

3차원 PTV에 의한
금붕어 가슴지느러미 주변 유동장 해석에 관한 연구

A study on 3D-PTV measurements of the wake of fin of a goldfish

지도교수 도 덕 희

2004년 02월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

장 규 섭

본 논문을 장규섭의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 공학박사 정형호 인

위원 공학박사 박권하 인

위원 공학박사 도덕희 인

2004년 02월

한국해양대학교 대학원

A study 3D-PTV Measurements of the Wake of fin of a Goldfish

by
Kyu Sup, Jang

Department of Mechanical Engineering
Graduate School Korea Maritime University

Abstract

Quantifying the unsteady flow structures produced by swimming fishes represents a difficult task because direct measurements applied to water environment are not possible. However, using 3D PTV(Particle Tracking Velocimetry), it is possible quantify the effect of fish fins on water movement. We used 3D PTV to visualize water flow in the wake of the pectoral fin of goldfish. Swimming speed is 0.0378m/s. Velocity quantified in three dimensional reconstruction of vortex structures. Vorticity is spouted out by each fin while the fin is a rotary motion. Left and right vortex produced by each fin are predicted to help maneuverability and body balance.

Contents

Abstract

Contents

Nomenclature

제 1 장 서론	-----	1
1.1 연구 배경	-----	1
1.2 연구 목적	-----	3
제 2 장 3차원 PTV계측시스템의 이론적 배경	-----	4
2.1 계측법의 원리	-----	4
2.2 유전 알고리즘을 이용한 3차원 입자영상유속계(3D-PTV)	-----	6
제 3 장 어류 지느러미 후류 유동장 계측	-----	13
3.1 실험방법 및 절차	-----	14
3.2 실험계측	-----	16
3.2.1 실험계측 조건	-----	17
3.3 계측결과	-----	24
3.3.1 3차원 속도장 및 예러제거	-----	24
3.3.2 단면(xy)에서의 속도장 특성	-----	31
3.2.3 y/D, z/D 단면에서의 지느러미 후류 속도 벡터장 분석	-----	33
3.2.4 지느러미의 움직임에 따른 후류 vorticity 분석	-----	37
제 4 장 결론	-----	43
참고 문헌	-----	44

Nomenclature

A_i	: Coefficient of area moment
B, B_{ii}	: Inverse matrix of M
C	: Fitness for continuous fluid of vector
c, c_x, c_y	: Plane distance from lens center
D, D_s, D_e	: Error of calculated 3-D position of particles
D_i	: Divergence of velocity
D_M	: Thresholding value of D_i
d_p	: Diameter of particle
F	: Equation of observation for x-direction
G	: Equation of observation for y-direction
I	: Intensity of particle
I_0	: Maximum intensity of particle
k_1, k_2	: Lens coefficient
M_M, M_X, M_Y, M_Z	: Rotation matrix
m_x, m_y	: Movement value of principle point Movement value of principle point
o	: Original point of photographic coordinate system
O	: Original point of absolute coordinate system
p	: Particle on images
P	: Particle in space

S_x, S_y, S_z	: Standard deviation of 3-D position
TKE	: Turbulence kinetic energy($\frac{1}{2} \overline{q^2} / U_0^2$)
T_u	: Turbulence intensity($\sqrt{\overline{u^2}} / U_0$)
T_v	: Turbulence intensity($\sqrt{\overline{v^2}} / U_0$)
T_w	: Turbulence intensity($\sqrt{\overline{w^2}} / U_0$)
$\Delta x, \Delta y$: Lens distortion value
\bar{x}, \bar{y}	: Center point of particle
x_0, y_0	: Deviation of the principal point from the center of image
x_p, y_i	: Value of the photographic position of particle
x, y, z	: Photographic coordinate system
X, Y, Z	: Absolute coordinate system
X_0, Y_0, Z_0	: Center of projection
X_p, Y_p, Z_i	: Value of the 3-D position of particle
X_m, Y_m, Z_m	: Rotated absolute coordinate system
\overline{X}	: Mean
U_0	x direction of inlet velocity

Greek characters

α, ω	: Tilted angle for X axis
β, ψ	: Tilted angle for Y axis
κ	: Tilted angle for Z axis
Γ	: Circulation
$-$: Time averaged value

제1장 서론

1.1 연구배경

수중 생물체의 움직임에 의해서 발생하는 유동 구조나 힘을 파악하는 것은 현재의 기술로는 매우 어려운 문제이다. 육상에서는 Force plates와 같은 장치들을 이용하여 움직이는 동물에 의해서 발생하는 힘을 바로 측정할 수 있게 해주지만 어류나 공중의 곤충들에 있어서는 위와 같은 장치들을 적용할 수 없으며 특히 생물체의 움직임에 따른 유동구조의 변형 때문에 그에 따른 유동 패턴을 파악하는 것 또한 실험적 방법이 아니라면 아직까지는 요원한 실정이다. 그러므로 유체 내에서 생물체 추진에 의한 유동구조의 기계적 이해를 위한 노력의 일환으로 많은 대안적 접근법들이 사용되어 지고 있다. 예를 들면 상당히 많은 노력에 의해서 수중에서 수영하거나 공중에서 비행하는 생물체의 유동 구조와 관련된 추진 과정 모델들이 연구되어 졌다. 초기 연구에서 Weis-Fogh (1973), Blake(1983)은 정지 또는 비정지 상태 분석에 관련된 이론적 시간 불변 및 상수들을 사용하여 이론적 모델들을 개발하였다. 가장 최근의 모델들은 힘 계수 평가보다는 시간 독립에 기초한 힘 순환 와 (Vortex) 추진 이론을 Elliston에 의해서 보다 정교하게 만들어 지고 있다. Dickinson 과 Gotz는 최근에는 어류 모델 주위의 매우 많은 격자점의 Unsteady Navier-Stokes 방정식을 풀기 위해 슈퍼컴퓨터를 사용하고 있으며, 동적인 추진력 산출을 위한 통찰력을 주었다. 어류에 있어서는 모델의 변형을 통해서 유체내의 시간 독립적인 힘의 개선이 가능하며 위와 같은 수치적 접근의 발전에도 불구하고, 유체 내에서 자유로운 이동에 의해 발생하는 힘 측정의 어려움은 기술적인 문제로 남아 있다. 이러한 부분은 수치해석과 관련된 Vortex model 평가 및 어떻게 어류들이 추진력을 발생하는 지에 대한 이해의 한계를 분명히 주고 있다.

이전 생체 후류 Vorticity 연구의 실험은 유체 내에서 이동하는 어류에 염료, 스

모그 및 입자들을 넣어 정성적인 계측하는 방법을 사용하였으며 정성적인 결과만을 제시하였다. 이런 종류의 유동 가시화는 유동 패턴의 통찰력을 제공하였지만, 특히 유동이 3차원적일 때 정량화시키는데 있어 상당한 어려움을 주었다. 대안적 접근법으로 3차원후류에 직각의 얇은 거의 2차원적인 단면에 대한 연구였다. 이러한 기법을 이용하여 Grodnitsky와 Morozov(1992)는 새의 후류와 관련된 연구였으며 Muller(1997)등은 유명한 어류에 적용하였다. Eliot G(1999)등에 의해서 연구되어진 Stereoscopic 기법을 이용한 3차원적 이미지들은 새의 후류 계측을 위해서 수학적으로 단면화되었다. 이러한 연구들은 후류의 형태학적으로나 에너지론 적으로 유용한 정보를 제공하였지만, 위에 언급한 유동장에서의 non uniform한 속도 벡터 분포의 유동장내에서는 입자군의 차가 발생하였다.

본 논문에서는 Vortex ring의 발생 및 발산은 어류 유동의 가장 큰 특징이라고 말할 수 있기 때문에 지느러미에서 발생하는 와동과 관련된 것을 다루고자 한다. 생체에서 발생하는 와동을 포함한 자연계에서 발생하는 와동의 연구는 인류의 역사와 함께 오래된 연구 분야로 오늘날까지도 많은 연구자들의 연구 분야가 되고 있다. 1800년대에 들어와서 여러 학자들에 의해서 와동에 대한 과학적 접근이 이루어지기 시작하였으며, 1858년 Helmholtz에 의해서 비점성 유체와 와도장에서 와도정리를 유도하였다. 이 정리는 비점성 유체에서 와도가 생기지도 않고 없어지지도 않는다는 것을 말한다. 11년 후 Kelvin경에 의해서 순환정리라고 명명된 Helmholtz의 와도정리의 다른 한 중요한 변형을 만들어 냈다. 이러한 발전이 현대 와이론의 근간을 이루고 있으며, 현재에 이르기까지 와에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

와동을 기술하는 유체역학의 기본방정식의 해는 Navier-Stokes 방정식의 발견 이래로 계속해서 탐구되고 있으며, 컴퓨터의 등장과 더불어 어떤 종류의 난해한 문제에 대해서도 기본 방정식을 수치적으로 푸는 것이 가능하여졌다. 기상학에서는 Bjerknes의 순환정리와 간략화된 Rossby에 의한 와도 전달방정식의 해가 이론적인 기상예보의 기초가 되었으며, 음향학에서 공기역학적인 음향의 발생 이론은 비정상 유동의 와운동에 기초하고 있다. 이외에 자연계에서는 모든 크기의 와동들이 발견된다. 초유체인 액체 헬륨 내의 양자화된 와동에서부터 은하의 회전에 이르는 우주

의 와동균이 존재한다.

1.2 연구목적

시스템 생물학(System-biology)은 생명과학과 공학이 융합된 새로운 학문으로 최근 많은 주목을 받고 있는 학문 분야중 하나이다. 이 학문은 생명체에 내재된 동적 특성(dynamics)을 공학적 차원에서 규명함으로써 보다 근본적으로 생체기능을 탐구하는 것으로 공학적 응용을 목표로 한다. 이러한 관점에서 볼 때 본 연구는 어류의 가장 큰 특징인 지느러미와 그것의 역할 및 움직임에 따른 유동구조를 파악함으로써 보다 고차원적인 추진 메커니즘 개발의 토대가 될 것으로 판단된다. 또한 최근 활발하게 연구되고 있는 수중 로봇의 개발에 있어서도 이러한 부분은 매우 중요한 자료로 활용 될 수 있을 것이다.

어류의 유동 특성을 3차원적으로 분석하기 위해서 본 논문에서는 실험적 기법을 선택하였으며 그 중에서 최근에 많은 분야에서 응용되고 있는 3차원 PTV를 이용하여 어류 지느러미 후류의 특성 정보를 얻었다. 3차원 PTV는 유동장의 매질과 동일한 비중의 입자를 투입한 후 레이저 조광 시트를 볼륨의 형태로 조사하며 이들 입자들의 거동을 가시화 기술 및 디지털 화상처리 기술을 이용하여 입자들의 운동을 해석한다. 유동장을 해석하는 PTV(Particle Tracking Velocimetry) 방법은 동시 다점 계측이 가능하므로 비정상 유동장의 해석에 유리하다는 장점을 가지고 있다.

이 연구의 가장 명확한 목적은 3차원 PTV를 이용하여 어류가 이동하는 동안 가슴지느러미에서 발생하는 후류 유동구조를 복원하며 그리고 이러한 데이터를 바탕으로 가슴지느러미의 역할에 대해서 분석하는 것이다. 이러한 분석을 통하여 로봇 물고기의 설계 등에 이용 될 수 있도록 어류 유동의 특징을 제시 할 것이다.

제 2 장 3차원 PTV계측시스템의 이론적 배경

2.1 계측법의 원리

카메라를 통한 3차원 공간의 정량적인 인식을 위해서는 2대 이상의 카메라와 각각의 카메라에 대한 정보가 필요하다. 이 카메라의 정보를 결정하는 것을 단사진표정이라 하며, 카메라 정보와 카메라로부터 얻은 영상은 카메라 중심점에 대한 투영의 관계가 성립된다. 이러한 원리로부터 Kobayasi, Doh 등(1991) (1995) (1997) (1998) (1999)은 외부요소 ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \psi, \kappa$)와 내부요소 (c, x_0, y_0, k_1, k_2)등 11개 요소를 가지는 관측방정식을 사용하였으나, 본 논문에서는 Doh (2001)이 제시한 외부요소($dis, \alpha, \beta, \kappa, m_x, m_y$)와 내부요소 (c_x, c_y, k_1, k_2) 10개를 가지는 새로운 관측방정식(2.1)을 사용한 유전알고리즘을 이용하였다.

Fig. 2.1 은 10개 표정요소를 이용하기 위해 절대 좌표계(X, Y, Z)에 대한 카메라 좌표계(x, y, z)의 관계를 보여 주고 있다. 먼저 dis 는 절대 좌표계 O(0, 0, 0)점으로부터 카메라 중심까지의 거리를 의미한다. 즉 O점으로부터 카메라중심까지의 거리를 말한다. 카메라 좌표계와 절대 좌표계를 일치시키기 위해 X, Y, Z축에 대한 회전각을 각각 α, β, κ 로 정의하면, 축에 대한 회전행렬은 $M_M = M_Z M_Y M_X$ 가 된다. 즉 X, Y(α, β)축 회전에 의해 카메라 좌표계의 z축과, 절대 좌표계의 Z축이 평행하게 되며, 다시 Z(κ)축 회전에 의해 카메라 좌표계의 x, y축과 절대좌표계의 X, Y축이 서로 평행하게 된다. 이렇게 회전된 절대 좌표값을 (X_m, Y_m, Z_m)으로 표시하고, 카메라의 z축과 절대좌표계의 Z축을 일치시키기 위한 이동량을 m_x, m_y 으로 표시한다. 이렇게 카메라의 z축과 절대 좌표계의 Z축을 일치시키면, Fig 2.2 와 같은 카메라의 xy평면과 절대 좌표계 사이의 투영관계가 성립된다. 즉 절대좌표계의 대상점과 사진좌표계의 투영점이 일직선상에 있다는 공선조건으로부터 다음과 같은 관측방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
x &= c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m}} + \Delta x \\
y &= c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m}} + \Delta y
\end{aligned} \tag{2.1}$$

여기서 c_x, c_y 는 이미지그래버에 따른 장방비의 차이를 고려한 것이며, $\Delta x, \Delta y$ 은 이미지 중심으로부터의 거리에 따른 렌즈에 의한 굴절을 고려하여 다음과 같이 정의하였다.

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

식 (2.1)와 같이 정의된 각 카메라의 표정요소를 구하기 위해 이미 알고 있는 3-D 좌표 (X_i, Y_i, Z_i)와 사진좌표(x_i, y_i)에 대해 F, G는 식 (2.2)과 (2.3)와 같이 표시된다.

$$F = c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m}} - (x - \Delta x) = 0 \tag{2.2}$$

$$G = c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m}} - (y - \Delta y) = 0 \tag{2.3}$$

이러한 F, G방정식은 비선형 연립방정식이므로 이를 풀기 위하여 초기에 표정요소의 미지값을 가정하고 테일러 급수전개에 의한 최소자승법으로 보정량을 구하여 수렴될 때까지 근사치를 보정하는 수정 Gauss - Newton법을 사용하였다.

2.2 유전 알고리즘을 이용한 3차원 입자영상유속계 (3D-PTV)

본 연구에서는 $3DE$ 의 한계값을 0.3, 교배율은 10%를 주었으며, 입자의 개수에 따라 10회 반복을 하였고 3차원 입자 추적은 Doh(2001)등이 제시한 유전 알고리즘을 이용한 3D PTV로 3차원 공간 벡터를 구했다.

참고로 본 연구에서는 유전 알고리즘의 대표적인 연산자인 돌연변이를 사용하지 않았는데 그 이유는 돌연변이의 역할이 국부적인 해의 수렴을 막기 위한 것이므로, 수렴속도를 높이기 위해 초기에 입자의 후보집단을 선정해 두고 개체의 생성은 그 안으로 제안하여 격리 및 이주 연산자만으로도 충분한 해를 구할 수 있었기 때문이다. 실질적으로 돌연변이의 개념을 넣어보았으나 계산시간만이 증가했을 뿐 결과에 아무런 영향이 없음을 확인하였다.

기존의 방법에서는 3차원 위치 결정시 두 대의 카메라로부터 입력된 영상을 기준으로 하여 입자에 대한 공선의 조건식에서 오차가 제일 작은 입자들을 같은 입자라고 인식하게 된다. 이러한 사실을 입자의 수가 비교적 적을 때 잘 들어맞음을 알 수 있었다. 그러나, 실질적으로 입자가 많아질 경우 입자에 대한 카메라 중심으로부터의 직선은 다른 카메라에서 하나의 직선으로 나타나게 되고, 이 직선과 만나는 입자들의 개수도 증가하게 되면서, 이러한 방식은 조그만 입자중심의 오차에도 완전히 다른 결과를 얻게 된다. 본 연구에서는 이런 잘못된 결과를 수정하기 위해 같은 입자를 인식하는 과정에 유전알고리즘을 적용하였다. 3차원 속도 벡터는 시점과 종점으로 구성되어 있으며, 시점과 종점 모두 카메라 두 대로부터 동일 입자로 인식되는 입자로부터 얻어진 공간 좌표이다. 따라서 3차원 속도 벡터는 카메라의 입장에서 2개의 시점과 2개의 종점을 가지게 된다. 이것으로부터 다음과 같은 염색체를 정의하였다.

Camera 1		Camera 2		Fitness	
Start point	End point	Start point	End point	3D Error	Continuity

Table 2.1 Definition of chromosome with respect to camera

여기서 카메라에 대한 시점과 종점은 각 영상에 대한 입자의 중심값을 나타내는 정수 값이고, 3D Error는 공선의 조건 식에서 두 직선간의 최단거리를 나타낸다. 즉 하나의 입자에 대한 3차원 위치 결정 시 오차는 식 (2.14)와 같고, 3차원 속도 벡터에 대한 위치 결정 시 오차는 식(2.15)와 같이 표현된다.

$$D = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2} \quad (2.14)$$

$$3DE = [D_s + D_e] \quad (2.15)$$

단, D_s : 3차원 속도벡터의 시점의 오차

D_e : 3차원 속도벡터의 종점의 오차

각 카메라에서 획득한 입자의 시점과 종점은 전체 유동장의 최대 이동거리를 초과하지 못한다. 따라서 시점을 기준으로 하여 카메라에 대한 2차원 벡터가 될 수 있는 후보들을 결정한 다음 초기에는 임의적으로 여러 개의 후보 중하나를 벡터로 선택한다. 이러한 과정을 카메라 두 대에서 획득한 영상에 대해 실행한다. 다음 과정은 임의적으로 결정된 두 개의 2차원 벡터를 선택하여 3차원 벡터를 만든다. 이렇게 결정된 3차원 벡터는 시점과 종점에 대한 공간상의 3DE값을 가지게 된다. 이렇게 생성된 집단을 이용하여 여러 가지 유전연산자를 반복 적용함으로써 원하는 결과에 접근시키게 된다.

유전알고리즘에서 목적함수는 해의 방향을 결정하는 것으로 가장 중요한 요소라

할 것이다. 국소영역 안에서 유체는 연속의 식을 만족해야 한다는 조건으로부터 PIV에서의 오류 벡터의 검출은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_f &= \frac{-3u(i, j) + 4u(i+1, j) - u(i+2, j)}{2\Delta x} \\
 \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_f &= \frac{-3v(i, j) + 4v(i, j+1) - v(i, j+2)}{2\Delta y} \\
 \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_b &= \frac{u(i-2, j) - 4u(i-1, j) + 3u(i, j)}{2\Delta x} \\
 \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_b &= \frac{v(i, j-2) - 4v(i, j-1) + 3v(i, j)}{2\Delta y}
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

PIV에서 구해진 속도로부터 식 (2.16)을 이용하여 하나의 속도 벡터를 기준으로 한 주어진 4영역의 속도 발산치는 식 (2.17)와 같으며, 이러한 4개의 정보를 이용하여 오류벡터를 판정하게 된다.

$$\begin{aligned}
 D1 &= \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_f + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_f \right| & D2 &= \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_f + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_b \right| \\
 D3 &= \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_b + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_f \right| & D4 &= \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_b + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_b \right|
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

대칭인 2조의 영역속도 발산치 (D1, D3) 혹은 (D2, D4)는 임의의 역치 DM을 초과하게 되면 오류벡터라고 판단된다. 그러나 판정조건의 성질상 복수의 정보를 사용하기 때문에 오류벡터에 인접한 정상벡터를 이상치로 오판하거나, 와류가 발생하는 부분 등과 같이 흐름의 변화가 큰 곳에서는 정상벡터를 이상치라고 오판할 가능성이 높다. 이러한 오판정을 최대한 줄이기 위해 4영역 중에서 속도의 변화량이 최소로 되는 영역만을 고려하고 이 영역이 흐름의 연속성을 만족하는지의 여부를 판

정하는 식 (2.18)과 같은 방법을 사용한다.

$$\left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} = \text{Min} \left\{ \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_f, \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_d \right\}, \quad \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_{\min} = \text{Min} \left\{ \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_f, \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_d \right\}$$

$$\therefore D(i, j) = \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_{\min} \right| \quad (2.18)$$

즉 D(i, j)가 역치값 DM을 넘는 경우 오류벡터라고 판정하게 된다. 식 (2.18)을 3차원에 적용하면 식 (2.19)와 같이 표시할 수 있다.

$$D(i, j, k) = \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_{\min} + \left[\frac{\partial w}{\partial z} \right]_{\min} \right| \quad (2.19)$$

그러나, 유전알고리즘을 사용한 PTV 계측에서 초기에 모든 속도 값이 임의적으로 가정되었고, 일정한 격자를 가지지 않았기 때문에 속도 변화치가 상대적으로 변화가 큼을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 위 식을 다음과 같이 고려하게 되었다.

연속의 식을 적용하기 위해 판단하고자 하는 벡터의 시점과 종점이 가까운 주위 벡터를 선택한다. 경험을 통해 선택영역이 좁으면 알고리즘의 수렴에 충분한 영향을 주지 못하고, 선택영역이 넓으면 주위의 에러벡터 영향이 커짐을 알 수 있었으며, 이러한 점을 고려하여 주위의 10개의 벡터를 주위 벡터로 선택하는 방식을 택하였다.

PTV에서는 벡터와 벡터사이에 어떤 일정한 간격이 존재하지 않으므로 차분식은 1차식으로 표현하였으며, 최종적으로 적합도는 다음과 같이 정의되었다.

$$C = \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{\min} + \left| \frac{\partial v}{\partial y} \right|_{\min} + \left| \frac{\partial w}{\partial z} \right|_{\min} \quad (2.20)$$

의미상 주위 벡터와 속도 변화량이 제일 작은 즉 벡터가 연속의 식을 만족하는 정도에 따라 주위 벡터와 유사한 분포를 가지면 C는 작은 값을 가지며 상대적으로 그렇지 못한 개체들의 C는 높은 값을 가지게 된다.

본 연구에서 3DE와 C가 낮은 개체들이 높은 적합도를 가지게 된다. 적합도는 유전 연산자들에 의해 사용되어지는데, 적합도를 둘로 나눈 것은 이러한 적합도가 서로 다른 역할을 하기 때문이다.

본 연구에서는 유전 연산자로 격리(isolation), 이주(migration), 교배(crossover) 및 재생산(reproduction)을 사용하였다. 하나의 염색체는 각 이미지에 대한 1개의 입자 총 4개의 입자가 임의적으로 선택되어지고 이러한 선택에 대한 3DE 값을 가지게 된다. 이러한 3DE 값을 기준으로 유전 연산자중 격리(isolation)를 적용하게 된다. 격리는 열성인 개체를 집단에서 배제하는 연산자로서 주어진 최대 오차를 넘는 모든 개체를 집단으로부터 배제하게 된다.

격리 연산 후 다시 살아남은 개체들로부터 3차원 속도에 대한 연속성을 적용한 C 적합도를 계산하게 된다. 이러한 C를 기준으로 열성으로 판단된 벡터들에 대해서는 다시 재생산(reproduction)을 하게 된다. 재생산은 각 카메라에 대한 시점을 고정시켜두고 중점에 대한 임의적 선택을 수행한다.

위의 과정이 끝나면 개체간의 교배(crossover) 과정을 거친다. 교배는 카메라에 대한 2차원 벡터를 고정한 상태에서 3DE를 기준으로 하여 객체간의 대응되는 카메라간의 데이터를 바꿈으로서 이루어진다. 교배된 개체의 3DE가 한계값을 넘을 경우 이 입자 또한 배제하게 된다.

위의 과정동안 배제된 데이터들은 다시 초기 개체생성과 같은 과정을 수행하여 선택된 집단으로 되돌려 보내는데 이러한 과정이 이주(migration)연산이다. Fig. 2.4는 3차원 PTV에 적용되어진 유전알고리즘의 개념도를 나타낸 것으로 그 내용은 앞에서 설명하였다. Fig. 2.5는 유전알고리즘의 순서도를 나타낸 것으로 크게 세대를 발생시킨 후 격리에 의해 그룹을 나누며, 재생산과 교배에 의해서 시간과 공간에 대해서 동시에 3차원 입자쌍을 매칭 시킨다. 충분한 수렴조건을 만족시키지 못

하면 새로운 세대를 이주시켜서 동일한 과정을 거쳐 수렴할 때까지 반복 연산시킨다.

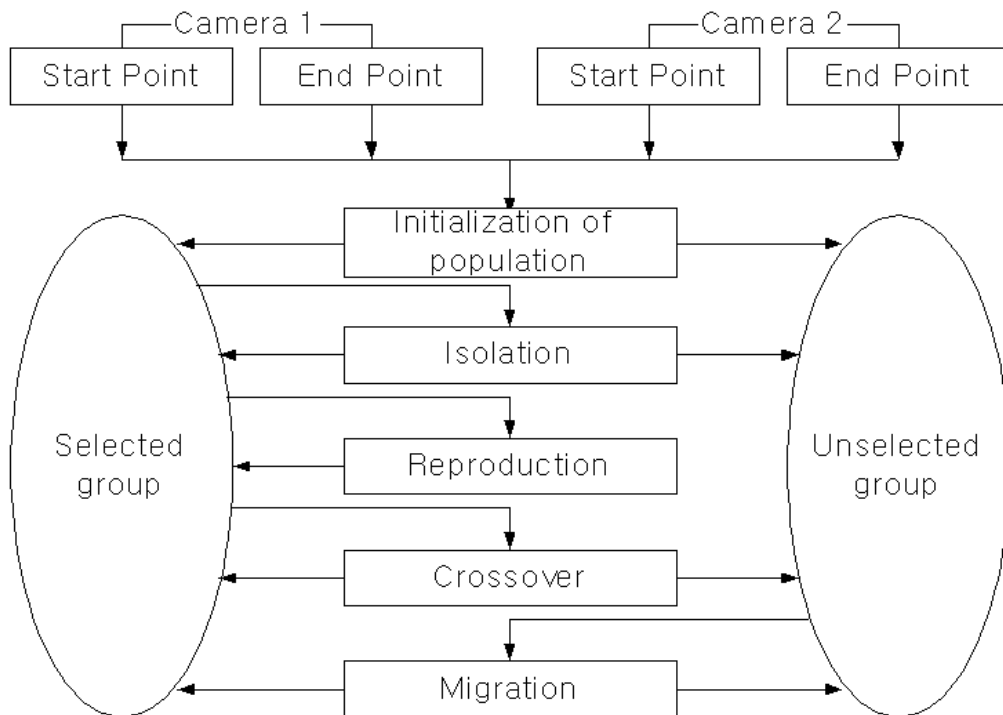


Fig. 2.4 Concept of 3D PTV using GA Algorithm

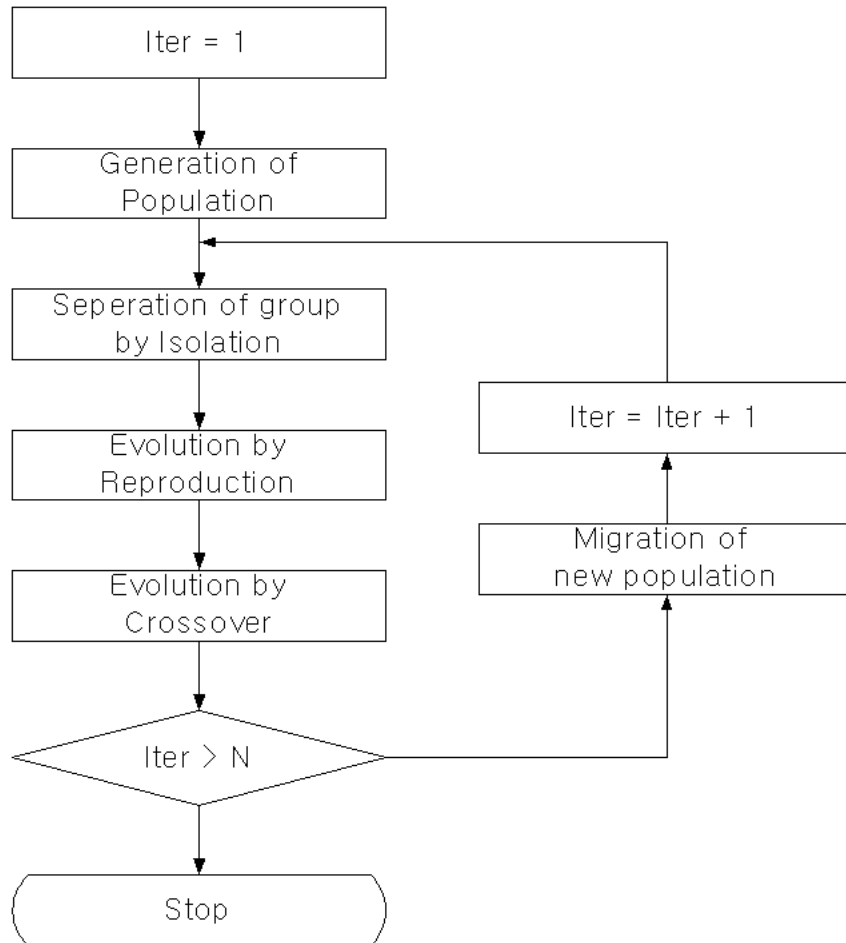


Fig. 2.5 Flowchart of 3D PTV using GA Algorithm

제 3 장 어류 지느러미 후류 유동장 계측

3.1 실험방법 및 절차

Fig. 3.1은 어류 지느러미 유동장 계측을 위해서 제작된 시스템을 나타내고 있다. 계측 시스템은 3대의 CCD카메라(SONY, SSC-M370, 768×494 pixels), 이미지 그래픽터(Ditect, 512×512 pixels, 256 gray levels), 레이저(Ar_Ion Laser, 5W) 와 32bit 호스트 컴퓨터로 구성되었다.

일반적으로 계측영역내의 미소입자들을 추적하는데 있어 고속유동의 경우 AOM을 사용하여 레이저와 같은 광원을 쉼핑하여 시간해상도를 높일 수 있다. AOM의 펄스신호는 CCD카메라에 의해서 동기되며, NTSC 카메라의 경우 초당 30프레임의 이미지를 획득하고, 이 때 획득된 1프레임의 이미지(1/30sec)를 짝수(1/60sec)와 홀수(1/60sec) 필드로 나눌 수 있으며, 이들 이미지간에 설정된 시간간격동안에 레이저 광원의 노출시간을 조절할 수 있다.

본 실험의 속도장의 경우 충분히 빠르지 않아서 AOM을 사용하지 않고 NTSC카메라 자체의 짝수와 홀수필드간의 간격인 1/60sec를 사용하되, 셔터스피드를 1/250sec로 하여 이 순간에만 광원에 노출하도록 하였다. 이 신호는 호스트 컴퓨터에 장착된 이미지 그래픽터(Ditect 64)로 보내져 A/D변환되어 256gray levels (512×512)로 저장된다. 이미지 그래픽터의 메모리에 저장된 이미지를 다시 호스트 컴퓨터에 저장한다. 본 실험에서 사용되는 이미지 그래픽터는 64MB의 RAM이 장착되어 있으며, 카메라에 의해 동기 되어 R, G, B 이미지를 동시에 실시간으로 64장씩 저장 할 수 있다.

저장된 이미지로부터 프레임을 필드로 분리하고, 배경을 제거하는 과정을 거치면, 이미지는 순수 입자들만이 존재하게 된다. 이렇게 처리된 이미지는 임계값에 의한 이치화한 다음 윤곽선추적(boundary trace)을 행하여 하나의 입자로 인식되는 화소에 대해 면전모멘트 공식에 의해 입자의 중심을 결정한다.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i x_i}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i y_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (3.1)$$

결정된 입자의 중심으로부터 수행된 카메라의 교정작업 결과를 이용하여 유전 알고리즘을 적용하여 최종적인 3차원 벡터를 결정한다.

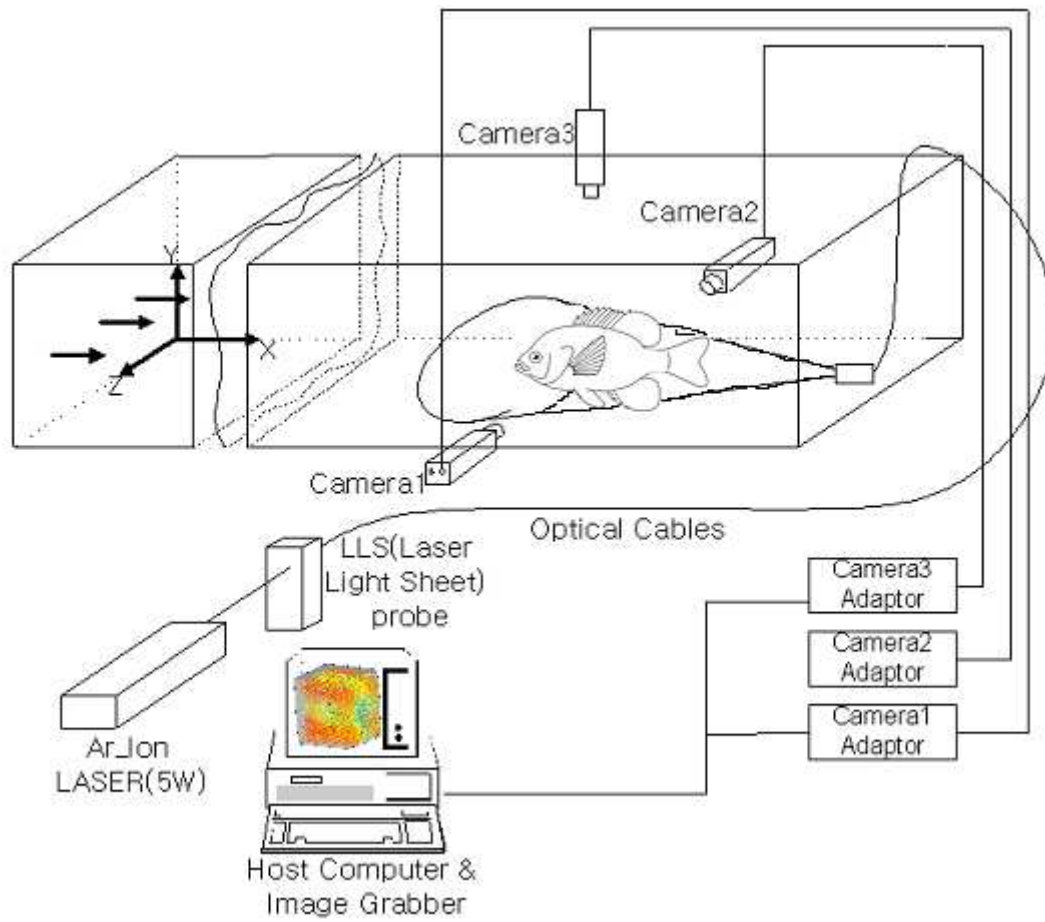


Fig. 3.1 3D GA PTV System

3.2 실험계측

3.2.1 실험계측 조건

본 실험에 사용된 수조는 회로수조로 측정영역이 $300 \times 300 \times 1200\text{mm}$ 이다. 금붕어가 측정 영역에 있도록 하기 위해서 1mm 와이어로 사각형의 모양을 만들었다. 사각 박스의 위치는 회로 수조의 출구 부분에서 약 2/3 지점인 850mm 후방의 수조 바닥에서 100mm의 높이에 설치하였고 입구부분에는 Honeycomb 구조를 별도로 설치하여 균일류(uniform flow)가 되도록 하였다. 입구로부터 평균유속은 0.03787012m/s 이며, 물의 동점성 계수 ν 는 1.0×10^{-6} 이며 이 때 레이놀즈수 Re 는 약 1136이었다. 카메라의 교정 작업을 마친 후 추적 입자를 유동장에 투입한 후 레이저의 광원을 하류측에 설치하여 관측영역 전체에 걸쳐 조사하였다. 어류의 계측 영역은 X축으로 $-40\text{mm} \sim 40\text{mm}$, Y축으로는 $-40 \sim 40\text{mm}$, Z축으로는 $-20 \sim 50$ 으로 정하였고, 레이저 빔은 볼륨 형태로 조사하였다. 입구조건은 x방향의 난류강도 TIU 는 0.5% 이내이며 y방향의 난류 강도 TIV 는 최대 1.1%이다. 평균적으로는 0.6% 이내로 유지하였다.

검사 영역내의 유동 즉 3차원 공간 내 입자의 3차원 위치를 계산하기 위해서, 먼저 각 카메라의 표정요소를 구한다. 이 작업은 3차원 공간인식의 기준이 된다. 따라서 공간내의 표준이 되는 Fig. 2.3 와 교정기(Fig. 3.3)는 109mm(지름) \times 10mm(높이)의 원판위에 직경이 1mm인 핀의 끝단에 지름이 0.6mm인 구를 만들어 3.8mm에서 52.5mm까지 각각 다른 길이로 42개를 제작하여 3차원적으로 배치하였다. 각 핀의 끝단의 구에는 레이저 조사시 식별이 용이하게 하기 위해 흰색의 도료를 발랐다. 교정기의 3차원 위치는 공인된 검정기관을 통하여 0.001 mm 오차 이내 까지 계측하여 얻어낸 결과를 이용하였다.

교정 작업이 모두 완료되면 추적 입자(나이론 12, 비중 1.02)를 유동장내에 투입하고 Ar-ion 레이저(5W)의 광원을 하류측에 설치하여 관측영역에 걸쳐 조사하였

다. 저장된 이미지의 잡음제거, 배경화면생성과 제거, 도심추출의 일련의 과정을 거치게 되며 3차원 공간 벡터장은 Doh(2001)등이 제시한 유전알고리즘을 이용한 PTV를 사용하였다. 3차원 공간 내에서 벡터장을 얻기 위한 절차는 먼저 2대의 CCD Camera를 이용하여 영상을 얻고 각 카메라에 대한 위치 캘리브레이션을 한 다음, 입자의 3차원 위치를 계산을 하였으며 GA를 이용하여 3차원 속도벡터를 획득하는 순이다.

Fig. 3.3 은 본 시험에 사용된 교정기의 그림이며, Fig. 3.4, Fig. 3.5은 실제 사용된 교정기를 카메라 1와 2에 의해서 획득한 이미지이다. 이렇게 획득된 이미지는 Doh(2001)가 제시한 캘리브레이션 기법을 따랐다. 먼저 카메라의 표정요소를 구한 후 이 값들을 역행렬로 생성한 후 스크린(CCD소자)상의 평면 좌표 값을 이용하여 실제 공간에 존재하는 캘리브레이터의 좌표를 복원하므로 교정정도를 확인할 수 있었다. 교정오차는 실제 캘리브레이터의 절대좌표에서 계측에 의해 구해진 상대 좌표 값의 차이로 나타낸다. 이번 실험에서 평균 오차 값은 0.02, 0.04mm 이며 편차는 0.05mm 이내로 하였다.

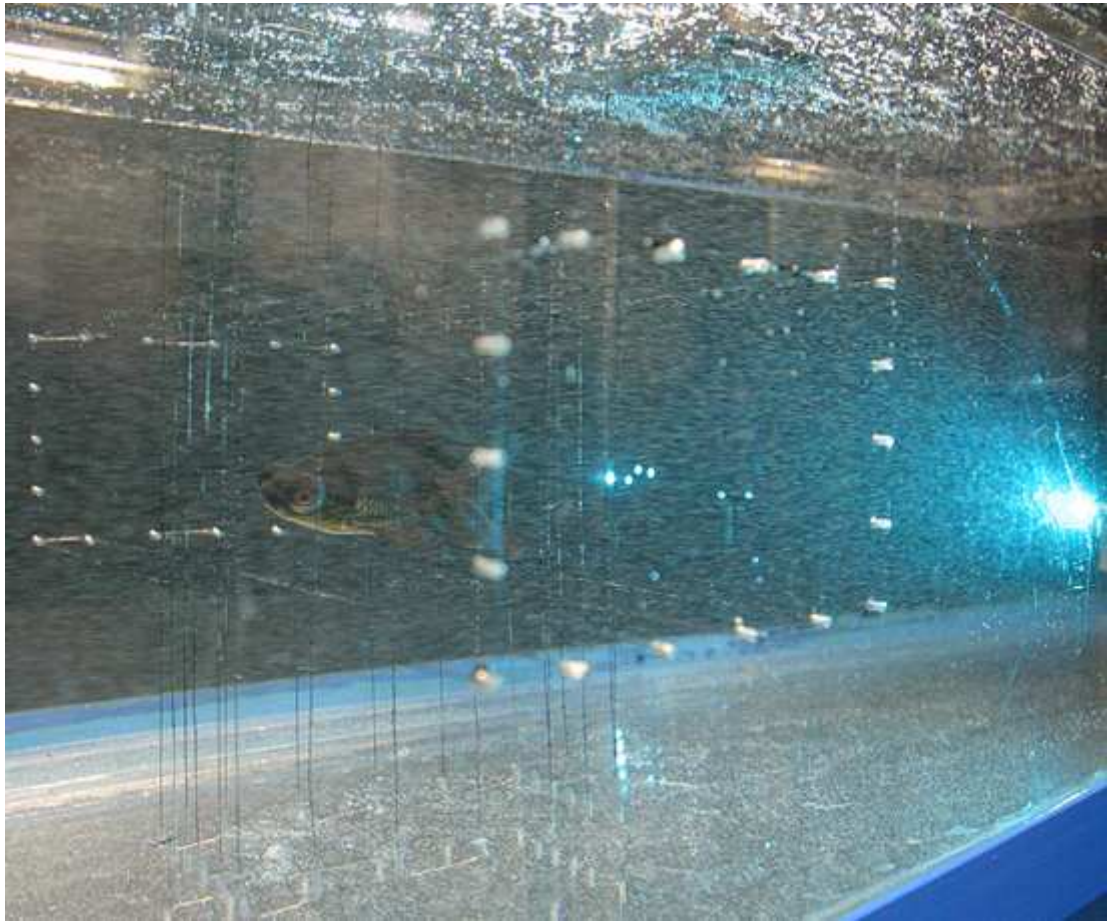


Fig. 3.2 Photo of real experimental system

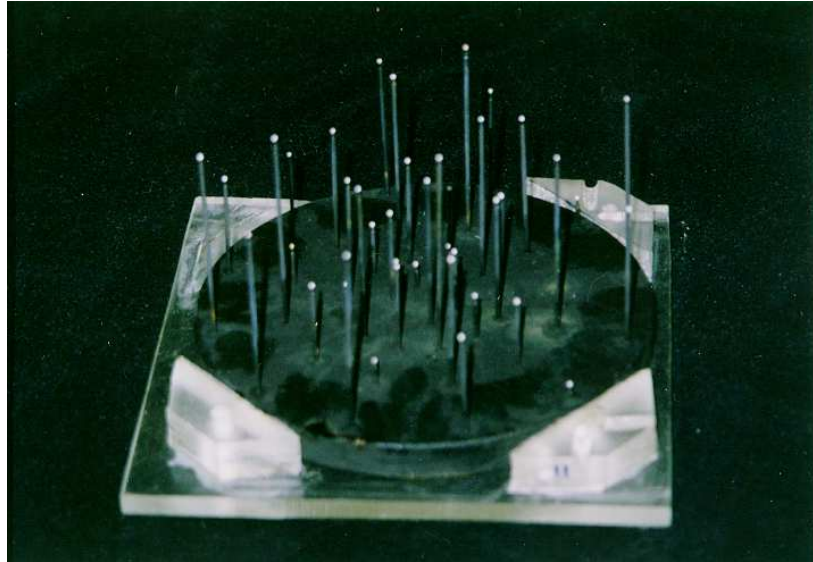


Fig. 3.3 Photo of calibrator image

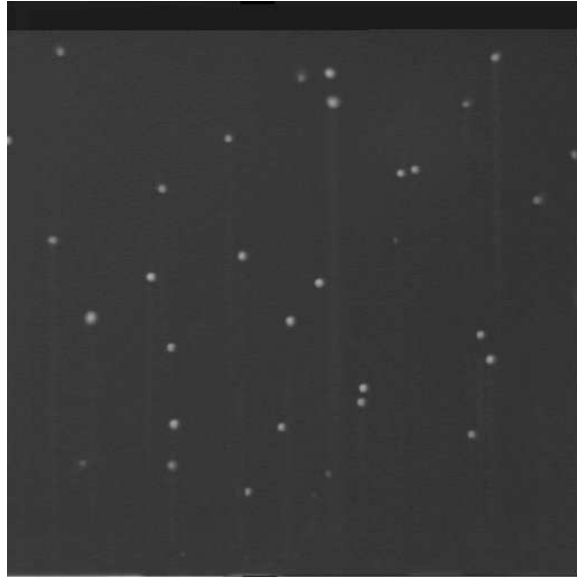


Fig. 3.4 Photo of calibrator image of camera 1

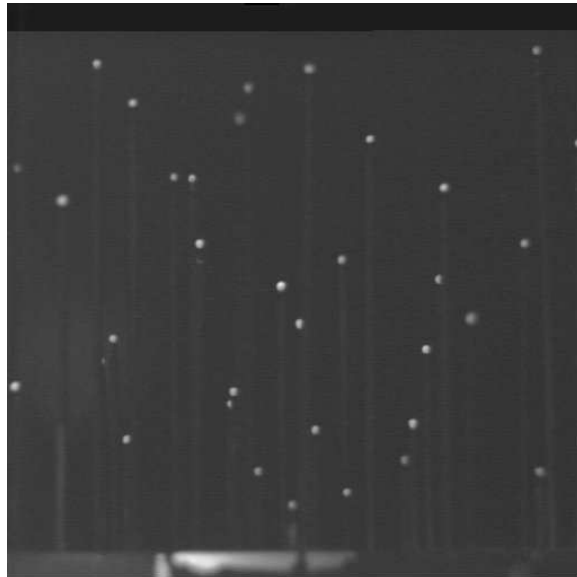


Fig. 3.5 Photo of calibrator image of camera 2

Fig. 3.7 과 Fig. 3.8(a) Fig. 3.8(b)는 실제 실험에 앞서서 수조의 입구에서의 물의 흐름이 일량류를 유지하는지와 입구조건에서의 난류강도가 어느 정도인지 확인하기 위해서 실제 실험부에서 300mm떨어진 입구쪽에서의 보간된 평균속도장, 에러가 제거된 속도장 및 평균유속분포와 난류강도를 그래프로 나타낸 것이다.

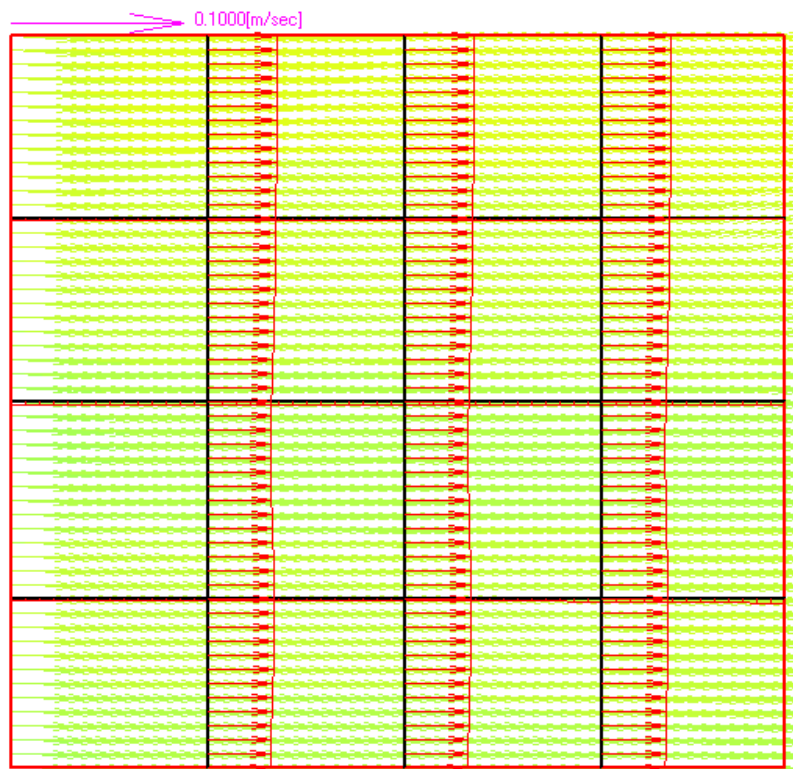


Fig. 3.7 Mean velocity profile

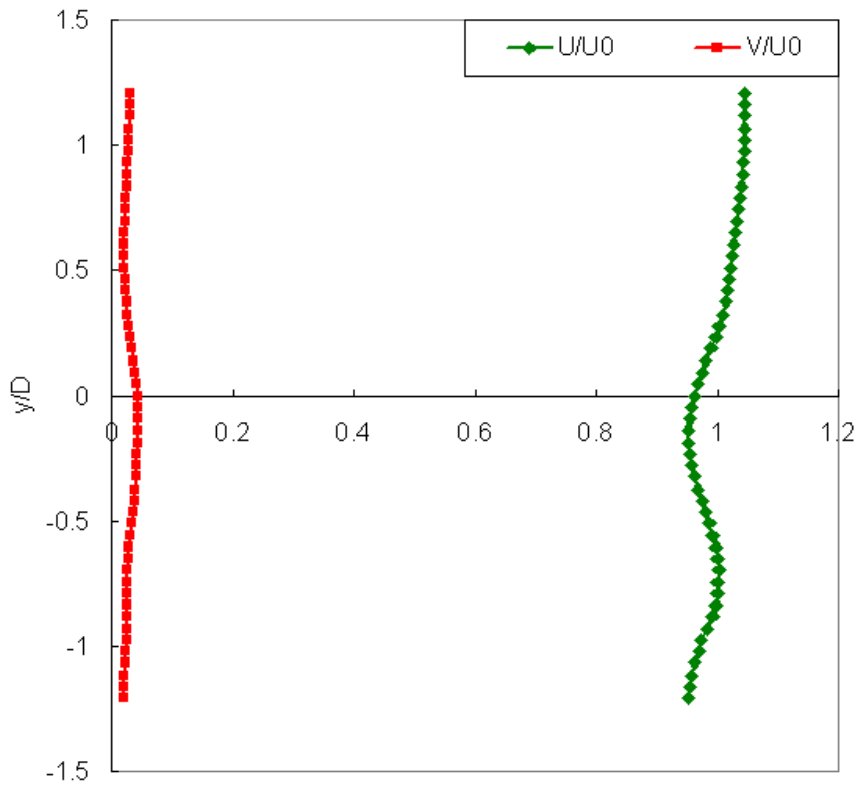


Fig. 3.8 (a) Mean velocity profile of dimensionless parameter

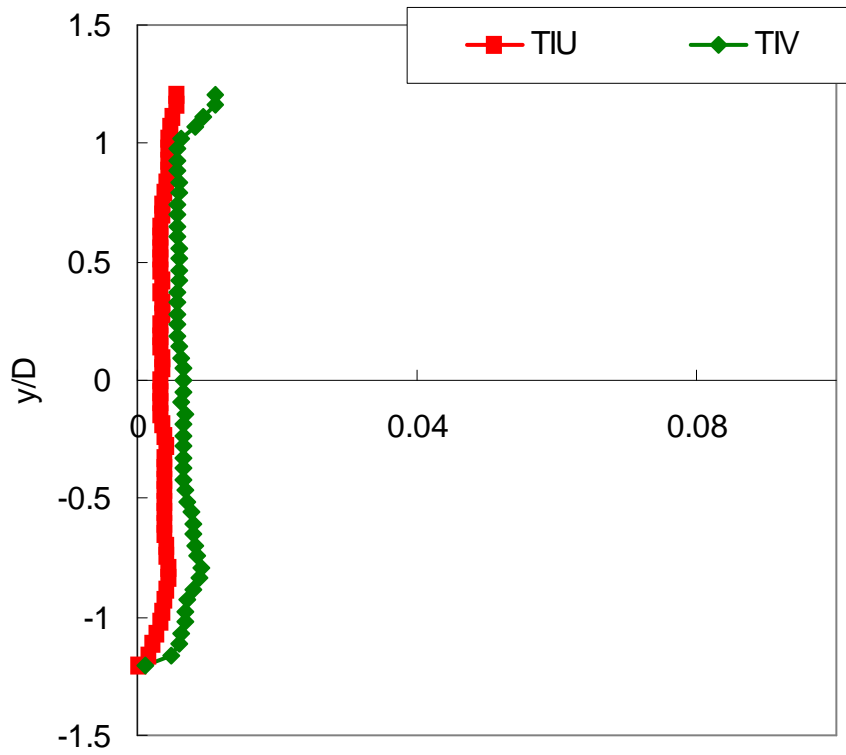


Fig. 3.8 (b) Turbulence intensity

$$\left(T_u = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_0}, T_v = \frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{U_0} \right)$$

3.3 계측결과

3.3.1 3차원 속도장 및 에러제거

총 실험은 20회에 걸쳐 수행하였으며, 획득된 것들 중에서 이미지가 가장 좋은 것을 선별하여 4개의 경우(case05, case06, case07, case13)에 대해서만 3D GA PTV 기법을 적용하여 3차원 속도벡터를 구하였다. 각 case는 총 64장의 3차원 속도 벡터로 본 논문에서 case04의 데이터와 이들 4개의 경우를 모두 평균한 데이터를 동시에 사용하였다.

GA알고리즘을 이용하여 총 2200여 개의 3차원 어류 지느러미 후류 유동장 벡터를 추종하였으며, Fig. 3.9는 무차원 좌표계를 나타낸 것으로 해당 단면에서의 무차원축에 대한 무차원 속도에 따른 구의 후류 유동장 특성을 분석하기 위하여 사용되었다.

Fig 3.9 와 Fig 3.10은 CCD 카메라를 통해서 얻어진 원시 이미지들이다. 이렇게 얻어진 이미지들을 GA 알고리즘을 이용하여 계산된 결과가 Fig. 3.11 이다. Fig. 3.12는 연속의 방정식에 근거하여 에러가 제거된 이미지이다.

Fig. 3.13는 획득된 3차원 벡터를 기반으로 유체연속성에 근거한 에러 제거 과정과 이 후에 설명되어질 Thompson's Tau 법에 의해서 에러를 제거한 후 최종적으로 보관된 파일의 평균속도벡터를 나타낸 것이다. Fig. 3.14의 그림은 시간 간격별로 3차원 vorticity의 변화를 나타낸 그림이다.

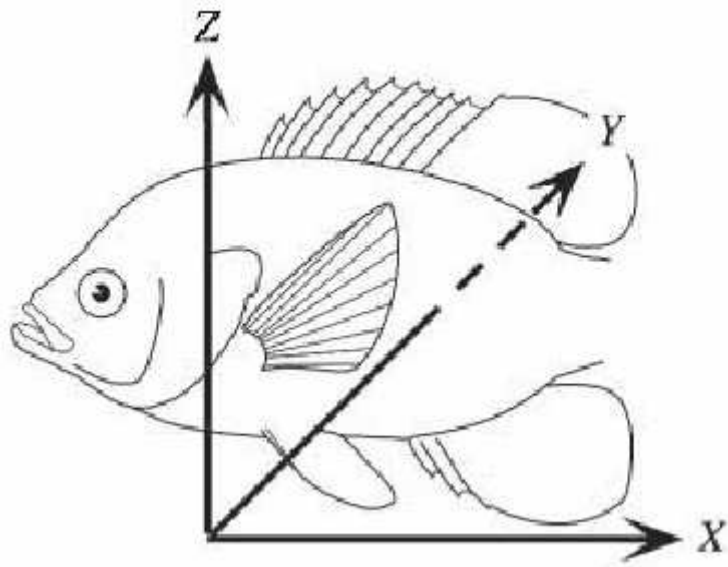


Fig. 3.9 Dimensionless coordinate at the center of fish

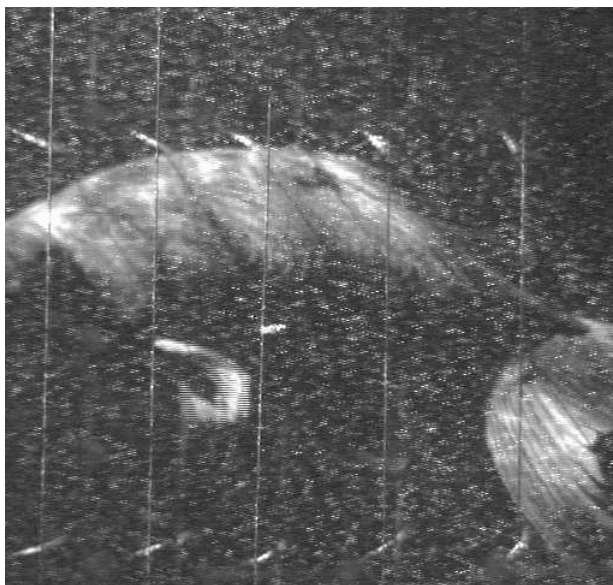


Fig 3.9 Raw image(R)

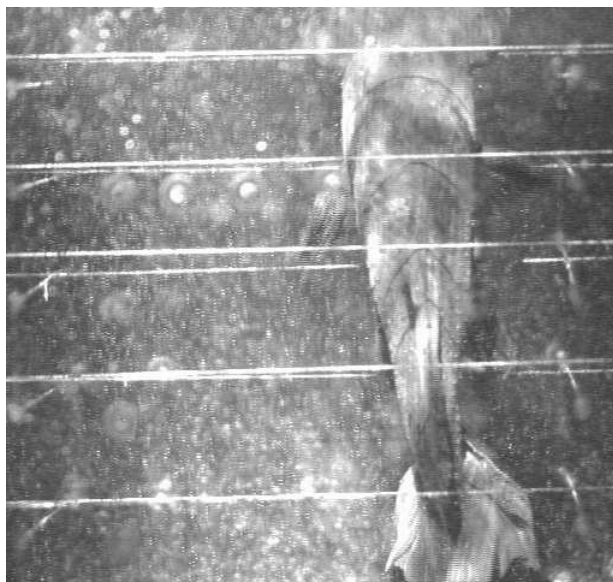


Fig 3.10 Raw image (G)

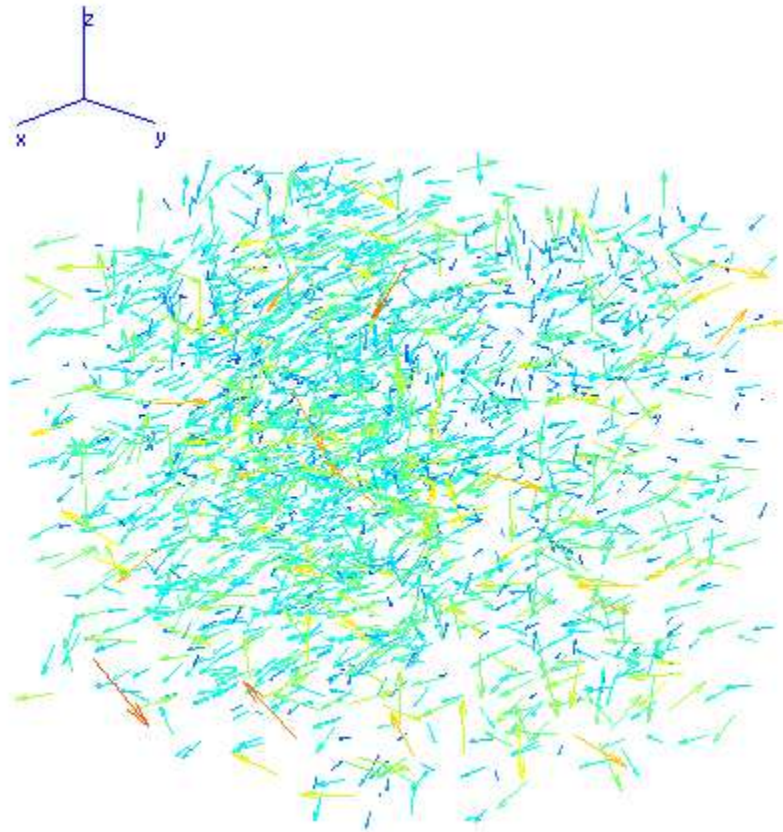


Fig. 3.11 Original image of 3D velocity vector including error

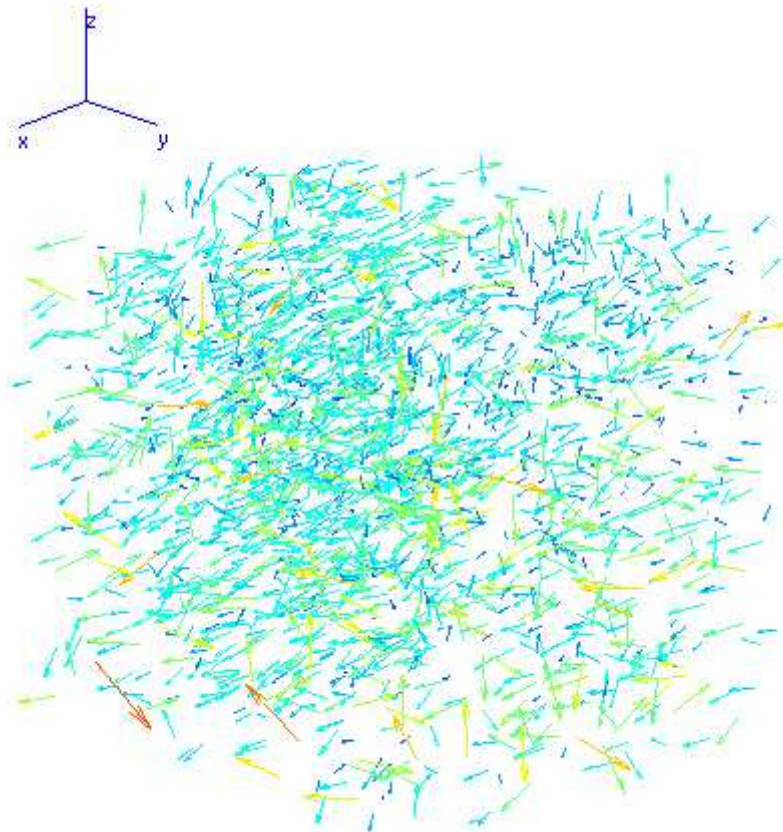


Fig. 3.12. Remove error vector using continuity equation

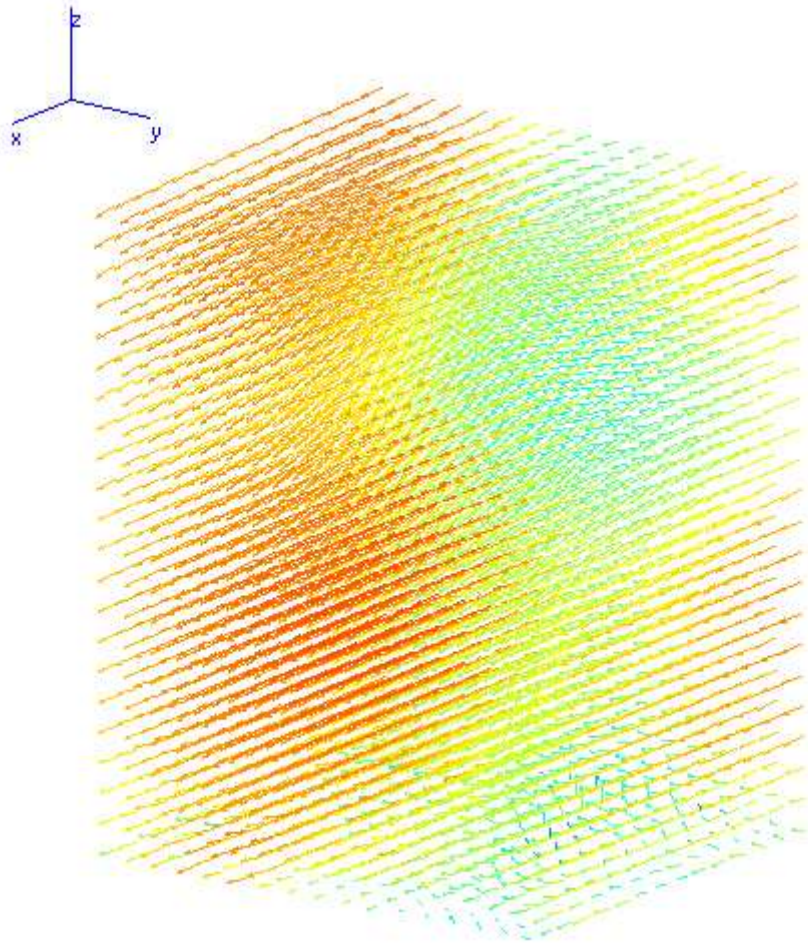
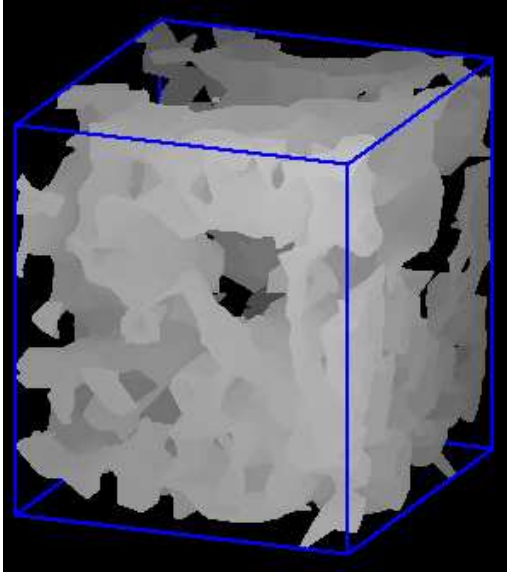
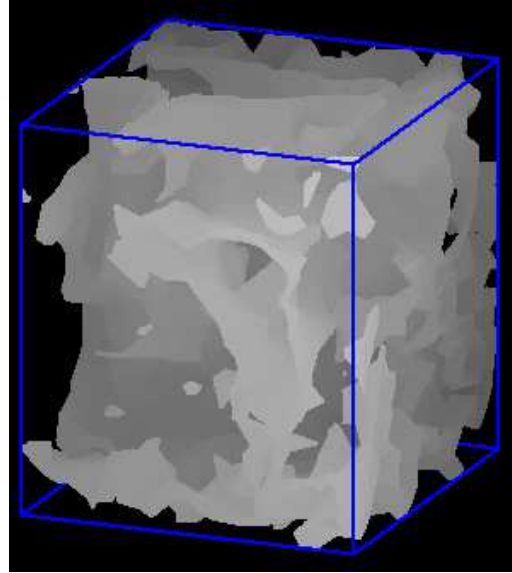


Fig 3.13 Interpolated mean velocity of near fin flow

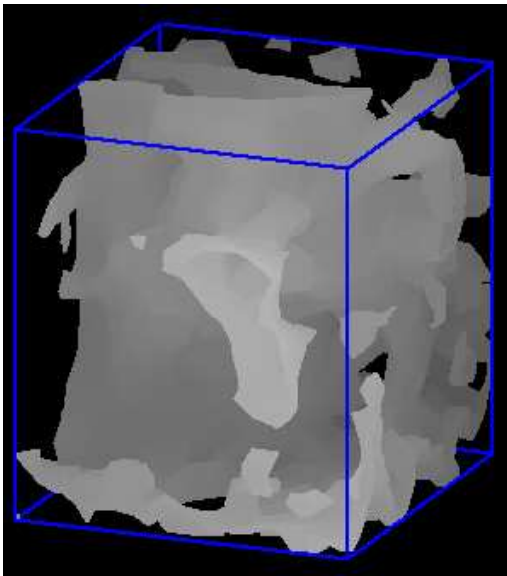


Time:

Time: 0.53



0.26



Time : 0.74

Fig. 3.14 The instantaneous vorticity of sphere

3.3.2 단면(xy)에서의 속도장 특성

3차원 PTV를 이용하여 raw image를 획득한 후 일련의 과정을 거쳐서 3차원 공간상의 속도 벡터 및 vorticity를 구하였다. 어류 지느러미 후류 유동의 경우 복잡한 3차원 유동이므로 내부유동을 상세히 보기 위해서는 3차원 정보를 2차원으로 Section화 하여 분석함으로써 좀더 구체적인 이해를 도울 수 있다.

Fig. 3.14는 G카메라 상에서 획득된 원본이미지와 3차원적으로 얻어진 순시속도 벡터장을 xy 단면으로 나누어 합성한 이미지이다. 획득된 순시속도벡터장의 위치는 (a)와 (b) 각각 $z/D = 0.0003$ 이다.

지느러미의 움직임이 가슴부분에서 시작하여 정점을 찍고 다시 가슴부분으로 돌아오는 이미지로서 지느러미가 가슴에서 멀어지는 시점에서는 어류가 와를 생성하며 반환 될 때 발생된 와를 발산하는 모습을 볼 수 있다.

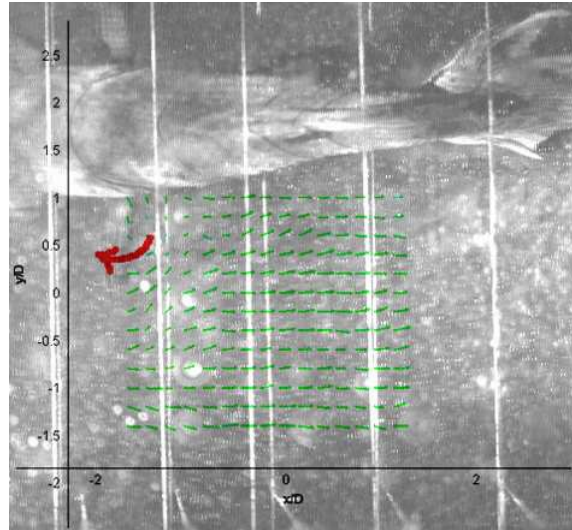


Fig. 3.14 (a) The instantaneous velocity vector of xy plane at 0.53 sec

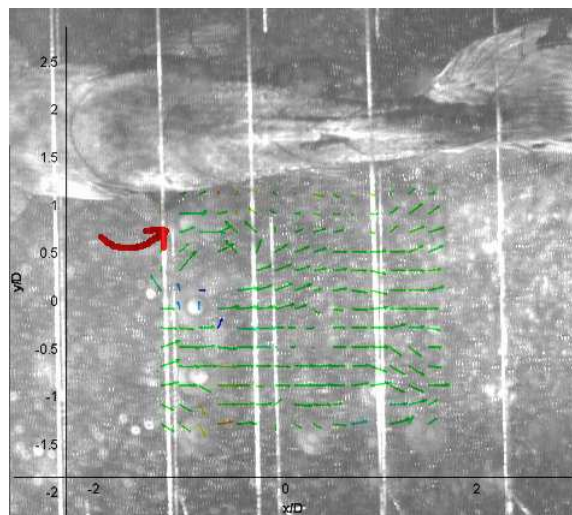


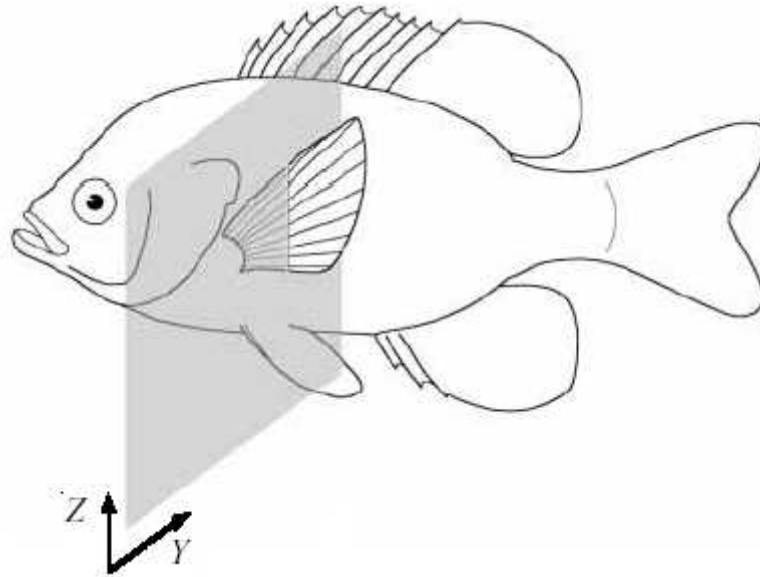
Fig. 3.14 (a) The instantaneous velocity vector of xy plane at 0.73 sec

3.3.3 y/D , z/D 단면에서의 지느러미 후류 속도 벡터장 분석

Fig.3.15에서 Fig.3.17은 무차원 축 z/D 와 y/D 에서 무차원 속도를 각각 U/U_0 , V/U_0 으로 나타낸 그림이다. 데이터는 case07의 64장의 이미지중 가장 특징적인 이미지를 선택하여 순시 속도를 구했다.

Fig.3.15는 3차원 공간 벡터장을 단면으로 나눈 것으로 이것은 두 개의 vorticity가 형성된 것을 확인 할 수 있다. Fig.3.16는 데이터를 그래프를 그렸으며 발생된 vorticity는 상하의 속도차로 인하여 회전이 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig.3.17은 Vortex ring이 형성된 맨 윗부분에서 그려진 분석된 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 작은 Vorticity가 양의 방향에서 음의 방향 즉 반 시계방향으로 회전하는 것을 구체적으로 설명하고 있다. 이러한 회전은 유체의 흐름이 빨라져서 몸체가 받는 양력을 상쇄시키는 역할을 하며 몸체 안정성을 유지하는데 중요한 역할을 한다.



Transverse

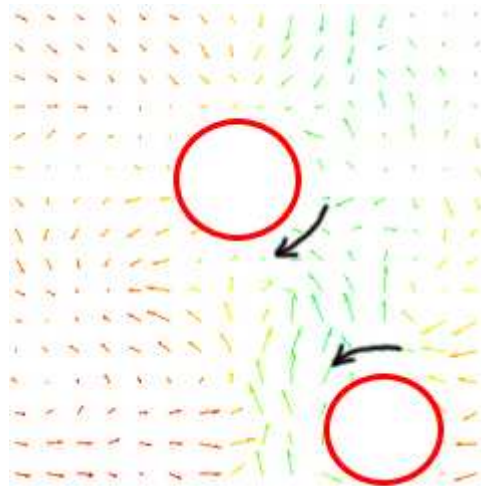


Fig. 3.15 Section of transverse vector image

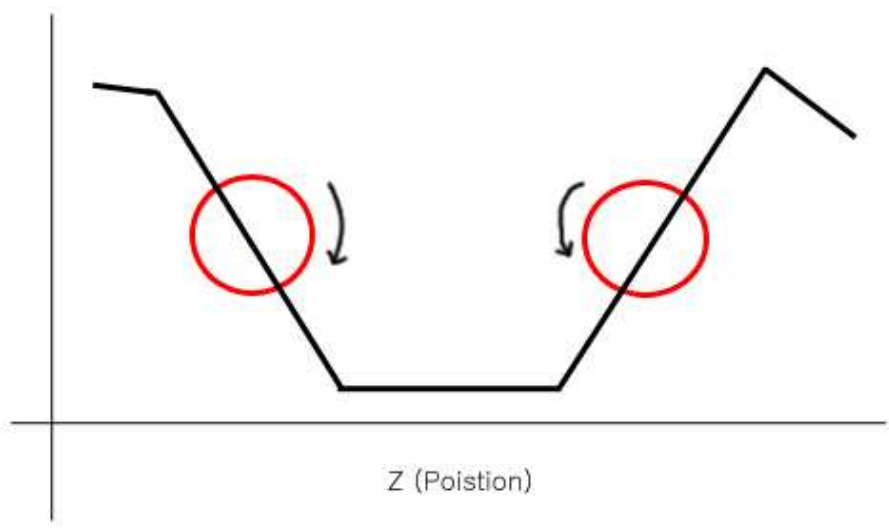
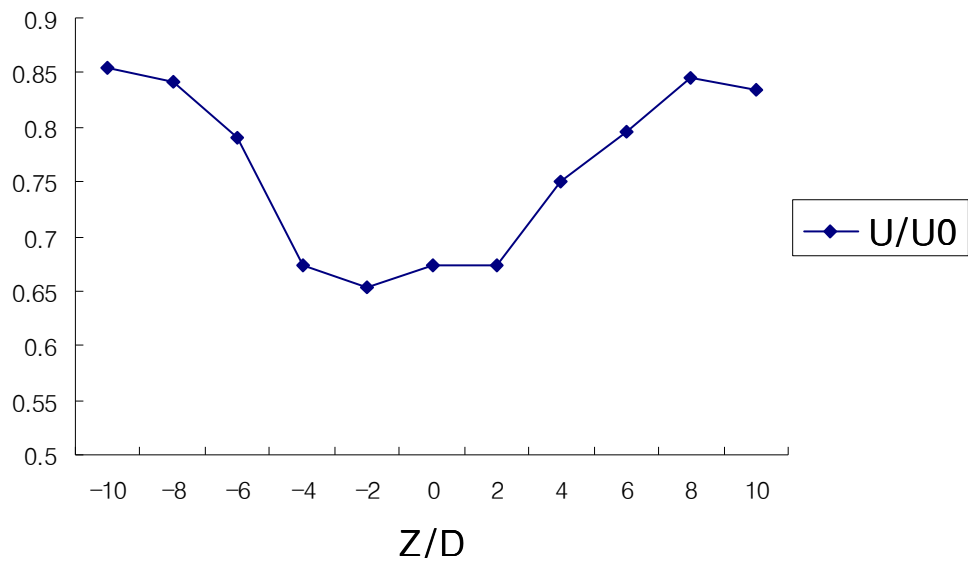


Fig. 3.16 Dimensionless velocity of image at the $x/D=0.1$ and $y/D=-0.33$

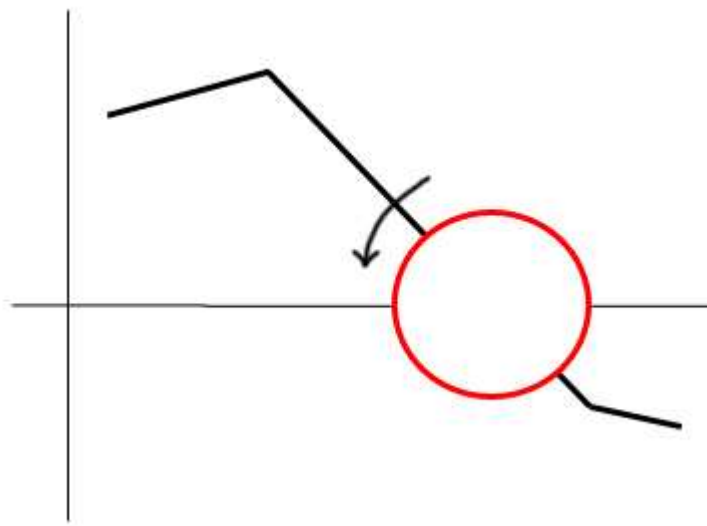
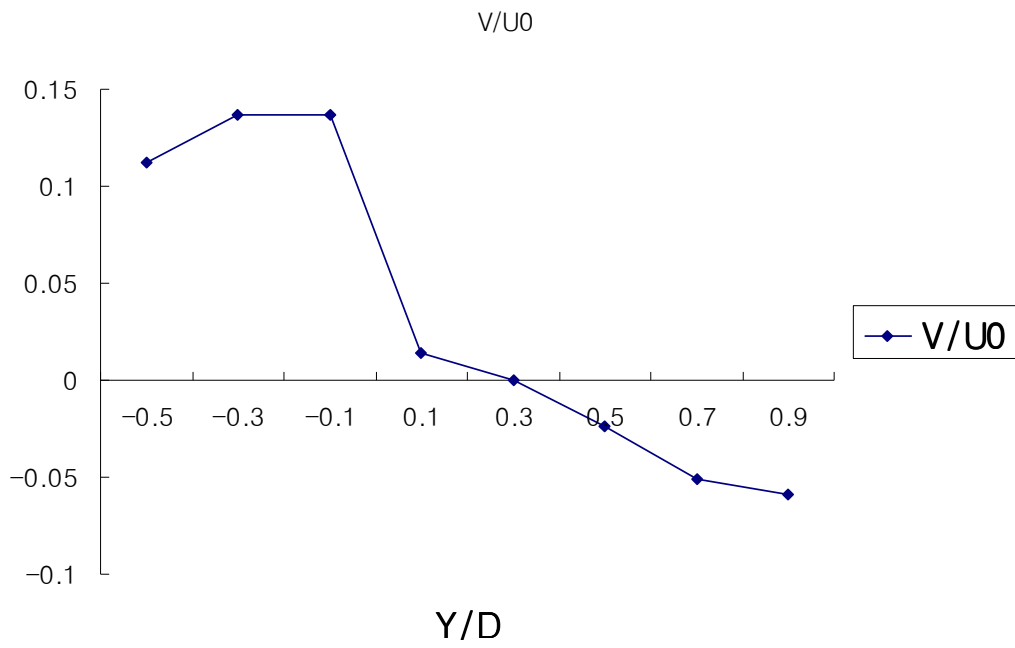


Fig. 3.17 Dimensionless velocity of image (G4) at the $x/D=0.05$ and $z/D=0.324$

3.3.4 지느러미의 움직임에 따른 후류 vorticity 분석

Fig. 3.19에서 3.21까지 지느러미의 움직임에 따른 vorticity의 이동을 볼 수 있다. 초기에 발생한 vorticity를 특정 메커니즘에 따라서 지느러미를 아래에서 상부로 향할 때 vorticity ring의 형태로 회전하며 발산하는 것을 볼 수 있다. 이러한 vorticity의 회전과 발산은 양쪽 날개에서 발생하며 추진력이 발생하는 동안 몸체 안정성의 유지에 있어 장점이 될 것으로 판단되어 진다. 그 이유로는 어류의 양쪽 방향에서 독립적으로 발생하는 크고 몸체 중심으로 지향되는 상호 작용 힘들의 난류에 의해서 야기되는 회전에 대해서 몸체 균형에 도움을 주기 때문이다.

Fig. 3.22에서 3.25까지는 총 5 case를 평균한 결과를 나타낸다. 평균화된 데이터를 가지고 분석한 결과 vorticity는 z/D 축을 기준으로 반시계 방향으로 경사진 것을 알 수 있었다. 이러한 이유는 어류의 무게 힘에 대한 안정성 확보로 보인다.

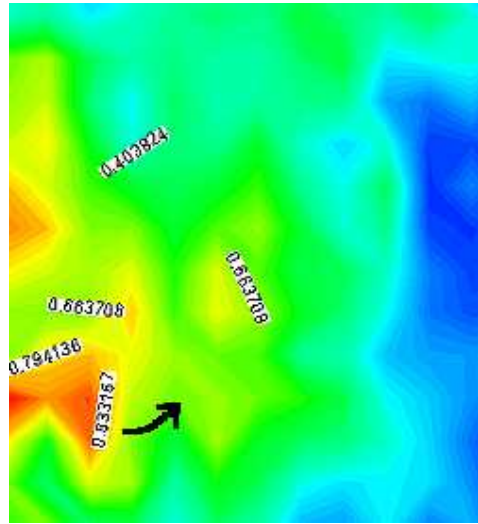
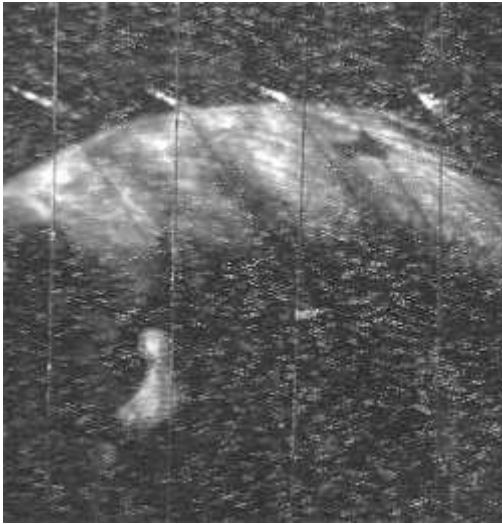


Fig. 3.18 Early upstroke

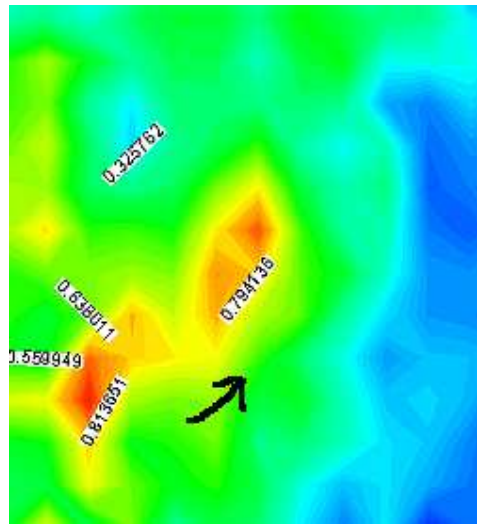
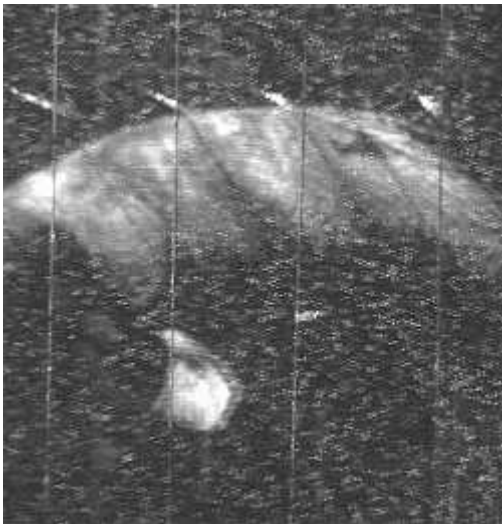


Fig. 3.19 Middle of upstroke



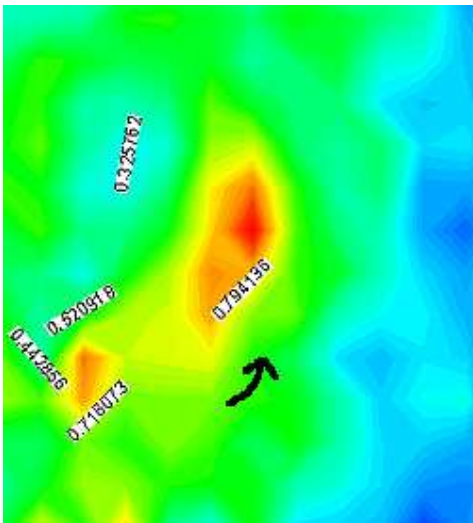
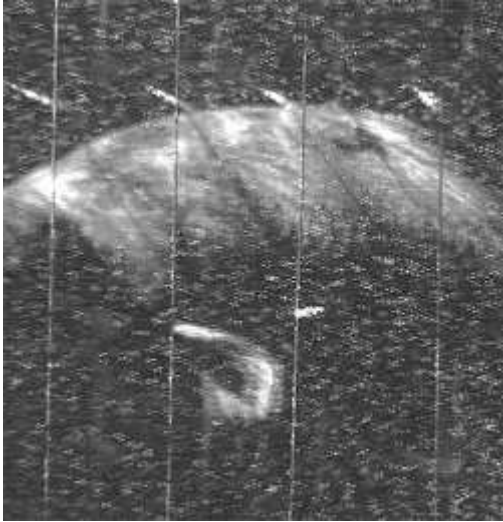


Fig. 3.20 Middle of upstroke

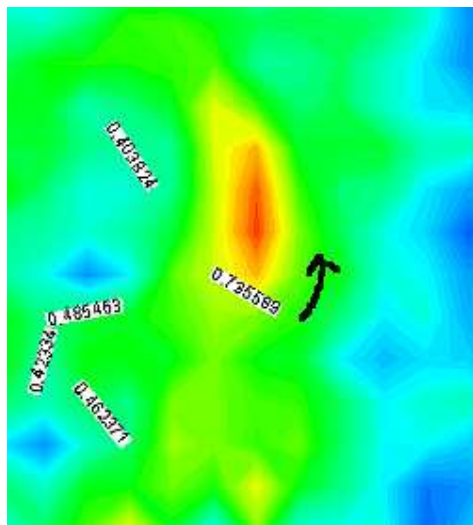
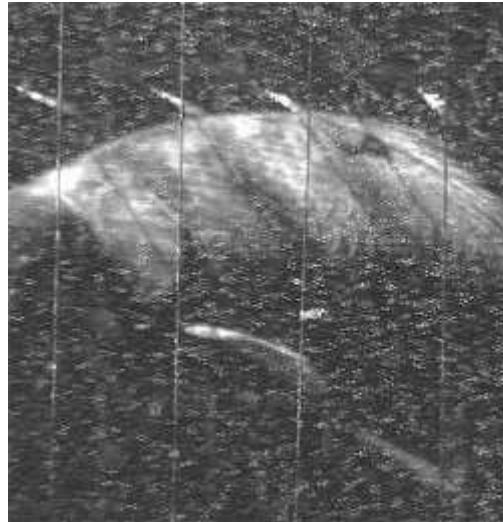
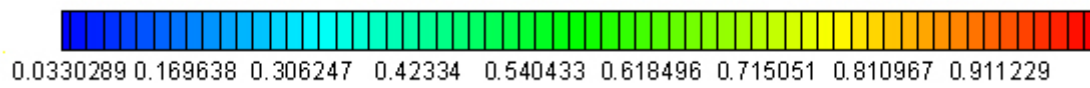


Fig. 3.21 End of upstroke



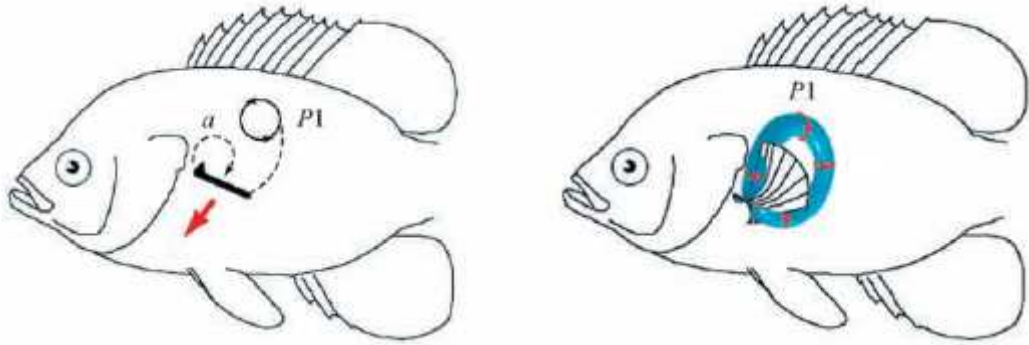


Fig. 3.22 Early upstroke

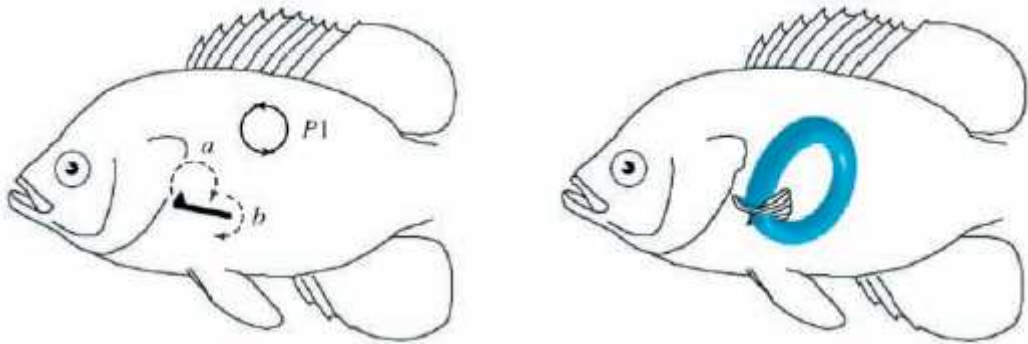


Fig. 3.23 Middle of upstroke

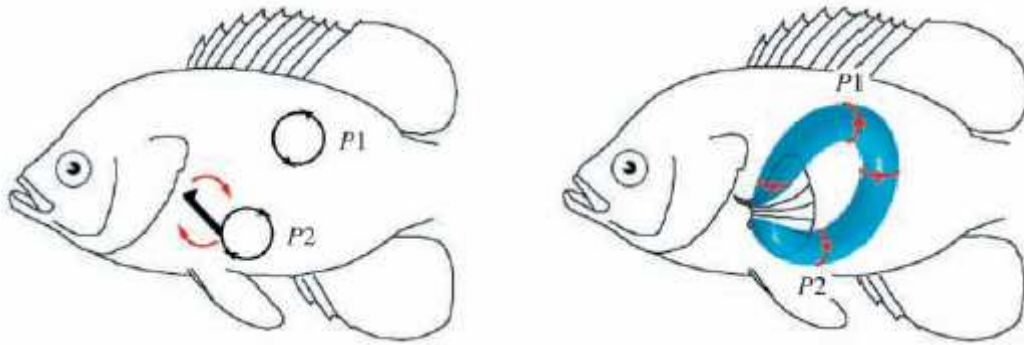


Fig. 3.24 End of upstroke

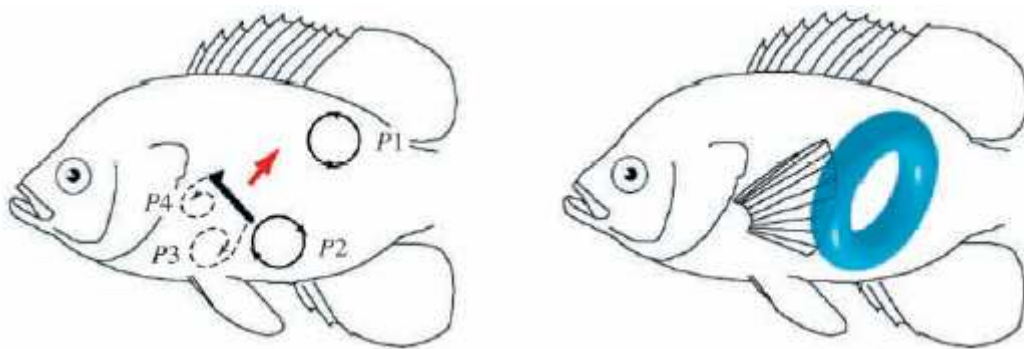


Fig. 3.25 End of upstroke

제 4 장 결론

선행 연구자들이 정량적으로 확립했던 이동하는 어류의 지느러미 후류 가시화를 3차원 PTV를 이용하여 정성적으로 정립하였다. 이러한 연구는 생체 메커니즘의 이해와 이용에 있어 필수적인 요소로 생각된다. 본 논문의 연구 결과는 다음과 같이 정리된다.

유전 알고리즘을 이용한 3D PTV를 생체 유동에 적용하여 3차원 순시속도, 평균 속도분포 및 vorticity를 정량적인 데이터로 획득할 수 있었다.

어류 가슴지느러미에서 발생하는 추진력은 공기 중으로 이동하는 조류나 곤충의 그것과 비교할 수 있다. 조류는 부력이 존재하지 않고 몸체 길이에 비해서 날개 길므로 상승력을 유지하기 위해서서는 무작위적인 후류를 발생시킨다는 연구 결과가 있다. 그러나 어류가 생존하는 환경에는 부력이 존재하며 또한 몸체 길이에 비해서 날개의 길이가 상대적으로 작다. 이러한 이유로 인하여 어류는 지느러미의 움직임에 따른 특징적인 Vortex ring을 발생하는 것으로 판단된다.

발생된 Vortex ring을 단면으로 분석했을 때 회전 방향은 Ring의 중심으로 향하고 있다. 이러한 것은 유속이 빨라지므로 서 발생하는 항력을 링의 회전에 의해서 상쇄시킬 수 있을 것이다. 위와 같은 사실에 근거하여 어류와 같이 부력이 존재하는 환경에서 운용된 로봇 설계에 있어 다음과 같은 제안을 할 수 있다. 긴 몸체를 가지는 대부분의 어류 유동의 특징은 짧은 지느러미에 의해서 vortex ring을 형성하며 이러한 Ring은 회전을 동반하여야 하며 몸체 반대방향으로의 발산은 순간적인 추진력 및 몸체의 안전성에 도움을 줄 수 있어야 한다.

참고 문헌

- 장근식, 노오현, 자연과 기술에서의 와유동, 방한출판사, 서울, pp. 1~22, 1988.
- 도덕희, 조용범, 홍성대, “ 유전적 알고리즘에 의한 PIV계측법”, 대한기계학회춘계학술대회 논문집(B), 울산대학교, pp.650-654, 2000.
- 조경래, 유전알고리즘을 이용한 3차원 PTV기법의 개발에 관한 연구, 한국해양대학교 석사논문, 부산, 2001.
- 조용범, 3차원 PTV에 의한 원주 근접후류의 특성조사, 한국해양대학교 석사논문, 부산, 2002.
- 성재용, 박강국, 유정열, “Cinematic PIV에 의한 실린더 후류의 위상평균된 3차원 구조”, 대한기계학회 2000년도 춘계학술대회논문집 B pp.661~666, 2000.
- Chang TP; Wilcox NA; Tatterson GB "Application of image processing to the analysis of three-dimensional flow fields." Opt. Eng. 23(3): 283-287, 1984.
- Yamakawa M; Iwashige K On-line velocity distribution measuring system applying image processing. J Flow Visualization Soc. Jpn., 6(20): 50-58, 1986.
- Eliot G. Druker & George V. Lauder; "Locomotor on swimming fish" The journal of experimental biology, 1999.

Eliot G. Druker & George V. Lauder; " Wake dynamics and fluid forces of turning maneuvers in sunfish" The journal of experimental biology, 2001.

Kobayashi T.; Saga T.; Sekimoto K. "Velocity measurement of three-dimensional flow around rotating parallel disks by digital image processing." ASME FED 85: 29-36, 1989.

Nishino K.; Kasagi N.; Hirata M. "Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing." ASME J. Fluids Eng. 111(4): 384-391, 1989.

D.H. Doh; D.H. Kim; S.W. Choi; S.D. Hong; Kobayashi; T. Saga "Single-frame 3D-PTV for high speed flows", Exp. in Fluid, 2000.

D.H. Doh; D.H. Kim; K.R. Cho; Y.B. Cho; T. Saga; T. Kobayashi; " Development of Ga based 3D-PTV Technique, J. Visualization, Vol.5, No3, pp.243-254, 2001

감사의 글

오랜 기간 동안 많은 조언과 함께 학문의 깊이와 폭을 넓혀 주신 도덕희 교수님께 진심으로 감사 드리며, 이번 졸업 논문을 심사해주신 정형호, 박건하 교수님께 감사 뜻을 전합니다.

8년 전 연구실에 처음 들어왔을 때 인생의 선배로서 많이 가르침을 주신 성환이 형, 성대형, 경래형 그리고 늘 긍정적인 사고로 희망을 주었고 이번 논문을 위해 많은 도움을 준 편용범, 연구실에서 크고 작은 추억들을 함께 공유한 조용범, 우장덕, 이원재, 박천수, 문지섭에게 고마움을 전합니다. 그리고 보다 높은 배움을 위해 떠나는 황태규, 차규한에게도 앞날에 밝은 등불이 함께하기를 기원합니다. 연구실에서 힘든 일을 묵묵히 했던 후배 장우, 삶의 터전에서 희망의 미래를 펼쳐 가는 재영, 경정이에게 고마움을 전하며 김종찬, 방윤석, 신동진, 상지웅에게도 앞날에 좋은 일만 있기를 희망합니다.

지금까지 끝없는 사랑으로 든든한 후원자였던 어머니, 할머니, 항상 바른 삶을 살도록 채근하신 민환, 일환, 이환이 삼촌, 숙모님들 그리고 동생 승호에게 감사합니다.

이 지면을 빌려 일일이 열거를 할 수 없지만 저에게 많은 힘이 되어 주신 모든 분들에게 감사의 마음을 전합니다.

조도에서 장규섭 드림