

음향카메라시스템을 이용한 낙동강어도의 어류모니터링

양용수·배재현¹·이경훈^{1*}·박정수²·손병규³
 국립수산과학원 자원회복사업단, ¹국립수산과학원 시스템공학과,
²한국수자원공사, ³서해수산연구소 해역산업과

Fish Monitoring through a Fish Run on the Nakdong River using an Acoustic Camera System

Yong-Su Yang, Jae-Hyun Bae¹, Kyounghoon Lee^{1*},
 Jung-Su Park² and Byung-Kyu Sohn³
Fisheries Resources Enhancement Center, National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-705, Korea
¹*Fisheries System Engineering Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-705, Korea*
²*Korea Water Resources Corporation, Busan 604-020, Korea*
³*Aquaculture Industry Division, West Sea Fisheries Research Institute, Incheon 400-420, Korea*

This study investigated a method for monitoring fishes immigrating to upper streams from the sea in relation to water level with elapsed time, and measured fish behavior patterns and swimming speed in a fishing boat gateway using an acoustic camera system. This method was employed due to difficulties, linked to high turbidity, of using only underwater optical systems for monitoring fish migrating to brackish water. Results showed that fish length distribution showed high correlation between haul sampling and an automatic counting algorithm supported by the DIDSON software program. These results will help to maximize the effects of fish run management by increasing understanding of the amount of major fish species migrating in relation to durable water levels.

Key words: Acoustic camera, Fish monitoring, Fish road, Gateway, DIDSON

서론

해양생물의 정량적인 밀도를 추정하거나 행동특성을 파악하기 위해 다양한 방법이 적용되고 있으나, 수중 자연 상태에서의 해양생물행동에 대한 관찰은 어려운 점이 많으므로 원격 탐사 분야에서는 현재 광학기술 (optics)과 음향기술 (acoustics)을 적용하고 있다. 광학기술은 현재 다양한 시스템이 개발되어 대상생물의 위치나 행동을 관찰하기 쉽도록 사용되지만, 상대적으로 좁은 탐지범위의 한계를 가지고 있다. 이에 반해, 음향기술은 음향 빔의 체적범위 내에 생물체의 행동특성을 용이하게 파악할 수 있다는 장점이 있다.

동물플랑크톤의 광학연구의 경우, 초기에는 silhouette photography (Ortner et al., 1979)를 이용하여 관찰하였으며, Critter Cam system (Stickler et al., 1977)을 도입하여 실험실에서 작은 공간 범위에 있어서 단각류의 행동을 관찰하였다. 또한, 비디오 카메라시스템 (Price, 1989)을 도입하여 음향수조에서 식물플랑크톤 패치에 대한 난바다곤쟁이류의 행동반응을 관찰하였다. 그러나, 이러한 실험은 실험실에서 행한 것으로, 실제 현장에서의 적용은 불가능하다. 최근에는, 수많은 과학자들에 의해 현장에서 비디오 기술을 응용한 동물플랑크

톤의 연구가 진행되고 있으며, 특히, 비디오플랑크톤 기록장치를 이용하여 현장에서 동물플랑크톤의 군집 및 밀도분포에 대한 연구 (Davis et al., 1992)도 있다.

동물플랑크톤의 행동에 대한 정보는 광학기법을 이용하여 주로 실험실에서 측정하였으나, 현장에서 생물체간의 상호작용 및 자연상태에서의 행동특성 측정이 요구되는데, 수중음향시스템과 유사한 방식의 2 주파수를 이용한 수중음향카메라 (underwater acoustic camera, Dual frequency IDentification SONar ; DIDSON)가 미국 Ocean Marine Industries Inc.에서 개발되어 전 세계적으로 해양생물학 및 구조해석분야에서 크게 호응을 얻고 있으며, 이 시스템의 활용도는 높은 실정이다.

본 연구는 낙동강하구연에 하천의 흐름의 단절로 인해 회유성 유영생물의 이동을 원활히 하고자 설치된 어도와 지역주민이 운행하는 소형선박의 낙동강 상류와 하류간 통행을 위한 목적으로 설치된 관문을 대상으로, 시설물을 통해서 이동하는 회유성 어류의 시간대별 유입량을 조사하기 위해 음향카메라 (DIDSON)를 어도에 설치하여 시간대별 수위에 따른 어류의 이동패턴을 관측하였으며, 추가로 어도의 역할을 하고 있는 관문에 설치하여 시간대별 수문의 개폐에 따른 어류의 이동패턴을 관측하고 일정 시간대별 채집어구에 의한 어종조성을 확인하였다.

*Corresponding author: khlee71@nfrdi.go.kr

재료 및 방법

어도 및 관문 이용 어류모니터링

본 실험에서 사용한 음향카메라는 1.8 MHz와 1.1 MHz의 초음파를 이용하여 정밀한 초음파 영상을 최대 21프레임의 화상으로 저장할 수 있다 (Table 1). 1.8 MHz는 폭 0.3°의 빔을 수평으로 96개, 1.1 MHz는 폭 0.6°의 빔을 수평으로 48개를 방사하여 수평각도 약 29°, 수직각도 약 12°의 영역을 탐지할 수 있다. 또한, 탐지가능거리는 고해상도 (1.8 MHz)에서 최대 12 m, 저해상도 (1.1 MHz)에서 최대 40 m까지 관찰할 수 있다.

Table 1. Specification of an acoustic camera for fish road monitoring

High-frequency mode	
Operating frequency	1.8 MHz
Beamwidth (2-way)	0.3° horizontal by 12° vertical
Number of beams	96
Low-frequency mode	
Operating frequency	1.1 MHz
Beamwidth (2-way)	0.4° horizontal by 12° vertical
Number of beams	48
Both modes	
Field of view	29°
Power consumption	30 W typical
Weight in air	7.0 kg
Weight in water	-0.61 kg
Dimensions	171 mm × 307 mm × 206 mm

낙동강하구언 어도는 콘크리트 구조물로 되어 있으며, L자형 6개의 지수관 (cutoff collar)을 설치하여 유속을 안정화시키는 목적으로 사용되고 있으며, 주기적으로 어도 문을 개폐하여 어류의 이동량을 조절하고 있다 (Fig. 1). 본 실험에서는 어도 문으로부터 4번째 지수관 부근에 설치되어 있는 철재 채집망 (sampling cage)에 부착하여 해수면위에서 일정시간동안 관측을 하였으며, 채집망 (mesh size ; 20 mm × 20 mm)을 주기적으로 해저면까지 내려서 어종 조성을 확인하였다. 어도에서의 음향카메라에 의한 어류이동모니터링은 해수면으로부터 바닥까지의 탐지범위가 약 2.0 m로 얇기 때문에 고해상도모드로 관찰하면서 데이터를 저장하였다.

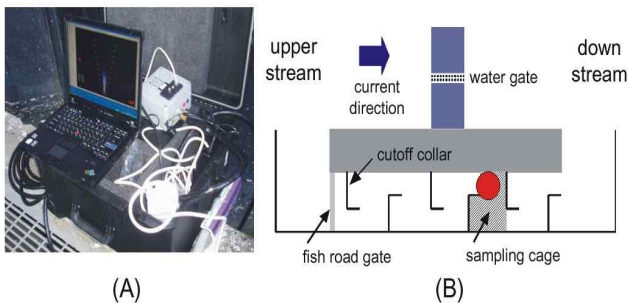


Fig. 1. Monitoring system (A) and schematic drawing (B) of fish road in the Nakdong river, and the red circle shows the station of an acoustic camera and sampling cage.



Fig. 2. Ship gateway through the Nakdong river (A) and monitoring rotator of an acoustic camera (B).

또한, 관문에서 회유하는 어류모니터링실험에서는 어류크기 및 유영행동특성을 보다 넓은 범위에 분포하는 어류를 분석하기 위하여 음향카메라 센서를 관문의 수심을 고려하여 방사 빔 각도를 약 40° 각도로 해저면을 향하도록 하고, 유영하는 어류의 수평반사에 의한 음향그림자현상 (acoustic shadow)이 생기지 않도록 조정하여 선박이 왕래하여 수문이 열릴 때 유입·유출되는 대상 어류의 시간대별 이동량을 확인하였다. 추가로, 관문의 평면적인 구조 (W 9 m × H 4 m)를 포함할 수 있는 지인망류 형태의 예인형 채집어구 (mesh size ; 2 mm × 2 mm)를 제작하여 관문내부에 유입된 어류의 채집효율을 높여 어종 조성을 파악하였으며, 채집당시의 어구에 의한 어류의 행동반응과 어류의 유영행동을 관찰하였다. 이 때, 음향카메라에 의해 수록된 영상은 제작업체에서 제공된 소프트웨어를 이용하여 음향카메라 영상을 초당 5 프레임의 정지영상으로 캡처하는 방식으로 빔 내부에서 수평이동거리 방향으로 유영하는 20 cm급 방추형 어류의 유영속도를 분석하였다.

또한, 어도내 음향모니터링에 의한 시간대별 체장조성의 신뢰성을 검증하기 위하여, 표본채집에 의한 주요어획물을 각 체장구간을 5 cm 단위로 최소 5 cm부터 최대 55 cm까지 11등급으로 나누고, 음향카메라에 의해 추정된 체장별 분포비율을 기준으로 표본채집에 의한 체장별 분포비율과 어종 조성을 분석하여 비교하였다. 여기서, 음향카메라의 체장계급별 사용 자료는 총 887개, 표본채집의 체장계급별 사용 자료는 총 282개를 사용하였다. 또한, 음향카메라를 이용하여 관문이 폐쇄된 시간대에 물의 흐름이 정지된 상태에서의 관문내에서 유영하고 있는 어류를 대상으로 체장별 유영속도를 측정 가능성을 확인하였다.

결과 및 고찰

어도 이용 어류모니터링

수위에 따른 어도 이용 어류의 이동량을 조사하기 위하여, 어도내 해수면에서 해저면까지 약 1.5 m의 수층에 대한 음향카메라의 방사 빔 각도를 일정한 상태로 유지하여 시간대별 모니터링을 실시하였으며, 음향카메라에 의해 저장된 자료는 실험실에서 자동사이즈측정모듈을 이용하여 탐지범위내 탐지된 어류의 크기에 대한 빈도분포를 나타내었다 (Fig. 3).

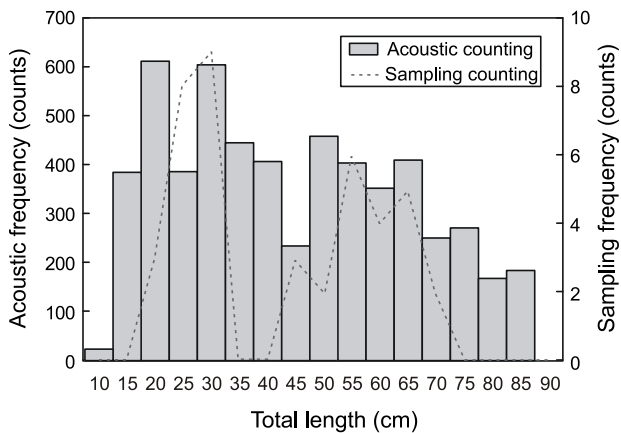


Fig. 3. Total length distributions of fish detected and caught by an acoustic camera and fish sampling cage in fish road.

또한, 어도내에 설치되어 있는 철재채집망을 이용하여 어종상을 확인한 결과, 대상어류는 송어 (*Mugil cephalus*, TL : 55.3 ± 7.2 cm)가 22마리, 농어 (*Lateolabrax japonicus*, TL : 24.7 ± 3.6 cm) 20마리가 채집되었다. 이러한 결과는 Fig. 3과 같이 시간대별 음향카메라에 의해 탐지된 개체수별 체장빈도에서도 쌍봉의 체장모드가 나타났으며, 채집 어류의 체장분산분석으로 검정한 결과 5% 유의수준에서 차이를 보이지 않았다 (ANOVA, $P < 0.05$).

한편, 음향카메라에 의한 농어류는 20~30 cm 범위의 체장분포를 약 65 %정도 차지하였으며, 송어류는 50~65 cm 범위의 체장분포를 나타내는 것으로 추정될 수 있다. 그러나, 어도내 어류가 왕래를 하지 않은 상태에서 채집망 주변에서 머무는 현상도 많이 포착되었으며, 음향카메라에 의한 체장측정값이 최대 87.3 cm로 측정된 것으로 보아, 어류의 중첩현상 혹은 분석에 사용된 자동 크기 모듈의 측정오차의 영향도 고려해야 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

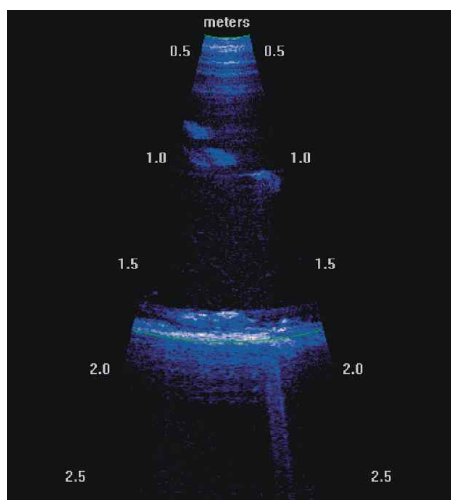


Fig. 4. Fish shoal moving toward downstream and staying near the bottom of the fish road.

Table 2. Counting and mean total length measured by DIDSON at Nakdong river in Sep. 11, 2008

Time	Fish counting	Mean total length (cm)	Water level (cm)
15:51-16:00	93	44.51	128
16:01-16:10	312	43.70	130
16:11-16:20	734	53.54	134
16:21-16:30	980	54.44	136
16:31-16:40	1,157	46.95	138
16:41-16:50	670	50.12	140
16:51-17:00	567	47.21	148
17:01-17:10	780	48.22	148
17:11-17:20	680	38.29	148

해당 어군의 시간대별 수위에 따른 측정된 대상 어류의 크기별 개체수를 10분 간격으로 측정된 결과, 수위가 높아지는 시점에 탐지되는 개체수가 증가하고 있는 것을 알 수 있으며, 특히, 16:30~16:40대에서는 최대 1,157마리까지 탐지되었다 (Table 2). 한편, 수위가 상승하고 있는 시점을 시작으로 하류쪽으로 이동하고 있는 어류가 상대적으로 많았으나, 수위가 높아짐에 따라 상·하류 교대로 각각 3,048마리와 3,154마리로 자유롭게 이동하는 것으로 나타났다 (Fig. 4).

또한, 물의 흐름에 따라 해저면에서 유영하면서 에너지를 비축하는 어류와 자유롭게 어도를 유영하면서 하류쪽으로 이동하는 어류를 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 수위가 증가함에 따라 상류에 존재하는 어류가 하류로 이동하고 수위가 일정하게 유지되면 자유롭게 이동하는 것으로 추정될 수 있으나, 분석에 사용된 자료가 짧은 시간대에 대한 것으로서 이러한 점과 수위가 높아짐에 따라 어도내 설치된 전자유속계 (ACM-16M, Alec. Co.)의 유속측정값의 오차가 커서 안정적인 자료의 획득에 어려움이 있었다. 향후 이러한 결과를 토대로 지속적인 모니터링을 수행하여 일별 수위 및 유속장에 따른 어류상의 이동패턴을 분석할 필요가 있다. 추가적으로 좁은 어도 내 이동하는 어류의 관측을 위해서는 음향카메라 방사빔의 수평적인 관측과 함께, 수직적인 관측을 수행하여 어도내 상·하류의 이동 모니터링이 필요하다고 판단된다.

관문 이용 어류모니터링

낙동강하구연에 설치된 관문은 낙동강내외 선박운항에 의해 자유롭게 수문이 개폐되므로 회유성 어류에게는 또 다른 어도의 기능을 하고 있다. 따라서, 실험 초기에는 어류의 유입이 없도록 관문을 폐쇄하여 채집어구에 의한 어류의 출현량을 모니터링한 결과, 시간에 따라 음향카메라에 의한 어류의 발견횟수가 감소하는 현상을 나타내었다. 또한, 바닷쪽과 강쪽의 관문 개폐에 따른 어류의 모니터링을 10분 간격으로 측정된 결과, 발견 개체수가 급감하는 현상은 통행선박 운항시 수문의 개폐에 따라 관문내부로 어류의 유입과 유출이 반복적으로 일어나는 현상을 음향카메라에 의해 탐지된 어류의 개체수를 통해 확인 가능하였다 (Table 3).

여기서, 일정시간대별 어종조성을 확인하기 위하여 표본채집 (3회)을 실시한 결과, 예인되는 그물끝줄에 의해 빠른 속도

로 이동하는 어류의 행동반응을 확인할 수 있었으며, 인망 후에도 어포부 뒷면의 소량의 어류 개체수와 양측 수문쪽 부근에 포획되지 않은 어류도 존재하고 있는 것으로 확인되었다 (Fig. 5).

Table 3. fish counting by an acoustic camera and gateway informations relatives to elapsed time in Aug. 21, 2007

Time	Fish counting	Gateway contents
15:41-15:50	150	- haul sampling (toward river/15:50)
15:51-16:00	112	
16:00-16:10	74	- haul sampling (toward sea/16:07)
16:11-16:20	22	
16:21-16:30	269	- gateway opening at sea (16:20-16:28) - gateway opening at river (16:29-16:33)
16:31-16:40	15	
16:41-16:50	134	- gateway opening at sea (16:40-16:45) - haul sampling (toward sea/16:50)
16:51-17:00	45	

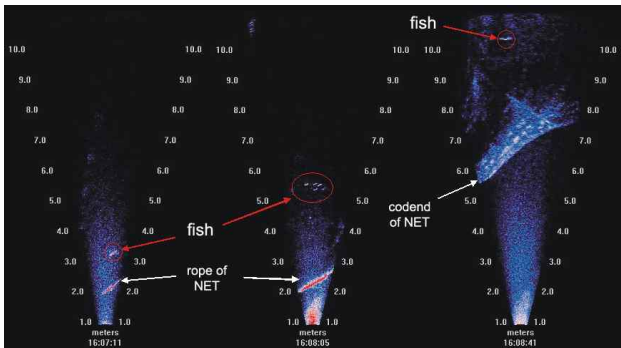


Fig. 5. Fish shoal and haul sampling recorded by an acoustic camera.

주요 어획물은 5 cm 미만의 소형어류 피라미 (*Zacco platypus*)가 17마리 (평균전장, \overline{TL} : 5.4 cm)가 어획되었으며, 음향카메라에 출현율이 높은 10 cm이하의 어류로는 참물개 (*Squalidus chankaensis tsuchigae*) 20마리 (\overline{TL} : 6.5 cm), 꼬리 (*Opsarichthys uncirostris amurensis*) 50마리 (\overline{TL} : 6.8 cm), 전어 (*Konosirus punctatus*) 21마리 (\overline{TL} : 8.2 cm), 누치 (*Hemibarbus labeo*) 53마리 (\overline{TL} : 9.6 cm)가 주로 어획되었다. 또한, 중·대형어류로는 송어 (*Mugil cephalus*) 13마리 (\overline{TL} : 35.7 cm), 강준치 (*Erythroculter erythropterus*) 8마리 (\overline{TL} : 36.1 cm)였으며, 동갈치 (*Strongylura anastomella*) 1마리 (\overline{TL} : 73.0 cm)가 어획되었다. 이외에 웅어 (*Coilia nasus*, \overline{TL} : 11.7 cm), 블루길 (*Lepomis macrochirus*, \overline{TL} : 13.9 cm), 점농어 (*Lateolabrax maculatus*, \overline{TL} : 22.8 cm)가 각각 1마리씩 어획되었다.

어도내 음향모니터링에 의한 시간대별 체장조성의 신뢰성을 확인하기 위하여, 표본채집에 의한 주요어획물의 종조성과 비교하였다 (Fig. 6). 여기서, 음향카메라에 의해 추정된 체장별 분포비율과 표본채집에 의한 체장별 분포비율을 분석한

결과, 높은 상관관계 ($R^2=0.96$)를 나타내었으며, 10 cm이하 소형어류인 누치, 꼬리 등이 약 43%의 높은 비율을 차지하였으며, 중형어류인 송어, 강준치가 약 25%의 높은 비율을 차지하였다.

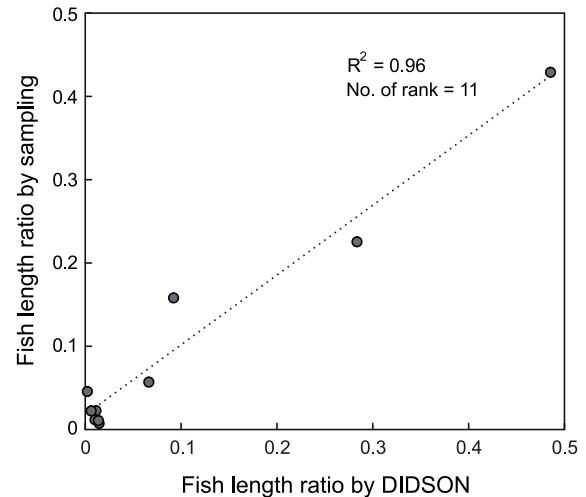


Fig. 6. Fish length ratio between an acoustic camera and haul sampling.

음향카메라 분석에 따른 방추형 어류의 유영속도 추정 어류의 유영속도는 어종, 체장, 생리상태 및 유속에 따라 많은 차이를 나타내는 것으로 알려져 있으며, 장시간 계속해서 움직일 수 있는 지속유영속도와 순간적으로 움직이는 순간 유영속도로 구분될 수 있다. 일반적으로 어류의 유영속도는 체장함수 (body length의 배수)로 나타낼 수 있는데, 방추형어 종의 경우 지속유영속도는 약 1 BL/s이며 순간유영속도는 10~15 BL/s로 알려져 있다 (Fredrik et al., 2000).

관문에서 유영하는 20 cm급 방추형 어류의 유영속도를 분석한 결과, 0.45 ± 0.05 m/s로 체장기준으로 2.25 BL/s로 나타났으며, 일반적인 방추형 어류의 지속유영속도에 비해 조금 빠른 속도로 유영하는 것으로 측정되었다.

본 연구에서 사용된 음향카메라는 시스템내부에는 음향원 도우라는 것을 이용하여 각 프레임에 대한 음향영상자료를 섹터별로 기록하고 두 주파수를 이용하여 고해상도의 초음파 영상을 지원하는 방식이다. 최근 미국 알래스카에서는 강 유역에 설치하여 연어의 개체수를 측정하고 있고, 댐 지역에서 어류의 유영특성이나 분포 파악 및 탁도가 높은 강하구역에서의 어류의 모니터링 등의 해양생태계와 결합한 어류자원의 해석측면에서 많이 활용되고 있으며, 물론 분포하고 있는 어류의 체장 측정에 활용되고 있다.

그러나 현재 개발되어 있는 수중음향카메라는 다양하게 적용되고 있는 분야도 많지만, 수중에 분포하고 있는 특정생물의 식별이 힘들다는 문제점도 가지고 있다. 또한, 빔 주사방향이 수평으로 발사될 경우 측정된 생물이나 구조물에 대한 음향탐지불가능 영역 현상이 발생될 수 있다는 단점도 있

나, 자망어구와 같은 대상어류의 어획메카니즘을 구명하거나, 광학카메라와 같이 빛에 의한 자극이 필요하지 않는 자연 상태에서 유영행동 특성을 관찰할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 댐이나 보 등이 설치되어 회유성 어류의 이동을 위해 설치된 어도가 설치된 해역은 기수역에 각종 부유물질이나 탁도가 높아 수중가시거리가 확보되지 않아, 좁은 구간에서도 수중광학카메라를 이용한 대상 어류의 모니터링이 어렵기 때문에, 음향카메라를 이용하여 낙동강 상·하류를 회유하는 주요어종의 시간대별 수위에 따른 모니터링의 가능성을 제시하였으며, 선박의 통행을 위해 설치된 관문의 개폐에 따른 어류상의 이동변화 및 주요어류의 유영속도를 측정하였다. 이러한 음향모니터링 결과는 향후 회유성 주요 어종을 중심으로 지속적인 장기간 수위변화에 따른 이동량 변동을 파악하여 어도 운영관리의 효과를 극대화시키는 방향으로 제공될 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원 수산시험연구사업 (RP-2010-FE-016)의 지원에 의해 수행되었으며, 본 논문의 완성도를 높이기 위해 사려 깊게 검토하여 주신 심사위원님들과 편집위원님께 감사드립니다.

참고문헌

Davis CS, Gallager SM and Solow AR. 1992. Microaggregations of oceanic plankton observed by towed video microscopy. *Science* 257, 230-232.

Fredrik A, Benneheij BJAM, Rudstam LG and Boisclair D. 2000. Can stationary bottom split-beam hydroacoustics be used to measure fish swimming

speed in situ. *Fish Res* 45, 31-41.

- Holmes JA, Cronkite GMW, Enzenhofer HJ and Mulligan TJ. 2006. Accuracy and precision of fish-count data from a dual-frequency identification sonar (DIDSON) imaging system. *ICES J of Mar Sci* 63, 543-555.
- Jaffe JS, Reuss E, McGehee D and Chandran G. 1995. FTV : a sonar for tracking macrozooplankton in three dimensions. *Deep Sea Res* 42, 1495-1512.
- Moursund RA, Carlson TJ and Peters RD. 2003. A fisheries applications of a dual frequency identification sonar acoustic camera. *ICES J of Mar Sci* 60, 678-683.
- Ortner PB, Cummings SR, Afring RP and Edgerton HE. 1979. Silhouette photography of oceanic zooplankton. *Nature* 277, 50-51.
- Ortner PB, Hill LC and Edgerton HE. 1981. *in situ* silhouette photography of Gulf Stream zooplankton. *Deep Sea Res* 28, 1569-1576.
- Price HJ. 1989. Swimming behaviour of krill in response to algal patches: a mesocom study. *Limnology and Oceanography* 34, 649-659.
- Strickler R. 1977. Observations of swimming performances of planktonic copepods. *Limnology and Oceanography* 22, 165-170.

2010년 7월 27일 접수

2010년 10월 3일 수정

2010년 12월 1일 수리