계·정보공학부 교수

## 2. 3차원 스테레오 PIV

### 2.1 알고리즘 처리순서

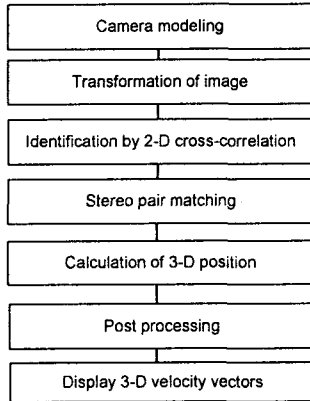


Fig. 1 Flow chart of 3-D stereo PIV

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 두프레임의 연속된 영상을 가지고 상호상관<sup>(7)</sup>에 의한 동일입자추적으로 2차원 속도벡터를 획득한다. 각각의 카메라 영상들의 2차원 속도벡터들을 이용하여 스테레오 정합(stereo matching)<sup>(8)</sup>을 행하고, 최종적으로 3차원 좌표공식에 의하여 3차원 속도벡터를 구해낸다. 후처리 과정에서는 얻어진 속도벡터들의 오류벡터를 제거하고, 3차원 거리역수보간기법을 이용하여 격자점상에 재배치하여 최종속도벡터를 구한다.

### 2.2 카라모델링

3차원 공간에서 투영된 입자에 대한 카메라 모델은 카메라의 기하학적 매개변수(geometric parameter)에 의해 변환행렬로 나타낼 수 있다. 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.

$$\begin{aligned} U &= u/t \\ V &= v/t \end{aligned} \quad (2)$$

식(1)의 행렬의 곱을 간단히 하면 3차원 물체를 2차원 영상으로 변환하는 식(3)의  $4 \times 3$  크기를 갖는 행렬  $R_{ij}$ 로 나타낼 수 있다. 이  $4 \times 3$  행렬  $R_{ij}$ 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  $u - U*t = 0$ ,  $v - V*t = 0$ 에 대입하면  $u, v, t$ 가 제거되므로 결국 호모지니어스 좌표계는 카메라로부터 얻은 영상면 좌표로부터 변환된다. Fig.2는 호모지니어스 좌표계를 나타낸 그림이며, 영상좌표  $p_a, p_b$ 와 그에 대응하는 물체의 지상좌표  $P(X, Y, Z)$ 를 알고 있다면  $R_{11}$ 에서  $R_{43}$ 까지 12개의 카메라모델링행렬의 요소(element)들을 구할 수 있다. 12개의 요

소들을 구하기 위해서는 12개의 방정식이 필요하나 식(4)는 호모지니어스 행렬로부터 유도된 식이므로  $R_{43}$ 을 임의의 수 1로 둘 수 있다.

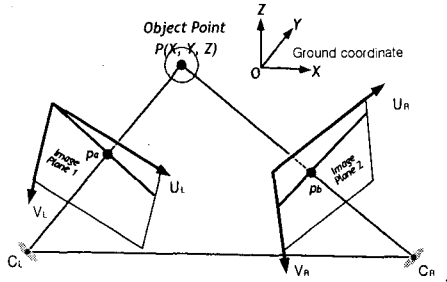
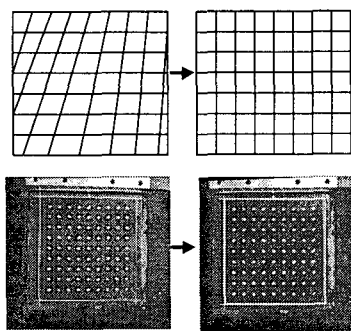


Fig. 2 Homogeneous coordinate system

### 2.3 영상의 왜곡보정

Fig.3의 (a)와 같이 획득된 영상은 실제 측정단면의 크기를 재현함에 있어서 왜곡이 발생함으로 식(5)의 투영변환식을 사용하여 영상좌표와 측정단면의 지상좌표 사이의 왜곡보정 변환계수를 구하여 왜곡된 원시영상을 보정한다. Fig.3의 (a)는 왜곡된 원시영상과 (b)는 투영변환식(5)를 사용하여 변환된 영상을 나타내고 있다.

$$X = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_4x + b_5y + 1}, Y = \frac{b_6x + b_7y + b_8}{b_4x + b_5y + 1} \quad (5)$$



(a) oblique-angled image (b) transformed image  
Fig. 3 Transformation of image

### 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 정합의 원리는 우선, 각각의 카메라에 대하여 연속된 두프레임을 가지고 상호상관식(7)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(6)과 같다.

$$[F] * [X] = [D] \quad (6)$$

여기서,

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

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

$$[D] = \begin{bmatrix} R_{L43}U_L - R_{L41} \\ R_{L43}V_L - R_{L42} \\ R_{R43}U_R - R_{R41} \\ R_{R43}V_R - R_{R42} \end{bmatrix} \text{ 이다.}$$

$R_{L_i}, R_{R_i}$ 는 카메라변환행렬을 의미한다. 4개의 선형독립방정식으로 이루어진 식(6)을 최소자승법에 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.4는 3대의 카메라를 사용한 스테레오 정합 방법을 나타낸다.

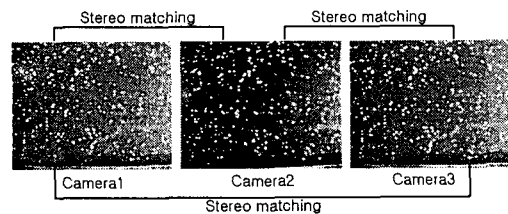


Fig. 4 Stereo matching of 3 cameras

## 3. 실험 및 결과

3차원 스테레오 PIV 알고리즘을 적용하기 위하여 Fig.5와 같이 PIV 계측시스템을 구성하였다. 개방형 3차원 순환유동장에 계단식모형의 장애물을 설치하였다. 설치된 장애물에 의해서 인위적

인 Vortex를 형성시켜 측면에서 유동장을 촬영하더라도 3차원성이 충분히 존재하도록 하였다. 입자의 투입은 산란성이 있는 직경이 110 $\mu$ m인 나일론입자를 사용하였다. 조명(Argon Ion Laser 300mW)은 유동장 전체에 대해 촬영단면에서 10mm 폭으로 투과시켰으며, 카메라 위치는 3대의 카메라가 동시에 한쪽면을 바라보게 하며 3대의 카메라 사이의 각도는 임의로 조정할 수 있게 하였다. 3대의 카메라로 촬영한 영상들은 이미지 보드를 통해 동시에 컴퓨터로 저장되며, 연속하는 두 프레임의 영상을 사용하여 3차원 스테레오 PIV 알고리즘에 적용하였다. Fig.6은 3차원 스테레오 PIV 알고리즘에 적용하여 구한 3차원 단면상의 속도벡터이다.

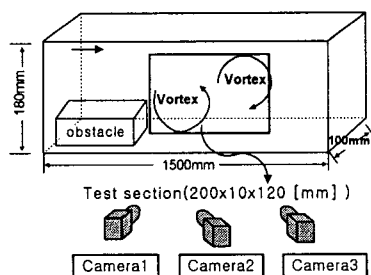


Fig. 5 Definition of measuring region

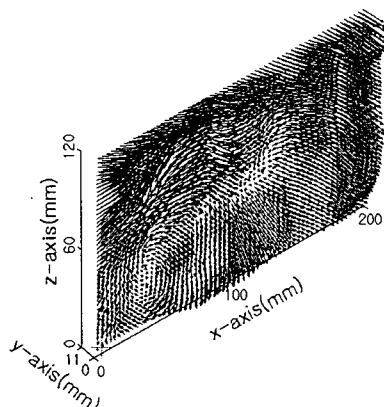


Fig. 6 Velocity vectors

#### 4. 결 론

본 연구에서는 본격적인 3차원 유동장의 한 단면상의 속도벡터를 PIV로 계측하기 위하여 호모지니어스 좌표계와 상호상관식을 이용한 2프레임의 3차원 스테레오 PIV 기법을 제안하였다. 영상

보정작업을 행하여 각각의 카메라에 대하여 임의의 각도에서 촬영하더라도 스트레오 정합을 행할 수 있게 하였으며, 3대의 카메라를 이용한 3차원 속도벡터를 구하는 기법을 개발하여 2대의 카메라를 이용하여 3차원 속도벡터를 구하는 것 보다 정도 높게 3차원 속도벡터를 획득하였다. 향후에는 3차원 스테레오 PIV 계측에 수반하는 불확실성 성분에 대한 체계적인 고찰과 함께, 본격적인 3차원 유동장에 대한 적용례를 보고 할 예정이다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 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.
- (2) Arroyo M. P. and Greated C.A., 1991, "Stereoscopic Particle Image Velocimetry", Meas. Sci. Tech.2, pp.1181-1186.
- (3) 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.
- (4) Vera B. Anand, 1994, "Computer Graphics & Geometric Modeling for Engineers", WILEY, pp.66-68.
- (5) Schenk T. and Toth C. K., 1992, "Computer Vision and Digital Photo-grammetry", ITC Journal, pp.34-38.
- (6) Schenk T. and Toth C. k., 1992, "Conceptual Issues on Softcopy Photo-grammetric Workstations", PE&RS, Vol. 58, No.1, January, pp.101-110.
- (7) Kim,Y.H, 1996, "A Study on PIV Measurement by Correlation Method", Master Thesis of Korea Maritime University.
- (8) Gerara Medioni and Ramakant Nevatia, 1982, "Segment-Based Stereo Matching, Computer Vision", Graphics and Image Processing, Vol. 3, pp.12-18.