

유체-구조 연동운동 3차원 측정시스템의 성능 검증

도덕희* · 조효제† · 백태실** · 황태규***

(원고접수일 : 2008년 12월 19일, 원고수정일 : 2008년 12월 29일, 심사완료일 : 2009년 1월 12일)

Performance Tests on the 3D-Flow-Structure-Interactions-Measurement System(FSIMS)

Deog-Hee Doh* · Hyo-Jae Jo† · Tae-Sil Baek** · Tae-Gyu Hwang***

Abstract : Performance tests on the 3-Dimensional Flow-Structure-Interactions-Measurement System (FSIMS) have been carried out. Experimental data obtained by the FSIMS on a floating cylinder have been used to generate a set of artificial images. Comparisons between the data obtained by the use of the artificial images and those original experimental data have been made. Another set of artificial images have also been generated based on theoretically modulated sinusoidal motions, and comparisons between the data obtained by the use of these artificial images and the theoretical ones have been carried out. It has been verified that the FSIMS has a measurement uncertainty of 0.04-0.06mm/frame for velocity vectors and 0.002-0.01mm for the cylinder's positions.

Key words : Performance tests(성능시험), Flow-Structure-Interactions-Measurement system (FSIMS, 유체-구조연동운동 측정시스템), Floating cylinder(부유체 실린더)

1. 서 론

해양구조물 혹은 선박의 운동의 경우 유체-구조 연동운동을 수반한다. 연동운동 해석을 위한 방안 으로서는 수치적 해석방법과 실험계측에 의한 해석 방안을 들 수 있다. 최근, 컴퓨터 성능향상에 힘입 어 수치적 해석방법에 의한 유체-구조물 연성문제를 다루는 연구가 점차 늘어나고 있는 추세에 있지만 이들 결과들을 뒷받침 해주는 실험계측방법은

유체의 운동과 구조물의 운동을 각각 독립적으로 측정하는 것이어서 이들 측정결과들로부터 유체-구조물의 연성운동을 도출해 내기란 용이하지 않다.

구조물의 운동을 해석하기 위한 가장 최선의 실험적 방법에는 비접촉식 6자유도 운동측정시스템⁽¹⁾이 있다. 이 측정시스템은 2대 이상의 CCD카메라에 투영된 구조물의 영상을 이용하여 삼각측량법에 의하여 구조물의 3차원 위치를 측정하는 것인데 카메라 렌즈의 왜곡효과 등을 무시하고 있는 관계

† 교신저자(한국해양대 조선해양시스템공학부, E-mail: hjjo@hhu.ac.kr, Tel:051)410-4302)

* 한국해양대 기계정보공학부

** 포항대학 자동차공학과

*** 조선기자재연구원

로 정밀도가 그다지 높지 않았다. 벨기에의 KRYPTON사는 이를 보완하여 6자유도 운동측정 시스템을 상용화 하였는데 시스템의 가격이 매우 고가인 것이 단점이다.

한편, 유체의 운동을 해석하기 위한 실험적 방법에는 비접촉식 3차원 입자영상유속계⁽²⁾가 있다. 이것은 유체의 밀도와 동일한 추적입자를 유동장에 투입한 후 이들의 운동을 2대 이상의 CCD카메라로 기록하여 얻어진 영상을 이용한 3차원 정합을 실시함으로써 유동장 전체에 대한 동일 시각의 수많은 3차원 속도성분벡터를 측정하는 것을 말한다. 구조물 운동에 대하여 보다 신뢰도가 높은 해석을 달성하기 위해서는 유체-구조 연동운동을 동시에 측정해야 하는데 도 등⁽³⁾은 이를 가능하게 하는 유체-구조 연동운동 3차원 측정시스템을 개발하였다. 이 측정시스템은 세계 최초의 것인 관계로 이 측정시스템에 대한 표준적 검증법이 없었는데 본 논문에서는 이 측정시스템에 대한 검증법의 구축과 이를 이용한 시스템의 측정성능을 평가하는 것을 연구의 목적으로 삼고자 한다.

2. 유체-구조 연동운동 측정시스템

2.1 계측시스템과 계측원리

Fig. 1은 도덕희 등⁽³⁾이 개발한 유체-구조 연동운동 측정시스템의 구성을 나타낸다. 측정시스템은 4 대의 카메라, 두 대의 이미지 그래버 및 컴퓨터로 구성된다. 2대의 카메라(Camera 1, Camera 2)는 구조물의 주변 3차원 속도장을 측정하는데 사용되고 2대의 카메라(Camera 3, Camera 4)는 부유체 실린더 구조물의 운동측정에 사용되는데 이들의 영상은 모두 동일 시각으로 이미지 그래버를 통하여 컴퓨터로 입력된다. 3차원 측정을 위해서는 각 2대 카메라의 물리좌표계(절대좌표계)에 대한 교정작업(Calibrations)이 필요하다. 이 작업에서는 이미 알고 있는 3차원 위치정보를 가진 교정기를 카메라를 향하여 측정 영역에 설치한 다음, 카메라에 비친 기준점들의 사진좌표와 실제 이들 기준점들의 실제 3차원 좌표를 이용하여 삼각측량의 원리에 의거 카메라의 내부 및 외부파라미터

(Parameters)가 구해진다. 즉, 물리좌표계에 대한 카메라의 사진좌표계의 상관관계가 구해지게 된다. 각 2대 카메라의 카메라파라미터가 구해지면 유전알고리즘 기반의 3차원 입자영상유속계⁽⁴⁾와 양방향탐색법⁽³⁾에 의거하여 유체유동장의 3차원 속도벡터분포와 구조물의 3차원 운동을 계산한다. 3차원 속도벡터분포는 유동가시화를 위하여 유동장에 투입된 유체와 동일비중의 미소추적입자들의 3차원 위치의 이동량을 계산함으로써 구해진다. 이때, 3차원 위치는 카메라들의 물리좌표계에 대한 카메라사진좌표계와의 관계인 카메라파라미터와 2대 카메라의 사진좌표(유체유동장에 자유로이 떠다니는 미소추적입자의 카메라1과 카메라2에 비친 영상좌표)를 이용하여 후술의 삼각측량 계산원리에 의거하여 구해진다. 한편, 구조물의 3차원 운동은 카메라파라미터(camera 3 & camera 4)와 구조물에 설치된 표적물(4개)에 대한 이들 카메라의 사진좌표를 이용하여 후술의 동일 계산원리에 의거하여 표적물의 3차원 이동량을 계산함으로써 구해지게 된다.

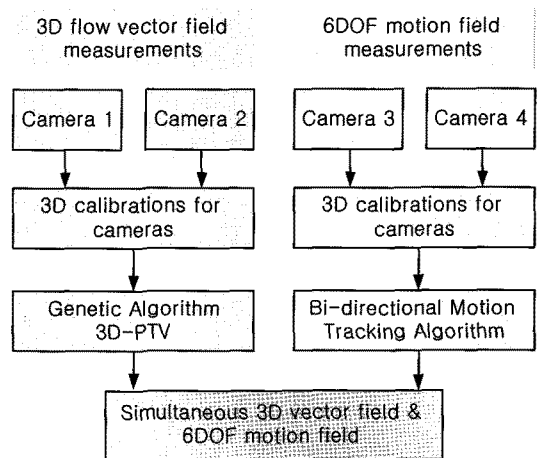


Fig. 1 Measurement system and procedures

2.2 유동장 내 미소입자와 구조물 표적물의 3차원 위치 계산

카메라영상을 이용한 3차원 공간인식을 위해서는 2대 이상의 카메라와 각각의 카메라에 대한 교정작업을 통하여 카메라파라미터(절대좌표계에 대

한 카메라의 상대적 위치정보, 자세기울기, 카메라 렌즈 및 CCD 셀 중심위치가 필요하다. 여기서는 10개 파라미터 교정법^[4]을 사용하는데 외부요소를 6개 (dis, α , β , κ , m_x , m_y), 내부요소를 4개 (C_x , C_y , k_1 , k_2)로 나누어진다.

절대좌표계에 대한 카메라 좌표계의 회전각을 각각 α , β , κ 로 정의하면 축에 대한 회전행렬은 $M_M = M_Z M_Y M_X$ 가 된다. 회전된 절대좌표값은 (X_m, Y_m, Z_m) 로 표시되고 카메라의 z축과 절대좌표계의 Z축을 일치시키기 위한 이동량이 (m_x, m_y) 로 표시된다. 절대좌표계상의 대상점과 사진좌표계의 투영점이 일직선상에 있다는 공선조건으로부터 다음과 같은 관측방정식 (1)이 얻어지게 된다.

$$\begin{aligned} x &= c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m^2}} + \Delta x \\ y &= c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m^2}} + \Delta y \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 dis는 절대 좌표계 O(0, 0, 0)점으로부터 카메라 중심까지의 거리, (c_x, c_y) 는 이미지 그레버에 따른 장방비를 고려한 렌즈 초점거리, $(\Delta x, \Delta y)$ 은 다음의 식 (2)로 표시되는 렌즈의 굴절량을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= \frac{x}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4), \quad \Delta y = \frac{y}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)은 카메라의 파라미터를 구하기 위해 이미 알고 있는 3차원 기준점 좌표(X_i, Y_i, Z_i)와 사진좌표(x_i, y_i)에 대한 관측방정식으로 다음 식 (3)의 F, G로 나타낼 수 있다. 여기서 k_1 과 k_2 는 렌즈의 왜곡보정계수를 의미한다.

식 (1)은 비선형 연립방정식이므로 이를 풀기 위하여 초기에 카메라 파라미터의 미지값을 가정하고 테일러 급수전개에 의한 최소자승법으로 보정량을 구하여 수렴될 때까지 근사치를 보정하는 수정 Gauss - Newton법을 사용한다. 카메라의 파라미터가 구해지면 사진좌표(x, y)와 절대좌표(X,

Y, Z)간에 다음 식 (3)이 성립된다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M_M^{-1} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, M_M 은 회전변환행렬이며 B는 이의 역행렬이다. 이때의 X_m, Y_m, Z_m 은 다음 식 (4)로 표시된다.

$$\begin{aligned} X_m &= \frac{x - \Delta x}{c_x} t + m_x \\ Y_m &= \frac{y - \Delta y}{c_y} t + m_y \\ Z_m &= d - t \\ d &= \sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} \end{aligned} \quad (4)$$

카메라의 중심위치를(X_0, Y_0, Z_0)라 하면 이 중심과 표적물입자의 중심을 지나는 직선 식은 $P(X, Y, Z) = P(a_1 t + X_0, a_2 t + Y_0, a_3 t + Z_0)$ 로 표시되며 2 대의 카메라로 구성되는 다음의 식 (5)으로 표현되는 2개의 직선 방정식의 교점이 최종적으로 구해지는 표적물의 공간좌표이다.

$$\begin{aligned} A(X, Y, Z) &= A(a_{11} t + b_{11}, a_{12} t + b_{12}, a_{13} t + b_{13}) \\ B(X, Y, Z) &= B(a_{21} s + b_{21}, a_{22} s + b_{22}, a_{23} s + b_{23}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, t와 s는 최소자승법에 의하여 구해지며 최종적으로 정의되는 추적입자(표적물)의 공간좌표는 두 직선의 교점이 되는데 식 (6)로 표현된 교점의 중간점으로 정의된다.

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \right\} \quad (6)$$

표적물의 공간좌표가 구해지면 시간 연속적으로 단위 시간당 표적물의 이동속도를 계산함으로써 가속도가 얻어지게 된다. 이상과 같은 절차를 거쳐 유동장의 추적입자들의 3차원 위치와 구조물에 설치된 4개 표적점의 3차원 위치가 구해지고 이들 위치들의 시간변화에 따른 공간이동량을 알게 되면 유동장의 운동과 구조물의 운동이 구해진다. 유동

장의 속도분포와 구조물의 운동측정에 필요한 유전 알고리즘기반의 3차원 입자영상유속계와 양방향탐색법에 관한 보다 구체적인 내용은 각각 Doh 등⁽²⁾과 도덕희 등⁽³⁾의 문헌에 잘 기술되어 있다.

3. 측정시스템의 성능 검증

3.1 유체-구조 연동운동 3차원 측정시스템의 성능 검증 개요

Fig. 2는 유체-구조 연동운동 3차원 측정시스템의 성능 검증의 개요를 나타낸다. 3차원 측정을 위해서는 카메라의 교정작업으로부터 구해지는 카메라 파라미터와 측정하고자 하는 운동장의 목표물의 카메라 영상의 사진좌표가 필요하게 된다. 측정시스템의 성능검증은 표준적 데이터 (유체유동장의 경우는 이미 알고 있는 3차원 속도벡터정보, 구조물 운동의 경우는 이미 알고 있는 구조물 운동정보)와 이 데이터로부터 얻어지는 가상실험영상(후술의 가상영상 작성법으로 구한 영상을 실제 실험 영상으로 간주)에 대한 계산결과와의 비교에 의하여 이루어지게 된다. 카메라교정을 위한 영상은 실제 교정작업으로부터 구한 파라미터를 이용하여 수치적으로 가상영상을 만들거나 아니면 순수 수치적으로만 가상영상을 만들 수 있다.

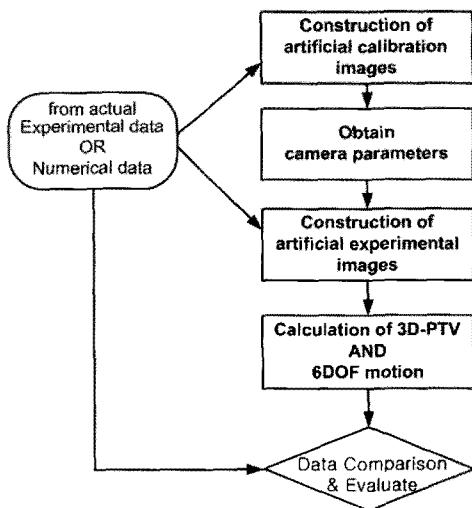


Fig. 2 Schematic of performance test

본 논문에서는 실제 실험⁽³⁾에 수행되었던 교정작업으로부터 얻어진 카메라파라미터를 사용하여 카메라파라미터 가상영상을 작성하였다. 한편, 성능시험을 위한 가상영상작성에 필요한 표본 데이터로는 실제 실험으로부터 얻어진 데이터(3차원 속도벡터장 데이터와 구조물 운동 데이터)를 사용하였다.

3.2 가상영상 작성

영상을 이용한 대표적인 측정법으로서는 입자영상유속계(particle image velocimetry)인데 이 측정법은 유체유동장에 대한 영상을 이용하여 속도벡터추출 알고리즘을 여하히 적용하느냐에 따라서 측정의 성능이 좌우된다. 지금까지 속도벡터추출 알고리즘은 다양한데, Willert & Gharib⁽⁵⁾은 DPIV(Digital PIV)기법의 평가를 위한 PIV가상영상(32 x 32 pixel의 상관영역에서 11개 정도의 입자가 포함되어 있는 경우에 8pixel의 변위에 대한 측정오차가 0.8pixel을 제시했으며, Okamoto 등⁽⁶⁾은 제트 유동의 3차원적 운동을 고려한 PIV 표준가상영상의 구성법을 제시하였다. 이후 도 등⁽⁷⁾은 렌즈의 초점길이, 렌즈의 굴곡, 렌즈의 영상의 중심으로부터의 원점의 이동과 같은 카메라의 내부요소를 추가로 고려함으로써 실제 실험상황에서 발생할 수 있는 가상영상작성법을 완성하였다. 본 연구에서는 유체-구조 연동운동 3차원 측정시스템⁽³⁾에 대한 성능검증용 가상영상 작성에는 이들의 방법⁽⁷⁾을 도입하였다.

즉, 실제 기준점(교정기) 영상을 찍은 2대의 카메라영상의 사진좌표와 이들의 3차원 좌표로부터 카메라파라미터를 구한 다음, 이들을 이용하여 30도의 시선각을 지닌 2대의 가상카메라에 대한 가상영상을 만들면 교정기의 가상영상이 된다. 또한 위에서 구한 실제 카메라파라미터를 사용하여 실제 실험에서 얻어진 3차원 속도벡터의 시점과 종점 및 구조물 표적물의 운동좌표 데이터를 활용하여 가상영상을 만들면 가상실험영상이 된다. 이 때, 속도벡터의 시점과 종점 및 구조물의 표적물의 각 시각에서의 3차원 위치정보는 카메라파라미터를 이용함으로써 카메라상의 2차원 사진좌표 데이터로 변환된다. 얻어진 사진좌표 데이터에 대하여 식 (7)

을 적용함으로써 가상영상을 작성하였다.

$$I(X, Y) = I_0 \text{Exp} \left(\frac{(X - X_p)^2 + (Y - Y_p)^2}{-(d_p/2)^2} \right)$$

$$I_0 = 240 \text{Exp} \left(-\frac{z_p^2 + x_p^2}{\sigma_l^2} \right) \quad (7)$$

여기서, $I(X, Y)$ 는 입자의 위치 (X, Y) 에서의 농도치를 말하며 (X_p, Y_p) 는 공간상의 입자위치인 (x_p, y_p, z_p) 가 영상으로 투영되었을 때의 사진 좌표이다. 여기서 d_p 는 입자의 지름이고 I_0 는 원통형광원이 조사되었을 때 입자의 위치에 따른 최대 밝기이다. σ_l 은 원통형 가상광원의 반경으로서 본 연구에서는 400mm로 하였다. 생성된 이미지의 해상도는 512×512 pixel이며, 각 pixel은 256(gray level, 8bit)이다. 보다 상세한 3차원 공간에서의 가상영상 생성법은 Okamoto et al.^[5]과 도덕희 등^[7]의 연구에 기술되어 있다.

3.3 부유체 실린더 구조물 측정 결과를 이용한 성능 시험

Fig. 4는 부유체 실린더(height=9cm, dia.=2.5cm) 모델의 유체-구조 연동운동(flow-structure interactions, FSI)에 대한 3차원 측정을 위한 시스템의 구성도를 나타낸다. 전술한 바와 같이 측정시스템은 4대의 카메라로 구성된다. Table 1은 실린더가 설치되었을 때의 수력학적 특성을 나타낸다. 본 실험을 통하여 얻어진 결과의 물리적

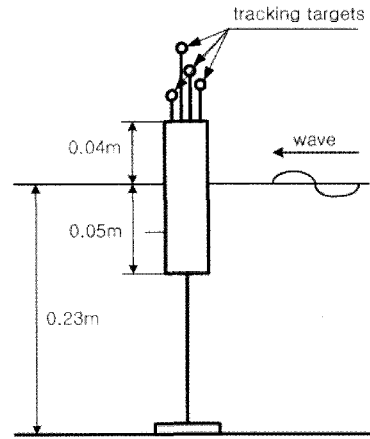


Fig. 5 Configuration of vertical floating cylinder

Table 1 Hydraulic conditions of the cylinder

Draft	0.05m
Center of Gravity	0.035m
Weight	0.030kgf

해석에 대해서는 참고문헌^[3]에 이미 잘 기술되어 있고 본 연구에서는 이들 데이터를 비교를 위한 표준데이터로서만 활용하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 각각 Fig. 4의 실험에서 얻어진 유동장과 구조물 운동을 담은 카메라 영상을 나타낸다.

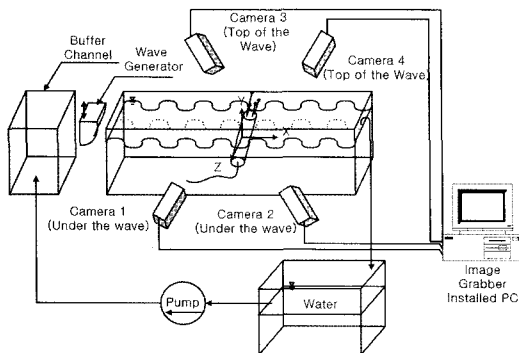
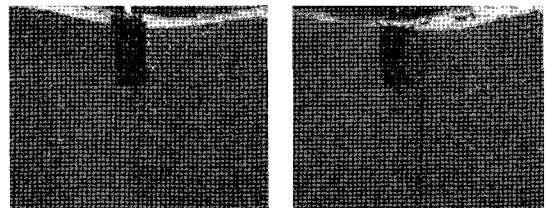


Fig. 4 FSI measurement system for a floating cylinder



(a) Camera 1 (b) Camera 2

Fig. 6 Flow images used for the measurements



(a) Camera 1 (b) Camera 2

Fig. 7 Motion images used for the measurements

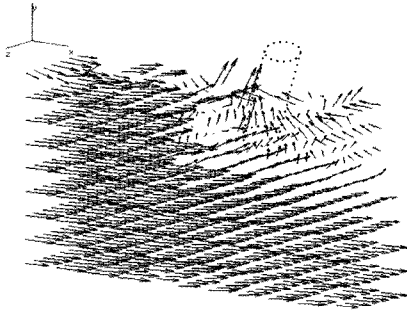


Fig. 8 Three-dimensional instantaneous grid vector field around the cylinder

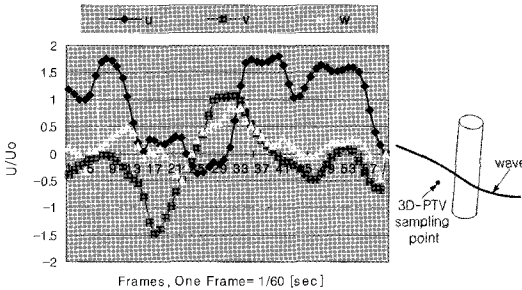


Fig. 9 Temporal evolutions of 3D vectors measured by 3D-PTV at x, y, z = (-20, -170, 0)

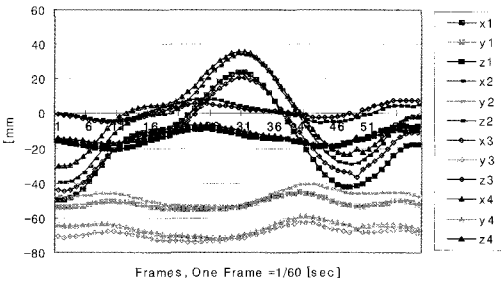


Fig. 10 Temporal motions of the four targets under the wave generator frequency 1.33 Hz

Fig. 8은 Fig. 4에 있는 수조 상부의 조파기 (Wave generator)가 1.33Hz로 작동하였을 때 구조물 주변의 유동장에 대한 카메라 1, 2의 영상으로부터 구한 3차원 격자상(11 x 9 x 7)의 순간 속도벡터분포를 나타낸다. Fig. 9는 그림에서 볼 수 있듯이 실린더 전부의 위치점에서 취출한 시간 연속의 3차원 속도벡터성분들을 나타낸다. Fig. 10은 실린더에 부착된 표적물(1번)의 시간연속의

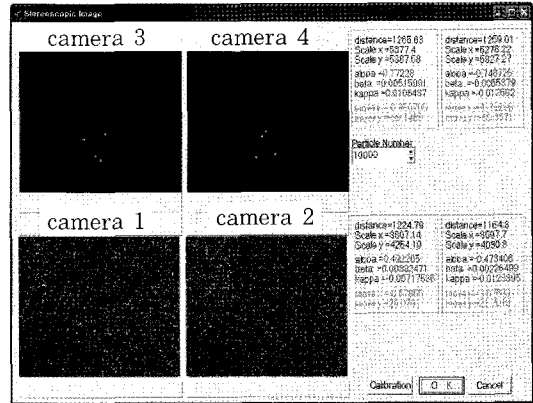


Fig. 11 Generated artificial images for the four cameras (experimental images)

3차원 위치변화를 나타낸다. 이들 속도벡터성분의 시간 연속의 변화량 구조물 표적물(1번)의 시간 연속의 운동위치 정보를 이용하여 가상영상을 전술의 방법으로 작성하였다. Fig. 11은 전술의 방법으로 작성된 교정기의 가상영상을 바탕으로 카메라의 파라미터를 계산한 결과를 이용하여 작성한 실험가상영상을 나타낸다. Fig. 12는 Fig. 9의 실험데이터와 이를 이용하여 작성된 가상영상을 바탕으로 얻어진 3차원 순간속도벡터의 시간이력을 나타낸다. Fig. 9와 거의 같은 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 13은 구조물 표적물(1번)을 재차 가상영상을 이용하여 복원하였을 때의 결과를 나타낸다.

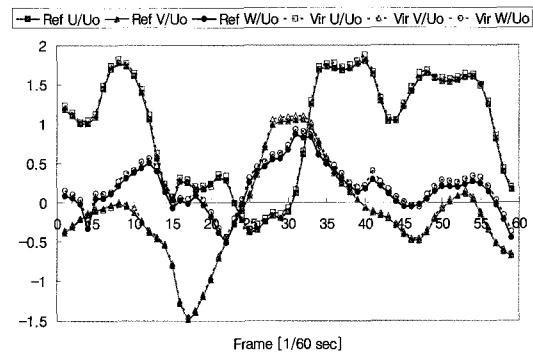


Fig. 12 Comparisons of 3D velocity vectors obtained from artificial images(Vir) with those(Ref) obtained from actual experiments(flow field)

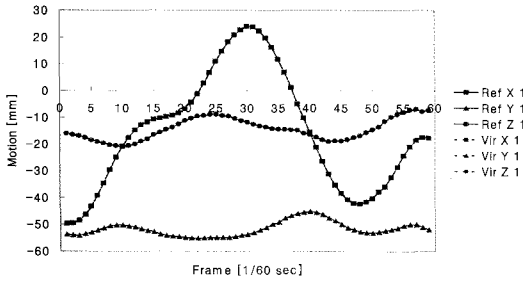


Fig. 13 Comparisons of 3D positions obtained from artificial images(Vir) with those obtained from actual experiments(Ref, motion field)

Table 2 Measurement uncertainties

Velocity fields, 3 components (mm/frame)	U	Averaged Error	0.04
		Standard Deviation	0.0211
	V	Averaged Error	0.03
		Standard Deviation	0.0168
	W	Averaged Error	0.06
		Standard Deviation	0.0184
Motion fields, displacement (mm)	x	Averaged Error	0.006
		Standard Deviation	0.0021
	y	Averaged Error	-0.01
		Standard Deviation	0.0071
	z	Averaged Error	-0.14
		Standard Deviation	0.0141

이 결과 역시 Fig. 10과 거의 동일한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. Table 2에 실제 실험데이터와 이를 이용하여 작성된 가상영상을 바탕으로 측정알고리즘으로 재현하였을 때의 결과를 나타낸다. 유체유동장의 측정에 있어서는 3차원 속도벡터 성분인 U, V, W에 대하여 각각 0.04, 0.13, 0.06 mm/frame의 평균오차가 존재하고 구조물 운동의 위치추정에 있어서는 x, y, z에 대하여 각각 0.006, 0.01, 0.14mm의 평균오차가 존재함을 알 수 있었다. 측정영역의 크기 (X, Y, Z=140mm, 120mm, 80mm)를 고려하였을 때 측정의 상대오차는 모두 1% 이내임을 알 수 있다.

3.4 수치적 가상평판의 운동 측정을 통한 성능 시험

Fig. 14는 수치적으로 발생시킨 정현파운동

(sinusoidal motions)을 하는 평판의 형태를 나타낸다. 이 평판의 수치데이터를 가상영상의 작성에 적용한 결과를 Fig. 15에 나타낸다. 이 가상영상을 바탕으로 재차 구조(여기서는 평판운동)의 운동추정 성능을 평가하였다. Fig. 16과 Fig. 17은 Fig. 15의 측정점 1과 3에 대한 운동을 측정된 결과의 시간연속 데이터를 각각 나타낸다. 두 그림에서 알 수 있듯이 측정점 3에서의 y-성분에 있어서의 오차가 측정점 1에서의 오차보다 크게 나타나 보임을 알 수 있는데 이는 카메라의 중심근처의 표적물의 위치추정 오차가 카메라로부터 벗어난 위치의 표적물의 위치추정 오차보다 크게 나타남을 의미한다. 이는 중심근처의 특징점에 대해서는 2대 카메라가 잘 구분하지 못하는 측정원리상의 문제점과 관련되어 있다고 볼 수 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로는 2대 카메라가 측정영역의 특징을 모두 잘 관찰할 수 있도록 배치해야 함을 의미한다.

Table 3은 평판의 운동에 대한 측정시스템의 측정오차를 평가한 결과를 나타낸다. Fig. 15의 측정점 1-5에 대하여 평판의 변형 179사각분에 해당하는 총 895점의 측정결과를 분석한 결과를 나타낸

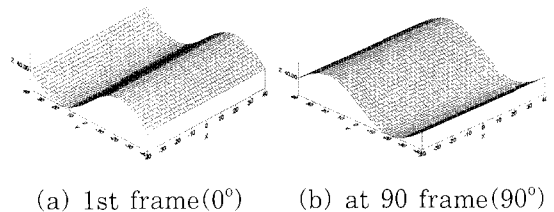


Fig. 14 Numerically generated plate's motion

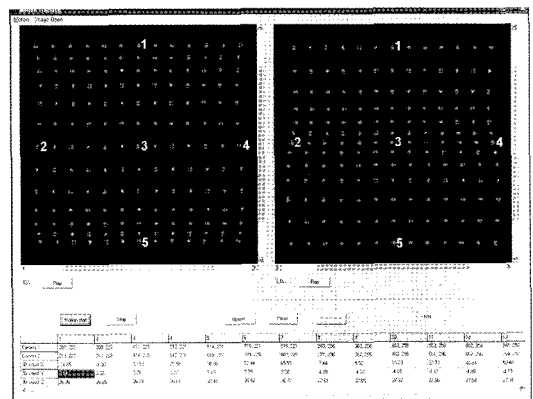


Fig. 15 Artificial images of the plate

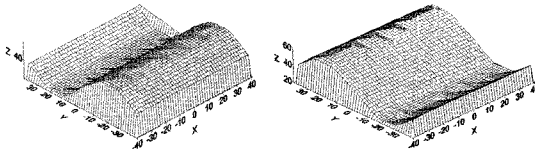


Fig. 16 Measured results of the plate's motion

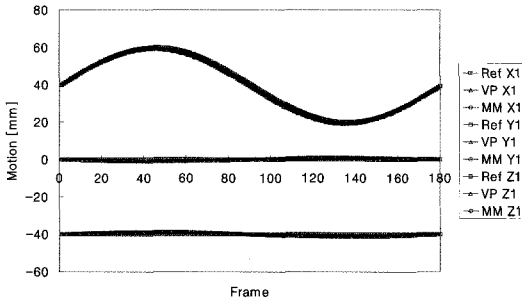


Fig. 17 Measured results for the point 1

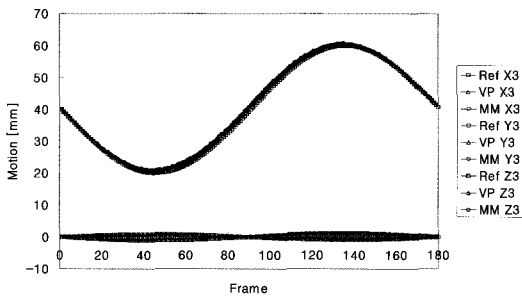


Fig. 18 Measured results for the point 3

Table 3 Measurement uncertainties (plate's motions)

	x [mm]	y [mm]	z [mm]
Averaged error	0.005922	-0.00989	-0.13593
Std. Deviation	0.617909	0.82737	0.851336

다. 이 표에서 알 수 있듯이 z-성분에 대한 오차가 다른 성분에 대하여 100배 정도 크게 나타나 보임을 알 수 있는데 이는 카메라의 배치각이 비교적 작은 30도에 해당되는 관계로 시선각 방향(즉 z방향)의 측정성분에 불확실성 성분이 크게 나타남을 의미한다. 이를 해결하기 위한 방안으로는 2대 카메라의 시선각을 키우던가 하여야 할 것이다. 일반적으로 비전측정에 있어서 가장 유리한 각은 45도

이나 측정 대상의 굴곡 등과 같은 측정여건에 따라서 제약을 받으므로 최적의 시선각을 선정하여야 한다. 한편, Fig. 15와 같은 평판상에 표시된 표적물의 측정의 경우는 표적물의 중심이 카메라의 보는 시각에 따라서 이동하게 되는 영향으로 인하여 카메라 시선각에 따른 측정의 불확실성 외에 추가의 측정불확실성이 나타나게 된다. Table 3에 있어서 표준편차가 평균오차보다 비교적 크게 나타나는 것은 이에 기인하는 것으로 볼 수 있다.

4. 결 론

4대의 카메라로 구성된 유체-구조 연동운동 3차원 측정시스템의 성능을 검증할 수 있는 표준적 방법을 제안하였다.

측정시스템에 대한 성능검정의 결과, 유체유동장의 측정에 있어서는 3차원 속도벡터성분인 U, V, W에 대하여 각각 0.04, 0.13, 0.06 mm/frame의 평균오차가 존재하고 구조물 운동의 위치측정에 있어서는 x, y, z에 대하여 각각 0.006, 0.01, 0.14mm의 평균오차가 존재하였다. 측정영역의 크기 (X, Y, Z=140mm, 120mm, 80mm)를 고려하였을 때 측정의 상대오차는 모두 1%이내이다. 그러나 실제 측정에 있어서는 카메라의 해상도, 주변 조명여건(태양광 포함), 카메라의 진동문제, 카메라 영상을 받아들이는 이미지 그래버의 성능 등으로 인하여 측정오차가 증가하게 됨에 유의하여야 한다. 공학적 측정의 신뢰도를 95%로 본다면 5%에 대한 측정의 불확도는 위의 유의 요건들을 잘 갖추기만 한다면 본 측정시스템은 공학적 응용가치가 상당하다고 볼 수 있다.

구축된 측정법은 카메라 4대를 현장에 직접 설치하여 측정이 가능한 관계로 실측 적용이 용이할 뿐만 아니라 측정 대상물에 계속적으로 인한 영향을 미치지 않고 여러 점의 표적물을 동시에 계측할 수 있으므로, 해양구조물(선박) 등과 같이 현장에서 발생하는 유체-구조 연동운동의 대표적 현상인 비선형, 비정상 운동에 대한 측정해석에 유용하다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실사업(교육과학기술부, ROA-2008-000-20069-0)과 Sea Grant사업(국토해양부)의 지원으로 진행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Japanese Shipping Research Committee, "A study on design forces and intact stabilities of offshore structures", Research Report No. 373, 1984.
- [2] D.H. Doh, D.H., Kim, S.H. Choi, S.D. Hong, S.D., T. Kobayashi, T. Saga, "Single-frame 3-D PTV for high speed flows", Exp. in Fluids, Vol.29, Suppl., pp 85-98, 2000.
- [3] 도덕희, 조효제, 상지웅, 황태규, 조용범, 편용범, "디지털영상처리기술을 이용한 비접촉식 유체-구조물 연동운동 3차원 측정시스템 개발에 관한 연구", 한국해양공학회지, Vol. 18, No. 4, pp.1-7, 2004.
- [4] D.H. Doh, D.H. Kim, K.R. Cho, Y.B. Cho, Y.B., T. Saga, T. Kobayashi, "Development of GA based 3D-PTV technique", Journal of Visualization, Vol. 5, No.3, pp 243-254, 2002.
- [5] C.E. Willert, M. Gharib, "Digital particle image velocimetry", Exp. in Fluids, Vol. 10, pp.181-193, 1991.
- [6] K. Okamoto, S. Nishio, T. Kobayashi, T. Saga, "Standard images for particle imaging velocimetry. Measurement Science and Technology, Vol. 11, No.6, pp.685-691, 2000.
- [7] 도덕희, 황태규, "표준화상을 이용한 2차원 PIV와 3차원 PIV 성능시험", 대한기계학회지, Vol. 28, No. 11, pp.1315-1321, 2004.

저 자 소 개



도덕희(都德熙)

1962년 10월생, 1985년 한국해양대학교 기관학과 학사, 1989년 동 대학원 기관학과 석사, 1995년 일본 동경대학교 대학원 기계공학과 박사, 1995년 3월~9월 포항공대 첨단유체공학연구소 연구원, 현재 한국해양대학교 기계정보공학부 교수, Journal of Visualization Managing Editor, 한국마린엔지니어링학회 사업이사, 대한기계학회 유체부문 학회이사, 한국유체기계공업학회 편집이사



조효제(趙孝濟)

1980년 부산대학교 조선공학과 학사, 1983년 동 대학원 조선공학과 석사, 1991년 일본 동경대학교 대학원 선박해양공학과 박사, 현재 한국해양대학교 조선해양시스템공학부 교수, 마린엔지니어링학회 사업이사, 한국해양공학회 사업이사.



백태실(白泰實)

1960년 10월생, 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 2001년 한국해양대학교 기계공학과 박사수료(공학박사), 현, 포항공 대학 자동차계열 교수, 당학회 중신회원



황태규(黃太奎)

1974년 4월생, 2001년 한국해양대학교 기계공학과 학사, 2003년 동 대학원 기계공학과 석사, 2005년 동 대학원 기계공학과 박사, 현재 한국조선기자재연구원 연구원.