정규상호상관도를 이용한 입체 입자영상유속계 알고리즘 개발

오정근*, 김유철*, 류민철**, 고원규***, 서정천†*

서울대학교 조선해양공학과 해양시스템공학연구소*
대우조선해양㈜**, 서울대학교 조선해양공학과***

Development of Algorithm for Stereoscopic PIV
using Normalized Cross-correlation

Jungkeun Oh*, Yoo-Chul Kim*, Min-Cheol Ryu**, Won Kyou Koh***
and Jung-Chun Suh†*

RIMSE, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University*
Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., Ltd.**
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University***

Abstract

Contrary to the conventional single-point measuring devices such as LDV, pitot-tube, hot-wire, etc., it would be possible to measure instantaneously 3-D flow fields with a stereoscopic PIV system. In this paper, we present an analysis algorithm for a stereoscopic PIV system using the normalized cross-correlation (NCC) and a 3-D calibration based reconstruction method. The evaluation method based on NCC is one of the most accurate correlation-based methods. We validated the developed algorithm through a benchmarking comparison with 3-D artificial SPIV images and calibration target images.

※Keywords: Particle image velocimetry(입자영상유속계), Stereoscopic PIV(입체입자영상유속계), Normalized cross-correlation(정규상호상관도)

1. 서론

대부분의 유동현상은 3 차원 구조로 되어있다. 특히 선체 주위의 유동이나 프로펠러 주위의 유동은 매우 복잡한 구조로 되어있다. 이러한 유동구조를 파악하기 위하여 실험과 수치계산을 이용한 많은 연구들이 수행되고 있다. 유동구조를 파악하

기 위한 실험적 연구들은 대부분 피토관(pitot-tube), 열선(hot-wire), 레이저유속계(LDV) 등의 점측정 방식으로 이루어 지기 때문에 전체 유동장의 구조를 한 순간에 동시 측정하는 것이 불가능하며 순간 유동장이 아닌 평균 유동장을 예측하기 때문에 유동장의 순간적인 변화를 알기 힘들다. 최근에는 이와 같은 문제점을 보완할 수 있는 2 차원 입자영상유속계(particle image velocimetry, PIV) 기법을 이용한 실험적 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 선박의 반류나 프로펠러 주위의

접수일: 2007 년 2 월 1 일, 승인일: 2007 년 11 월 13 일

†교신저자: jungsuh@snu.ac.kr, 02-880-7341

유동과 같은 복잡한 유동을 PIV 기법을 이용하여 계측하고 있다(이상준 등 2002, 이상준과 백부근 2003, 이상준과 백부근 2004). 또한, 난류 유동 해석(이인원 등 2004) 및 날개 끝단의 와류 유동 해석에도 PIV 기법이 사용되고 있다(현범수와 김무룡 2006). 한편, 이러한 실험적 연구들은 2 차원 PIV 기법을 이용하였으므로 계측면을 관통하는 속도 성분을 계측할 수 없으며 이 속도 성분에 의한 오차를 피할 수 없다. 따라서 계측면을 관통하는 속도 성분을 포함하는 3 차원 PIV 기법이 필요하다. 3 차원 PIV 기법들 가운데 가장 보편적으로 활용되고 있는 방법이 입체 입자영상유속계(stereoscopic PIV, SPIV)이다. SPIV 는 전체 유동장을 한 순간에 관측할 수 있기 때문에 유동 구조를 파악하기 쉬우며, 순간적인 유동장의 변화를 알 수 있고, 유동장에 교란을 주지 않는 장점이 있다. SPIV 는 2 대의 카메라를 이용하여 영상을 획득한 후, 각각의 영상을 2 차원 PIV 해석 알고리즘을 이용하여 분석한 후, 두 영상의 결과로부터 3 차원 성분을 얻어내는 기법이다

한편, PIV 해석 알고리즘에서 속도벡터를 얻는 방법으로는 Willert and Gharib(1991)의 영상의 밝기로 상호상관도를 나누는 방법, Huang et al.(1993)과 Fincham and Spedding(1997)가 사용한 정규상호상관도(Normalized cross-correlation, NCC) 방법 그리고 Gui and Merzkirch(2000)의 MQD(Minimum Quadratic Difference) 방법 등 여러 가지의 방법이 알려져 있다. 이와 같은 방법들 중에서 가장 정확한 결과를 보이는 방법은 NCC 방법이다(Pust 2000, 류권규 등 2005). 다만, NCC 의 단점은 계산속도가 느리다는 것인데 이것은 김진 등(2004)과 류권규 등(2005)에서 제시한 연속덧셈방법과 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용하여 보완할 수 있다.

SPIV 에서 3 차원 속도를 해석하는 방법으로는 광선 추적법(ray tracing method)과 교정시험방법(calibration method)이 있다. 광선 추적법은 실험 세팅에 관한 모든 거리 정보를 알아야지만 가능하기 때문에 수행하기가 까다롭다. 교정시험방법은 2 차원 교정시험방법과 3 차원 교정시험방법으로

나눌 수 있는데 2 차원 교정시험방법도 역시 대부분의 거리 정보를 알아야지만 가능하다. 3 차원 교정시험방법은 거리 정보를 필요로 하지 않기 때문에 상대적으로 수월하게 수행할 수 있다. 3 차원 교정시험방법은 Soloff et al.(1997)이 계측면과 영상면 사이의 관계를 3 차 다항식(x,y 는 3 차, z 는 2 차)으로 표현하는 방법을 제시하였으며 Hill et al.(2000)은 z 를 4 차로 하는 다항식을 이용하는 방법을 사용하였다(본 논문에서 사용한 좌표계는 Fig. 7과 같으며 유동의 흐름 방향을 z 방향, 계측면을 x-y 평면으로 하였다).

본 논문에서는 2 차원 PIV 해석 알고리즘 중에서 속도벡터를 구하는 방법으로 연속덧셈방법과 FFT 를 통한 NCC 를 이용하는 오정근 등(2005)의 방법에 더하여, 3 차원 교정시험방법을 통한 보다 정확한 3 차원 속도를 구하는 SPIV 해석 알고리즘을 개발하였다. 개발된 SPIV 해석 알고리즘은 3 차원 가상이미지를 이용하여 검증하였다.

2. 입체입자영상유속계(SPIV)

2.1 정규상호상관도

SPIV 해석 알고리즘은 크게 나누면 한 쌍의 영상을 분석하는 과정과 분석된 결과를 이용하여 3 차원 성분을 얻어내는 과정으로 나눌 수 있다. 이 중, 영상을 분석하는 과정에서는 2D PIV 해석 알고리즘을 이용한다. 본 논문에서는 2D PIV 해석 알고리즘에서 속도 벡터를 얻는 방법으로 가장 정확하다고 알려진 NCC 를 이용하였다. NCC 는 Eq.(1)로 표현되며 각 기호는 Fig. 1과 같다.

$$C_{II'}(x,y) = \frac{\sum_{i,j}^M \sum_{i',j'}^N I(i,j)I'(i',j') - \bar{I}\bar{I'}}{\sqrt{\sum_{i,j}^M \sum_{i',j'}^N I^2(i,j) - MN\bar{I}^2} \sqrt{\sum_{i,j}^M \sum_{i',j'}^N I'^2(i',j') - MN\bar{I'}^2}} \quad (1)$$

$C_{II'}$: normalized cross-correlation coefficient between I and I'
 I : interrogation window of the 1st image
 I' : searching window of the 2nd image
 $\bar{I}$: the average of pixel values of I
 $\bar{I'}(x,y)$: the average of pixel values of I' overlapped with I at (x,y)

Fig. 1 Notation of cross-correlation

M, N : Interrogation window size of 1st image

M', N' : Searching window size of 2nd image

i : x-dir. pixel index on the interrogation window of the 1st image

j : y-dir. pixel index on the interrogation window of the 1st image

x : x-dir. position of interrogation window on the searching window of the 2nd image

y : y-dir. position of interrogation window on the searching window of the 2nd image

Eq.(1)의 분자는 각 픽셀값에서 미소조사영역(interrogation window)과 탐색영역(searching window)의 픽셀값의 평균을 뺀 값으로 계산한 상호상관도(cross-correlation)를 의미하고, 분모는 미소조사영역과 탐색영역의 픽셀값에 대한 표준편차를 의미한다. 이 NCC를 이용하면 레이저의 세기 즉, 영상에서 입자들의 밝기에 영향을 받지 않고 입자 분포 패턴의 영향만을 고려할 수 있다.

Eq.(1)을 Fig. 1에 표시한 x, y 에 대하여 모두 계산하면 가장 큰 $C_{II}(x, y)$ 를 알 수 있으며 탐색영역의 중앙에서부터 이 때의 (x, y) 까지가 미소조사영역의 이동거리가 된다. 이러한 과정을 획득한 영상 전체에 대하여 계산하면 영상 전체에 대한 벡터장을 얻을 수 있다.

Fig. 2 Translation system for SPIV (Prasad 2000)

Fig. 3 Angular displacement system for SPIV (Prasad 2000)

2.2 카메라 세팅에 따른 SPIV 시스템 및 특성

카메라 세팅에 따라 SPIV 시스템을 크게 2가지로 분류할 수 있다 (Prasad 2000). Fig. 2와 같이 카메라와 계측면이 평행한 시스템을 translation system 이라고 하고 Fig. 3과 같이 카메라와 계측면이 각을 이루는 시스템을 angular displacement system 이라고 한다. Translation system 은 실험을 수행하기가 수월하나 계측영역이 작고 계측 오차가 상대적으로 많다는 단점이 있고, angular displacement system 은 계측영역이 넓고 계측 오차가 상대적으로 적으나 영상이 왜곡되고 초점을 맞추기가 어렵기 때문에 실험을 수행하기가 까다롭다.

그러나 2.3 절의 3 차원 교정시험방법으로 왜곡 영상에 대한 문제가 해결되며, 초점을 맞추는 것은 Fig. 4와 같은 샤임플러그 조건(Scheimpflug condition)으로 해결할 수 있다. 샤임플러그 조건을 간단히 설명하면, 피사체의 가까운 부분과 먼

Fig. 4 Scheimpflug condition for adjusting the focus in the angular displacement system

부분에 동시에 초점을 맞추기 위한 조건으로서, Fig. 4와 같이 물체면(O-plane), 렌즈면(L-plane), 영상면(I-plane)이 한 곳(C)에서 만나게 하면, Eq.(2)와 같이 물체면과 영상면의 모든 위치에서 가우스(Gauss) 렌즈공식을 만족하여 피사체 전체에 대하여 초점을 맞출 수 있게 된다. 따라서 계측영역이 넓은 angular displacement system을 사용하는 것이 유리하다.

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{\phi / \cos \theta}, \quad \phi: \text{focal length} \quad (2)$$

2.3 SPIV 해석 알고리즘

본 논문에서는 Fig. 5와 같이 격자 모양의 교정 표적(calibration target)을 이용한 3 차원 교정시험 방법을 이용하여 SPIV 해석 알고리즘을 구성하였다. 이 방법은 대다수의 SPIV 해석 알고리즘에서 적용하는 방법이며 격자 모양의 교정표적뿐만 아니라 간격이 일정한 원형 모양의 표적도 많이 사용하고 있다.

3 차원 교정시험은 Fig. 7과 같이 계측하고자 하는 면을 중심으로 Fig. 5의 교정표적을 $\pm z$ 방향으로 움직이면서 Fig. 6과 같은 영상들을 획득한 후, 교정표적의 좌표(x,y,z)와 영상에서의 좌표(X,Y) 사이의 관계를 얻어내어 3 차원 해석을 수행하는 방법이다. 보통 레이저 평면의 두께는 수 mm 정도 이기 때문에 교정표적은 z 방향으로 0.1mm~0.5mm 정도로 움직이면서 좌,우의 카메라를 이용하여 영상을 획득한다. 교정표적과 영상의 좌표들 간의 관계를 구하기 위해서는 계측면(Fig. 7에서 $z=0.0$)을 포함하여 최소한 3 곳에서

영상을 획득하여야 하며, 통상적으로 10~20 개의 위치에서 영상을 획득한 후 관계를 구하는 것이 보다 정확하다.

단계별로 살펴보면 다음과 같다.

Fig. 5 Calibration device

Fig. 6 Left and right images of the calibration target

Fig. 7 3D calibration process: several locations of the calibration target

a. 영상 좌표 찾기

본 논문에서는 획득한 영상에서 좌표를 찾기 위하여 Fig. 8과 같은 모양의 영상 조각을 이용하였다. 3 차원 교정시험으로부터 얻은 각각의 좌, 우 영상들과 Fig. 8의 영상 조각의 상호상관도를 Eq. (1)을 사용하여 계산한 후 픽셀 단위 이하로 추정하는 방법(오정근 2006)을 이용하면 Fig. 9과 같은 상호상관값을 구할 수 있으며 이 결과로부터 좌표를 찾을 수 있다. Fig. 9에서 3 차원으로 보인 그림은 상호상관값을 의미하며, 영상에서의 좌표에 해당하는 곳은 상호상관값이 매우 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 2 차원으로 확대한 그림으로 살펴보면 보다 정확하게 알 수 있다. 이렇게 찾은 영상 좌표의 예를 Fig. 10에서 보이고 있다.

Fig. 8 '+' mask template to find points on calibration images

Fig. 9 Correlation plane of calibration image and '+' mask template

b. 교정표적의 좌표와 영상좌표의 관계식

교정표적의 좌표(x, y, z)는 예측하고자 하는 영역 및 목적에 맞게 임의로 설정하며, a.에서 구한 영상에서의 좌표와 대응시킨다. 예로서, Fig. 10는 왼쪽 카메라로부터 얻은 영상인데, 교정표적의 좌표를 임의로 정하고(교정표적의 원점을 Fig. 11과 같이 정하고) 그에 해당하는 영상좌표와 대응시킨다. 이와 같이 모든 점들을 좌, 우 카메라 영상에 대하여 대응시킨다. 그러면 교정표적의 좌표와 영상좌표 사이의 관계를 Eq.(3)과 같이 표현할 수 있다.

Fig. 10 Found points of an image

Fig. 11 Coordinates relation between calibration target and image at $z=0.0\text{mm}$

$$\begin{aligned} \underline{X} &= F(\underline{x}) \\ \underline{X}: \text{영상 좌표(Image Plane)} \\ \underline{x}: \text{교정 표적의 좌표(Object Plane)} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 관계식을 3 차 다항식으로 가정하여 Eq.(4)와 같이 나타낼 수 있다.(Soloff et al. 1997)

$$\begin{aligned} F(\underline{x}) &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 \\ &+ a_7xz + a_8yz + a_9z^2 + a_{10}x^3 + a_{11}x^2y + a_{12}xy^2 \\ &+ a_{13}y^3 + a_{14}x^2z + a_{15}xyz + a_{16}y^2z + a_{17}xz^2 + a_{18}yz^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Eq.(4)에서 다항식의 계수들은 왼쪽, 오른쪽 영상의 X, Y 에 따라 달라진다. 다시 말하면, 왼쪽 영상의 X, Y, 오른쪽 영상의 X, Y 총 4 개 ($F_x^L, F_y^L, F_x^R, F_y^R$)의 관계식을 찾아야 한다. 이 4 개의 관계식을 얻는 방법은 보통 최소자승법(least square method)를 이용하는데 본 논문에서는 특이값분해(singular value decomposition)를 사용하였다. 계산하고자 하는 행렬의 랭크(rank)가 낮을 경우에 최소자승법의 해는 특이값을 포함할 수 있는데, 특이값분해는 안정적으로 근사해를 구할 수 있다. 다만, 특이값분해의 계산 시간이 최소자승법의 계산 시간보다 수 초 정도 더 소요된다. 그러나 전체 계산에서 단 한번만 수행하며, 이 정도의 소요시간은 전체 계산량에 비하여 매우 짧은 시간이므로 큰 문제는 없다.

c. 속도 벡터 계산

우선, 좌, 우의 영상을 각각 NCC 를 이용한 2 차원 PIV 해석 알고리즘을 이용하여 각각을 계산한다. 그 결과 각각의 영상에서 입자의 이동거리 ($\Delta \underline{x}$)를 얻게 되며 이는 테일러 전개를 통하여 Eq.(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta \underline{X} = F(\underline{x} + \Delta \underline{x}) - F(\underline{x}) \cong \nabla F(\underline{x}) \Delta \underline{x} \quad (5)$$

이를 행렬로 표현하면 Eq.(6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta X_L \\ \Delta Y_L \\ \Delta X_R \\ \Delta Y_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{1,1}^L & F_{1,2}^L & F_{1,3}^L \\ F_{2,1}^L & F_{2,2}^L & F_{2,3}^L \\ F_{1,1}^R & F_{1,2}^R & F_{1,3}^R \\ F_{2,1}^R & F_{2,2}^R & F_{2,3}^R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}$$

$$F_{i,j} = \frac{\partial F_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

i = 1,2 (Image Plane(X, Y))

j = 1,2,3 (Object Plane(x, y, z))

L : Left Image

R : Right Image

현재 알고 있는 영상에서의 이동 거리 ($\Delta X_L, \Delta Y_L, \Delta X_R, \Delta Y_R$)를 이용하여 유동장에서의 이동 거리($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)는 다음과 같은 순서로 구해낸다.

1. 해석하고자 하는 유동장의 좌표($\underline{x}_p$)에 해당하는 좌우 영상의 좌표($\underline{X}_p$)를 관계식을 이용하여 계산한다.(Fig. 12)
2. $\underline{X}_p$ 에서의 이동거리($\Delta \underline{X}_p$)를 이미 계산된 주위의 값으로부터 보간을 이용하여 구한다.(Fig. 13)
3. $\underline{x}_p$ 에서의 편미분한 관계식 $F_{i,j}(\underline{x}_p)$ 을 계산한다.
4. Eq.(6)을 이용하여 $\Delta \underline{x}_p$ 를 계산한다.(Fig. 14)

Fig. 12 A schematic diagram of mapping x_p to X_p^L and X_p^R

Fig. 13 A schematic diagram of interpolation at X_p

Fig. 14 A schematic diagram of reconstruction process

3. SPIV 해석 알고리즘 검증

3.1 가상 이미지를 이용한 알고리즘 검증

SPIV 해석 알고리즘을 검증하기 위하여 Okamoto et al.(2000)의 가상 이미지 '#331'를 이용하였다. 이 가상 이미지는 Fig. 15와 같은 가상의 실험 조건에서의 유동으로서 관측영역은 약 1.6cm*1.6cm 이고, 256*256 픽셀로 이루어져 있다. 또한, Fig. 16와 같이 0.005초 간격으로 각 카메라(정면, 좌, 우 카메라)에서의 이미지가 제공된다.

이러한 조건의 가상 이미지를 이용하여 Fig. 17과 같이 세 경우에 대하여 SPIV 해석 알고리즘을 적용하여 보았다. 그 결과 Fig. 18~Fig. 22과 같은

Fig. 15 SPIV virtual experimental setup

Fig. 16 A sequence of 3D artificial images

Fig. 17 Three types of result using 3D artificial images

RMS(root mean square) 에러를 보였다. 카메라 위치에 따른 RMS 에러를 비교해 보면 약간씩 차이를 보이고 있으나 거의 비슷한 결과를 보이고 있으며, 그 중에서 왼쪽-오른쪽 영상을 이용한 결과가 RMS 에러가 가장 작게 나왔다. 전반적으로 약 0.2~0.6cm/s 정도의 RMS 에러를 보이고 있는데, 40 번째 결과에서 RMS 에러의 양이 가장 크고, 90 번째 결과에서 RMS 에러의 양이 가장 작은 것을 볼 수 있다.

Fig. 18 RMS error of V_x of SPIV analysis with 3D artificial images

Fig. 21 RMS errors of V_x and V_y of SPIV analysis with 3D artificial images

Fig. 19 RMS error of V_y of SPIV analysis with 3D artificial images

Fig. 22 RMS errors of V_x , V_y and V_z of SPIV analysis with 3D artificial images

Fig. 20 RMS error of V_z of SPIV analysis with 3D artificial images

이러한 결과가 나온 이유는 40 번째 결과는 Fig. 23와 같이 회전하는 성분이 강한 유동이기 때문에 시간간격 0.005 초가 입자의 회전 움직임을 직선 운동으로 볼 수 없을 만큼 상대적으로 긴 시간이기 때문에 운동 궤적을 잃어버렸기 때문이다. 또한, 해석 가능한 정도의 입자를 포함해야만 하는 미소조사영역(interrogation window)의 크기가 유동 구조에 비하여 상대적으로 커서, Fig. 24과 같이 미소조사영역 내의 입자의 움직임이 서로 다르기 때문에 발생하는 에러도 존재하는 것으로 판단된다. 반대로 90 번째 결과에서는 대부분이 직선 운동이기 때문에 RMS 에러가 작게 나왔다.

Fig. 23 40th reference vector field and evaluated vector fields

Fig. 24 Different displacements of particles in the interrogation window

앞서 언급한 에러의 원인들 가운데 시간 간격으로 인한 에러는 실제 실험에서 시간간격을 충분히 짧게 하여 해결할 수 있고, 입자의 개수를 충분히 하면 미소조사영역의 크기에 따른 에러도 줄일 수 있다.

한편, 위의 결과들 중에서 가장 큰 0.6cm/s 의 RMS 에러를 픽셀단위로 환산해 보면 약 0.48 픽셀/s 이고, 이는 픽셀단위 이하의 오차이다.

3.2 교정 표적을 이용한 알고리즘 검증

SPIV 해석 알고리즘을 검증하기 위하여 교정 표적의 영상을 z 방향으로 1mm 간격으로 총 11 세트를 얻어내어 해석을 수행하였다. 관측영역은 약 50mm*50mm 이다. Eq. (7) 은 구해낸 관계식을 나타내고 있다.

이 관계식을 이용하여 z=0.0mm 일 때의 영상을 기준으로 z=1.0mm 로 움직였을 경우와 z=-1.0mm 로 움직였을 경우에 대하여 미소조사영역

Table 1 Result of SPIV analysis with calibration target

		dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)
Real displacement		0.0	0.0	1.0
Measured displacement	Average	0.0039	0.0120	1.0066
	Standard deviation	0.0036	0.0037	0.0095
	RMS	0.0053	0.0125	1.0065
Real displacement		0.0	0.0	-1.0
Measured displacement	Average	0.0017	-0.0013	-1.0117
	Standard deviation	0.0017	0.0040	0.0075
	RMS	0.0023	0.0041	-1.0116

32*32 픽셀, 50%중첩으로 해석을 수행하여 Table 1에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 F_x^L(x) &= 659.746 + 21.813x - 0.004y - 8.033z - 0.014x^2 + 0.000xy + 0.000y^2 \\
 &\quad - 0.036xz - 0.001yz - 0.275z^2 + 0.000x^3 + 0.000x^2y + 0.000xy^2 \\
 &\quad + 0.000y^3 + 0.000x^2z + 0.000xyz + 0.000y^2z + 0.001xz^2 + 0.001yz^2 \\
 F_y^L(x) &= 275.878 + 0.184x + 23.344y + 0.556z - 0.000x^2 - 0.015xy + 0.000y^2 \\
 &\quad - 0.001xz - 0.043yz + 0.013z^2 - 0.000x^3 + 0.000x^2y - 0.000xy^2 \\
 &\quad + 0.000y^3 + 0.000x^2z + 0.000xyz + 0.000y^2z - 0.001xz^2 - 0.001yz^2 \\
 F_x^R(x) &= 669.435 + 21.573x - 0.268y + 8.116z + 0.015x^2 + 0.000xy + 0.000y^2 \\
 &\quad - 0.031xz + 0.001yz + 0.401z^2 + 0.000x^3 + 0.000x^2y + 0.000xy^2 \\
 &\quad + 0.000y^3 + 0.000x^2z + 0.000xyz + 0.000y^2z - 0.004xz^2 + 0.000yz^2 \\
 F_y^R(x) &= 276.556 + 0.103x + 23.141y + 0.508z + 0.000x^2 + 0.017xy + 0.000y^2 \\
 &\quad + 0.000xz - 0.040yz + 0.024z^2 + 0.000x^3 + 0.000x^2y + 0.000xy^2 \\
 &\quad + 0.000y^3 + 0.000x^2z + 0.000xyz + 0.000y^2z - 0.001xz^2 - 0.002yz^2
 \end{aligned} \quad (7)$$

위의 결과에서 알 수 있듯이 x,y,z 방향의 움직임이 모두 1%정도(0.01mm)의 오차를 보이고 있다. 이러한 오차는 교정 표적의 z 방향 이동 거리를 1mm 보다 더 작게 하여 관계식을 구하면 줄일 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 정규상호상관도(NCC)를 이용한 PIV 해석 알고리즘을 이용하여 보다 정확하게 3차원 유동을 계측할 수 있는 SPIV 해석 알고리즘을 개발하였다. 3차원 성분을 도출하는 방법으로

는 3 차원 교정시험방법을 이용하였고, 교정표적의 좌표를 찾기 위하여 ‘+’ 모양의 영상조각을 이용하였다. 개발한 SPIV 해석 알고리즘을 검증하기 위하여 3 차원 가상 이미지를 이용하여 최대 에러가 픽셀 이하 단위로 나타나는 것을 확인하였고, 교정 표적을 이용한 검증 결과에서는 약 1%의 오차를 보였다. 실제 실험에서는 시간 간격을 유동의 특성에 따라 조절하고 관측영역의 크기에 따라 미소조사영역 내의 추적입자의 수를 조절하면 에러의 양을 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

향후에 공간해상도를 높이는 알고리즘을 추가한다면 보다 정밀한 계측을 할 수 있을 것이다.

후 기

본 2 단계 BK21 사업의 일부 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 김진, 류권규, 박영하, 반석호, 2004, “ PIV/PTV 를 이용한 균일 유입류에서의 프로펠러 후류 유동장 계측,” 대한조선학회 추계학술대회, pp. 578-582.
- 류권규, 김동수, 윤병만, 2005, “ 상호상관 PIV 기법을 위한 빠르고 정확한 FFT 알고리즘의 개발,” 한국수자원학회 논문집, 제 38 권, 제 10 호, pp. 851-859.
- 오정근, 2006, 정규상호상관도를 이용한 입체 입자영상유속계(SPIV) 알고리즘 개발과 적용, 박사학위논문, 서울대학교.
- 이상준, 고민석, 이정목, 2002, “ PIV 를 이용한 KRISO 3600TEU 컨테이너선모형선의 반류 측정 및 해석,” 대한조선학회 논문집, 제 39 권, 제 3 호, pp. 48-56.
- 이상준, 백부근, 2003, “ PIV 를 이용한 선박 프로펠러 후류의 속도장 계측,” 대한조선학회 논문집, 제 40 권, 제 5 호, pp. 17-25.
- 이상준, 백부근, 2004, “ 회전하는 선박 프로펠러 전방 유입류에 대한 PIV 속도장 해석,” 대한조선학회 논문집, 제 41 권, 제 4 호, pp. 30-37.
- 이인원, 전호환, 김경천, 2004, “ 편광기법을 이용한 3 차원 난류경계층 구조의 PIV 계측,” 대한조선학회 추계학술대회, pp. 487-492.
- 오정근, 김유철, 류민철, 서정천, 2005, “ 캐비테이션 터널에서의 유동관측을 위한 PIV 시스템 및 해석 알고리즘,” 대한조선학회 추계학술대회, pp. 79-90.
- 현범수, 김무룡, 2006, “ 진동하는 사각날개의 날개끝 와류 구조에 관한 실험적 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 43 권, 제 1 호, pp. 59-67.
- Fincham, A.M. and Spedding, G.R., 1997, “ Low Cost, High Resolution DPIV for Measurement of Turbulent Fluid Flow,” Exp. in Fluids, Vol. 23, No. 6, pp. 449-462.
- Gui, L. and Merzkirch, W., 2000, “ A Comparative Study of the MQD Method and Several Correlation-based PIV Evaluation Algorithms,” Exp. in Fluids, Vol. 28, No. 1, pp. 36-44.
- Hill, D.F., Sharp, K.V. and Adrian, R.J., 2000, “ Stereoscopic Particle Image Velocimetry Measurements of the Flow around a Rushton Turbine,” Exp. in Fluids, Vol. 29, No. 5, pp. 478-485.
- Huang H., Fiedler H. and Wang J., 1993, “ Limitation and Improvement of PIV. Part I: limitation of PIV Due to Velocity Gradients,” Exp. in Fluids, Vol. 15, pp. 168-174.
- Okamoto, K., Nishio, S., Saga, T. and Kobayashi, T., 2000, "Standard Images for Particle-image Velocimetry," Meas. Sci. Tech., Vol. 11, pp. 685-691.
- Prasad. A.K., 2000, "Stereoscopic Particle Image Velocimetry," Exp. in Fluids, Vol. 29, No. 2, pp. 103-116.
- Pust, O., 2000, "Direct Cross-correlation Compared with FFT-based Cross-correlation," 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, pp. 1-12.

- Soloff S.M., Adrian R.J. and Liu Z-C, 1997, " Distortion Compensation for Generalized Stereoscopic Particle Image Velocimetry," Meas. Sci. Tech., Vol. 8, pp. 1441-1454.
- Willert, C.E. and Gharib, M., 1991, " Digital Particle Image Velocimetry," Exp. in Fluids, Vol. 10, pp. 181-193.

< 오 정 근 >

< 김 유 철 >

< 류 민 철 >

< 고 원 규 >

< 서 정 천 >