

3차원 Volume PIV의 개발

김미영[†] · 최장운^{*} · 남구만^{**} · 이영호^{***}
 (2002년 10월 10일 접수, 2003년 4월 29일 심사완료)

Development of 3-D Volume PIV

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

Key Words : 3-D PIV(3차원 PIV), Epipolar Line(에피폴라선), Stereo Matching(스테레오 정합), Collinear Equation(공선식), Collinear Line(공선), Cross-Correlation(상호상관), Orientation Parameter(표정요소), Erroneous Vector(오류벡터), Calibration(검정)

Abstract

A Process of 3-D Particle image velocimetry, called here, as "3-D volume PIV" was developed for the full-field measurement of 3-D complex flows. The present method includes the coordinate transformation from image to camera, calibration of camera by a calibrator based on the collinear equation, stereo matching of particles by the approximation of the epipolar lines, accurate calculation of 3-D particle positions, identification of velocity vectors by 3-D cross-correlation equation, removal of error vectors by a statistical method followed by a continuity equation criterion, and finally 3-D animation as the post processing. In principle, as two frame images only are necessary for the single instantaneous analysis 3-D flow field, 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 camera and a Halogen lamp illumination were adopted to capture the wake flow behind a bluff obstacle. Among 200 effective particles in two consecutive frames, 170 vectors were obtained averagely in the present study.

기호설명

C_{jk}	: 상호상관계수 [-]	G	: y [-] 에 관한 공선식
CVS	: 상호상관영역 [mm]	k_1, k_2	: 렌즈 왜곡 보정계수 [-]
D	: 발산 [-]	$O(X_0, Y_0, Z_0)$: 카메라 투영 중심 [mm]
DM	: 발산 역치값 [-]	$P(X, Y, Z)$: 입자지상좌표 [mm]
F	: x [-] 에 관한 공선식	$p(x, y)$: 입자사진좌표 [mm]
f	: 초점거리 [mm]	$R(a_{ij})$: 회전 행렬 [-]
\dagger 책임저자, 회원, 한국해양대학교 대학원 박사과정		SVR	: 탐색반경 [mm]
E-mail : iitpiv@hotmail.com		XYZ	: 3차원 위치값 [mm]
TEL : (051)403-1213 FAX : (051)403-0381		X_p, Y_p, Z_p	: $p(x, y)$ 의 지상좌표 [mm]
* (주)아이아이티 연구원		xyz	: 계의 카메라 좌표 [mm]
** 회원, (주)아이아이티 연구원		xy	: 계의 사진좌표 [mm]
*** 회원, 한국해양대학교 기계·정보공학부			

- x_0, y_0 : 이미지 중심에서부터 원 점의
 편향정도 [mm]
- $\Delta x, \Delta y$: 렌즈왜곡 [mm]
- ω : X축의 회전값 [deg]
- ψ : Y축의 회전값 [deg]
- χ : Z축의 회전값 [deg]

1. 서론

PIV⁽¹⁾(Particle Image Velocimetry)계측은 종래의 시간평균 점계측 기법과 비교하여 많은 장점을 제공하고 있다. 그 중에서도 3차원 PIV⁽²⁻⁵⁾는 열유체 유동의 현상을 3차원적으로 해석할 수 있는 가장 효과적인 계측기법으로 주목받고 있다. 유동장내의 3차원 속도성분의 비정상 계측은 단순한 속도성분 뿐만 아니라 유체공학적으로 유용한 보다 많은 정량적인 가시화 정보의 활용을 가능케 한다. 3차원 PIV 속도계측의 기본 원리는 스테레오 정합(stereo matching)⁽⁷⁾에 근거하며, 이것은 최종적으로 획득한 3차원 속도의 정확도에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 신뢰할 수 있는 3차원 속도계측을 위하여는 PIV 영상에 대한 스테레오 정합 기법에 관한 체계적인 연구가 필수적이며, 다음으로, 여기에서 얻어진 3차원 입자 공간좌표를 이용하여 속도벡터를 효과적으로 추출하기 위한 알고리즘의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 3대의 카메라를 동시에 사용하는 PIV 시스템을 이용하여 스테레오 영상정합을 수행하였으며 3대의 CCD카메라에 대한 검정(calibration)을 행하여 미지의 표정요소(orientation parameter) 값을 구하였다. 또한, 스테레오 정합을 행할 때 에피폴라선(epipolar line)을 구하여 대응함으로써 스테레오 정합의 정확도를 높게하고, 처리 시간을 단축하였다. 그리고, 미소 시간 간격을 갖는 2초의 연속된 3차원 공간입자좌표에 3차원 상호상관기법을 적용함으로써 유효속도를 효과적으로 획득할 수 있었다. 얻어진 3차원 속도벡터에는 오류벡터가 포함될 수 있다. 이를 해결하기 위하여 통계적인 방법과 함께 연속의 방정식에 기초한 3차원 확장기법을 제시하였다. 본 연구에서 제안한 3차원 volume PIV 기법의 알고리즘의 정확도와 처리시간에 대한 고찰은 본 연구의 지자가 발표한 참고문헌 (6)에 기록하였으며, 본 연구에서는 알고리즘을 실제 유동장에 적용하였다. 실제 유동장에 적용하기 위하여 3차원 개방형 순

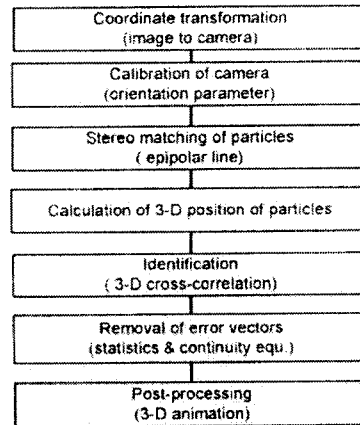


Fig. 1 Flow chart of 3-D PIV

환수조를 제작하고 입구 하단에 계단모형의 장애물을 설치하였다. 이때 발생하는 후류의 유동장을 대상으로 적용실험을 행하였으며 3차원 속도벡터, 운동에너지, 와도 등을 계산하고 동영상을 제작하였다.

2. 3차원 Volume PIV

2.1 처리순서

Fig. 1은 본 연구에서 제안한 3차원 PIV 속도계측의 흐름도이다. 먼저 3대의 카메라 및 1대의 이미지 그레버를 사용하여 영상을 획득하고, 얻어진 영상좌표에 공선식(collinear equation)을 적용하기 위하여 사진좌표로 바꾼다. 다음으로, 카메라 검정모델(camera calibrator)을 이용하여 각각의 카메라의 회전행렬요소 및 카메라 투영중심위치 등을 계산한다. 이어서, 2대의 카메라 영상입자에 대하여 스테레오 정합을 실시한다. 그리고 스테레오 정합을 보다 정확하게 수행하고, 처리속도를 빠르게 하기 위하여 에피폴라선을 구한다. 이렇게 얻어진 3차원 위치값, 즉 3차원 공간상의 시점(제1프레임)과 종점(제2프레임) 위치 값에 대하여 3차원 상호상관 알고리즘을 적용하여 공간상의 임의의 위치에 소재하는 다수의 속도벡터를 추출한다. 이렇게 얻어진 초기의 속도벡터에서 오류벡터를 통계적인 방법으로 제거한 다음 거리역수 보간을 이용하여 3차원 격자점상에 재배치하여 연속의 방정식을 적용하고, 이 식을 만족하지 못하는 벡터는 다시 오류벡터로 간주하여 제거작업을 반복한다. 최종적으로 격자점상에 배치된 속도벡터를 이용하여 운동에너지 등의 물리량을 구한다. 그리고 3차원유동장의 직관적인 이해를 돕기 위하여 애니메이션 파일을 제작하여 본

연구에서 제시한 3차원 volume PIV의 계측 효과를 증대시킨다.

2.2 영상좌표의 변환

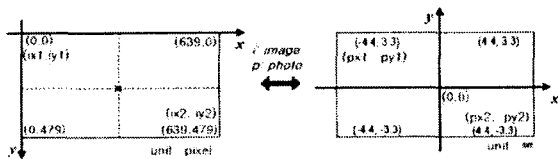
3차원 PIV에서는 유동장의 영상을 확보하기 위하여 2대 이상의 카메라를 배치한다. 여기에서는 아날로그형 CCD카메라 (모델명 : SONY XC-77RR)를 사용하였다. Table 1은 카메라의 제품 규격을 보여준다. Fig. 2의 (a)는 영상좌표계를 나타내며 이미지그래버(모델명:DT3154)를 이용하여 획득한 영상의 유효 픽셀 수는 640pixel x 480pixel이므로 영상의 좌상단 좌표값(ix1, iy1)은 (0, 0)이고, 우하단 좌표값(ix2, iy2)은 (639, 479)이다. Fig. 2의 (b)는 사진좌표계를 나타내며, CCD카메라의 촬상면적이 8.8mmx6.6mm이므로 중심에서부터 사진의 좌상단 좌표값(px1, py1)은 (-4.4, 3.3)이고, 우하단 좌표값(px2, py2)은 (4.4, -3.3)이다. 공선식을 만족하는 모든 값들은 길이 단위의 사진좌표계를 사용하므로 영상좌표를 사진좌표로 1:1 대응되도록 변환시켜야 한다.

2.3 카메라 표정요소 결정

Fig. 3에서 3차원 공간상의 임의의 한점 P(X, Y, Z)에 대하여 카메라 좌표계의 투영중심 O(X₀, Y₀, Z₀)와 사진 좌표계상의 p(x, y)를 연결하는 직선을 공선(collinear line)이라고 부른다. 한편, 3차원 PIV에서는 카메라 표정요소⁽⁸⁻¹⁰⁾를 구하기 위하여 정밀하게 제작된 카메라 검정모델이 필요하다. 카메라 검정모델에서 획득한 기지의 기준값을 이용하여 카메라 외부표정요소인 투영중심 O(X₀, Y₀, Z₀)와 회전값 ω, φ, x를 구한다.

Table 1 Specification of camera

Item	Specification
Cell number	768(H) × 493(V) [pixel]
Focal length	16 [mm]
Sensing area	8.8 × 6.6 [mm]



(a) Image coordinate (b) Camera coordinate
Fig. 2 Coordinate transformation

다음으로 5개의 내부표정요소, 즉, 카메라 초점 거리 f, 사진좌표상의 주점(principal point)의 위치 이탈량 x₀, y₀와 카메라 렌즈의 방사방향왜곡(radial distortion)계수인 k₁, k₂를 구한다. 이 경우에 카메라 표정요소를 구하기 위한 공선식은 식 (1)과 같다. 식 (1)은 비선형이므로 선형화가 필요하다. 카메라 검정모델의 3차원 기준점 (n ≥ 6)을 적용하여 Talyor 급수전개에 의해 선형화된 방정식을 풀어서 11개의 카메라 표정요소 값을 구한다. 선형화된 방정식은 최소자승법과 Newton-Raphson법⁽¹¹⁾을 사용하여 표정요소 해의 값이 수렴 할 때까지 반복해서 최종 해를 구한다. Table 2는 본 연구에서 구한 3대의 카메라에 대한 카메라 표정요소 값의 예를 나타내고 있다. 단, 지상좌표계의 원점은 카메라 검정모델의 좌하단에 위치한 좌표를 기준으로 하였다.

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

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

여기서 Δx, Δy는 비측정용 카메라(non-metric camera)에 대한 렌즈왜곡 보정량이고 식 (2)에 의하여 구할 수 있다.

$$\Delta x = x_0 + \bar{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4), \quad \Delta y = y_0 + \bar{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (2)$$

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

식 (1)의 a_{ij}는 식 (3)과 같이 정의된 회전행렬의 요소이다.

$$a_{11} = \cos \phi \cos x$$

$$a_{12} = -\cos \phi \sin x$$

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

$$a_{21} = \cos \omega \sin x + \sin \omega \sin \phi \cos x$$

$$a_{22} = \cos \omega \cos x - \sin \omega \sin \phi \sin x$$

$$a_{23} = -\sin \omega \cos \phi$$

$$a_{31} = \sin \omega \sin x - \cos \omega \sin \phi \cos x$$

$$a_{32} = \sin \omega \cos x + \cos \omega \sin \phi \sin x$$

$$a_{33} = \cos \omega \cos \phi \quad (3)$$

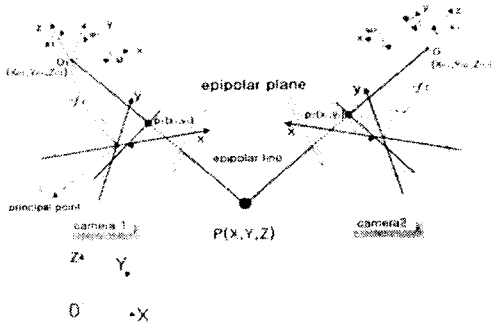


Fig. 3 Stereo matching

Table 2 Orientation parameters

	camera1	camera2	camera3
X_0	7.51(mm)	49.40(mm)	91.02(mm)
Y_0	-440.69(mm)	-451.32(mm)	-451.28(mm)
Z_0	34.17(mm)	33.34(mm)	32.62(mm)
ω	-91.94(deg)	-91.01(deg)	-90.92(deg)
ψ	-1.12(deg)	-1.00(deg)	-0.97(deg)
χ	12.34(deg)	-0.10(deg)	-2.69(deg)
f	22.94(mm)	23.96(mm)	23.26(mm)
x_0	2.9251(mm)	-0.1817(mm)	0.7620(mm)
y_0	0.5125(mm)	0.0160(mm)	0.0675(mm)
k_1	-0.2621(-)	-0.4810(-)	-0.7799(-)
k_2	0.0488(-)	-10.0999(-)	-0.2924(-)

2.4 스테레오 정합

Fig. 3과 같이 3차원 위치의 한 점 P를 2대의 카메라로 촬영하였을 경우 각각의 카메라에 한 점의 상 (p_1, p_2)이 찍히게 된다. 카메라의 투영중심 ($O(X_0, Y_0, Z_0)$)와 사진좌표의 점 $p(x, y)$ 와 지상 좌표의 점 $P(X, Y, Z)$ 가 일직선상에 있다는 공선식을 이용해서 카메라의 투영중심 ($O(X_0, Y_0, Z_0)$)와 사진좌표값 p_1, p_2 의 지상좌표에 대한 3차원 위치 (X_p, Y_p, Z_p)를 구할 수 있다. 또한 동일한 점을 촬영하였기 때문에 카메라 투영중심 (O_1, O_2)과 사진좌표값 (p_1, p_2)을 연결한 직선 $\overline{O_1p_1}$ 와 직선 $\overline{O_2p_2}$ 는 지상좌표 $P(X, Y, Z)$ 에서 만난다는 원리를 이용하여 기하학적으로 동일입자를 찾을 수 있다. 또한 카메라1에서 임의의 입자를 선택하였을 경우에 그 입자는 반드시 카메라2의 에피폴라선상에 존재하기 때문에 이 선을 구

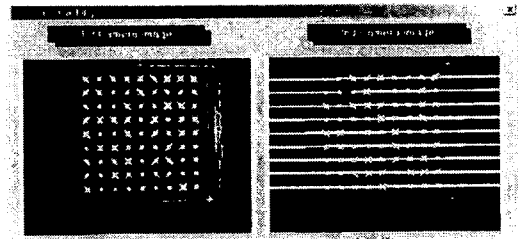


Fig. 4 Epipolar lines

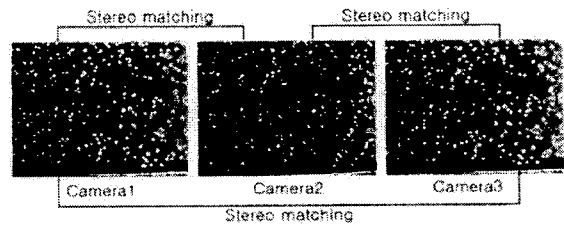


Fig. 5 Stereo matching of 3 cameras

함으로써 효과적으로 동일입자를 찾아낼 수가 있다. Fig. 4는 본 연구에서 제시한 기법을 나타내는 컴퓨터 화면상의 에피폴라선의 예이다. 또한 본 연구에서는 3대의 카메라를 이용하여 유동장의 3차원 속도벡터를 얻기 때문에 Fig. 5와 같이 동일계측 시간에 3회의 스테레오 정합이 가능하여 오류벡터의 발생을 줄일 수 있다.

2.5 3차원 좌표계산

스테레오 정합에 의하여 동일입자를 확인한 다음 공선식을 다시 적용하면 추적입자의 3차원 위치값 (X, Y, Z)을 지상좌표에서 찾을 수 있다. 관계식은 식 (4)와 같고, 회전행렬 R 이 직교행렬(orthogonal matrix)이므로 식 (5)같이 변환된다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_p - X_0 \\ Y_p - Y_0 \\ Z_p - Z_0 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} X_p - X_0 \\ Y_p - Y_0 \\ Z_p - Z_0 \end{bmatrix} = R^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = R' \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \\ = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad (5)$$

다음으로 공선식을 이용하면 식 (6)이 얻어진다.

$$\frac{X-X_0}{X_p-X_0} = \frac{Y-Y_0}{Y_p-Y_0} = \frac{Z-Z_0}{Z_p-Z_0} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)으로부터 식 (7)을 구한다.

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

$$Y = (Z-Z_0) \frac{a_{12}x + a_{22}y - a_{32}f}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}f} + Y_0 \quad (7)$$

다음으로 식 (7)을 이용하여 몇 가지의 수식 전개를 거쳐서 추적입자의 3차원좌표 (X, Y, Z)를 구할 수 있다.

2.6 3차원 volume 상호상관

3차원 volume 상호상관 PIV에서는 유동장 전체에 분포된 입자들에 대하여 스테레오 정합 및 3차원좌표 계산을 행하고 속도벡터를 추출한다. 제1프레임에 분포된 개개의 입자의 위치는 자동적으로 벡터의 시점이 된다. 그리고 제2프레임에 위치한 다수의 입자는 이들 벡터의 종점후보가 될 수가 있다. 속도벡터의 종점을 구하기 위하여 우선 3차원 전체 공간을 이진화(binazation)한다. 제 1 프레임과 제 2 프레임의 3차원 공간에 대하여 입자가 존재하는 위치 값을 1을, 존재하지 않는 위치 값은 0을 주어 3차원 공간 전 영역을 이진화 한다. 이 경우에 벡터의 종점을 구하기 위한 상호상관식은 식 (8)과 같다.

$$C_{pq} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N f(i, j, k)g(i+P, j+Q, k+R)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N f(i, j, k)^2 \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N g(i+P, j+Q, k+R)^2}} \quad (8)$$

C_{pq} 는 부차원 상관계수이며, 0~1값을 가진다. $f(i, j, k)$, $g(i+P, j+Q, k+R)$ 는 상관영역에서 이진화를 행한 값이고, P, Q, R 은 제 2 프레임의 좌표 값 (i, j, k) 에서 상관영역의 중심이 이동한 거리이며 최대이동 거리(Searching Volume Radius, SVR) 이하의 값을 가진다. 속도벡터를 찾기 위하여 제 1 프레임의 하나의 입자도심(centroid)을 속도벡터의 시점으로 하고 이를 중심으로 적절한 크기의 $L \times M \times N$ 의 상관영역(Correlation Volume Size,

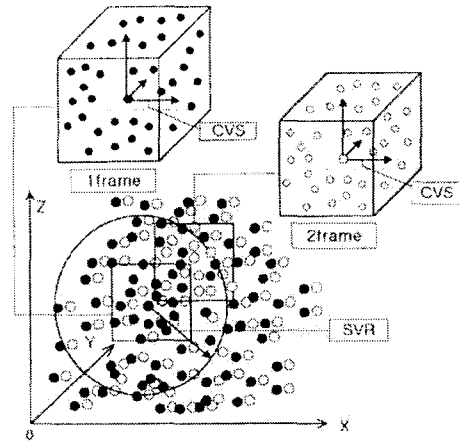


Fig. 6 Concept of 3-D cross-correlation

CVS)을 설정한다. 제 2 프레임 상에서 미리 예측한 입자의 최대이동거리(Searching Volume Radius, SVR) 이내에 있는 모든 입자의 도심을 중심으로 제 1 프레임과 같은 크기의 상관영역을 설정한다. 식 (8)을 이용하여 이 영역 안에서 최대 상관값(C_{pq})을 가지는 제 2 프레임의 입자의 도심위치를 속도벡터의 종점으로 한다. 이러한 과정으로 제 1 프레임상의 모든 입자에 대하여 속도벡터를 구한다. Fig. 6은 3차원 volume 상호상관 기법의 개념도를 나타낸다.

2.7 오류벡터 처리

PIV를 사용하여 얻어진 속도벡터는 부정확한 카메라검정 및 스테레오정합, 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 제거한다.

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

$$\bar{X} = \sum_{k=1}^N X_k / N$$

여기서, S 는 표준편차, N 은 측정개수, 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 측

정치의 주위 참조 속도값 수 N 을 8로 하였고, τ 의 값으로는 0.7~1.2 사이의 값을 취하여 오류백터를 검출하였다. 그러나 식 (9)의 통계적인 방법만으로는 완벽하게 오류백터를 제거할 수는 없다. 따라서 이러한 속도백터를 가지고 보간을 행하면 잘못된 백터 값이 주변으로 전파된다. 이를 방지하기 위하여 PIV에 의해 계산된 속도백터 분포에 주목하여 국소적인 흐름의 연속성을 기본으로 하는 알고리즘을 확장하여 오류백터를 정도 높게 검출할 수 있는 방법을 채택하였다. "속도백터가 오류백터이면 국소적인 흐름의 연속성이 파괴된다"라는 전제조건 하에서 주목하고 있는 격자점 근방 영역의 속도정보로부터 속도의 공간 변화량을 고차정도의 차분식으로 계산하고 이 값을 이용하여 오류백터를 검출한다. 격자점 $P(i, j, k)$ 의 주변 흐름에 대하여 2차정도의 편속차분식으로 연속의 식을 근사적으로 표현한다. 전진차분과 후퇴차분을 사용하면 x, y 방향의 속도의 변화량은 식 (10)으로 표현된다. 검출방법은 점 P 의 백터를 포함함으로써 흐름의 연속성이 만족되지 않는 경우, 즉, 식 (10)의 D 값이 식 (11)의 역치 DM 을 넘을 때에는 점 P 의 속도백터는 오류백터로 판단한다. 식 (10)과 식 (11)은 x 방향에 대한 것만 나타내며 y 와 z 방향은 편의상 생략한다.

$$\left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_f = \frac{-3u(i, j, k) + 4u(i+1, j, k) - u(i+2, j, k)}{2\Delta x}$$

$$\left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_b = \frac{u(i-2, j, k) - 4u(i-1, j, k) + 3u(i, j, k)}{2\Delta x}$$

$$\left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} = \text{Min} \left\{ \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_f, \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_b \right\}$$

$$Dx(i, j, k) = \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_{\min} + \left[\frac{\partial w}{\partial z} \right]_{\min} \right| \quad (10)$$

$$\left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{DM} = \left| \frac{u(i-2, j, k) - 8u(i-1, j, k)}{12\Delta x} \right| - \left| \frac{u(i+2, j, k) - 8u(i+1, j, k)}{12\Delta x} \right|$$

$$DM(i, j, k) = \left\{ \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{DM} \right| + \left| \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_{DM} \right| + \left| \left[\frac{\partial w}{\partial z} \right]_{DM} \right| \right\} \quad (11)$$

3. 3차원 PIV 실험

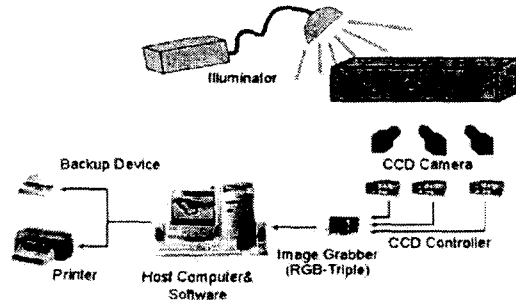


Fig. 7 3-D PIV system

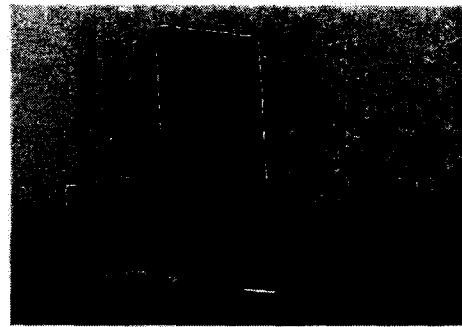


Fig. 8 Camera calibrator

3.1 시스템 구성

본 연구에서 채택한 3차원 PIV 시스템은 Fig. 7과 같이 개방형 순환수조, 계속유동장 전체를 비출 수 있는 할로젠 조명램프(100W), 카메라 검정모델, 3대의 아날로그 CCD카메라, 이미지그래버, 그리고 PC로 구성된다. Fig. 8은 깊이 방향(카메라방향)의 이동정도가 0.01mm인 카메라 검정모델을 보여준다. 이 모델은 크기가 가로100mm x 세로 100mm인 얇은 금속평판이며, 여기에 10mm씩 등간격(가로9개 x 세로9개)으로 직경이 0.3mm인 원을 정도높게 그려 넣었다. 깊이 방향으로 회전트래버싱 손잡이를 이용하여 10mm씩 9회 움직여서 공선식에 사용되는 3차원 지상좌표를 얻는다. 따라서 기준점은 729개(가로9×세로9×깊이9)개이다.

3.2 실험방법

제안된 3차원 volume 상호상관 PIV기법을 적용하기 위하여 Fig. 9와 같은 개방형 순환 유동장에 계단식 모형의 장애물을 설치하였다. 설치된 장애물에 의해서 후류를 발생시켜 측면에서 유동장을 촬영하더라도 3차원성이 충분히 존재하도록 하였다. Fig. 10은 주적입자가 포함된 원시

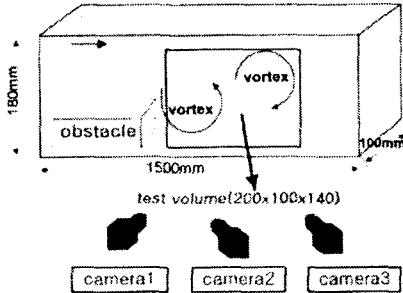


Fig. 9 Definition of measuring region

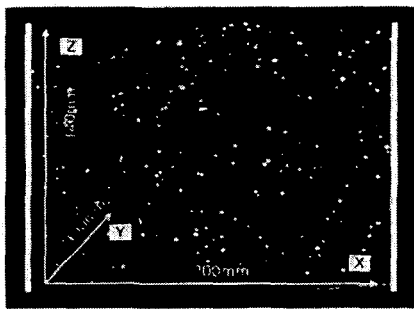


Fig. 10 Original image

Table 3 Experimental condition

Flow	tapping water
Camera	SONY XC-77RR (768pixel x 493 pixel)
Camera Number	3
Particle	Nylon12 (1mm)
Illuminator	Hallogen type lamp(100W)
Water Flow Size (H,D,V)	1500mm X 100mm X 180mm
Test Section Size (H,D,V)	200mm X 100mm X 140mm

유동장을 나타내며 Table 3은 실험조건을 나타낸다. 3차원 실험에서 추적입자를 먼저 유동장에 투입하기 전에 카메라 표정요소 정보를 얻기 위한 카메라 검정 실험이 중요하다. 이때 카메라 검정 모델을 촬영할 유동장 안에 넣고 검정작업을 실시함으로써 물에 대한 카메라 곡률 손실을 줄일 수 있었다. 입자의 투입은 산란성이 좋은 평균 직경이 1mm인 나일론 입자를 사용하였다. 이때에 유동장 전체에 균일하게 입자를 분포시키되, 입자의 겹침을 최소한으로 줄임으로서 입자의 도심좌표의 정확도 및 이후의 제반 계산정도를 향상시켜 오류백터의 수를 감소시키는 것이 필요하다. 조명으로서는 할로겐램프(백색, 출력

100W, 화이버가이드부착)을 사용하여 유동장 전체를 균일하게 조사시켰으며, 3대의 카메라는 편의상 후류의 한쪽 벽면 근처에 근접하여 배치하였다.

4. 처리결과

카메라로 촬영한 영상들은 이미지그래버를 통해 동시에 컴퓨터로 저장되며, 연속된 두 프레임의 영상조합을 채택하여 3차원 volume PIV 기법을 적용하였다. Fig. 11은 카메라 검정모델에 대하여 스테레오 정합을 행하여 구한 3차원 좌표데이터의 예이다. Fig. 12는 3대의 카메라에 존재하는 입자들을 스테레오 정합하여 구한 3차원 좌표 값들의 예이다. 3차원 공간에서 이진화된 입자의 직경은 1mm로 설정하였다. 다음으로, Fig. 13은 두 프레임의 3차원분포 입자들을 대상으로 상호상관계산으로 구한 3차원 속도벡터들이다. 벡터를 추적할 때의 상호상관영역(Correlation Volume Size, CVS)은 20mm x 20mm x 20mm로 설정하였고, 시점과 종점의 최대이동거리인(Searching Volume Radius, SVR)은 7mm로 설정하여 처리하였다. 총 64프레임 영상을 대상으로 조사하였을 때 스테레오 정합된 3차원 동일입자의 수는 평균적으로 프레임당 약 200개 이고 속도벡터는 약 170개를 획득할 수 있었다. 구해진 속도벡터의 범위는 0~1.6(m/sec)이며 평균속도는 0.67(m/sec)로 나타났다. Fig. 14는 2대의 카메라를 사용하여 3차원 속도벡터를 구한결과이며 Fig. 15는 Fig. 14와 동일한 조건에서 3대의 카메라를 사용하여 속도벡터를 구한 결과이다. 카메라 2대와 3대를 사용하여 총 64프레임의 영상을 대상으로 속도벡터를 비교하여 오류백터를 구한 결과 Fig. 14 ~ Fig. 15에서와 같이 2대의 카메라를 사용하여 속도벡터를 구하는 것 보다 3대의 카메라를 사용하여 속도벡터를 구하는 경우에 오류백터가 줄어들었다. 원시속도벡터에서 통계적인 방법으로 오류백터를 제거하고 수동애러처리 과정을 거친 다음 격자점에 재배치하였다. Fig. 16은 이때의 속도벡터를 나타내며, 격자점 재배치시의 보간법으로는 3차원 거리역수 보간법⁽¹²⁾을 사용하였다. 다음으로 연속의 방정식을 사용하여 오류백터를 제거하여 최종적인 백터분포를 구하였다. 얻어진 속도벡터를 이용하여 운동에너지,

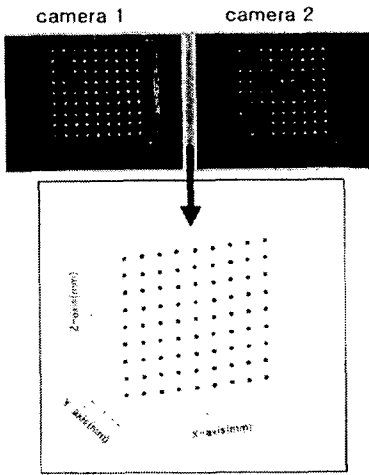


Fig. 11 3-D position of calibration image

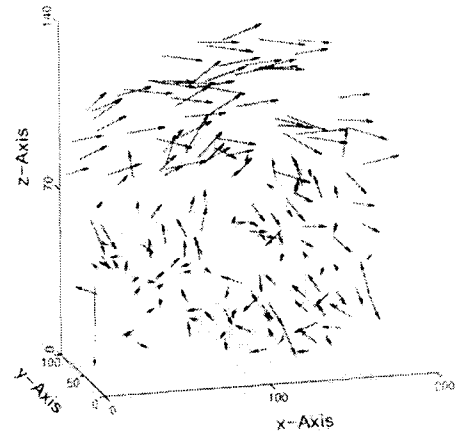


Fig. 14 Velocity Vectors using two images

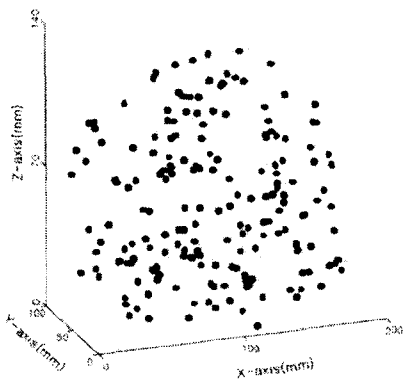


Fig. 12 3-D position of particles

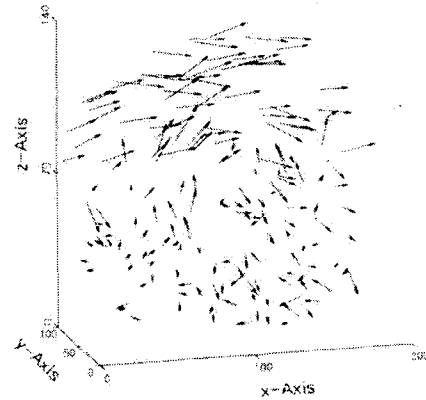


Fig. 15 Velocity Vectors using three images

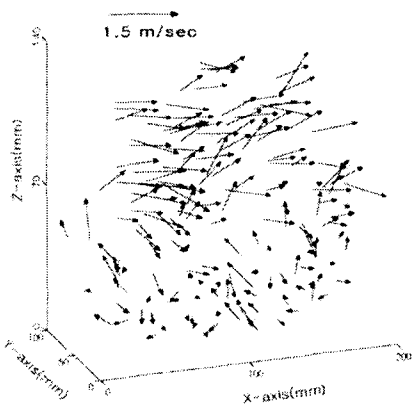


Fig. 13 Original vectors

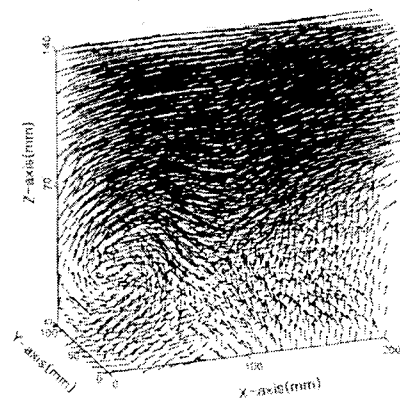


Fig. 16 Interpolation of discrete vectors

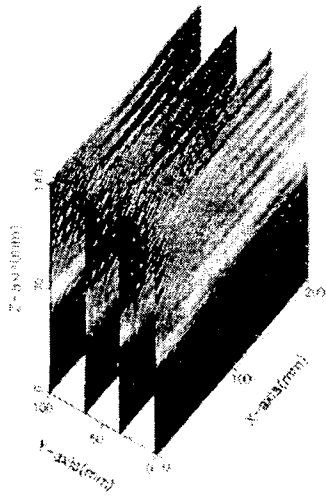
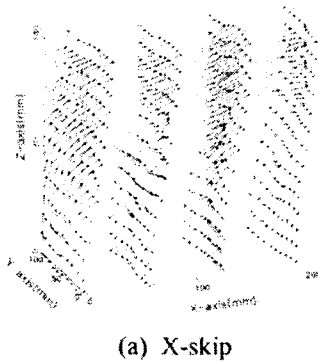
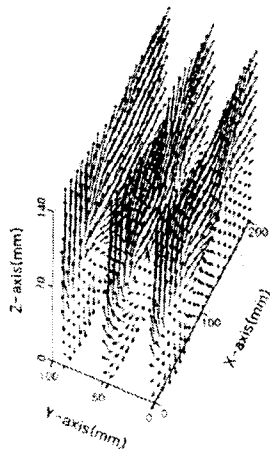


Fig. 17 Kinetic energy with velocity vectors



(a) X-skip



(b) Y-skip

Fig. 18 Distribution of velocity vector

와도, 등을 구하였으며 3차원 애니메이션 영상제작에 이용하였다. Fig. 17은 속도벡터와 운동에너지를 나타내며, Fig. 18의 (a), (b)는 속도벡터를 바라보는 시점에 따라 벡터분포단면을 등간격으로 스킵하여 다양하게 표현한 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 본격적인 3차원의 유동장의 속도벡터를 PIV로 계측하기 위하여 상호상관계수를 이용한 2프레임의 3차원 volume PIV 기법을 제안하였다. 영상의 스테레오 정합시 에피폴라 라인을 이용하여 영상정합의 정확도를 높이고, 처리속도를 빠르게 하였으며, 3대의 카메라를 이용한 스테레오 정합 및 3차원 속도벡터의 계산 방법을 적용함으로써 2대의 카메라를 이용하여 속도벡터를 구하는 것 보다 정도 높게 속도벡터를 획득하였다. 또한, 두 프레임을 이용한 3차원 상호상관식을 적용하여 속도벡터의 종점을 구하므로 연속된 여러 장의 프레임을 사용하여 속도벡터를 구하는 종래의 방법에 비하여 유효속도벡터의 수를 증가시켰다. 또한, 오류벡터의 제거에는 통계적인 방법과 함께, 연속의 방정식을 최대한 만족하도록 하는 기법을 제시하였다. 제안된 기법을 유동장에 적용하기 위하여, 개방형순환수조에 맞춤형 장애물을 설치하여 후류를 발생시켰으며, 3대의 아날로그카메라 및 할로겐램프를 이용하여 영상을 확보하였다. 카메라 당 평균 200개의 유효입자를 얻었으며, 이를 이용하여 약 170개의 유효벡터를 효과적으로 확보할 수 있었다. 향후에는 3차원 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) Santiago, J.G., Wereley, S. T and Adrian, R. J., 1998, "A Particle Image Velocimetry System for Microfluidics," *Exp. in Fluids*, 25, pp. 316~319.

- (2) Raffel, M., Gharib, M. and Kompenhans, J., 1995, "Feasibility Study of Three-Dimensional PIV by Correlating Images of Particles Within Parallel Light Sheet Planes," *Exp. in Fluids*, 19, pp. 69~77.
- (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) Sata Y. and Kasagi N., 1992, "Improvement Toward High Measurement Resolution in Three-Dimensional Particle Tracking Velocimetry," *Flow Visualization VI*, Tanida et al., ed., pp. 792~796.
- (5) Suzuki Y., Ikenoya M. and Kasagi N., 1999, "Three-Dimensional PTV Measurement of the Phase Relationship Between Coherent Structures and Dispersed Particles in a Turbulent Channel Flow," 3rd Int. Workshop on Particle Image Velocimetry, Santa Barbara, pp. 107~112.
- (6) 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.
- (7) Park, H. J., 1995, "A Study on Stereo Matching Techniques for Photogrammetric Orientations," Doctor Thesis of SungKyunKwan University.
- (8) 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.
- (9) EI-Hakim, S.F., 1986, "Real Time Image Metrology with CCD Cameras," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 52, pp.1757~1766
- (10) Hanung, H.H., 1986, "Digital Ortho-photo Mapping using non-metric cameras," Ph. D. Thesis of the Univ. of Wisconsin-Madison
- (11) Lee, K. S., 1999, "Numerical Methods for Engineers," Won-Hwa, pp. 66~69, pp. 259~275.
- (12) Kim, Y.H., 1996, "A Study on PIV Measurement by Correlation Method," Master Thesis of Korea Maritime University.