

## 3D-PTV에 의한 금붕어 후류 계측

도덕희<sup>†</sup> · 황태규<sup>\*</sup> · 장규섭<sup>\*</sup> · 방윤석<sup>\*</sup> · 상지웅<sup>\*</sup> · 김동진<sup>\*</sup> · 백태실<sup>\*\*</sup> ·  
조용범<sup>\*\*\*</sup> · 편용범<sup>\*\*\*</sup>

### 3D-PTV Measurements of the Wake of a Goldfish

Doh D. H., Hwang T. G., Chang G. S., Bang Y. S., Sang J. W., Kim D. J.,  
Baek, T. S., Cho Y. B. and Pyun Y. B.

**Key Words:** 3D-PTV Measurement(3D-PTV 계측), Wake Characteristics(후류 특성),  
Goldfish(금붕어).

#### Abstract

3D-PTV measurement was conducted on the wake of a goldfish in order to understand its swimming motions. The measurement system consisted of three CCD cameras, an image grabber, an Ar-Ion laser and a host computer. The flow properties of the wake of the goldfish were measured under three different velocities of the currents. Unsteady flow structures around the goldfish were quantitatively clarified using the time-consecutive instantaneous three-dimensional vectors obtained by the constructed 3D-PTV system.

#### 기호설명

D	: 구의 직경	[mm]
U, V, W	: x, y, z 방향 평균속도	[m/sec]
U0	: 대표속도	[m/sec]
$(X_m, Y_m, Z_m)$	: X, Y, Z축에 의한 회전된 입자좌표	
$(X_0, Y_0, Z_0)$	: 카메라 중심의 위치(절대 좌표계)	
$c_x, c_y$	: 투영면(초점거리)	[pixel]
x, y	: 사진좌표	[pixel]

#### 1. 서론

물고기가 자신 주변의 조류상태에 따라서 힘을 그다지 들이지 않고 헤엄을 치는 원리를 공학분야에 적용할 수만 있다면 더 없는 좋은 생체유체역학의 응용사례라 볼 수 있다. Techet 등은 이러한 목적을 위하여 물고기 로봇을 만들어 물고기 주변 경계층에 대한 연구를 시도하였다(1). 그러나, 로봇은 물고기의 심리적 상태나 운동을 완전하게 재현하기 힘든 관계로 이상적인 것은 물고기의 구속이 없는 상태에서 발생하는 주변유동에 대한 실험적 결과가 더욱 바람직하다고 할 수 있다. Anderson 등은 도미와 돛상어가 물이 정지할 때와 흐를 때에 경계층의 유동상태를 2차원 PIV기법으로 상세하게 보고하고 있다(2). 그들은 물고기가 자신의 몸체 주변에서 좀처럼 박리를 발생시키지 않도록 운동함으로써 항력을 최대한 줄이고 있다고 언급하고 있다. 이러한 경우에는

<sup>\*</sup> 정회원. 한국해양대학교 기계·정보공학부  
doh@hanara.hhu.ac.kr, Tel:051-410-4364

<sup>\*\*</sup> 정회원. 포항제1대학, 자동차과

<sup>\*\*\*</sup> (주)티엔텍

flowtech@tientech.com, Tel:051-403-2691

항력을 줄이는 측면에서는 공학적 의의가 있다고 볼 수 있겠으나, 물고기가 매우 빠르게 진진하고 있는 상황에서 급작스럽게 방향을 바꾼다든지 할 경우에 물고기 몸체의 어떤 운동에 의하여 어떤 유동이 발생함으로써 그러한 행동이 가능하게 하는지에 대한 연구는 경계층 유동보다는 Wake에 대한 연구가 중요하게 된다. 그러나, 물고기가 자유상태에서 운동해야한다는 점, Wake를 발생시키는 상황에서는 유동이 3차원적이라는 점, 등으로 인하여 2차원적 측정방법으로는 유동해석은 불가능하게 된다.

본 연구에서는 최근 복잡유동장 해석에 각광을 받고 있는 3차원 입자영상유속계(3D-PTV 계측법)을 금붕어의 주변 유동장 계측에 적용하여 정량적 해석을 시도하였기에 이를 보고하고자 한다.

## 2. 3D-PTV 계측시스템

### 2.1 계측시스템

Fig. 1은 몸통길이가 Fig. 2에 나와 있는 약 45mm이고 몸통높이 폭이 25mm인 금붕어의 후류를 3D-PTV계측법으로 정량적으로 계측하기 위한 시스템을 나타내고 있다. 계측시스템은 2대의 CCD카메라(768×494 pixels), 이미지그래버(512×512 pixels, 256 gray levels), 레이저(5W)와 호스트컴퓨터로 구성되어 있다. 실험을 위하여 300×300×1200 mm<sup>3</sup> 인 회류 수조를 사용하였으며, 금붕어가 자유로이 움직일 수 있는 최소한의 공간의 수로(80×80×600 mm<sup>3</sup>)를 그 안에 그림과 같이 설치하였다.

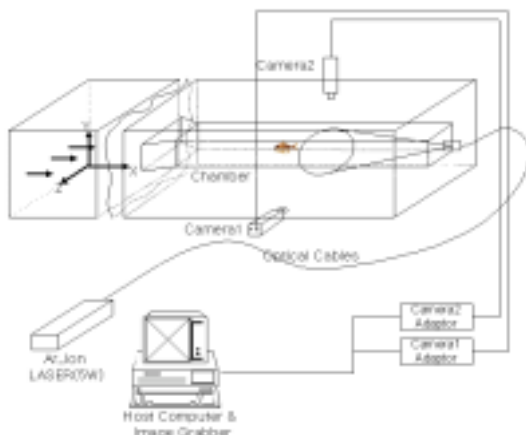


Fig. 1 3D-PTV measurement system.



Fig. 2 Tested goldfish.

금붕어가 내부 수로를 헤엄을 쳐서 꼬리지느러미가 카메라의 관측영역을 빠져나가는 순간 2대의 CCD카메라로 이미지를 획득하였다.

수로 안의 입구흐름 속도가 각각 0.015m/s, 0.025m/s, 0.034m/s일 때 금붕어의 꼬리지느러미가 후류에 어떠한 영향을 주는 지에 대하여 3D-PTV로 계측하였다. 금붕어의 몸통높이 폭 25mm를 대표길이로 하였다.

2대의 카메라로부터 받아들이는 영상은 유동장에 투입된 입자상의 중심을 구하기 위하여 컴퓨터로 보내어진다. 각 카메라들의 영상으로부터 얻어진 입자들의 중심은 3차원 속도벡터를 얻는데 쓰여진다.

### 2.2 카메라교정 및 3D-PTV계측알고리즘

카메라를 이용하여 3차원 공간을 정량적으로 인식하기 위해서는 먼저 2대 이상의 카메라와 각각의 카메라에 대한 정보가 필요하다. 이를 구하는 과정이 카메라교정이다. Kobayasi 등<sup>(3)</sup>과 도덕희 등<sup>(4)(5)</sup>은 외부요소 ( $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \chi$ )와 내부요소 ( $c, x_0, y_0, k_1, k_2$ )등 11개 요소를 가지는 관측 방정식을 사용하였는데 이 방법은 카메라 정보를 얻는 과정이 복잡한 여러 가지 과정을 거쳐야 한다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위하여 도 등<sup>(6)(7)</sup>이 적용한 10개 표정요소법을 도입하였다.

이 방법에서 절대좌표계의 대상점과 사진좌표계의 투영점이 일직선상에 있다는 공선조건으로부터 다음과 같은 관측방정식 (1)을 얻을 수 있다.

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

dis는 절대 좌표계  $O(0, 0, 0)$ 점으로부터 카메라 중심까지의 거리를,  $(X_m, Y_m, Z_m)$ 는 입자의 공간상 3차원 좌표값을,  $m_x, m_y$ 은 카메라의 z축과 절대좌표계의 Z축을 일치시키기 위해 이동한 거리를,  $c_x, c_y$ 는 이미지 그래버에 따른 장방비의 차이를 고려한 렌즈중심점과 화면주점간의 거리를 의미한다.  $\Delta x, \Delta y$ 는 방사상의 렌즈왜곡을 고려한 량으로 다음 식 (2)로 정의된다.

$$\Delta x = \frac{X}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4), \quad \Delta y = \frac{Y}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{2}$$

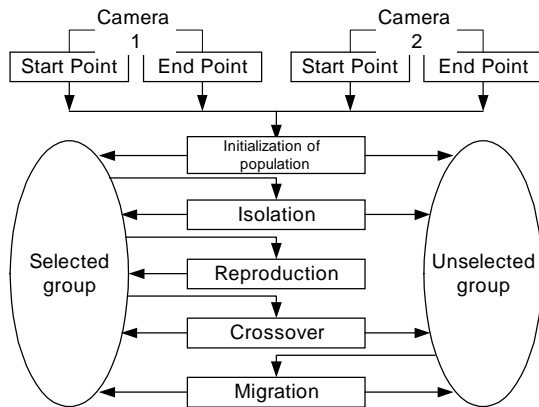


Fig. 2 Flow chart of the Used Genetic Algorithm.

카메라의 교정을 위한 기준점으로서 42개의 3차원 위치정보를 가진 교정기를 사용하였다. 이 위치 교정기는 원주후방에 상대위치를 계측한 후 설치된다. 카메라의 교정작업이 끝나면 카메라의 파라메타가 구해지게 되는데 이 값들과 실제 실험영상의 입자영상좌표만을 가지고 3차원 속도벡터가 구해지게 된다.

유동장의 구조를 얻어내기 위해서는 한 순간에 얻어지는 속도벡터의 수가 많아야 하는데 이를 위하여 유전알고리즘기반의 3차원 PTV기법<sup>(6)(7)</sup>을 도입하였다. Fig. 2는 도입한 유전알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 이 알고리즘에서는 초기개체의 생성, 격리, 재생산, 교배 및 이주와 같은 유전알고리즘(GA)연산자를 사용하였다. 각 카메라 1, 2의 시점과 종점의 위치는 염색체의 유전자로 사용하였다. 각 카메라에서의 공선의 조건식에서 두 직선간의 최단거리가 최소로 되는 염색체들을 골라서 배제된 집단으로 소속시킴 후 배제되지 않은 입자쌍의 집단

들 중에서 연속개념에 의거한 식이 만족되는 염색체들을 골라서 선택된 집단으로 소속시키는 과정을 반복함으로써 시간 및 공간에 대응하는 입자쌍을 발견하게 된다.

3차원 속도벡터는 입자쌍들이 만드는 시점과 종점간의 이동거리에 시간간격을 나눔으로써 얻어지게 된다. 유전알고리즘기반 3차원 PTV계측알고리즘의 보다 자세한 내용은 참고문헌<sup>(7)</sup>에 기술되어 있다. 본 연구에서는 3차원 최단거리의 한계값을 0.5mm, 교배율은 10%를 주었으며, 입자의 개수에 따라 10~15세대(반복횟수)를 사용하였다.

계측시스템의 성능을 평가하기 위하여 VSJ (Visualization Society of Japan)가 제시하고 있는 벽면충돌제트에 대한 LES데이터를 이용한 가상영상을 카메라의 입력영상으로 이용하였다. 그 결과 속도벡터 회복률이 입자수가 2000개에서 약 80% 이상임을 알 수 있었다. 이 때, 회복된 속도벡터라 함은 VSJ에서 제공하고 있는 LES데이터 값과 실제 계측된 값과의 차이가 0.05mm이내인 벡터로 정의하였다. 실제 실험영상으로부터는 한 번의 측정으로 얻어지는 속도벡터 수는 약 3000개였으며 이는 실제 영상에서의 입자개수의 약 70%에 해당하였다. 한편, 약 10%의 속도벡터회복률의 차이는 실제 영상에서의 잡음 등의 영향에 기인한 것으로 본다<sup>(8)</sup>.

상대오차는 LES에 의한 충돌제트데이터와 3D-PTV에 의하여 계측된 데이터와의 비를 나타내며 다음 식 (3)으로 정의하였다.

$$S = \frac{1}{N} \sum \frac{V_{ref} - V_{mea}}{V_{mea}} \times 100\% \tag{3}$$

$V_{ref}$ 와  $V_{mea}$ 는 각각 충돌제트에 대한 LES데이터와 3D-PTV에 의한 계측데이터를 의미하며  $N$ 은 회복된 속도벡터(올바르다고 판단된 벡터의 개수)의 개수이다. 입자수가 2000개일 때에는 상대오차가 약 4%이내인 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 구축한 3D-PTV는 이와 같은 성능을 가지고 있으며 이를 Fig. 1의 실험장치에 적용하였다.

### 2.3 계측결과

Fig. 3은 각 카메라에서 얻어진 임의 한 시각에서의 원시영상을 나타내고 있다. 이들 두 시각에서의 영상에 대하여 잡음제거, 배경제거, 면심

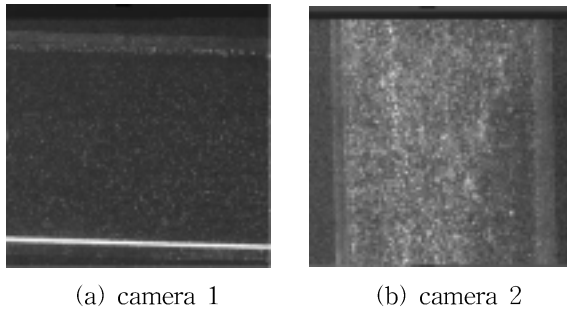
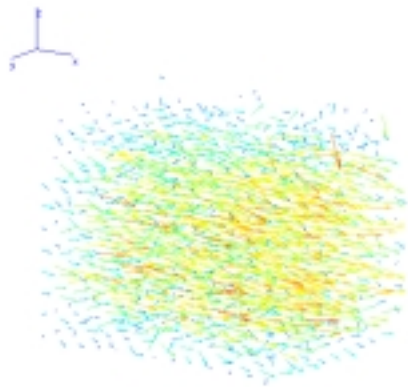
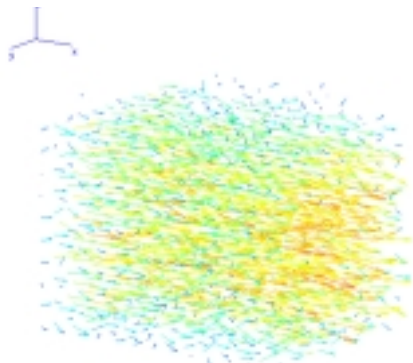


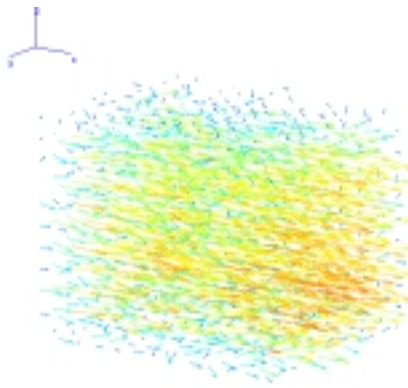
Fig. 3 Raw image.



(a) Case A



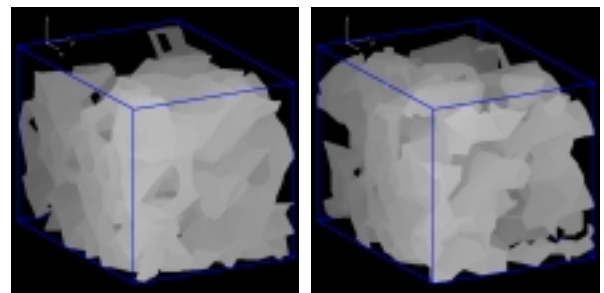
(a) Case B



(a) Case C

Fig. 4 Interpolated mean 3D vector distribution of the Goldfish's rear wake.

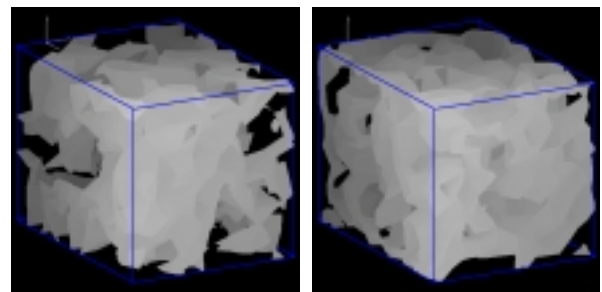
계산 등의 과정을 통하여 유동장에 투입된 미소 입자들의 중심을 구하여 사진좌표로 사용하게 된다. 이들 두 영상의 사진좌표를 전술의 3D-PTV 계산에 의한 3차원 순간속도벡터를 얻게된다. 시간 연속적인 3차원 속도벡터분포는 이와 같은 작업을 각 시각 영상마다에 처리계산함으로써 얻어지게 된다.



(a) 0 sec

(b) 1 sec

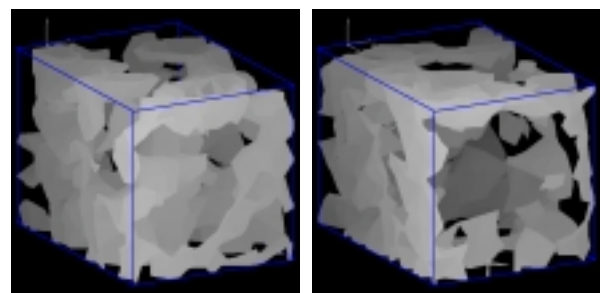
Fig. 5 Instantaneous vorticity distribution of the Goldfish's rear wake. (Case A)



(a) 0 sec

(b) 1 sec

Fig. 6 Instantaneous vorticity distribution of the Goldfish's rear wake. (Case B)



(a) 0 sec

(b) 1 sec

Fig. 7 Instantaneous vorticity distribution of the Goldfish's rear wake. (Case C)

**Table 1** Flume velocity.

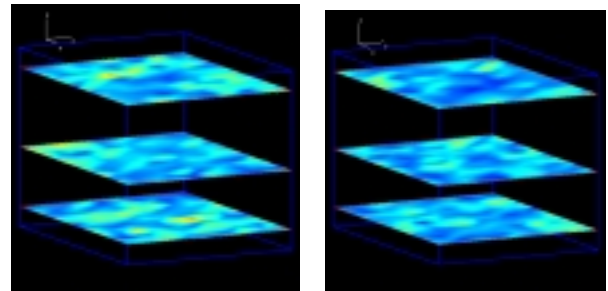
Case	Velocity [m/sec]
A	0.015
B	0.025
C	0.034

Table 1은 주류의 흐름속도를 나타낸다. Fig. 4는 Table 1의 경우에 대하여 구축된 3D-PTV 계측법으로 측정하여 얻은 격자상의 평균속도벡터 분포를 나타낸 것으로 (a)는 case A, (b)는 case B, (c)는 case C일 때의 속도분포를 나타낸 것이다. 이들 그림으로부터 알 수 있듯이 금붕어의 존재에 의한 후류 속도와 주유동의 속도가 명확하게 구분되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5, Fig. 6 및 Fig. 7은 각 case에서의 순간 와도의 공간분포를 보이고 있는데 (a)는 입의 시각에서의 와도분포를 (b)는 이 시각으로부터 1초 후의 와도분포를 보이고 있다. 전체적으로 보아, 유동의 구조는 마치 구의 후류<sup>(9)</sup>와 같은 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 구의 후류에 가까울수록 금붕어는 아무런 운동을 하지 않음을 의미하게 되는데, 실제로 금붕어가 유동이 있는 상황에서도 가끔씩 아무 운동을 하지 않고 정지해 있는 경우가 있었다. 한편, 유속이 빠른 case C의 경우가 와도분포가 단순한 구조를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 유속이 빠를 때에는 금붕어 자신이 유동과 함께 휩쓸려 가지 않게 하기 위하여 스스로가 유체저항을 최대한 줄이기 위한 소정의 지느러미운동을 수행함으로써 상류 측으로 거슬러 올라갔다는 사실로 추론할 수 있다.

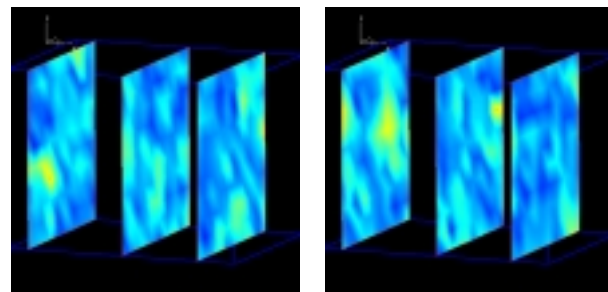
Fig. 8과 Fig. 9는 입의 시각과 그 시각으로부터 1초 후의 X-Y단면과 Y-Z단면에서의 순간 와도분포를 보이고 있는데 모두 case B의 경우 (흐름속도 0.025 m/sec)에 대한 결과이다. Fig. 8에서 알 수 있는 것은 1초가 되면 0초 때보다 와도가 많이 약화되어 있음을 알 수 있다. 그러나, Fig. 9의 경우에는 1초가 되어도 전체적으로는 와도가 약화되어 있지 않음을 알 수 있다. 이는 유동의 수직방향의 와도가 약하여 대류방향으로의 와도에 휩쓸려 수직방향의 와도는 다른 방향 성분에 비하여 빨리 사라지게 됨을 의미한다고 볼 수 있다.

한편, 이들 그림에서 보이는 와구조는 금붕어의 지느러미운동에 의하여 발생된 것으로 여겨진다.



(a) 0 sec

(b) 1 sec

**Fig. 8** Instantaneous vorticity distribution of the Goldfish's rear wake. (Case B, X-Y Plane)

(a) 0 sec

(b) 1 sec

**Fig. 9** Instantaneous vorticity distribution of the Goldfish's rear wake. (Case B, Y-Z Plane)

### 3. 결 론

3D-PTV계측법을 이용하여 금붕어의 지느러미 운동에 따른 후류에 대한 유동특성 조사를 하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

전반적으로 구의 유동과 유사한 점으로 미루어 금붕어는 주 유동의 유동속도가 어느 정도 이하면 필요이상의 지느러미운동을 실시하지 않음을 알 수 있었다.

지느러미운동에 의하여 발생하는 와구조는 시간이 흘러도 서로가 합치거나 하는 일이 잘 관찰되지 않은 점을 미루어 보아 금붕어가 지능적으로 와발생을 위한 지느러미운동을 하고 있음을 추론할 수 있었다.

현재, 활용 가능한 3차원 측정법에는 3D-PIV<sup>(10)</sup>법과 3D-PTV법이 있는데, 3D-PIV법은 한 단면에서의 3차원 속도성분을 얻어내므로 물고기와 같이 대상물체가 공간적으로 이동하는 경우의 측정일 때, 공간 전체를 측정하지 못하는 제약을 가지게 된다. 그러나, 3D-PTV법은 이러한 경우에 매우 유용함을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Techet, A. H., Luthi, B., Anderson, E. J., McGillis, W. R., Grosenbaugh, M. A., Triantafyllou, M. S., 1999, "Flow visualization of swimming robotic fish in the near boundary region," Proc. of 3rd Int. Workshop on PIV'99, Santa Barbara, USA, Sep. 16-18, pp.57-61.
- (2) Anderson, E. J., McGillis W. R., Grosenbaugh, M. A., 2001, "The boundary layer of swimming fish," J. of Experimental Biology, Vol.204, pp.81-102.
- (3) Kobayashi, T., Saga, T., Sekimoto, K., 1989, "Velocity measurement of three-dimensional flow around rotating parallel disks by digital image processing", ASME FED Vol.85, pp.29-36.
- (4) 최성환, 도덕희, 이연원, 1999, "디지털화상처리를 이용한 유동장의 비접촉 3차원 고속류 측정법의 개발", 韓國船舶機關學會誌, Vol. 23 No. 2, pp.149-159.
- (5) Doh, D.H., Kim, D.H., Choi, S.H., Hong, S.D., Kobayashi, T. and Saga, T., 2001, "Single-Frame 3-D PTV for high speed flows", Exp. in Fluids, Vol. 7, pp.84-95.
- (6) Doh, D. H., Cho, K. R., Cho Y. B., Baek T. S., Ryu D. S., Hwang Y. C., Chang K. S., 2001, "Development of a new 3D-PTV using genetic algorithm", Proc. of 3rd Pacific Symp. on Flow Visualization and Image Processing, PSFVIP-3, Maui, Hawaii, Mar. 18-21, pp.241-242, CD-ROM Proc. Paper No. F3134.
- (7) 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.
- (8) 도덕희, 김동혁, 조용범, 편용범, 2002, "3D-PTV를 이용한 원주후류 시계열 실시간 난류통계량 측정," 대한기계학회 춘계학술대회, 용평, 5.22-5.24, CD-ROM 논문집 논문번호 02S269, 초록집 p.134.
- (9) 도덕희, 황태규, 조용범, 백태실, 편용범, 2003, "3D-PTV에 의한 구 후류 난류통계량 측정," 대한기계학회 춘계학술대회, 한국해양대학교, 4.23-25. (to be printed)
- (10) 도덕희, 이원제, 조용범, 편용범, 백태실, 하승운, 2002, "스테레오 PIV와 스테레오 PTV에 의한 실시간 난류통계량 측정," 대한설비공학회 2002하계 학술발표대회 논문집, 용평 리조트, 6.27-29, Vol.1, pp.120-125.