

해상도 3차원 상호상관 Volume PIV 시스템 개발 및 적용

김미영* · 최장운** · 이현*** · 이영호****

Development and Application of High-resolution 3-D Volume PIV System by Cross-Correlation

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

Key Words : 3-D PIV(3 차원 PIV), epipolar line(에피폴라선), stereo matching(스테레오 정합), collinearity equation(공선조건식), 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. Flows size is 1500x100x180(mm), particle is Nylon12(1mm) and illuminator is Hollogen type lamp(100w). The stereo photogrammetry is adopted for the three dimensional geometrical mesurement of tracer particle. For the stereo-pair matching, the camera parameters should be decide in advance by a camera calibration. Camera parameter calculation equation is collinearity equation. In order to calculate the particle 3-D position based on the stereo photogrammetry, the eleven parameters of each camera should be obtained by the calibration of the camera. Epipolar line is used for stereo pair matching. The 3-D position of particle is calculated from the three camera parameters, centers of projection of the three cameras, and photographic coordinates of a particle, which is based on the collinear condition. To find velocity vector used 3-D position data of the first frame and the second frame. To extract error vector applied continuity equation. This study developed of various 3D-PIV animation technique.

1. 서 론

PIV(Particle Image Velocimetry)^[1]계측은 유체의 거동을 파악하는 것으로 다른 일반적인 속도계측 기법과 비교하여 많은 장점을 제공하고 있다. 그중에서도 3차원 PIV^[2]는 열유체 유동의 현상을 3차원적으로 해석할 수 있는 가장 효과적인 계측 법으로 주목받고 있다. 유동장내의 3차원 속도성분의 실시간 계측은 단순한 속도성분 뿐만 아니라 공학적으로도 유용한 정보를 제공하고 있다. 3차원 속도계측의 기초는 스테레오 정합(Stereo matching)이며 스테레오 정합은 최종 계산된 3차원 속도의 정확도에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 실시간 3차원 속도계측 시스템을 구성하기 위하여 스테레오 정합 기법 개발 및 개선에 관한 체계적인 연구와 3차원 공간상에서의 속도벡터 추출 알고리듬 개발이 필요하다.

본 연구에서는 3대의 카메라를 사용한 3차원 PIV 시스템을 구성하고 3대의 카메라를 이용한 스테레오 정합 기법을 구하기 위하여 연구를 수행하였으며 각각 3대의 CCD카메라에 대한 검정 및 표정요소(orientation parameter)[3]를 구하기 위한 연구를

수행하였다. 3차원 공간상에서 연속하는 2개의 영상으로부터 속도를 검출하기 위하여 고해상도 3차원 상호상관 PIV 알고리듬을 개발하여 3차원공간 상에서 속도벡터를 추출하였다. 또한 스테레오 정합[4]을 행할 때 호모지니언스 좌표 계를 이용한 에피폴라 라인을 구하여 스테레오 정합에 있어서 시간을 단축하며 정합의 결과를 정밀하게 하였다. 또한 얻어진 3차원 속도벡터의 효과적인 에러제거를 위해 연속의 방정식에 의한 에러제거방법을 제시하였으며 제거된 에러벡터를 보간하기 위해 시간이 빠르고 정밀도가 높은 3차원 거리역수 보간 기법을 제시하였다. 본 연구에서는 3차원 개방형 순환수조를 제작하고 입구 하단에 계단모형의 장애물을 설치하여 Vortex를 인위적으로 생성하는 가시화 실험을 실시하여 고해상도 3차원 상호상관 PIV알고리듬에 적용하였다.

2. 3차원 Volume PIV

2.1 3차원 PIV 시스템 구축

본 연구에서 구축한 3차원 PIV 시스템은 Fig.1과 같이 3차원 개방형 순환수조, 유동장 전체를 비출 수 있는 할로겐 Type 조명(100W), 카메라 검정모형모델, 3대의 CCD카메라와 3대의 카메라상의 아날로그영상은 디지털 영상으로 동시에 변환시켜주는 이미지 변환보드(DT3154) 및 호스트 PC로 구성하였다.

* 한국해양대학교 대학원 miyoung@iitpiv.com

** (주)아이아이티 연구원 david@iitpiv.com

*** (주)아이아이티 연구원 cjw1216@iitpiv.com

**** 한국해양대학교 기계공학과 lyh@pivlab.net

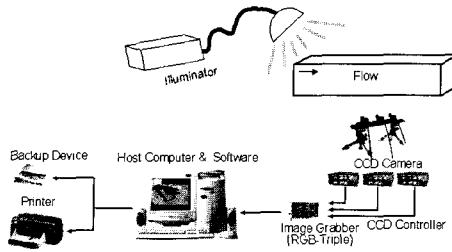


Fig. 1 3-D PIV system

2.2 3차원 PIV 알고리듬 처리순서

Fig.2는 본 연구에서 구성된 3차원 속도계측 알고리듬의 흐름도를 나타낸다. 먼저 3대의 카메라를 사용해서 이미지그래버를 통하여 영상을 획득하고, 얻어진 영상좌표는 공선조건식을 만족하기 위해 사진좌표로 바꾼다. 그리고 각각의 카메라의 회전행렬요소, 카메라 중심위치 등을 계산한다. 다음으로 2대의 카메라 영상간의 스테레오 정합을 실시한다. 스테레오 정합을 보다 정확하고, 계산속도를 빠르게 하기 위하여 에피폴라선(epipolar line)을 구한다. 이렇게 얻어진 3차원 위치값, 즉 3차원 공간상의 시점과 종점의 3차원 좌표값을 가지고 3차원 상호상관 PIV 알고리듬으로 속도벡터를 추출한다. 후처리 과정에서는 얻어진 속도벡터들의 에러벡터를 제거하고, 거리역수보간^[5]을 이용하여 격자점상에 재배치하며, 3차원 격자 상에서 연속의 방정식을 적용하고, 연속의 방정식을 만족하지 못하는 벡터는 에러벡터로 간주하여 제거 작업을 실시한다. 제거된 자리의 속도벡터는 주위 값을 참조한 3차원 거리역수 보간 기법을 이용하여 구한다. 최종적으로 구한 속도벡터를 이용하여 다양한 유체의 물리량을 구하고 3차원 애니메이션을 만든다.

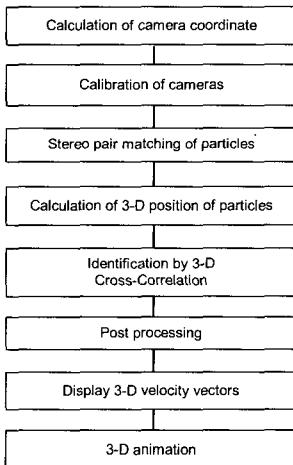


Fig. 2 Flow chart of 3-D PIV

2.2.1 카메라 좌표의 계산

3차원 PIV에서는 대상물의 영상을 취득할 경우에 좌측과 우측에 장착되어 있는 CCD카메라를 이용하여 영상을 획득하는데 본 연구에서 사용된 CCD카메라는 SONY XC-77RR이며 이 카메라의 제품사양을 Table1에 나타낸다. DT3154 영상보드를 통하여 획득된 영상의 크기는 640(H)×480(V)이다. 이와 같은 영상좌표 상의 원시 데이터를 Fig.3과 같이 사진좌표로 1:1 대응하도록 다시 변환시키는 과정이 필요하다.

Table 2 Specification of SONY XC77RR

Items	Specification
Cell Numbers	768(H)×493(V)
Focal length	16mm
Cell Size	11.0(H)×13.0(V) μm
Sensing Area	8.8×6.6mm

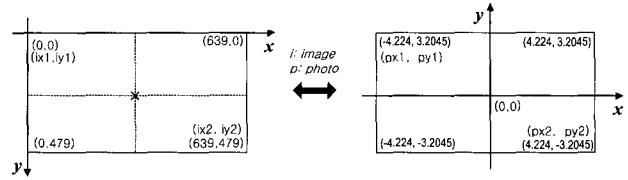


Fig. 3 Image coordinate & Camera coordinate

2.2.2 공선조건식에 의한 카메라 표정요소 결정

투영중심(X_0, Y_0, Z_0), 지상좌표(X, Y, Z) 및 사진좌표(x, y)가 일직선상에 있다는 공선조건식을 이용해서 3대의 카메라에 대하여 먼저 외부표정요소의 6개의 미지변량 값인 투영중심 $O(X_0, Y_0, Z_0)$ 과 회전값 ω, ψ, χ 를 구하고 다음으로 내부표정요소의 5개의 미지변량 값인 카메라 초점거리 f 와 주점의 위치이 동량 x_0, y_0 와 방사방향의 왜곡수차에 의한 렌즈디스토션 ($k_1 r^2 + k_2 r^4$)의 변환계수인 k_1, k_2 를 구한다. 카메라 표정요소를 구하기 위한 공선조건식 식(1)과 같다. 식(1)은 비선형이므로 반복계산을 통해 관측 값을 얻기 위해서는 선형화시켜야 한다. 11개의 카메라 표정요소 결정을 위해 필요한 5점 이상의 알고있는 3차원 기준점($n \geq 6$)을 대상으로 Talyor 급수전개에 의해 선형화된 관측방정식으로 카메라 표정요소를 구한다.

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

$$G = -f \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} - y + \Delta y = 0 \quad (1)$$

2.2.3 스테레오 정합

Fig.4와 같이 3차원 위치의 한 점을 2대의 카메라로 촬영하였을 경우 각각의 카메라에 실제 사물의 상이 찍히게 된다. 앞에서 언급하였듯이 공선조건식은 카메라의 투영중심과 사진좌표와 실제 사물좌표 값이 일직선상에 있다는 가정이므로 식(1)을 이용해서 카메라의 투영중심과 3차원 공간상에서의 사진좌표값 P_a, P_b 의 위치를 구할 수 있고, 동일한 점을 촬영하였기 때문에

각각의 카메라 투영중심과 사진좌표값을 연결한 직선 O_1P_a 와 직선 O_2P_b 는 실제 지상좌표 $P(X, Y, Z)$ 에서 만난다는 원리를 이용해서 동일입자를 찾을 수 있다. 또한 카메라1에서 임의의 입자를 선택하였을 경우에 그 입자는 반드시 카메라2의 에피폴라선상에 존재하며 Fig.5와 같이 에피폴라선을 구함으로써 동일입자를 찾기 위한 탐색영역을 줄여 시간을 절약하면서 정도높게 동일입자를 찾을 수 있다. 본 연구에서는 3대의 카메라를 이용하여 유동장의 3차원 속도벡터를 얻기 위해서 Fig.6과 같이

스테레오 정합 방법을 제시하였다. 세 가지 경우에 대하여 스테레오 정합을 행하고, 스테레오 정합시 획득된 3차원 위치 값들을 평균하여 최종적으로 입자들의 3차원 위치 값들을 찾아낸다.

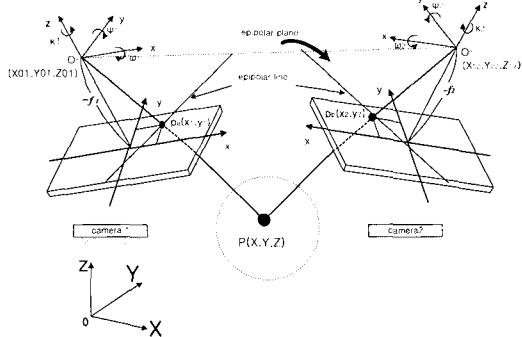


Fig. 4 Stereo pair matching

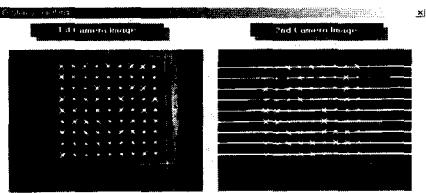


Fig. 5 Epipolar lines

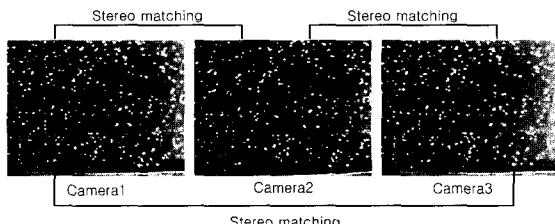


Fig. 6 Stereo matching of three cameras

2.2.4 3차원 상호상관

고해상도 3차원 상호상관 PIV는 전 영역에 대하여 이진화(binariization)를 행하여 3차원 공간으로부터 입자를 검출한 후, 개개의 입자에 대하여 동일입자를 추적한다. 동일입자를 추적하기 위한 상관식은 식(2)와 같다.

$$C_{f_k} = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N f(i, j, k) g(i+P, j+Q, k+R)}{\sqrt{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N f(i, j, k)^2 \cdot \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N g(i+P, j+Q, k+R)^2}} \quad (2)$$

C_{f_k} 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. 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. Fig.7은 3차원 상호상관 모형을 나타낸다.

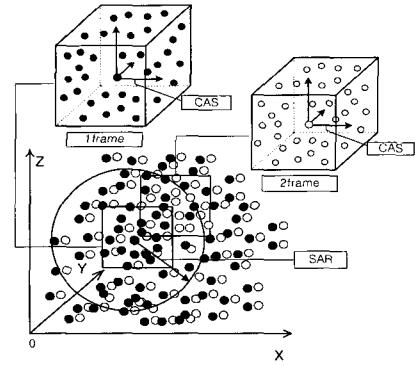


Fig. 7 3-D cross-correlation model

3. 실험장치 및 방법

3차원 고해상도 상호상관 PIV 알고리듬을 적용하기 위하여 Fig.8과 같은 PIV 계측시스템을 구성하였다. 오픈 순환 유동장에 계단식모형의 장애물을 설치하였다. 설치된 장애물에 의해서 인위적인 Vortex를 형성시켜 측면에서 유동장을 촬영하더라도 3차원성이 충분히 존재하도록 하였다. Fig.9는 원시 유동장을 나타낸다. 입자는 직경이 1mm인 나일론 입자를 사용하였고 조명은 할로겐 램프를 사용하여 전체 유동장을 고루 비추게 하였다.

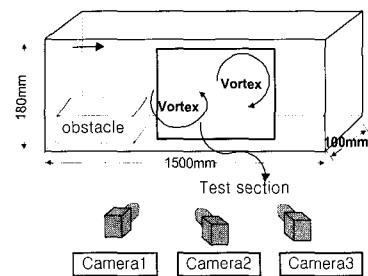


Fig. 8 Definition of measuring region

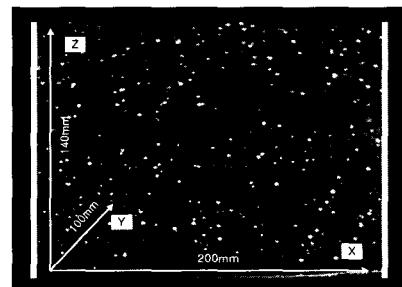


Fig. 9 Original image

4. 처리결과

3대의 카메라로 촬영한 영상들은 이미지보드를 통해 동시에 컴퓨터로 저장되며, 연속하는 두 프레임의 영상을 사용하여 고해상도 3차원 상호상관 PIV 알고리듬을 적용하였다. Fig.10은 카메라 보정과 스테레오 정합을 행하여 구한 3차원 좌표 데이터이며 기지의 3차원 절대 좌표와 비교하여 카메라 보정 정도를 검증하였다. Fig.11은 3대의 카메라 상에 찍힌 점들을 스트레오 정합하여 구한 3차원 좌표 값들이다. Fig.12는 첫 번째 프레임과 두 번째 프레임의 입자들을 대상으로 동일입자 추적을 행하여

구한 속도벡터이다. 동일입자 추적시 상관영역인 CAS는 $20 \times 20 \times 20$ (mm)로 설정하였고, 시점과 종점의 최대이동거리인 SAR은 7 (mm)로 설정하여 처리하였다. 총 64프레임 영상을 대상으로 조사하였을 때 스테레오 정합된 3차원 입자의 수는 평균적으로 한 프레임에 약 200개 정도이고 동일입자추적을 실시하여 구한 속도벡터는 약 170개정도 나타났다. 원시속도벡터에서 에러벡터 제거하고 수동에러처리 과정을 거쳐 $20 \times 10 \times 14$ 의 격자점에 재배하였고, Fig.13은 격자점에 재배치한 속도벡터를 나타내었으며. 격자점 재배치시 보간법은 3차원 거리역수 보간법을 사용하였다. Fig.14는 운동에너지지를 나타내었고, Fig.15, Fig.16, Fig.17은 속도벡터를 다양하게 표현한 것이다.

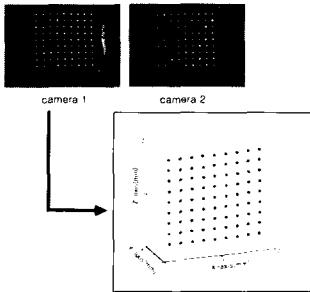


Fig. 10 3-D position of calibration image

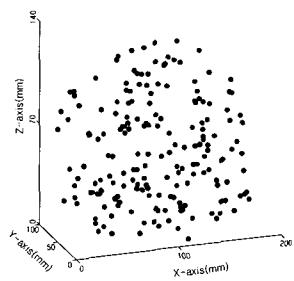


Fig. 11 3-D position of particles

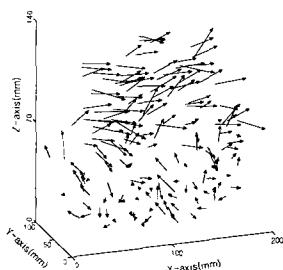


Fig. 12 Original vectors

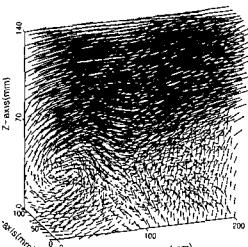


Fig. 13 Interpolation of original vectors

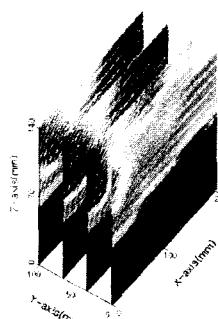


Fig. 14 Kinetic energy

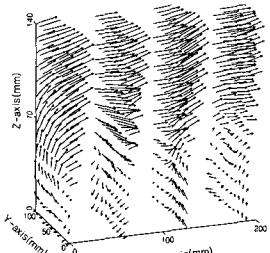


Fig. 15 Velocity vectors (X-skip)

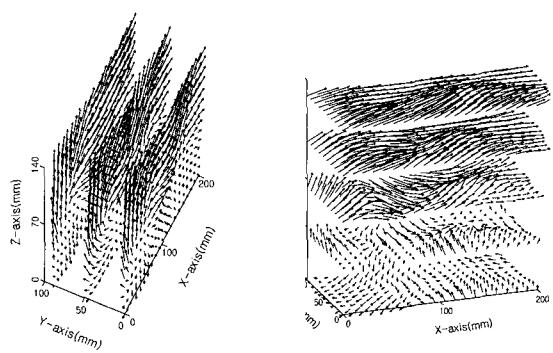


Fig. 16 Velocity vectors (Y-skip)

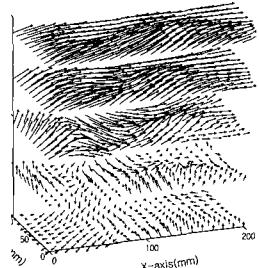


Fig. 17 Velocity vectors (Z-skip)

5. 결 론

본 연구에서는 3D Volume PIV에 의해 본격적인 3차원 유동장의 속도벡터를 연속적으로 획득하였다. 알고리듬개발에 있어서는 영상의 스테레오 정합시 에피폴라 라인을 구현하여 속도를 빠르게 하며 정합의 정도를 높였고, 3대의 카메리를 이용한 스테레오 정합 구현 및 3차원 속도벡터의 계산방법을 개발하여 2대의 카메리를 이용하여 3차원 속도벡터를 구하는 것보다 정도 높게 3차원 속도벡터를 획득하였다. 또한 연속하는 두프레임의 영상을 이용한 3차원 상호상관식을 개발하여 3차원 공간상에서 동일입자 추적을 행하므로 기존의 2차원 영상에서 연속된 여러 장의 프레임을 사용하여 속도벡터를 구하는 방법에 비해 속도벡터의 유효 숫자를 증가시켰고, 고속 유동장에서도 처리가 가능하게 되었다. 또한 연속의 방정식을 최대한 만족하도록 하는 효과적인 에러벡터 제거 방법을 제시하여 에러벡터를 제거하고 최종적인 속도벡터를 구하였다. 얻어진 속도벡터를 이용하여 운동에너지, 와도, 난류강도등을 구하였으며 3차원 애니메이션에 적용하였다. 향후에는 실험에 대한 다양한 검증과 해석이 필요하겠다.

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] 이석군, 1998, "CCD 사진기와 객체지향기법을 이용한 근거리 수치 사진 측량에 관한 연구", 연세대학교 박사논문.
- [4] Gerara Medioni and Ramakant Nevatia, 1982, "Segment-Based Stereo Matching, Computer Vision", Graphics and Image Processing, Vol. 3, pp.12-18.
- [5] 최장운, 이영호, 1996, "PIV에서의 보간기법의 평가에 관한 연구", 한국박용기판학회지 제20권4호, pp.90-100.