한국해양공학회 2004년도 춘계학술대회 논문집 PP.274~278

디지털영상처리기술을 이용한 비접촉식 유체-구조연동운동 3차원 측정시스템 개발에 관한 연구

도덕희* · 상지웅** · 황태규** · 조용범** · 편용범***
*한국해양대학교 기계정보공학부
**한국해양대학교 대학원
***(주)티엔텍

A Study on Developments of Three-dimensional Measurement System for Flow-Structure Interactions using Digital Image Processing

DEOG-HEE DOH*, JI-WOONG SANG**, TAE-GYU HWANG**, YONG-BEOM CHO** AND YONG-BEOM PYEON***
*Division of Mech. & Info. Eng., Korea Maritime Univ., Busan, Korea
**Graduate School, Korea Maritime Univ., Busan, Korea
***TNTech Co. Ltd., Busan, Korea

KEY WORDS: Flow-Structure Interactions 유체구조연동운동, Four CCD Camera 4대 카메라, Motion of Vertical Cylinder 직립원통형 실린더 운동, Flow Fields 3D Measurement 유동장 3차원 측정

ABSTRACT: *A simultaneous measurement system that can analyze the flow-structure interactions 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 pended in the working fluid of a water channel and the surface of the working fluid is forced sinusoidal to make the cylinder bounced. Reynolds number for the mean main stream is about 1000. 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 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'(일본조선연구협회, 1984)이 있으며 유체의 운동을 해석하기 위한 실험적 방법에는 '비접촉식 3차원 입자영상유속계'(도덕희, 2000)가 있다.

제1저자 홍길동 연락처: 대전광역시 유성구 장동 35-1
042-888-1234 gdhong@kriso.re.kr

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 안정성해석을 위해서는 유체-구조물의 연동운동을 동시에 측정해야하는데 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 도덕희 등(2002)의 3차원 측

정알고리듬을 도입한다. 유체-구조물 연동운동 모델로서는 깊이 9cm 지름이 2.5cm인 원통형실린더를 사용하였다.

2. 유체-구조물 연동운동 측정시스템

2.1 계측시스템 및 계측방법

Fig. 1은 계측시스템의 구성을 나타낸다. 계측시스템은 4 대의 카메라, 두 대의 이미지 그래버 및 호스트컴퓨터로 구성된다. 2 대의 카메라는 부유식 구조물의 운동을 나머지 2대의 카메라는 구조물의 주변 3차원 속도장을 측정하기 위하여 설치하였다. 미리 알고 있는 기준점을 설치하여 카메라에 대한 교정작업을 한다. 이 교정작업을 통하여 물리좌표계(절대좌표계)에 대한 카메라의 파라메타가 구해지게 된다. 교정작업이 끝나면 기준점들이 놓였던 자리에 Fig. 2와 같은 부유식 구조물 모델을 설치한다. Fig. 2(a)는 실린더형 구조물(9cm x 2.5cm)이 수조내부에 설치되었을 때의 스케일을 나타내고 Fig. 2(b)는 구조물의 모델사진을 나타낸다. 구조물의 운동을 측정하기 위하여 구조물 상부에 Fig. 2와 같이 표적물 4개를 설치하였다. Table 1에 실린더가 수조에 설치되었을 때의 수력학적 사양을 나타내고 있다.

구조물의 운동은 후술하는 표적물의 3차원 위치계산을 통하여 얻어지게 되나, 구조물이 시시각각 운동하는 관계로 표적물에 대한 각 영상에서의 동일한 표적물을 추적해야할 필요가 있다. 동일 표적물은 각 영상간의 상호상관법(Adrian, 1991; 도덕희, 1998)에 의한 탐색에 의하여 표적물이 탐색되게 된다. 일단, 동일 표적물이 탐색되면 동일 입자들의 2 카메라영상의 사진좌표와 각 카메라의 파라메타를 이용하여 3차원 위치계산을 하게 된다.

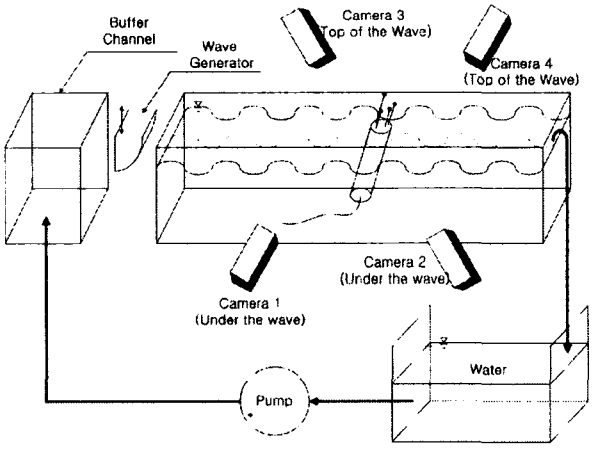
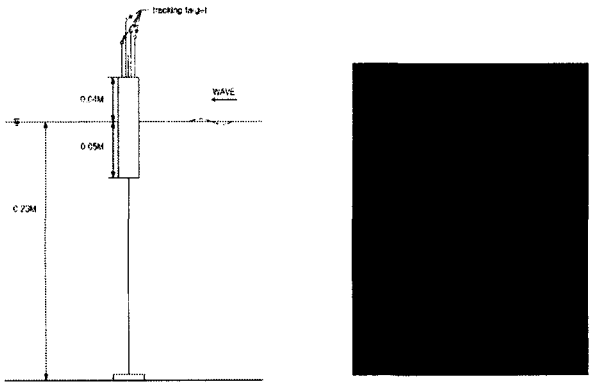


Fig. 1 Overall measurement system

Table 1 Hydraulic condition of the cylinder

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



(1) Configuration of cylinder (2) Picture of cylinder

Fig. 2 Configuration of vertical floating cylinder

2.2 구조물 표적물과 유동장내 추적 입자의 3차원 위치 계산

전술한 바와 같이 카메라를 이용한 공간인식을 위해서는 2 대 이상의 카메라와 각각의 카메라에 대한 교정작업을 통하여 카메라파라미터(절대좌표계에 대한 카메라의 상대적 위치정보, 자세기울기, 카메라 렌즈 및 CCD cell 위치)가 필요하다. 본 연구에서는 10개 파라미터 교정법(도덕희 등, 2002)을 사용한다. 즉, 외부요소를 6개 (dis, α, β, κ, m_x, m_y), 내부요소를 4개로 나뉘어 (C_x, C_y, k_1, k_2) 총 10개의 카메라 파라미터를 사용한다.

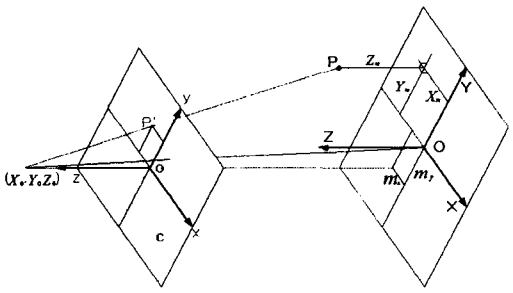


Fig. 3 Camera parameters on the absolute and the photographical coordinates.

Fig. 5는 절대좌표계(X, Y, Z)에 대한 카메라 좌표계(x, y, z)와의 관계에서 10개 파라메타와의 관계를 보여 주고 있다. dis는 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.

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

여기서 (c_x, c_y)는 이미지 그래버에 따른 장방비를 고려한 렌즈 초점거리이며, $(\triangle x, \triangle y)$은 다음의 식 (2)로 표시되는 렌즈의 굴절량을 나타낸다.

$$\triangle x = \frac{x}{r}(k_1 r^2 + k_2 r^4),\ \triangle y = \frac{y}{r}(k_1 r^2 + k_2 r^4)$$
$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2)$$

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.

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

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_M은 회전변환행렬이며 B는 이의 역행렬이다. 이때의 Xm, Ym, Zm은 다음 식 (5)로 표시된다.

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

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 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.

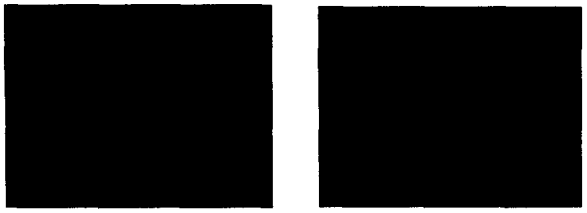
$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \right\} \quad (8)$$

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 되고 가속도가 얻어지면 힘이 구해지게 된다.

3. 직립 실린더 구조물 유체-구조연동운동 측정

Fig. 4(a)와 (b)는 구조물의 3차원 운동측정을 위하여 사용된 2대 카메라의 영상을 나타낸다. 즉, Fig. 1의 측정시스템의 카메라 3과 4에 해당하는 영상을 나타낸다. 구조물 상부에는 구조물 자체의 운동을 파악하기 위하여 4개의 표적물이 있다. 이들 영상을 이용하여 전술의 표적물의 3차원 위치를 계산함으로써 3차원 운동측정이 가능하게 된다. Fig. 5(a)와 (b)는 구조물 하부의 유체유동장(3차원 속도장)을 측정하기 위하여 사용된 다른 2대 카메라의 영상을 나타내는데 이는 Fig. 1의 카메라 1과 2에 해당하는 영상을 나타낸다. Fig. 5에 나타나 있는 바와 같이 유동장에 수많은 추적입자(나일론, sg:1.02)가 있는데 3차원 속도장을 얻기 위해서는 많은 입자들 중에 동일한 입자를 구분하여 매칭시킬 필요가 있는데 이를 위해서는 유전알고리듬기반의 매칭알고리듬(도덕희 등, 2002)을 사용한다. 간략히 기술하자면 수많은 입자들의 사진좌표를 유전자로 간주하여 유동의 연속함수를 유전알고리듬의 최적화를 위한 목적함수로 사용함으로써 두 영상의 두 시각분의 입자들 간의 최적화 계산을 실시하는 것으로 두 카메라영상으로부터 얻어진 입자쌍의 정보가 3차원 속도벡터 계산에 쓰이게 된다. 즉, 사진좌표로 구성되는 정보(x1, y1, x2, y2)와 카메라의 파라메타(10개)를 전술의 계산에 의거하여 3차원 위치를 얻고, 얻어진 두 시각분

의 3차원 위치를 두 영상간의 시간차로 나눔으로써 3차원 속도벡터가 얻어지게 된다.



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

Fig. 4 Images used for the measurements of structure motion

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

Fig. 5 Images used for the measurements of flow field

Fig. 6은 구조물 상부에 설치된 4개의 표적물에 대하여 시간 연속으로 측정한 결과를 나타내고 있다. (x1, y1, z1)과 (x4, y4, z4)는 표적물 1과 4의 절대좌표계(카메라의 지상좌표계)3차원 위치를 나타낸다. x 방향은 Fig. 4와 5에서 우측방향을 말하는데, Fig. 6의 x1, x2, x3, x4의 위치를 보면 점점 증가함을 알 수 있다. 이는 구조물이 전반적으로 x방향으로 증가함을 의미하는데, 파도에 의하여 구조물이 x방향으로 기울어져 있음을 추론할 수 있다. 또한, x 방향의 운동을 보면 증가하다가 다시 감소함을 알 수가 있는데 이는 구조물이 우측으로 운동하다가 좌측으로 운동됨을 의미하는데 그 주기가 약 0.8초였음이 확인되었다. y방향의 운동도 마찬가지로 파도의 운동과 동일한 운동을 하고 있음을 알 수 있으며 이의 주기도 4개의 표적물이 약 0.8초로 나타났다. z방향의 운동은 주기적 운동이 아니라 정체적인 운동을 하였는데 이는 수조상부에서 발생된 파가 2차원 파인 것에 기인한다고 볼 수 있다.

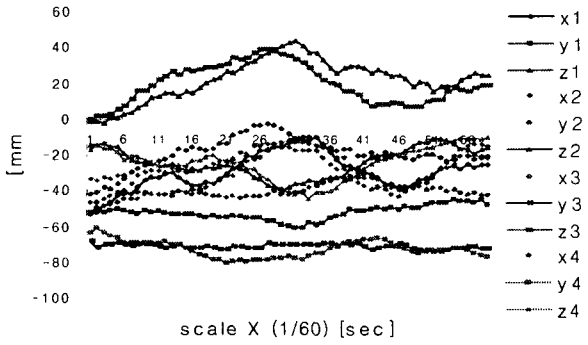


Fig. 6 Temporal motions of the four targets

Fig. 7 Three-dimensional vector field around the cylinder (t = t1)

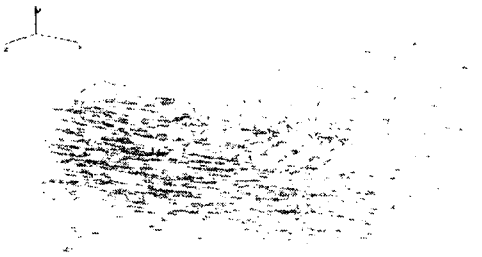


Fig. 8 Three-dimensional vector field around the cylinder (t = t1 + 9/60sec)

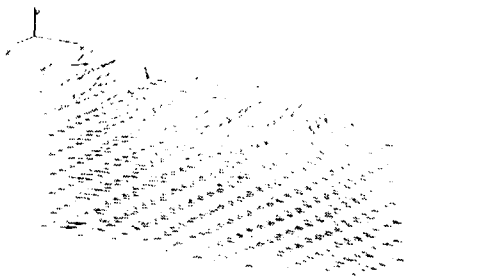


Fig. 9 Three-dimensional grid vector field around the cylinder (t = t1)

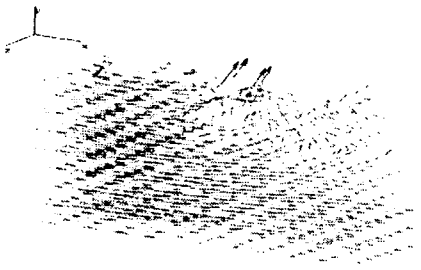


Fig. 10 Three-dimensional grid vector field around the cylinder (t = t1 + 9/60sec)

그러나, z방향의 운동도 미소하지만 존재하고 있음을 알 수 있는데 이는 구조물이 3차원적 운동을 하고 있음을 의미한다.

Fig. 7과 Fig. 8은 측정시각 t1과 t1 + 9/60 초일 때의 측정된 실린더주변의 순간 3차원 속도장을 나타낸다. 이들 속도장들로부터는 정량적 해석이 어려우므로 Fig. 9와 Fig. 10과 같이 유동장의 공간격자상에 보간을 실시하여 유동특성을 파악하게 된다. Fig. 6의 구조물 운동측정결과에서 시작시간점에서의 유동장이 Fig. 9의 결과에 해당되며 이로부터 9시각(scale) 후의 유동장 측정결과가 Fig. 10에 해당된다. 이들 그림으로부터 알 수 있는 것은 구조물이 현재 상승중에 있으며 구조물 주변의 유동장이 구조물의 상승에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 구조물의 하부에는 주류 방향의 흐름에 따른 영향으로 균일한 유동을 보이고 있음을 알 수 있다.

3. 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 계측기법을 개발하였으며 그 과정에서 다음과 같이 정리하였다.

측정시스템의 절대좌표계에 있어서 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 이었다. 이는 측정영역의 크기가 약 100mm 정도 인 것을 고려해 봤을 때, 길이대비 1%정도 이내의 오차임을 알 수가 있었다.

구축된 측정법으로 직립형 실린더의 운동과 실린더 주변의 유체유동장에 대한 동시측정을 통하여 실린더의 운동과 유체유동과의 상관관계를 해석하였다.

구축된 측정법은 완전 비접촉 계측이므로 측정 대상물에 계측으로 인한 영향을 미치지 않으며 여러 점의 표적물을 동시에 계측할 수 있으므로 구조물의 非定常 운동을 정도 높게 측정할 수 있었다.

카메라로부터 입력된 영상정보가 컴퓨터의 RAM상에서 인식이 가능하도록 하였으며, 표적물영상정보를 이용하여 표적물의 3차원 운동추적이 실시간 수준으로 가능케 함으로써 비접촉식 운동측정에 있어서 On-Line측정이 가능하게 되었다.

본 연구에서 구축한 계측법은 유체-구조연성문제를 해석하는데 필요로 하는 실험데이터 구축에 긴요하게 사용될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 (신기술실용화기술개발사업, 과제번호: 10008287)의 지원으로 수행된 연구결과임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Adrian, R. J., (1991). Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 23, pp. 261-304.

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.

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.

D.H. Doh, (1998). PIV Measurement Technique, KSME Journal, Vol. 38 No. 10, pp.36-41. PIV 계측기술, 기계학회지 해설논문, 38권 10호, pp.36-41.

2004년 5월 6일 원고 접수
2004년 월 일 최종 수정본 채택