

## 스테레오 카메라 기법을 이용한 참다랑어의 크기 및 유영속도 측정

양용수 · 이경훈\* · 지승철<sup>1</sup> · 정성재<sup>2</sup> · 김경민<sup>1</sup> · 박성욱  
국립수산과학원 시스템공학과 · <sup>1</sup>국립수산과학원 미래양식연구센터  
<sup>2</sup>동해수산연구소 해역산업과

### Measurement of size and swimming speed of Bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) using by a stereo vision method

Yong-Su YANG, Kyounghoon LEE\*, Seong-Chul Ji<sup>1</sup>, Seong-Jae JEONG<sup>2</sup>,  
Kyong-Min KIM<sup>1</sup> and Seong-Wook PARK

*Fisheries System Engineering Division, National Fisheries Research & Development Institute,  
Busan 619-705, Korea*

<sup>1</sup>*Future Aquaculture Research Center, National Fisheries Research & Development Institute,  
Jeju 690-192, Korea*

<sup>2</sup>*Aquaculture Industry Division, East Sea Fisheries Research Institute, Gangneung, 210-861, KOREA*

This study was performed to develop a video based system which can be used to measure the averaged fish size in a non-intrusive fashion. The design was based on principles of simple stereo geometry, incorporated fish dimensions weight relationships and took into consideration fish movement to lower system costs. As the fish size is an important factor that impacts the economy of an aquaculture enterprise. Size measurements, including fork length, width or height, girth, thickness and mass, can be used to determine fish condition in the fish farm, so the averaged fish size of fish cage needs to consistently monitor in open ocean aquaculture cage. A precision of  $\pm 3\%$  for replicate length measurements of a 60cm bar is obtained at distances between 2.0 and 6.0m, and the mean fork length and mean swimming speed of bluefin tuna were estimated to 48.8cm and 0.78FL/s, respectively.

Keywords: Stereo vision method, Bluefin tuna, Swimming speed, Size distribution

\*Corresponding author: khlee71@nfrdi.go.kr, Tel: 82-51-720-2583, Fax: 82-51-720-2586

## 서 론

최근, 외해가두리시설에 양식되는 고급어종의 성장 효율성을 극대화시키기 위하여 대상 어류의 해양환경과 시기별 연직분포에 관한 모니터링 정보수집의 중요성이 인식되었고, 해외 수산선진국에서는 양식시설 내 대상 어류의 크기 및 섭이조건 등과 같은 다양한 조건에 적용이 가능하도록 외해 양식기술의 효율성을 극대화시키기 위한 최적화 기술이 시도되고 있다 (Costa et al., 2006; Harvey et al., 2003). 이러한 정보는 대상 어류의 관점에서 스트레스를 최소화하기 위하여 해양환경정보 및 일주기패턴에 대한 연직분포 특성을 규명하여 친환경적 관리시스템을 운영하기 위한 정량적인 정보 제공이 필요하다.

수중에 분포하고 있는 해양생물의 정량적인 밀도를 추정하거나 행동특성을 파악하기 위해 일반적으로 수중카메라를 이용한 방법이 많이 적용되고 있다 (Davis et al., 1992). 수중카메라를 이용한 광학기술은 현재 다양한 시스템이 개발되어 시간에 따라 대상생물의 위치나 행동을 관찰하는데 유용하게 적용되지만, 상대적으로 좁은 탐지범위를 가지며 인위적인 빛 자극에 의해 어류행동에 영향을 미치는 한계를 가지고 있으나, 다이버에 의한 주요 해역별 어류의 분포상황을 조사에서부터 예인체를 이용한 대개의 밀도 분포 (An et al., 2009)와 같은 자원분야뿐만 아니라, 가두리양식장에서의 남방참다랑어 체장측정 (Harvey et al., 2003)과 같은 양식분야에서도 효율적인 성장도 관련 정보를 얻기 위해 개발되어 적용되어 최근에는 컴퓨터 인공지능 알고리즘을 이용하여 대상어류의 형상을 추출하고 성장률을 추정하는 단계 (Costa et al., 2006)까지 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 수중광학기술을 이용하여 대상생물의 크기를 측정할 수 있는 스테레오 카메라 기법 (stereo camera system)의 측정정도 향상을 위한 기본개념을 소개하고, 참다랑어와 같은 고가어류를 대상으로 양식하는 가두리내의 시

기별 성장도를 측정하기 위한 목적으로 스테레오 카메라 기법을 도입하여 수중에서 유영하는 대상어류의 크기를 측정하였으며, 동기화된 2대의 카메라 영상으로 3차원거리에 대한 정보를 명확하게 파악할 수 있으므로 제주 표선연안에 설치된 외해가두리 내에 유영하는 참다랑어를 대상으로 유영속도를 측정하였다.

## 재료 및 방법

### 스테레오비전 3차원 추적 원리

카메라영상을 이용한 3차원 공간인식을 위해서는 2대 이상의 카메라가 필요하며, 절대좌표계에 대한 카메라의 상대적 위치정보, 기울기, 렌즈 왜곡량 등과 같은 카메라 파라미터가 구해져야 한다. 본 연구에서는 이를 구하기 위하여 10개 파라미터 교정법을 사용하였다 (Doh et al., 2002). 식 (1)은 외부요소 ( $dis, \alpha, \beta, \chi, m_x, m_y$ )와 내부요소 ( $C_x, C_y, K_1, K_2$ )를 구하는데 사용된 관측방정식이며, 절대좌표계 ( $X, Y, Z$ )에 대한 카메라 좌표계 ( $x, y, z$ )와의 관계는 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다.

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

여기서,  $dis$ 는 절대좌표계 원점  $O(0, 0, 0)$ 와 카메라 사진좌표계 원점  $(X_0, Y_0, Z_0)$ 간의 거리를 나타내며, 좌표  $(X_m, Y_m, Z_m)$ 은 절대좌표계와 사진좌표계가 일치하도록 회전각  $\alpha, \beta, \chi$ 로 회전하였을 때, 점  $P$ 의 (사진좌표계에서는  $P'$ ) 절대좌표계상에서의 좌표를 나타낸다.  $m_x, m_y$ 은 카메라 사진좌표계의  $z$ 축과 절대좌표계의  $Z$ 축을 일치시켰을 때 사진좌표계의 원점이 절대좌표계의 원점으로부터 벗어난 이동량을 의미한다.

$C_x, C_y$ 는 이미지 그래버에 따른 장방비의 차이를 고려한 렌즈중심점과 화면중점 간의 초점거리를 의미하며,  $k_1, k_2$ 는 렌즈의 굴절 계수를 의미

한다.  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ 는 방사상의 렌즈왜곡을 고려한 양으로 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta x = (x/r) \times (k_1 r^2 + k_2 r^4), \Delta y = (y/r) \times (k_1 r^2 + k_2 r^4),$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2)$$

한편, 식 (3)은 10개의 파라미터로 구성된 역변환행렬  $M_M^{-1}$ 을 이용하여 사진좌표계를 절대좌표계로 변환시켰을 때의 좌표를 나타내며,  $M_M$ 은 회전변환행렬을 나타내며  $(X_m, Y_m, Z_m)$ 은 식 (4)로 설명할 수 있으며, 2대의 카메라 (A, B)로부터 사진좌표 상에 나타난 표적물의 3차원 위치는 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M_M^{-1} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

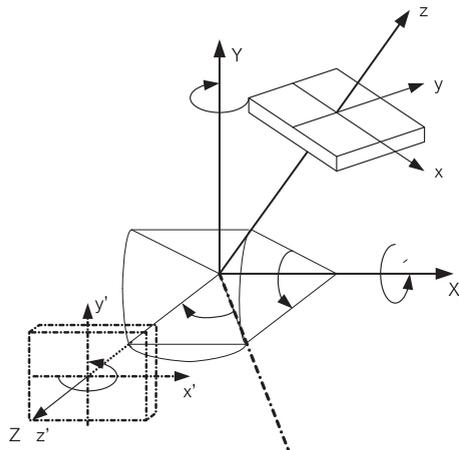


Fig. 1. Absolute coordinates and photographic coordinates.

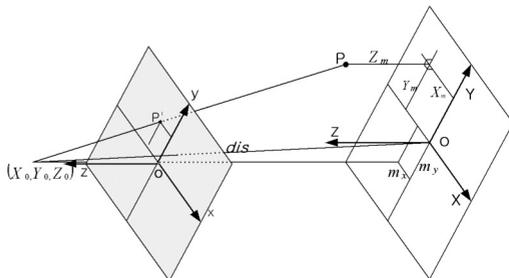


Fig. 2. Relations of camera parameters on the absolute coordinate and the photographic coordinate.

$$X_m = \frac{x - \Delta x}{C_x} t + m_x, Y_m = \frac{y - \Delta y}{C_y} t + m_y,$$

$$Z_m = d - t, d = \sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \frac{1}{1} \left\{ \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \right\} \quad (5)$$

여기서,  $t$ 는 최소자승법에 의하여 구해지며 최종적으로 정의되는 추적입자 (표적물)의 공간좌표는 두 직선의 교점이 되고, 각 사진좌표계상에서의 구현되는 두 직선의 교점의 중간점을 의미한다. 따라서, 각 표적물에 대한 영상상의 좌표값을 알면 위와 같은 과정을 통하여 표적물의 공간좌표가 구해진다.

### 스테레오영상 동기화 기법

Stereo matching은 좌우 동기화된 2대의 카메라를 이용하여 이미지를 획득하는 것으로서, 좌측 카메라에서 촬영된 화상과 우측 카메라에서 촬영된 화상을 비교한 후, 대응점을 찾아서 삼각측량법을 이용하여 3차원 위치값을 찾는 방법이다 (Kim et al., 2001). 일반적으로 적용되는 matching method edge based matching method, region correlation matching method, least square matching method, gradient-based matching method가 있는데, 본 연구에서는 region correlation matching method를 적용하였다. 이 방식의 특징으로는 특정 영역에서의 화소 주변의 면적으로 비교하여, 그 면적 중의 점을 각각 좌우의 화상에서 차이를 계산하고, 그 합계가 가장 작은 것을 찾아 대응점으로 하는 방법이다. 참다랑어와 같은 고도회유성 어족의 군집을 이루는 매개체에서 matching point를 찾는 데 가장 효율적인 방법이다 (Fig. 3).

Stereo matching 방식은 크게 두 가지 방식이 있으며, Fig. 4과 같이 translation 방식과 angular displacement 방식이 있다. Translation 방식은 카메라의 광학축 (optical axes)이 조명된 평면에 수직한 것이 특징이다. 다시 말해서 Fig. 4 (A)와 같

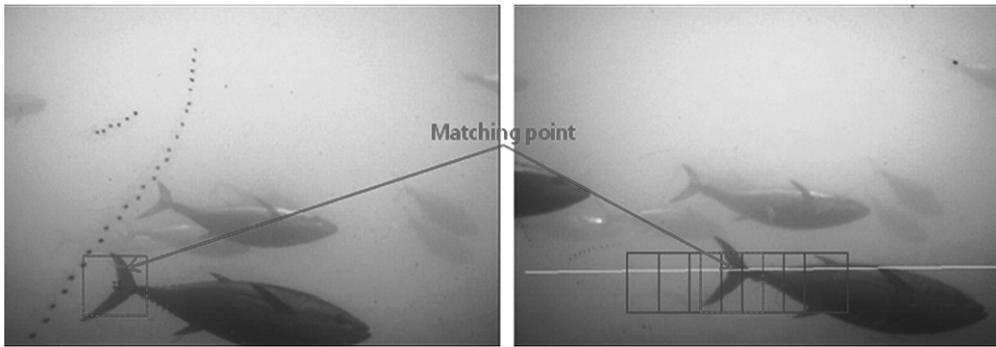


Fig. 3. Region correlation matching method.

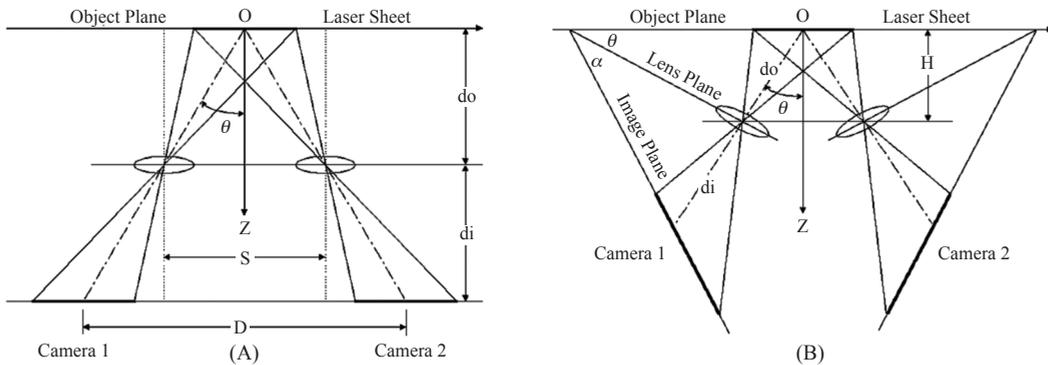


Fig. 4. Translation method (A) and angular displacement method (B).

이 물체면 (object plane)과 렌즈면 (lens plane), 카메라센서면 (image plane)이 평행하게 설치된 시스템으로서, 입체효과 (stereoscopic effect)가 카메라의 축으로부터 떨어진 거리까지 고려할 수 있으며, 카메라의 렌즈 배율요소 (magnification factor)와 카메라간의 거리간격 ( $\theta$ )을 가지고 기하학적 이동거리와 3차원 속도 성분을 계산하는 방법이다.

반면, angular displacement 방식은 2대의 카메라렌즈가 측정영역과 수직하지 못하고 조명평면과 소정의 각도를 이루게 하여 계측을 하는 방식이다. 측정각도에 따라 거의 제약이 따르지 않으나 취득한 영상에 강한 투시왜곡에 발생하게 되므로, 영상 기록면 좌표와 측정단면 좌표 사이의 상관 함수를 구하는 작업이 필요할 뿐만 아니라 굴절의 영향으로 카메라렌즈의 설치를 가능

하면 지상면을 기준으로 평행하게 설치해야 하는 단점이 있었다. 이러한 단점을 극복하기 위해 Scheimpflug stereo-camera (Prasad et al., 1993)를 제안되었는데, Fig. 4 (B)와 같이 카메라의 렌즈면과 센서면이 레이저 빔면과 하나의 라인을 공통으로 가로지르도록 기울이게 하는 방식이다. 본 연구에서는 해상 환경에서 요구하는 넓은 측정 영역 확보를 위해 angular displacement법을 적용하였다. 또한, 영상의 기하학적 변환 (geometric transformation)으로 굴절과 수차의 영향을 고려하여 정확도를 향상시켰다.

#### 참다랑어의 유영속도 계산

대상생물의 유영속도 측정에 필요한 정보는 기본적으로 3차원 이동거리 ( $\Delta D$ )와 시간 ( $\Delta t$ )의 함수이다. 본 연구에서는 스테레오 비전을 이용

하여 확보한 공간 내의 정확한 3차원 위치값을 검출할 수 있으므로 대상생물의 이동경로를 알 수 있으며, 또한 카메라 셔터를 동일 간격으로 설정하여 식 (6)과 같이 잠다랑어의 수영 속도 ( $F_{SS}$ , Swimming Speed)를 측정할 수 있다.

$$F_{SS} = \frac{\Delta D}{\Delta t} = \frac{(D_2 - D_1)}{C_{SS}} \quad (6)$$

여기서,  $D_2$ 는 Frame 2의 3차원 위치값,  $D_1$ 은 Frame 1의 3차원 위치값,  $C_{SS}$ 는 Frame 1과 Frame 2 사이의 시간차를 나타낸다.

#### 스테레오카메라시스템 구성 및 교정작업

본 연구에서 개발된 시스템의 구성요소는 1/3" ICX204 CCD카메라 (FL2-08S2C, PT Gray사) 2대, 4.0mm렌즈, 영상을 전송하는 image repeat (1394b, FWB) 및 영상처리용 랩탑컴퓨터로 구성하였다. 시스템 구성에 있어서, 2대의 카메라 간격은 800mm이며, 2대의 카메라는 중앙을 기준으로 각각 10° 씩 내부로 경사지게 설치하였으며, 2대 카메라시스템 중앙에 repeat를 장착하고 영상은 랜 케이블을 통하여 촬영된 영상을 디지털방식 (bmp파일)으로 30프레임 (frame/sec) 화상을 저장장치로 전송하도록 설정하였다 (Fig. 5).

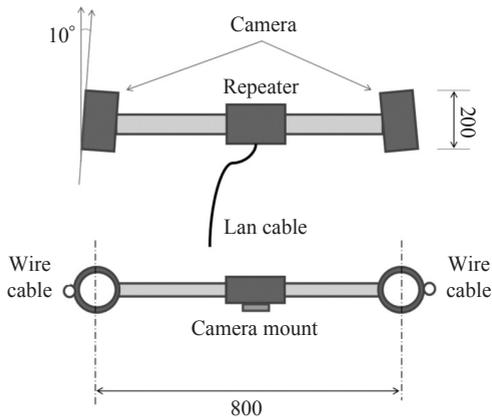


Fig. 5. Underwater stereo camera system description.

사람이 3차원 공간을 인식하려면 최소한 2개 이상의 눈이 필요하다. 카메라를 이용하여 3차원적인 계측을 하려면 2대 이상의 카메라가 필요하다. 우리의 두 눈이 안면에 고정되어 있으면서 두 눈 간의 상대적 운동이 순간적으로 신경세포로 전달되므로 우리는 공간을 실시간으로 인식할 수 있다. 이처럼 카메라를 이용하여 3차원 공간을 인식하기 위해서는 카메라간의 상대적 운동을 인식시킬 필요가 있는데 이를 3차원 계측

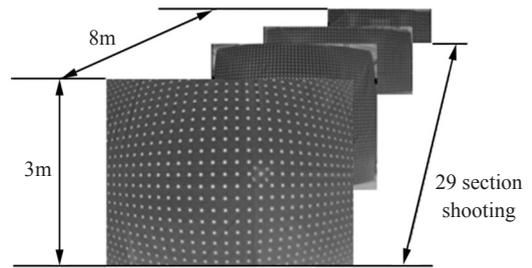


Fig. 6. Calibration processing by 29 sectional shooting.

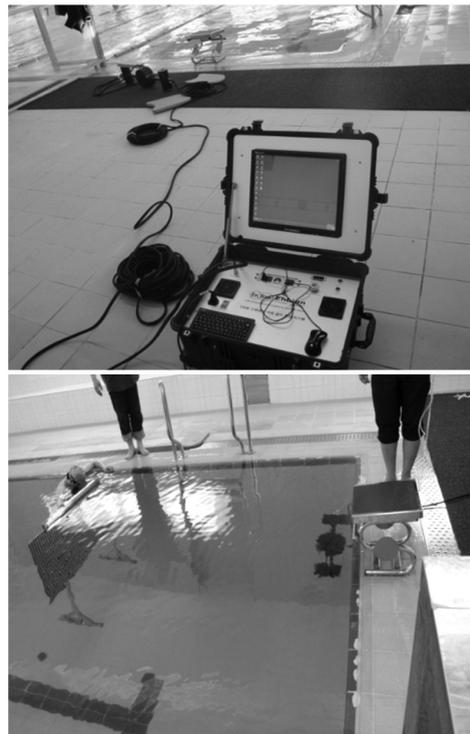


Fig. 7. Underwater calibration processing in water pool.

에서는 카메라 교정이라 한다 (Okamoto et al., 1997; Schenk et al., 1992).

먼저, 카메라의 정보를 얻기 위해 모든 카메라에 대한 교정작업을 해야 하며, Fig. 6와 같이 교정패널을 거리에 따라 총 3가지로 제작하였다. 각각의 교정패널은 구간별로 1번째 교정패널 (W0.1m×H0.1m)은 2m지점에서 3m지점까지, 2번째 교정패널 (W0.2m×H0.2m)은 3m지점에서 5m지점까지, 3번째 교정패널 (W0.3m×H0.3m)은 5m지점에서 8m까지 교정작업을 실시하였다. 본 연구에서는 계산상의 2차원 좌표를 이용하여 이상적인 교정작업을 수행하였는데, 본 개발품은 수중에서 적용되는 시스템이므로 영상 왜곡현상 (Image distortion)을 최소화하기 위해, Fig. 7과 같이 실내수영장내에서 교정작업을 수행하였다.

### 결과 및 고찰

#### 스테레오카메라시스템의 측정 정도

개발된 시스템의 측정오차는 정도향상을 위해 카메라로부터 기본적으로 3단계의 교정패널을 이용하여 교정정도를 검증한 결과는 Fig. 8과 같다. 시스템 측정 결과 정확도는 3m에서 0.5% 내외로 가장 높았으며, 8m에서는 4%내외로 상대적으로 오차가 높게 나왔다. 이는 카메라의 해상도와 관련된 것으로 대상체와 카메라 사이의 거리가 멀어지므로 1 Pixel이 차지하는 영역 작아지므로 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

한편, 본 연구에서 적용된 카메라 보정 작업은 앞서 언급한 3단계 교정방식 외에 1단계 교정방식과 5단계 교정방식을 추가로 측정하여 오차율을 평가하였다 (Fig. 8). 평가 결과, 1단계 교정방식은 카메라로부터 멀어질수록 오차율이 4m 기점을 기준으로 급속하게 증가하였다. 여기서, 1-4m 영역에서는 이미지 해상도가 상대적으로 간격에 대한 영역판별이 가능하지만, 4m 이후에서는 해상도 저하에 따라 교정오차에 의한 것으로 판단된다. 5단계 교정단계는 1단계를 기준으

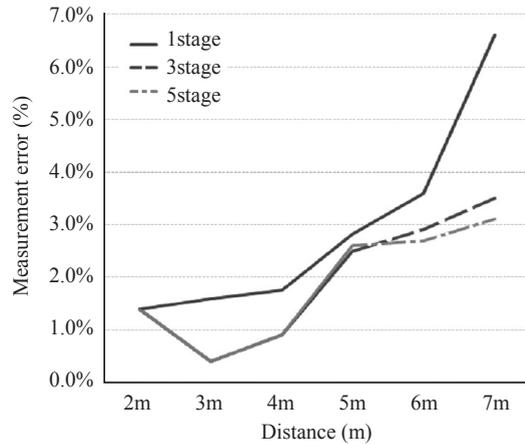


Fig. 8. Horizontal measurement error according to applied calibrators.

로 교정패널 point 간격을 10×10mm로 하였으며, 단계별로 2배수 하여 카메라에서 8m에 위치한 거리에서는 160×160mm 간격의 교정패널을 적용하였다. 시험 결과, 3단계 교정방식과 오차율은 미미한 것으로 확인하였으며, 7m 이후에서 약 0.4% 오차율이 있는 것으로 확인하였다. 이것은 교정패널의 point 간격 보다는 이미지 해상도에서 발생하는 오차에 의한 것으로 판단된다. 따라서, 본 시스템의 교정 오차율은 0.5% 이내로 낮출 수 있으며, 측정값의 정확도는 약 30% 개선할 수 있을 것으로 판단한다.

또한, 시스템적 구성의 측면에서 수중 내 측정 가능한 시야 확보와 고해상도 카메라 적용시 픽셀에 따른 오차 및 영상 왜곡을 최소화 할 수 있어 측정에 따른 오차를 줄일 수 있다. 하지만, 필요 이상의 고해상도 영상은 이미지를 1초당 전송하는 frame rate를 줄이고, 이미지 전송시 영상 손실이 발생할 수 있는 문제점이 있다. 따라서, 50m 이상의 원거리에서 고속으로 영상을 손실 없이 전송할 수 있는 방수용 광케이블의 적용이 필요하며, 카메라의 감도 (sensitivity)가 높고 고해상도 (high resolution)의 이미지를 적용한다면, 오차율을 최대 40%까지 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

외해가두리 참다랑어 유영속도 및 체장

최근 전 세계적으로 외해양식시설용 가두리를 개발하기 위해 미국 해양대기청 (NOAA)과 뉴햄프셔대학교에서는 컴퓨터 시뮬레이션과 모형시험을 검증한 sea station 모델이 공동 개발되어 우리나라 제주도 표선연안에 설치되어 있으며, 현재 참다랑어의 종묘생산 목적으로 친어를 사육하고 있다. 외해가두리 내에는 육상과 가까운 내만에서 양식하기 어려운 어종이나 양식대상종의 폐사율을 저감하기 위한 목적으로 사용되어지는데, 최근 참다랑어와 같은 고가형 어류의 경우 적합한 시스템이라고 볼 수 있다. 그러

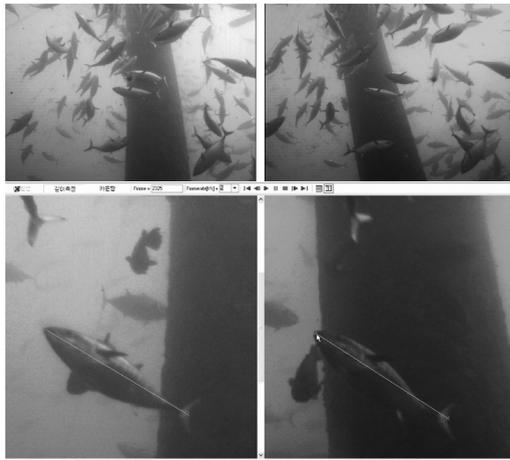


Fig. 9. Captured pictures (upper) and fish size measured pictures (down) of stereo camera system.

나, 주기적으로 먹이공급을 통한 성장도 및 건강도를 파악하기 위해서는 기존의 채집에 의한 방법으로는 정량적인 수치를 제공하기 어려우므로, 사육되는 어류의 체장에 대한 정확한 정보를 통해서 성장도 분석이 가능하다 (Fig. 9).

따라서, 본 연구에서 개발된 스테레오카메라시스템의 동기화된 2대의 카메라 영상으로 3차원 거리에 대한 정보를 명확하게 파악하여 시스템으로부터 위치하고 있는 참다랑어의 크기와 가두리내부의 유영속도를 측정된 결과는 Fig. 10과 같다. 외해가두리내 참다랑어의 가랑이체장 (Fork Length, FL)은 평균 47.8cm±2.3cm (Avg.±S.D)였다. 또한, 유영속도는 최대 387.1cm/s, 최소 63.0cm/s로서, 평균 164.1cm/s로 추정되었다. 그 결과, 외해가두리내 개체별 참다랑어의 체장 대비 유영속도는 최대 1.91 FL/s, 최소 0.27 FL/s로서, 평균 0.78 FL/s로 나타났다.

특정 대상어류에 대한 유영속도는 체장의 배수로 나타내는 것이 일반적이며, 참다랑어의 지속유영속도 (sustained swimming speed)는 0.88 - 1.64FL/s로 알려져 있다 (<http://www.fishbase.org>). 또한, 다이버가 외해가두리 내에 입수된 상태에서 측정시스템을 조정하기 위한 행동들이 참다랑어의 위협적인 요소로 판단하여 빠른 유영속도를 나타내, Fig. 10 (B)와 같이 체장별 유영속도가 쌍봉형으로 나타난 것으로 판단된다. 이러한 측정오차를 줄이기 위한 방법으로는 대

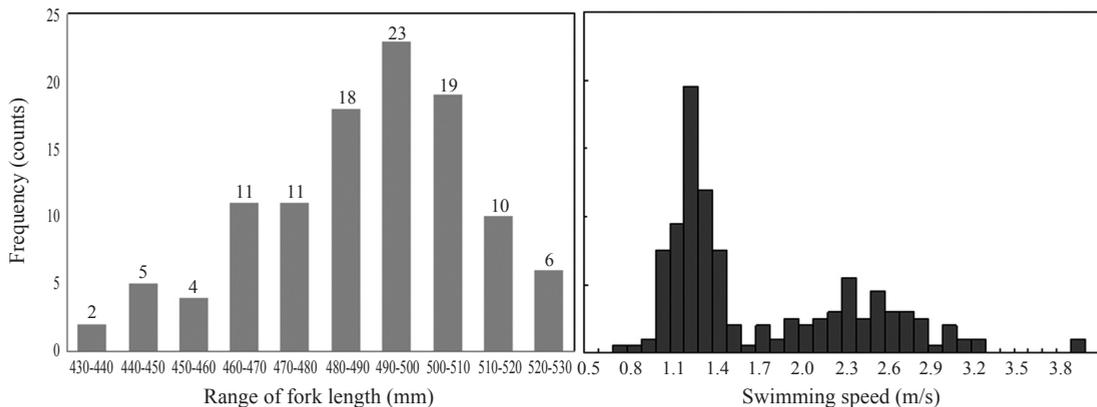


Fig. 10. Fork length of bluefin tuna in ocean spar fish cage system in jeju island.

상어류에 위협을 가하지 않고 일정시간이 지나 안정된 상태에서 측정할 필요가 있으며, 어류의 자극이 없는 야간에 초음파영상카메라와의 비교를 통한 검증이 추가적으로 필요하다고 사료된다. 그러나, 본 연구에서 개발된 스테레오비전을 이용한 비접촉식 측정시스템은 참다랑어와 같은 고가 양식어종을 대상으로 어류에게 스트레스를 주지 않는 상태에서 생물정보를 파악할 수 있는 장점이 있으며, 연안바다목장 현장조사나 어류상 다이버조사에서도 다양한 수중모니터링에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

## 결 론

본 연구에서 개발된 스테레오비전을 이용한 비접촉식 카메라시스템은 최첨단 기술의 발달로 인한 수산공학기술의 외해양식기술에 적용하기 위한 결과로서, 외해가두리 내 대상 어류의 수층별 분포특성과 성장모니터링 기술을 규명하기 위한 연구의 필요성을 제기하였으며, 이러한 연구는 향후 외해양식시설내부의 어군행동 특성을 분석하여 고급어종의 수층별 최적조건을 규명하고 어류의 유영행동 및 섭이행동 특성과 관련된 학술적인 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 외해가두리 내 대상 어류의 성장률에 저해되는 스트레스를 저감하는 동시에 양식시설의 최적설계에 관한 주요인자 규명을 통해 외해가두리양식산업의 효율성 극대화에 이바지할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 국립수산과학원 수산시험연구 (RP-2011-FE-007)의 지원에 의해 수행되었으며, 본 논문을 사려 깊게 검토하여 주신 심사위원님들과 편집위원님께 감사드립니다.

## 참고문헌

An, H.C., K.H. Lee, J.H. Bae, B.S. Bae and J.K. Shin,

2009. Estimation of the distribution density of snow crab, *Chionoecetes opilio* using a deep-sea underwater camera system attached on a towing sledge. J. Kor. Soc. Fish. Tech., 45 (3), 151 – 156.
- Costa, C., A. Loy, S. Cataudella, D. Davis and M. Scardi, 2006. Extracting fish size using dual underwater cameras. aquacultural engineering, 35, 218 – 227.
- Davis, C.S., S.M. Gallager and A.R. Solow, 1992. Microaggregations of oceanic plankton observed by towed video microscopy. Science, 257, 230 – 232.
- Doh, D.H., D.H. Kim, K.R. Cho, Y.B. Cho, T. Saga and T. Kobayashi, 2002. Development of GA based 3D-PTV technique. Journal of Visualization, 5 (3), 243 – 254.
- Harvey, E., M. Cappo, M. Shortis, S. Robson, J. Buchanan and P. Speare, 2003. The accuracy and precision of underwater measurements of length and maximum body depth of southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*) with a stereo-video camera system. Fish. Res., 63, 315 – 326.
- Holmes, J.A., G.M.W. Cronkite, H.J. Enzenhofer and T.J. Mulligan, 2006. Accuracy and precision of fish-count data from a dual-frequency identification sonar (DIDSON) imaging system. ICES Journal of Marine Science, 63, 543 – 555.
- Kim, M.Y. and Y.H. Lee, 2001. Development of high-resolution 3-D PIV Algorithm by Cross-correlation. Pro. of the KSME Fall Annual Meeting B, 410 – 416.
- Moursund, R.A., T.J. Carlson and R.D. Peters, 2003. A fisheries applications of a dual frequency identification sonar acoustic camera. ICES Journal of Marine Science, 60, 678 – 683.
- Okamoto, K., S. Nishio, T. Kobayashi and T. Saga, 1997. Standard Images for particle Image velocimetry. Proc. PIV' 97-Fukui, 229 – 236.
- Pasad, A.K. and R.J. Adrian, 1993. Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows. Exp. Fluids., 15, 49 – 60.
- Schenk, T. and C.K. Toth, 1992. Computer Vision and Digital Photo-grammetry. ITC Journal, 24 – 38.

2011년 5월 25일 접수

2011년 8월 10일 1차 수정

2011년 8월 12일 수리