

유동-구조상관(FSI) 3차원 측정시스템에 의한 부유식 실린더 연동운동해석

도덕희[†].상지웅^{*}.황태규^{*}.편용범^{**}.백태실^{***}

FSI Analysis on a Floating Cylinder by 3D Flow-Structure Interaction (FSI) Measurement System

Doh D. H., Sang J. W., Hwang T. G., Pyeon Y. B. and Baek T. S.

Key Words: 4-Camera(4대 카메라), 3D-PTV(3차원 입자영상유속계), 6D-Motion (6자유도 운동), Flow-Structure Interactions (유동-구조상관)

Abstract

A simultaneous measurement system that can analyze the flow-structure interactions(FSI) has been constructed and analyses on the flow field and the motion field of a floating cylinder was made. The three-dimensional vector fields around the cylinder are measured by 3D-PTV technique while the motion of the cylinder forced by the flow field is measured simultaneously with a newly developed motion tracking algorithm(bidirectional tracking algorithm). The cylinder is pendant in the working fluid of a water channel and the surface of the working fluid is forced sinusoidal to make the cylinder bounced. The interaction between the flow fields and the cylinder motion is examined quantitatively.

기호설명

x, y, z : 구조물좌표계 좌표 [mm]
 X, Y, Z : 절대좌표계 좌표 [mm]
 x_i, y_i, z_i : ($i=1\sim 4$) 구조물 목표물번호
 F, G : 카메라 관측방정식
 x, y : 카메라사진좌표계 좌표 [pixel]
 u, v, w : Velocity component of x, y, z axis

1. 서론

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

최근, 컴퓨터 성능향상에 힘입어 수치적 해석방법에 의한 유체-구조 연성문제를 다루는 연구가 점차 늘어나고 있는 추세에 있지만 이들 결과들을 뒷받침 해주는 실험계측방법은 유체의 운동과 구조의 운동을 각각 독립적으로 측정하는 것이어서 이들 측정결과들로부터 유체-고체의 연성운동을 도출해 내기란 용이하지 않다.

구조의 운동을 해석하기 위한 가장 최신의 실험적 방법에는 비접촉식 6자유도 운동측정시스템

[†]정회원. 한국해양대학교 기계정보공학부
doh@hanara.hhu.ac.kr, Tel:051-410-4364

^{*} 학생회원. 한국해양대 대학원

^{**} (주)티엔텍
flowtech@tientech.com, Tel:051-403-2691

^{***} 정회원. 포항제일대 자동차학과

(1)이 있으며 유체의 운동을 해석하기 위한 실험적 방법에는 비접촉식 3차원 입자영상유속계⁽²⁾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 왜곡 효과 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 안정성해석을 위해서는 유체-구조물의 연동운동을 동시에 측정해야 하는데 아직 이를 가능하게 하는 측정시스템은 없다. 본 연구에서는 저가이면서 유체-구조물의 연동운동에 대하여 비접촉식으로 3차원 측정이 가능한 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 도 등 [3]의 3차원 측정알고리즘을 도입한다. 유체-구조물 연동운동 모델로서는 길이 9cm 지름이 2.5cm인 원통형실린더를 사용하였다.

2. 실린더 유동-구조상관 3차원 측정시스템 및 실험방법

Fig. 1은 계측시스템의 구성을 나타낸다. 계측시스템은 4 대의 카메라, 두 대의 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 교

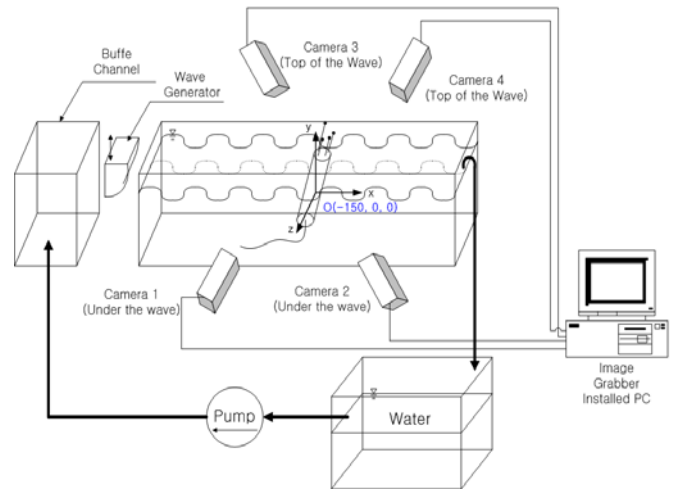


Fig. 1 FSI measurement system.

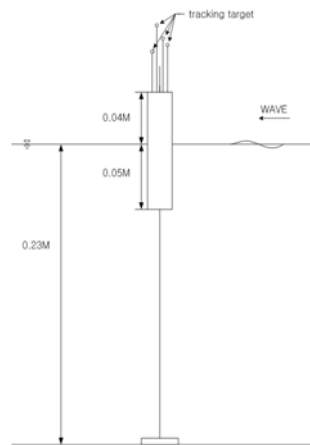


Table 1 Hydraulic conditions of the cylinder

Draft	0.05m
Center of Gravity	0.035m
Weight	0.030kgf
Displacement	0.114kgf

Fig. 2 Configuration of vertical floating cylinder.

정작업을 한다. 이 교정작업을 통하여 물리좌표계(절대좌표계)에 대한 카메라의 파라메타가 구해지게 된다. 카메라의 교정은 100개의 기준점이 있는 교정판을 수조상부에 설치한 다음 카메라 시선각의 정면방향으로 이동하여 3차원 교정점들을 구현하였다. 교정작업이 끝나면 기준점들이 놓였던 자리에 Fig. 2와 같은 부유식 구조물 모델(9cm x 2.5cm)을 설치한다. 구조물의 운동을 측정하기 위하여 구조물 상부에 표적물 4개를 설치하였다. Table 1에 실린더가 수조에 설치되었을 때의 수력학적 사양을 나타낸다. 구조물의 운동은 후술하는 표적물의 3차원 위치계산을 통하여 얻어지게 되나, 구조물이 시시각각 운동하는 관계로 표적물에 대한 각 영상에서의 동일한 표적물을 추적해야할 필요가 있는데 이를 위하여 양방향탐색법 (bidirectional tracking algorithm)

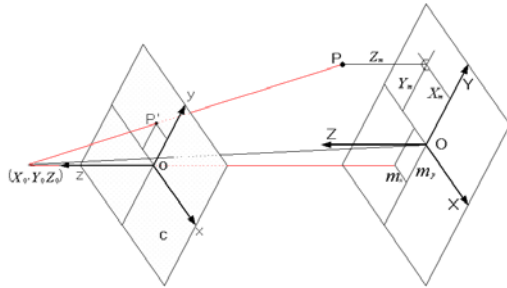


Fig. 3 Camera parameters on the absolute and the photographic coordinates.

이라는 새로운 개념을 본 연구에서 개발하였고, 유동장의 3차원 측정을 위하여 기존의 3차원 입자영상유속계(3D-PTV)기술⁽³⁾을 도입하였다.

카메라영상을 이용한 3차원 공간인식을 위해서는 2대 이상의 카메라와 각각의 카메라에 대한 교정작업을 통하여 카메라파라미터(절대좌표계에 대한 카메라의 상대적 위치정보, 자세기울기 카메라 렌즈 및 CCD 셀 중심위치)가 필요하다. 본 연구에서는 10개 파라미터 교정법⁽³⁾을 사용하였다. 여기서는 외부요소를 6개 (*dis*, *a*, *β*, *κ*, *m_x*, *m_y*), 내부요소를 4개로 나뉘어 (*C_x*, *C_y*, *k₁*, *k₂*) 총 10개의 카메라 파라미터를 사용하게 된다. Fig. 3은 절대좌표계(X, Y, Z)에 대한 카메라 좌표계(x, y, z)와의 관계에서 10개 파라미터와의 관계를 보여 주고 있다. *dis*는 절대 좌표계 O(0, 0, 0)점으로부터 카메라 중심까지의 거리를 의미한다. 절대좌표계에 대한 카메라 좌표계의 회전각을 각각 α, β, κ로 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.

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

여기서 (*c_x*, *c_y*)는 이미지 그래버에 따른 장방비

를 고려한 렌즈 초점거리이며, (Δx , Δy)은 다음의 식 (2)로 표시되는 렌즈의 굴절량을 나타낸다.

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

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.

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

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.

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

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

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

이다. 카메라의 중심위치를 (*X₀*, *Y₀*, *Z₀*)라 하

면 이 중심과 표적물입자의 중심을 지나는 직선 식은 $P(X, Y, Z) = P(a_1t + X_0, a_2t + Y_0, a_3t + Z_0)$ 로 표시되며 2 대의 카메라로 구성되는 다음의 식 (7)으로 표현되는 2개의 6직선 방정식의 교점이 최종적으로 구해지는 표적물의 공간좌표이다.

$$A(X, Y, Z) = A(a_{11}t + b_{11}, a_{12}t + b_{12}, a_{13}t + b_{13})$$

$$B(X, Y, Z) = B(a_{21}s + b_{21}, a_{22}s + b_{22}, a_{23}s + b_{23}) \quad (6)$$

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 동일한 추적점(표적물과 미소추적입자)을 시간 연속의 영상을 이용하여 추적점들의 시간연속적인 공간이동을 계산함으로써 구조물과 유동장의 3차원 운동이 측정된다. 한편, 구조물의 운동을 측정을 위해서는 2시각 사이의 영상간에 동일한 표적물의 추적이 필요하게 되는데 이를 위하여 본 연구에서는 Fig. 4와 같은 ‘양방향탐색법(bidirectional searching method)’ 도입하였다. 구체적 방법은 다음과 같다. 제 1시각 영상에서의 표적물점(P11)이 제 2시각 영상의 임의 크기의 탐색영역 내(반경 S_r 이내)에 자신의 표적물로 추정되는 후보(P21)를 기점으로 하여 제 1시각의 보다 작은 임의 크기의 탐색영역 내(반경 S_r')에 원래의 표적물(P11)이 발견되면 두 시각사이에서의 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 이 20픽셀 S_r' 가 15픽셀 에서 완벽하게 자신의 표적물이 발견되었다. 이 때, 표적물의 도심은 2치화된 영상으로부터 구하였다. 한편, 구조물 주변에서 유체(물)와 함께 운동하고 있는 미소입자(직경 $200\mu m$, 비중 1.02)들의 동일입자들에 대하여 도 등⁽³⁾이 개발한 유전알고리즘기반의 3차원 입자영상유속계법을 적

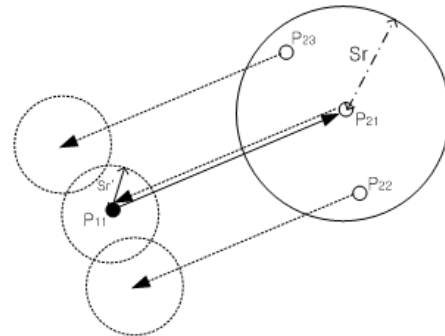


Fig. 4 Concept of motion tracking (bidirectional tracking algorithm)

용하여 유동장의 3차원 속도벡터장을 구하였다. 이 방법의 적용을 통하여 두 장의 실험영상으로부터 약 2000개~3000개의 순간 3차원 속도벡터분포를 얻었다.

3. 측정결과 및 유동-구조상관 운동해석

전술의 4대의 카메라에 대한 교정작업이 완료된 후 원통형실린더를 실험수조에 설치한 다음 수조 상류 표면상부에서 사인파를 발생시켜서 유동장을 형성시켜 본 실험을 실시하였다. Fig. 5(a)와 (b)는 구조물의 3차원 운동측정을 위하여 사용된 2대 카메라의 영상(Fig. 1의 카메라 3,4 영상)을 나타낸다.

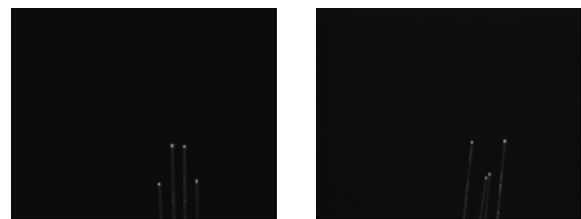


Fig. 5 Images used for the measurements of structure motion.

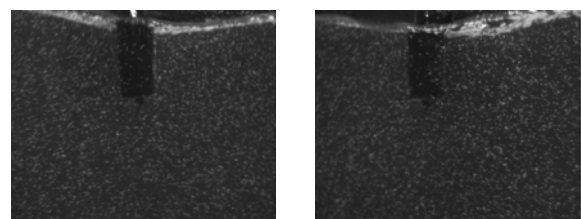


Fig. 6 Images used for the measurements of flow field.

구조물 상부에 설치된 4개의 표적물에 대하여 전술의 3차원 위치계산 및 양방향추적법을 적용함으로써 운동측정이 가능하게 된다. Fig. 6(a)와 (b)는 구조물 하부의 유체 유동장(3차원 속도장)을 측정하기 위하여 사용된 다른 2대 카메라의 영상(Fig. 1의 카메라 1, 2 영상)을 나타낸다. 이 그림에서처럼 수많은 미소추적입자가 있는데 3차원 속도장을 얻기 위해서는 이들 수많은 입자들 중에 동일한 입자를 구분하여 매칭시킬 필요가 있는데 이를 위해서는 유전알고리즘기반의 매칭 알고리즘⁽³⁾을 사용하였다. 이에 대한 보다 구체적인 내용은 참고문헌에 상술되어 있다.

Fig. 7은 수조 상류측에 설치된 파발생기(wave generator)가 1.33Hz로 구동되었을 때 구조물 상부에 설치된 4개의 표적물에 대하여 시간 연속으로 측정한 결과들을 나타낸다. Fig. 8과 Fig. 9는 파발생기가 1.33Hz로 구동되고 있을 때 본 연구에서 구축된 시스템으로 얻어진 3차원 순간 속도벡터장을 나타내는데 Fig. 7의 구조물 운동을 나타내는 20 프레임(Frame)과 29프레임에서의 구조물 주변의 3차원 유동상태를 나타낸다. Fig. 7의 20 Frame째에서는 x가 크게 증가, y는 근소한 감소, z는 근소한 증가를 보이고 있는데 이는 이 시각사이에서는 실린더의 운동에 피칭(pitching)이 지배적인 순간임을 의미하는데 Fig. 8과 Fig. 9의 순간속도벡터분포가 이를 잘 뒷받침 해 주고 있다. 그림의 점선은 실제실린더가 있는 것을 가시적으로 나타낸 것이다. 또한, x방향 성분의 속도벡터가 지배적임을 알 수 있는데 이는 Fig. 9의 결과로부터도 추론될 수 있는 타당한 결과이다.

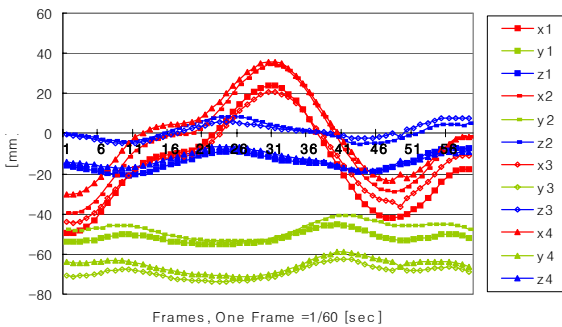


Fig. 7 Temporal motions of the four targets under the wave generator frequency 1.33 Hz.

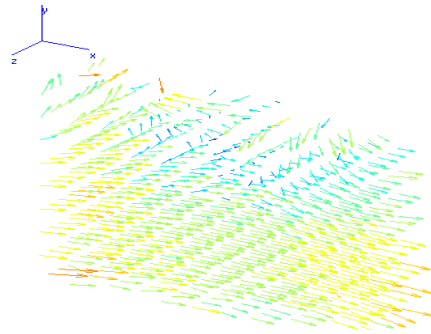


Fig. 8 Three-dimensional grid vector field around the cylinder at 20 Frame of Fig. 7.

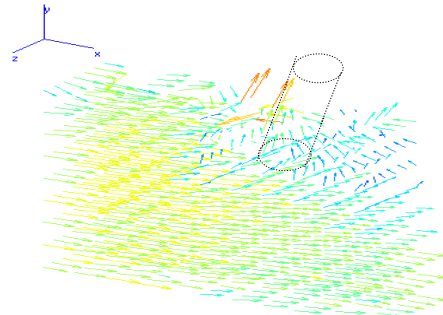


Fig. 9 Three-dimensional grid vector field around the cylinder at 29 Frame of Fig. 7.

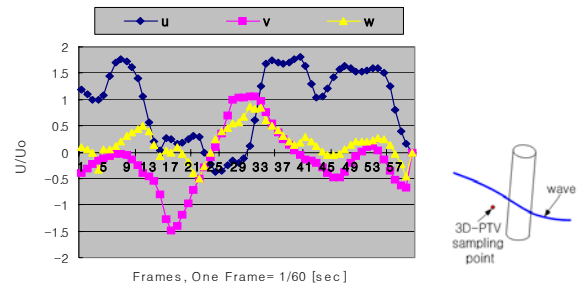


Fig. 10 Temporal evolutions of 3D vectors measured by 3D-PTV at X, Y, Z = (-20, -170, 0).

실린더 후부에 실린더 쪽으로 달려드는 속도벡터분포를 볼 수 있는데 이는 실린더 하부로부터 떨어져 나온 와(vortex)에 의하여 실린더 후부에 강한 순환영역을 형성하고 있음을 의미한다. Fig. 10은 파발생기가 1.33Hz로 운동하고 있을 때 3D-PTV[2]로 측정된 x, y, z = (-20, -170, 0)에서의 3차원 속도벡터들의 시간이력을 나타낸다. (-20, -170, 0)의 위치란 실린더 하부면 중심점을 기점으로 하여 실린더 왼쪽으로 20mm, 위쪽으로 15mm인 점을 의미하는데 Fig. 10의 우측에

그 개념도를 나타내었다. 이 점에서는 u, v, w 성분들이 주기적 특성을 보임에 따라 이 점에서의 유동은 주기적 3차원 유동을 가지고 있음을 알 수 있다. u성분의 1차 모드의 변화주기는 약 1.3Hz이었고 이는 파발생기가 1.33Hz인 점을 고려하면 타당한 결과이다. Fig. 11은 실린더의 연직축에 대한 회전성분을 조사하기 위하여 식(8)로 정의된 파라메타를 나타내었다. 이에 의하면 1.6Hz에서는 입사파의 주기와 같은 주기로 크게 회전하고 있고, 1.33Hz에서는 시간력에서 보여준 바와 같이 2차모드 성분의 영향으로 진폭은 적지만 단주기 회전성분이 있음을 보여준다.

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

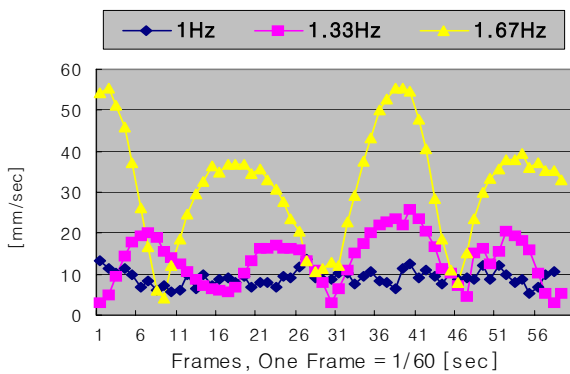


Fig. 11 Temporal characteristics of motion degree.

4. 결 론

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

구축된 측정시스템으로 카메라교정기의 기준점을 측정한 결과와 원래의 기준점과의 비교를 통한 오차해석결과, x방향의 평균오차 및 표준편차는 0.20mm 및 0.30mm, y방향의 평균오차 및 표준편차는 0.20mm 및 0.25mm, Z방향의 평균오차 및 표준편차는 0.30mm 및 0.55mm 이었

다. 이는 측정영역의 한 변의 길이가 약 100mm 정도 인 것을 고려해 봤을 때, 길이대비 1%정도이다.

조파기의 주기를 변화시키에 따라 실린더의 운동진폭이 변화함과 동시에 3차원 거동의 양상이 확연히 달라짐을 알 수 있었다. 실린더 끝단에 보텍스에 의한 후류가 확인되었는데 이는 실린더의 운동에 기인하는 것으로 점성에 의한 형상감쇠력으로 작용한다는 것을 알 수 있었다. 3D-PTV로부터 얻어진 u, v, w 성분의 전체적인 변화양상과 구조물의 3차원 운동측정결과로부터 얻어진 표적물의 x, y, z방향의 운동변화 양상은 서로 연계를 가지고 있음이 확인되었고, 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, 부유식 해양구조물의 유체-구조물 연성문제 해석에 적합한 시스템으로 사용될 수 있다. 또한, 카메라로부터 입력된 영상정보가 컴퓨터의 RAM상에서 인식이 가능하므로 표적물영상정보를 이용하여 표적물의 3차원 운동추적이 실시간 가능하게 되었고, 임의 변동하는 구조물의 거동을 On-Line측정이 가능하므로 본 계측시스템은 현장계측에도 유용성이 높을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 日本造船研究協會, 1984, "海洋構造物の設計外力および復原性に關する研究," 研究資料 No. 373.
- (2) 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.
- (3) Doh, 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.