

디지털영상처리기술을 이용한 비접촉식 유체-구조물 연동운동 3차원 측정시스템 개발에 관한 연구

도덕희* · 조효제** · 상지웅*** · 황태규*** · 조용범*** · 편용범****

*한국해양대학교 기계정보공학부

**한국해양대학교 해양시스템공학부

***한국해양대학교 대학원 기계공학과

****(주)티엔텍

A Study on the Development of a Three-dimensional Measurement System for Flow-Structure Interaction Using Digital Image Processing

DEOG-HEE DOH*, HYO-JAE JO**, JI-WOONG SANG***, TAE-GYU HWANG***, YONG-BEOM CHO*** AND YONG-BEOM PYEON****

*Division of Mechanical and Information Eng., Korea Maritime University, Busan, Korea

**Division of Marine Systems Eng., Korea Maritime University, Busan, Korea

***Dept. of Mechanical Eng. Graduate School, Korea Maritime University, Busan, Korea

****TNTech Co. Ltd., Busan, Korea

KEY WORDS: Flow-Structure Interaction 유체-구조연동운동, Four CCD Camera 4대 카메라, Motion of Vertical Cylinder 직립원통형 실린더 운동, Flow Field 3D Measurement 유동장 3차원 측정

ABSTRACT: A simultaneous measurement system that can analyze the flow-structure interaction has been developed. This system consists of four CCD cameras, two for capturing instantaneous flow fields and two for tracking a solid body. The three-dimensional vector fields around a cylinder are measured, while the motion of the cylinder forced by the flow field is measured, simultaneously, with the constructed system. The cylinder is suspended in the working fluid of a water channel, and the surface of the working fluid is forced sinusoidally to make the cylinder bounced. Reynolds number for the mean main stream is about 3500. The interaction between the flow fields and the cylinder motion is examined quantitatively.

1. 서 론

해양구조물(선박)의 조종성과 안정성 해석을 위해서는 구조물의 운동과 이 구조물의 주위를 흐르는 유체운동과의 상호연성에 대한 해석이 필요하다. 이를 위한 방안으로는 수치적 해석방법과 실험계측에 의한 해석방안을 들 수 있다.

최근, 컴퓨터 성능향상에 힘입어 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-고체의 연성운동을 도출해 내기란 용이하지 않다.

구조물의 운동을 해석하기 위한 가장 최신의 실험적 방법에는 비접촉식 6자유도 운동측정시스템 (Japanese Shipbuilding Research Committee, 1984) 이 있으며 유체의 운동을 해석하

기 위한 실험적 방법에는 비접촉식 3차원 입자영상유속계 (Doh et al., 2002, 2004)가 있다.

비접촉식 6자유도 운동측정시스템은 2대 이상의 CCD카메라에 투영된 구조물의 영상을 이용하여 삼각측량법에 의하여 구조물의 3차원 위치를 측정하는 것이며, 비접촉식 3차원 입자영상유속계는 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.

기존의 비접촉식 6자유도 운동측정시스템은 삼각측량법에 의거한 것이므로 카메라 렌즈의 왜곡효과 등을 무시하고 있는 관계로 공간정밀도가 높은 측정에는 무리가 있었다. 이를 보완하여 상용화 된 것이 벨기에 KRYPTON사가 6자유도 운동측정시스템이다. 그러나, 시스템의 가격이 매우 고가인 것이 단점이다.

한편, 구조물의 정도 높은 안정성 해석을 위해서는 유체-구조물의 연동운동을 동시에 측정해야 하는데 아직 이를 가능하게 하는 측정시스템은 없다. 본 연구에서는 저가이면서 유체-구조물의 연동운동에 대하여 비접촉식으로 3차원 측정이 가능

제1저자 도덕희 연락처: 부산광역시 영도구 동삼동 1번지
051-410-4364 doh@mail.hhu.ac.kr

한 시스템의 개발에 관한 내용을 다루고자 한다. 2대의 카메라 영상을 이용하여 구조물의 3차원 운동을 측정하고 2대의 카메라 영상을 이용하여 유체의 3차원 유동장을 측정할 수 있는 시스템을 구현하게 되며 3차원 측정을 위해서는 Doh et al.(2002)의 3차원 측정알고리즘을 도입한다. 유체-구조물 연동 운동 모델로서는 길이 9cm 지름이 2.5cm인 원통형 실린더를 사용하였다.

2. 유체-구조물 연동운동 측정시스템

2.1 계측시스템 및 계측방법

Fig. 1은 계측시스템의 구성을 나타낸다. 계측시스템은 4대의 카메라, 2대의 이미지 그래버 및 호스트컴퓨터로 구성된다. 2대의 카메라는 부유식 구조물의 운동을, 나머지 2대의 카메라는 구조물의 주변 3차원 속도장을 측정하기 위하여 설치하였으며 이들은 모두 동기화되어 있다. 미리 알고 있는 기준점을 설치하여 카메라에 대한 교정작업을 한다. 이 교정작업을 통하여 물리좌표계(절대좌표계)에 대한 카메라의 파라미터가 구해지게 된다. Fig. 2는 카메라의 교정을 위하여 사용된 교정판을 나타낸다. 이 교정판의 양면에는 그림과 같이 격자형의 두께 1mm의 정밀세선이 가로 및 세로방향으로 배치되어 있으며 이들 정밀세선의 십자형 교점들을 기준점으로 삼았다. 실제 교정 시에는 이 교정판을 수조 상부에 설치하여 카메라 시선각의 정면방향으로 이동하여 3차원 교정점들을 구현하였다. 교정작업이 끝나면 기준점들이 놓였던 자리에 Fig. 2와 같은 부유식 구조물 모델을 설치한다. Fig. 3(a)는 실린더형 구조물(9cm x 2.5cm)이 수조 내부에 설치되었을 때의 스케일을 나타내고 Fig. 3(b)는 구조물의 모델사진을 나타낸다. 구조물의 운동을 측정하기 위하여 구조물 상부에 Fig. 2와 같이 표적물 4개를 설치하였다. Table 1에 실린더의 주요요목을 나타내고 있다.

구조물의 운동은 후술하는 표적물의 3차원 위치 계산을 통하여 얻어지게 되나, 구조물이 시시각각 운동하는 관계로 표적물에 대한 각 영상에서의 동일한 표적물을 추적해야할 필요가 있는데 이를 위하여 양방향탐색법이라는 새로운 개념을 본 연구에 도입하고, 유동장의 3차원 측정을 위하여 기존의 3차원 입자영상유속계(3D-PTV) 기술을 도입한다.

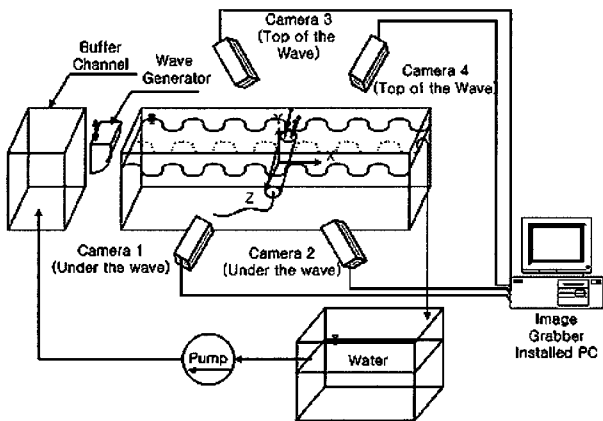


Fig. 1 Overall measurement system

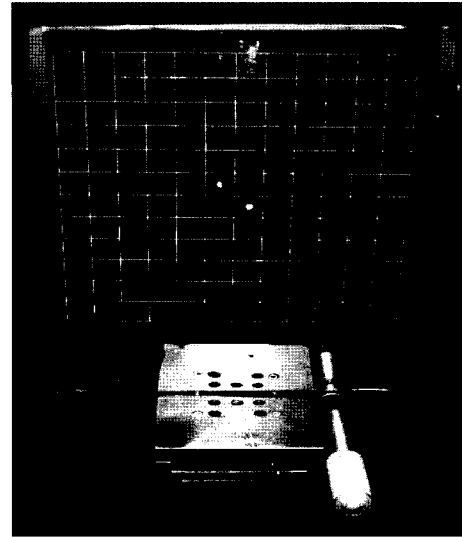
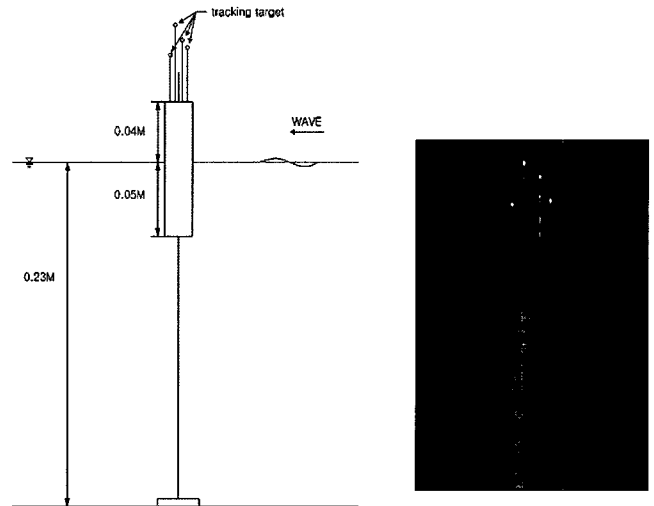


Fig. 2 Picture of calibrator for four cameras

Table 1 Hydraulic condition of the cylinder

Draft	0.05m
Center of Gravity	0.035m
Weight	0.030kgf



(a) Configuration of cylinder (b) Picture of cylinder

Fig. 3 Configuration of vertical floating cylinder

2.2 구조물 표적물과 유동장내 추적 입자의 3차원 위치 계산

카메라영상을 이용한 3차원 공간인식을 위해서는 2대 이상의 카메라와 각각의 카메라에 대한 교정작업을 통하여 카메라 파라미터(절대좌표계에 대한 카메라의 상대적 위치정보, 자세 기울기, 카메라 렌즈 및 CCD 셀 중심위치)가 필요하다. 본 연구에서는 10개 파라미터 교정법을 사용한다. 즉, 외부요소를 6개 (dis, α , β , κ , m_x , m_y), 내부요소를 4개로 나누어 (C_x , C_y , k_1 , k_2) 총 10개의 카메라 파라미터를 사용한다.

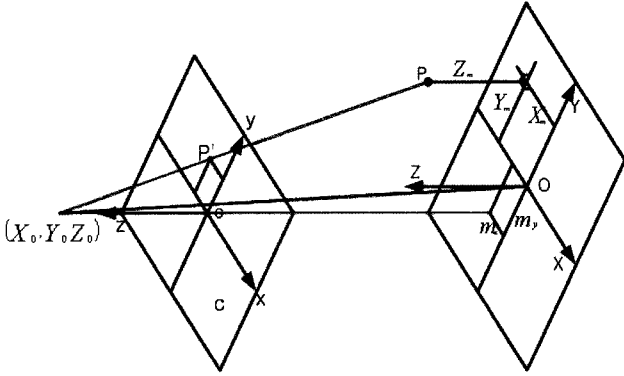


Fig. 4 Camera parameters on the absolute and the photographic coordinates

Fig. 4는 절대좌표계(X, Y, Z)에 대한 카메라 좌표계(x, y, z)와의 관계에서 10개 파라미터와의 관계를 보여 주고 있다. dis는 절대 좌표계 O(0, 0, 0)점으로부터 카메라 중심까지의 거리를 의미한다. 절대좌표계에 대한 카메라 좌표계의 회전각을 각각 α , β , κ 로 정의하면 축에 대한 회전형렬은 $M_M = M_Z M_Y M_X$ 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 일치선상에 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 (c_x, c_y) 는 이미지 그래버에 따른 장방비를 고려한 렌즈 초점거리이며, $(\Delta x, \Delta y)$ 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 다음의 식 F, G로 나타낼 수 있다. 여기서 k_1 과 k_2 는 렌즈의 왜곡보정계수를 의미한다.

$$\begin{aligned} F &= c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m^2}} - (x - \Delta x) = 0 \\ G &= c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m^2}} - (y - \Delta y) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

이 방정식은 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 식 (3)으로부터 다음과 같은 관계식 (4)가 성립된다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M_M^{-1} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, M_M 은 회전변환행렬이며 B는 이의 역행렬이다. 이때의 X_m, Y_m, Z_m 은 다음 식 (5)로 표시된다.

$$\begin{aligned} X_m &= \frac{x - \Delta x}{c_x} t + m_x \\ Y_m &= \frac{y - \Delta y}{c_y} t + m_y \\ Z_m &= d - t \\ d &= \sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} \end{aligned} \quad (5)$$

이다. 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 2대의 카메라로 구성되는 다음식 (6)으로 표현되는 2개의 직선 방정식의 교점이 최종적으로 구해지는 표적물의 공간좌표이다.

$$\begin{aligned} A(X, Y, Z) &= A(a_{11} t + b_{11}, a_{12} t + b_{12}, a_{13} t + b_{13}) \\ B(X, Y, Z) &= B(a_{21} s + b_{21}, a_{22} s + b_{22}, a_{23} s + b_{23}) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, t와 s는 최소자승법에 의하여 구해지며 최종적으로 정의되는 추적입자(표적물)의 공간좌표는 두 직선의 교점이 되는데 식 (7)로 표현된 교점의 중간점으로 정의된다.

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \right\} \quad (7)$$

각 표적물에 대해 위와 같은 과정을 거치면 대응하는 카메라간의 동일 표적물에 대한 공간좌표가 구해진다. 표적물의 공간좌표가 구해지면 시간 연속적으로 단위 시간당 표적물의 이동속도를 계산함으로써 가속도가 얻어지게 된다.

2.3 구조물 운동과 유동장 3차원 운동 계산

이상과 같은 절차를 거쳐서 Fig. 3(b)와 같이 구조물에 설치된 4개 표적점의 위치와 구조물 주위의 유동장의 추적입자들의 3차원 위치가 구해지게 되고 다음으로 이들 위치들의 시간 변화에 따른 공간이동량을 알게 되면 구조물 운동과 유동장의

3차원 운동량을 구할 수 있게 된다. 구조물의 표적물의 개수가 4개이므로 구조물의 운동을 파악하기 위해서는 각 시각영상으로부터 동일한 표적물의 추적이 필요하게 되는데 이를 위하여 본 연구에서는 Fig. 5와 같은 양방향탐색법(bi-directional searching method)을 도입하였다. 구체적 방법은 다음과 같다. 제1시각 영상에서의 표적물점(P11)이 제2시각 영상의 임의 크기의 탐색영역 내(반경 S_r 이내)에 자신의 표적물로 추정되는 후보(P21)를 기점으로 하여 재차 제1시각의 보다 작은 임의 크기의 탐색영역 내(반경 S_r')에 원래의 표적물(P11)이 발견되면 두 시각 사이에서의 운동의 동일한 표적물로 간주하였다. 이 방법에서는 S_r 과 S_r' 값의 설정에 따라서 동일 표적물의 발견이 잘 되지 않을 수도 있는데 본 연구에서는 S_r 을 20픽셀 S_r' 를 15픽셀로 취함으로써 동일 표적물을 찾을 수 있었다. 이 때, 표적물의 도심은 2차화된 영상으로부터 구하였다. 한편, 구조물 주변에서 유체와 함께 운동하고 있는 미소입자(직경 200 μ m, 비중 1.02)들의 동일입자들에 대하여 유전알고리즘기반의 3차원 입자영상유속계측법(Doh et al., 2002)을 적용함으로써 유동장의 3차원 속도벡터장을 구하였다. 이 방법의 적용을 통하여 두 장의 실험영상으로부터 약 2000개~3000개의 순간 3차원 속도벡터 분포를 얻었다.

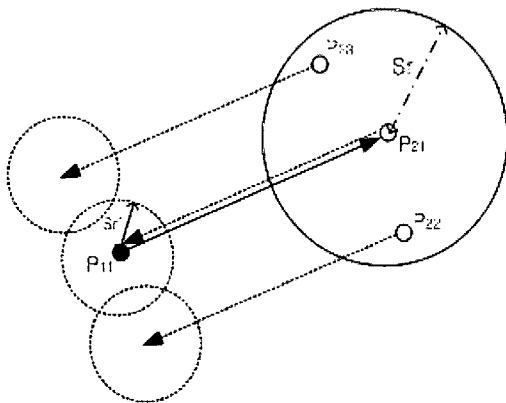


Fig. 5 Concept of motion tracking (bidirectional searching method)

3. 직립 실린더 구조물 유체-구조 연동운동 측정

전술의 4대의 카메라에 대한 교정작업이 완료된 후 원통형 실린더를 실험수조에 설치한 다음 정현파 중의 구조물 운동과 유동장을 계측하였다. Fig. 6(a)와 (b)는 구조물의 3차원 운동측정을 위하여 사용된 2대 카메라의 영상을 나타낸다. 즉, Fig. 1의 측정시스템의 카메라 3과 4에 해당하는 영상을 나타낸다. 구조물의 운동측정은 구조물 상부에 설치된 4개의 표적물에 대하여 기술의 3차원 위치계산 및 양방향추적법을 적용함으로써 가능하게 된다. Fig. 7(a)와 (b)는 구조물 하부의 유체 유동장(3차원 속도장)을 측정하기 위하여 사용된 다른 2대 카메라의 영상을 나타내는데 이는 Fig. 1의 카메라 1과 2에 해당하는 영상을 나타낸다.

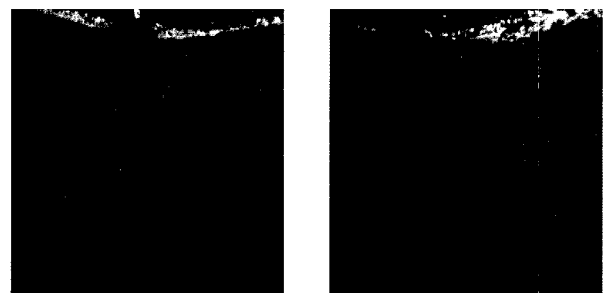
Fig. 7의 각 카메라 영상에 나타나 있는 바와 같이 수많은

미소추적입자가 있는데 3차원 속도장을 얻기 위해서는 이들 수많은 입자들 중에 동일한 입자를 구분하여 매칭시킬 필요가 있는데 이를 위해서는 유전알고리즘기반의 매칭알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘에서는 사진좌표쌍을 유전알고리즘계산을 위한 유전자로 사용하는데, 두 대의 카메라의 파라미터와 두 대의 사진좌표쌍으로부터 구해지는 3차원 속도벡터가 유동의 연속방정식을 만족할 때까지 교배(crossover), 재생산(reproduction), 이주(migration), 격리(isolation)와 같은 유전알고리즘연산이 반복 계산된다. 유동의 연속방정식을 만족하여 최종적으로 얻어진 유전자쌍(사진좌표쌍)이 두 시각 사이의 동일한 입자로 간주되며 3차원 속도벡터계산에 사용된다. 다시 말하면, 최종적으로 결정된 사진좌표쌍 (x_1, y_1, x_2, y_2)과 카메라의 파라미터(10개)를 이용하여 전술의 계산절차에 의거하여 3차원 위치를 얻고, 얻어진 두 시각분의 3차원 위치를 두 영상간의 시간차로 나눔으로써 3차원 속도벡터가 얻어지게 된다. 보다 상세한 측정알고리즘에 대한 내용은 Doh et al.(2002)의 연구에 잘 기술되어 있다.



(a) Image of camera 3 (b) Image of camera 4

Fig. 6 Images used for the measurements of structure motion



(a) Image of camera 1 (b) Image of camera 2

Fig. 7 Images used for the measurements of flow field

Fig. 8은 수조 상류측에 설치된 조파기(wave generator)가 각각 1Hz, 1.33Hz, 1.67Hz로 구동되었을 때 구조물 상부에 설치된 4개의 표적물에 대하여 시간 연속으로 측정한 결과들을 나타낸다. 좌표축의 정의는 Fig. 1과 같은데 x방향은 Fig. 6과 Fig. 7에서 우측방향을 나타낸다.

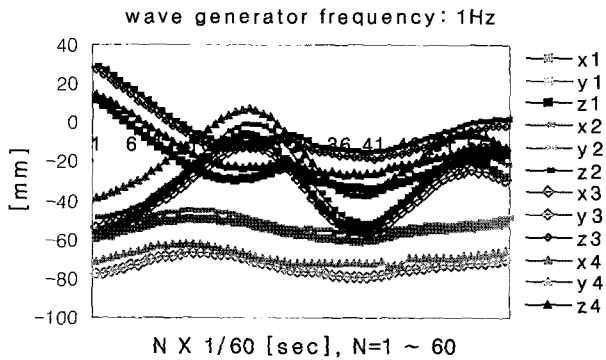


Fig. 8 Temporal motions of the four targets under the wave generator frequency 1 Hz

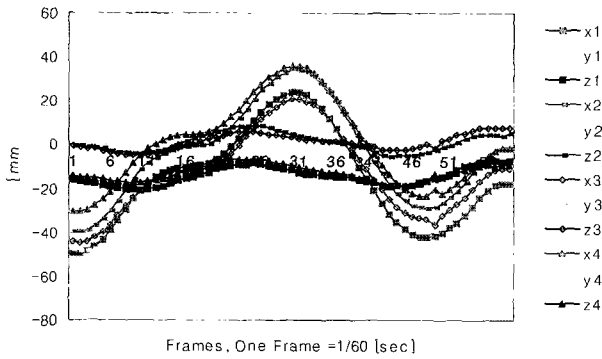


Fig. 9 Temporal motions of the four targets under the wave generator frequency 1.33 Hz

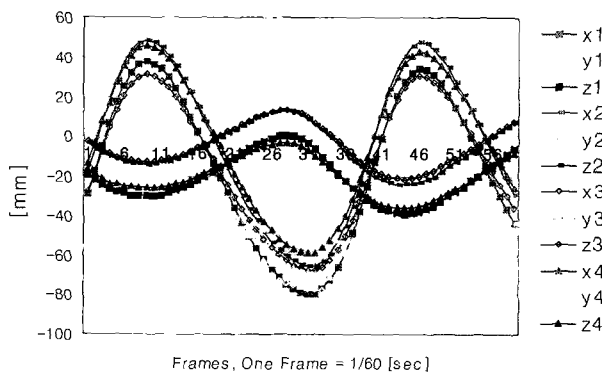


Fig. 10 Temporal motions of the four targets under the wave generator frequency 1.67 Hz

Fig. 8 ~ Fig. 10은 수조 상류측에 설치된 조파기(wave generator)를 각각 1Hz, 1.33Hz, 1.67Hz로 구동하였을 때, 구조물 상부에 설치된 4개의 표적물에 대해 각 축방향 변위의 시간력을 나타낸다. 단, 각 주파수를 가지는 정현파의 진폭은 2cm로 조절하였고, 좌표축은 Fig. 1에 정의한 바와 같이 x축

및 y축은 각각 파의 진행방향과 연직상방향을 양으로 하였다. 즉, (x1,y1,z1)은 절대좌표계에서 표적물 1의 3차원 위치를 나타내고, 원통실린더의 수선면의 중심을 교정기의 원점(0, 0, 0)으로부터 (-150, 0, 0)의 위치에 두었다.

이들 그림으로부터 알 수 있는 것은 파의 주파수가 커질수록 표적물의 x축 및 y축에 대한 변위가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 실린더의 각 전후요, 종요 및 상하요의 공진 주파수가 보다 높은 주파수에 있다는 것을 나타낸다. Fig. 8의 주파수 1Hz 정현파에서는 z방향, 즉 파진행 방향에 수직되는 운동이 크게 발생하여 z축에 대한 회전운동(pitching)에 영향을 미치게 되어 표적물의 x축 방향의 운동주파수는 입사파의 주파수보다 크게 나타나면서 실린더의 거동이 상당히 불안정한 상태를 보여준다. Fig. 9의 주파수 1.33Hz 정현파에서의 표적물의 x축 방향 운동은 1Hz와 1.67Hz 때와는 달리 주파수 1.33Hz보다 높은 2차 모드의 형성을 가지적으로 보여준다. 이는 z방향의 운동이 주기적으로 안정되면서 y축 방향운동(heaving)과 회전운동(pitching)의 비선형 연성효과에 기인하는 것으로 추정된다. 또한, Fig. 10에서는 주파수 1.67Hz 정현파에서의 각 표적물의 위치변화를 나타낸 것으로, 이에 의하면 전체 운동이 비교적 안정적이고, x방향 운동주파수가 1.6Hz 정도로 1차 모드 운동이 지배적이라는 것을 알 수 있다. 본 실험에서는 계측시스템의 개발에 주안점을 두어 임의의 3개의 주파수를 가지는 정현파만을 구동하여 전주파수 영역에서의 거동을 고찰하는 데는 다소 어려움이 있지만, 장주기파 중에서는 Vortex Shedding의 영향으로 파진행 방향에 수직되는 운동이 크게 발생하여 실린더는 불안정한 거동을 나타낸다는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 11은 실린더의 연직축에 대한 회전성분을 조사하기 위하여 식(8)로 정의된 파라미터를 나타내었다. 이에 의하면 1.6Hz에서는 입사파의 주기와 같은 주기로 크게 회전하고 있고, 1.33Hz에서는 시간력에서 보여준 바와 같이 2차 모드 성분의 영향으로 진폭은 적지만 단주기 회전성분이 있음을 보여준다.

$$60 \cdot \left(\frac{1}{8}\right) \sum_{i=1}^4 (|u_i| + |w_i|) \quad (8)$$

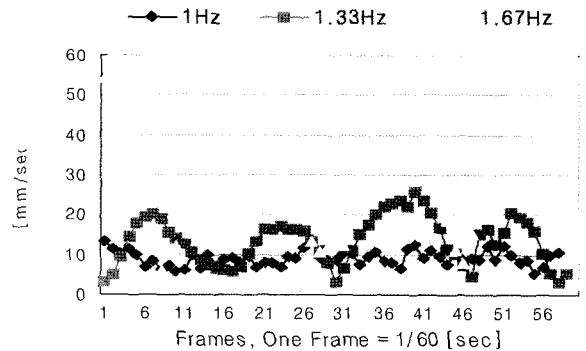


Fig. 11 Temporal characteristics of motions corresponding to yawing



Fig. 12 Three-dimensional vector field around the cylinder at ($t = t_1$)



Fig. 13 Three-dimensional vector field around the cylinder at ($t = t_1 + 9/60$ sec)

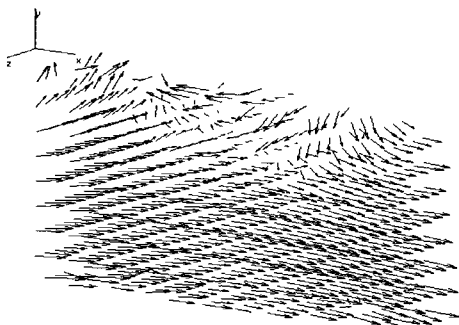


Fig. 14 Three-dimensional grid vector field around the cylinder at ($t = t_1$)

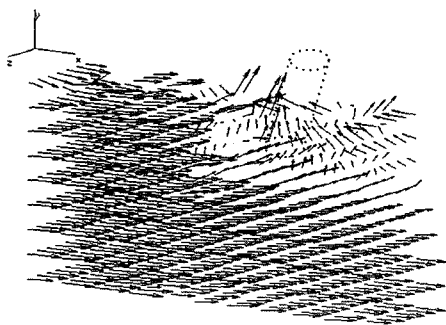


Fig. 15 Three-dimensional grid vector field around the cylinder at ($t = t_1 + 9/60$ sec)

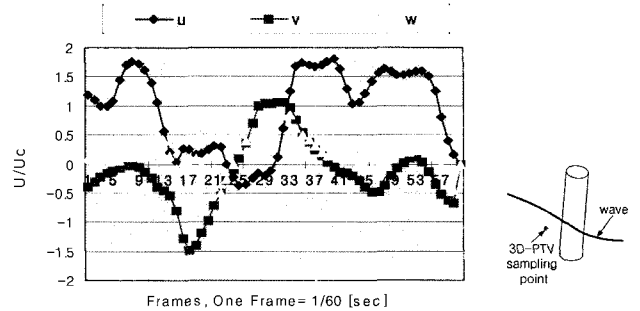


Fig. 16 Temporal evolutions of 3D vectors measured by 3D-PTV at $x, y, z = (-20, -170, 0)$

한편, Fig. 12와 Fig. 13은 조파기가 1.33Hz로 구동되고 있을 때 유체영역을 투시하고 있는 카메라 1과 2의 영상을 이용하여, 전술의 3D-PTV측정법으로 얻어낸 구조물 주변의 속도측정 개시 후 20프레임과 29프레임(9/60초 후) 각각의 순간 3차원 속도분포를 나타내고 있다. 여기서의 한 순간에 얻어진 3차원 속도벡터 수가 2000~3000개 정도이며 이들 순간벡터들로부터는 정량적 평가가 어려우므로 Doh et al.(2002)이 적용한 보간법을 적용함으로써 정량평가를 실시하였다. Fig. 14와 Fig. 15에 보간된 3차원 순간속도벡터 분포를 나타내었다. 주파수 1.33Hz에서의 표적물의 변위를 나타내는 Fig. 9를 관찰해 보면 20 프레임에서 29 프레임에 걸쳐 x방향의 변위가 급격하게 증가하는 반면, y 및 z방향의 변위는 미소한 변화를 보이고 있다. 이는 이 시각사이에 실린더의 운동에 x 방향의 변위가 지배적인 것을 의미한다. 이는 유체영역에서의 순간속도벡터 분포를 나타내고 있는 Fig. 14와 Fig. 15를 관찰함으로써 유체와 구조물의 운동현상으로부터 Fig. 9의 결과를 연관시킬 수 있다.

Fig. 15의 x방향 속도벡터크기(u)가 Fig. 14에 비교하여 매우 크게 나타나고, 이는 이 순간에 속도의 변화량이 크게 되어 실린더의 x축 방향으로 힘으로 작용하여 x축 방향 변위 및 z축 방향 회전을 유발시킨다는 것을 유추할 수 있다. Fig. 15에 나타난 실린더는 가시적 효과를 위하여 인위적으로 나타난 것이다. 본 실험에서는 카메라 1과 2가 실린더 한쪽 측면에 설치되어 있어, 실린더의 반대쪽 측면에 인접한 유체영역에서는 속도벡터를 측정할 수 없다(이 부분의 측정을 위해서는 반대방향에 제 3의 카메라를 설치하여야 한다). Fig. 15에 보여주는 얻어진 3차원 속도벡터분포에 의하면 x방향 성분의 속도벡터가 지배적인 반면, 실린더 후부에 실린더 쪽으로 향하는 속도벡터들을 볼 수 있다. 이는 실린더 하부로부터 떨어져 나온 와(vortex)에 의하여 실린더 후부에 강한 순환영역을 형성하고 있음을 의미한다. 따라서 실린더의 x축 방향 및 z축에 대한 회전운동에 기인하는 와의 영향을 무시할 수 없고, 결국 운동에 대한 형상감쇠력이 상당량 있을 것으로 추정할 수 있다.

Fig. 16은 조파기가 1.33Hz로 운동하고 있을 때 3차원 입자 영상유속계(3D-PTV)에 의하여 측정된 $x, y, z = (-20, -170, 0)$ 에서의 3차원 속도벡터들의 시간이력을 나타낸다. 여기서 좌표 $(-20, -170, 0)$ 는 정수중의 실린더 수선면의 중심점에서 파상쪽으로 20mm, 수심 35mm의 위치를 말하고, Fig. 16의 우측에

개략적인 위치를 나타내었다. 이 점에서는 u , v , w 성분들이 시간변화를 보임에 따라 이 점에서의 유동은 3차원 유동특성을 가지고 있음을 알 수 있다. u 성분은 1차 및 2차 모드를 가지고 있고, 1차 모드의 주파수는 약 1.3Hz로서 이는 조파기의 구동주파수가 1.33Hz인 점을 고려하면 타당한 결과를 주고 있음을 알 수 있다. 그리고 11프레임부터 21프레임 사이에 2차 모드가 나타나며 이는 전술한 표적물의 위치변화를 나타내는 Fig. 9의 x 축 변위에서 11프레임과 21프레임 사이에 2차 운동이 나타나는 것과 연동되어 있음을 알 수 있다. 파진행 방향과 수직인 u 성분은 일정하지는 않지만 주기성을 보이고 있어 이는 실린더 측면에서 떨어져 나가는 vortex의 영향에 기인하는 것으로 추정된다. 이상의 결과를 유체-구조물 연동의 측면에서 보면, 입사파에 의해서 실린더에는 파주기에 해당하는 파랑강제력과 측면 vortex shedding에 의한 양력이 동시에 작용하여 3차원 거동을 유발하게 된다. 또한 실린더가 운동하게 됨에 따라 실린더 끝단에서 vortex를 유발하여 순환영역을 형성하게 된다. 따라서 실린더 주위의 유체영역 속도벡터 분포는 입사파로 인한 속도분포에 구조물의 운동에 의한 방사속도와 vortex에 의한 속도 교란이 더해져 서로 합성된 결과를 주게 된다.

3. 결 론

4대의 카메라의 영상을 이용하여 구조물의 운동과 구조물 주위의 유체유동장을 동시에 측정할 수 있는 시스템을 구현함으로써 부유식 구조물의 운동과 유체유동장과의 연동문제를 정량화할 수 있는 계측기법을 개발하였으며 이를 원통형실린더 구조물에 대해 적용함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

구축된 측정시스템으로 카메라교정기의 기준점을 측정한 결과와 원래의 기준점과의 비교를 통하여 측정시스템에 대한 오차해석을 수행하였다. 그 결과, x 방향의 평균오차 및 표준편차는 0.20mm 및 0.30mm, y 방향의 평균오차 및 표준편차는 0.20mm 및 0.25mm, z 방향의 평균오차 및 표준편차는 0.30mm 및 0.55mm 이었다. 이는 측정영역의 한 변의 길이가 약 100mm정도 인 것을 감안하면, 길이대비 1%정도 이내의 오차임을 알 수가 있다.

조파기의 주기를 변화시키기에 따라 실린더의 운동진폭이 변화함과 동시에 3차원 거동의 양상이 확연히 달라짐을 알 수 있다. 실린더 끝단에 vortex에 의한 후류를 확인할 수 있었고, 이는 실린더의 운동에 기인하는 것으로 점성에 의한 형상감쇠력으로 작용한다는 것을 알 수 있다. 주파수 1.33Hz인 정현파

에서는 실린더의 전방부에 실린더 측면에서 발생한 vortex shedding으로 인한 와류동이 관측되었다. 그리고 3D-PTV로부터 얻어진 u , v , w 성분의 전체적인 변화양상과 구조물의 3차원 운동측정결과로부터 얻어진 표적물의 x , y , z 방향의 운동 변화 양상은 서로 연계를 가지게 되고, 이는 본 연구에서 구축된 동시측정시스템을 통해 역학적 분석이 가능하다는 것을 의미한다.

구축된 측정법은 완전 비접촉 계측이므로 측정 대상물에 계측으로 인한 영향을 미치지 않으며 여러 점의 표적물을 동시에 계측할 수 있으므로, 구조물의 비선형, 비정상 운동도 정도 높게 측정할 수 있다. 또한, 카메라로부터 입력된 영상정보가 컴퓨터의 RAM상에서 인식이 가능하므로 표적물영상정보를 이용하여 표적물의 3차원 운동추적이 실시간 가능케 함으로써 임의의 변동하는 구조물의 거동을 On-Line측정이 가능한 시스템이다. 따라서, 본 계측시스템은 현장계측에도 유용성이 높을 것으로 판단되고, 특히 부유해양구조물의 유체-구조물 연성문제 해석에 적합한 시스템으로 사용될 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 (신기술실용화기술개발사업, 과제번호: 10008287)의 지원으로 수행된 연구결과임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다. 또한, 중소기업기술연구소의 실용적 조언에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

Japanese Shipbuilding Research Committee,(1984). A Study on Design Forces and Intact Stabilities of a Offshore Structures, Research Report No 373.
 Doh, D.H., Kim, D.H., Choi, S.H., Hong, S.D., Kobayashi, T. and Saga, T.(2000). Single-Frame 3-D PTV for High Speed Flows, Exp. in Fluids, Vol 29, Suppl., pp 85-98.
 Doh, D.H. Kim, D.H. , Cho, K.R., Cho, Y.B., Saga, T. and Kobayashi, T.(2002). "Development of GA based 3D-PTV Technique", Journal of Visualization, Vol 5, No 3, pp 243-254.

2004년 6월 21일 원고 접수

2004년 8월 2일 최종 수정본 채택