

理學碩士 學位論文

한국 연근해산 갈치(*Trichiurus*
lepturus)의 음향반사강도에 대한
주파수 및 체장 의존성



2007年 2月

釜慶大學校 大學院

水産物理學科

皇甫榮

理學碩士 學位論文

한국 연근해산 갈치(*Trichiurus lepturus*)의
음향반사강도에 대한 주파수 및 체장 의존성

指導教授 李 昊 在

이 論文을 理學碩士 學位論文으로 提出함



2007年 2月

釜慶大學校 大學院

水産物理學科

皇甫榮

皇甫榮의 理學碩士 學位論文을 認准함

2007年 2月 日



主 審 工學博士 辛亨鎰 ㉠

委 員 水産學博士 李遺元 ㉠

委 員 水産學博士 李吳在 ㉠

목 차

Abstract	ii
서론	1
재료 및 방법	3
1. 실험어류 및 계측시스템의 구성	3
1.1. 실험어류	3
1.2. 계측시스템의 구성	6
1.2.1. 현수법에 의한 반사강도 측정	6
1.2.2. <i>In Situ</i> 반사강도 측정	10
2. 분석 방법	12
결과 및 고찰	14
1. 평균 반사강도 패턴	14
2. 주파수별 반사강도의 체장 의존성	17
3. 자유 유영상태의 반사강도	20
4. 반사강도의 체장 및 주파수 의존성	22
결론	26
감사의 글	28
참고 문헌	29

*Frequency and Length Dependence on Target Strength of
Largehead Hairtail(Trichiurus lepturus) Caught in Korean Waters*

Young Hwangbo

Department of Fisheries Physics, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Largehead hairtail(*Trichiurus lepturus*) is one of most fisheries stocks inhabiting widely in East China Sea and Yellow Sea, which is produced by various fishing gear such as stow net, long line, jigging and trawl to 60,086 M/T in 2005.

Now, each kind of research and investigation for scientific estimation, management and protection of main fisheries biomass were conducted in all countries of the world. Also, the hydroacoustic survey has been performed annually by the NFRDI with using bottom and mid-water trawls in inshore and offshore around the Korea Peninsula. However, acoustical survey has been not performed in estimation for fish size distribution so that it is necessary to construct the data bank of their target strength(TS) relative to fish species, length(L) and frequency.

This study describes on the frequency and length dependence on TS, in which distribute in Korean waters(mainly near Jeju Island), in relation to the construction of the TS data bank.

The TS measurement of largehead hairtail was carried out in water

tank(L5m×W6m×H5m) using 4 frequencies of 50, 75, 120 and 200kHz by tethered method. The average TS patterns were measured as a function of tilt angle, ranging from -45°(head down) to +45°(head up) by every 0.2°. Furthermore, the length conversion constant(β_{20}) was estimated under the assumption that TS is proportional to the square of its length.

Also, the *in situ* TS measurement on live largehead hairtail was performed by using split beam echo sounder in the Suyeong Man, Busan.

The result of experiments at each frequency can be summarized as follows:

1. As result of TS-length dependence for 104 largehead hairtails, the length conversion constant was -66.60 at 50kHz, -69.53 at 75kHz, -67.85 at 120kHz and -69.57 at 200kHz under assumption that TS is proportional to L^2 , respectively.
2. We obtained a linear regression equation of $\sigma/\lambda^2 = 0.032042 (AL/\lambda)^{1.75101}$, in the result of the relationship between σ/λ^2 and AL/λ of 104 individuals at 50, 75, 120 and 200kHz. And then, σ is sound scattering cross section(m^2), AL is anal length(m) and λ is wavelength of frequency(m).
3. Mean TS($\langle TS \rangle$) of 118 largehead hairtails obtained by split beam echo sounder measurements at 120kHz was -45.9dB. The length conversion constant β_i derived from the relationship between $\langle TS \rangle$ and mean anal length($\langle AL \rangle$) was $\beta_i = -69.82$ dB.
4. The difference in TS between the *in situ* measurement and the prediction by tank measurement was 1.1dB.

서 론

UN해양법협약(UNCLOS) 발효 이후 한반도 주변수역에 인접한 일본, 중국은 물론 세계 연안국이 자국의 배타적 경제수역(EEZ)과 공해수역에 대한 어업생물자원의 관리를 한층 더 강화하고 있어 우리나라 어선은 국내에서 뿐만 아니라 해외 어장에 있어서도 어장축소에 따른 조업해역의 확보에 많은 어려움을 겪고 있다. 이에, 정부 당국은 우리나라 주변수역에 서식하는 어업자원의 효율적인 관리 및 유효이용을 위하여 총허용어획량(TAC) 제도를 시행하고 있다. 이러한 TAC제도의 원만하고 효율적인 시행을 위해 어업생물의 체장정보를 파악하여 일정 크기 이상의 어체만을 선택적으로 어획할 수 있도록 하기 위한 체장어군탐지기의 개발 및 보급과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다(이와 신, 2005).

현재, 우리나라 해양수산부 산하 국립수산물품질관리원(NFRDI)에서는 한반도 주변수역 및 여러 해역에 있어서 어업자원의 음향학적 조사 및 저·중층 트롤 조업에 의한 시험 조사를 매년 시행하고 있고, 또한, 전 세계적으로도 많은 어종에 대한 어류의 체장조성 평가를 위한 음향학적 연구가 활발히 진행되고 있다. 우리나라에서는 TAC 관리대상 어종을 중심으로 상업적으로 중요한 어종에 대한 TS(Target Strength) 연구가 수행되어 왔으나, 2005년 어획량이 60,086M/T으로써 우리나라의 주요 상업어종 중의 하나인 갈치에 대한 체장별 및 사용 주파수별 반사강도의 체장 의존성에 대한 정량적인 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서, 지금까지 우리나라에서 음향학

적 연구가 거의 수행된 바 없는 근해 갈치 자원에 대한 음향반사강도의 체장 의존성에 대한 데이터뱅크의 구축 및 현장 적용을 위한 연구가 절실히 요구되고 있다.

일반적으로 어류의 음향산란단면적 즉, 반사강도는 어류 체장의 2승에 근사적으로 비례하는 것으로 알려져 있다(Foote, 1980a). 어류의 반사강도를 측정하기 위한 방법으로는 제어법과 자연법이 있는데, 제어법에서는 어류를 송·수파기의 음축상에 위치시켜 측정하는 현수법(Dahl et al., 1983; Kang et al., 2003; Foote et al., 2002)과 cage에 의한 방법이 주로 이용되고, 자연법에서는 현장에서 직접 split beam 및 dual-beam echo sounder를 이용하여 측정하는 직접법이 주로 이용되고 있다(Foote et al., 1986; Gauthier et al., 2001).

따라서, 본 연구에서는 제주도 인근해역에서 채낚기에 의해 어획된 갈치를 대상으로 대형 음향 수조에서 현수법에 의해 50, 75, 120 및 200kHz의 체장별 및 주파수별에 대한 음향반사강도 및 부산 수영만에서의 120kHz split beam echo sounder를 이용하여 자유 유영상태에 있는 갈치의 음향반사강도를 측정하였다. 특히, 이들 수조실험과 현장실험의 결과를 토대로 우리나라 주변 해역에서 어획된 갈치에 대한 음향반사강도의 체장 의존성에 대하여 분석, 고찰하였다.

재료 및 방법

1. 실험어류 및 계측시스템의 구성

1.1 실험어류

갈치(*Trichiurus Lepturus*)는 TAC 관리대상 어종 중의 하나이며, 농어목 (*Perciformes*) 갈치과(*Trichiuridae*)의 어류로써 서해 및 남해, 동중국해, 발해, 일본 서부 및 큐슈 연안 등 우리나라 주변수역에 넓게 분포하는 난류성 저서 어종이다(NFRDI, 1988).

실험에 사용된 갈치의 생물학적 조성은 Table 1과 같고, 항문장(anal length)과 체중(body weight)의 관계 및 항문장의 빈도분포는 Fig. 1과 같다.

Table 1. Biological composition of the largehead hairtail, *Trichiurus lepturus* used in the target strength measurement

Frequency (kHz)	Anal length range(cm)	Weight range(g)	No. of fish
50/75/ 120/200	23.6~35.0	290.0~700.0	26
120	14.2~17.5	40.0~70.0	20

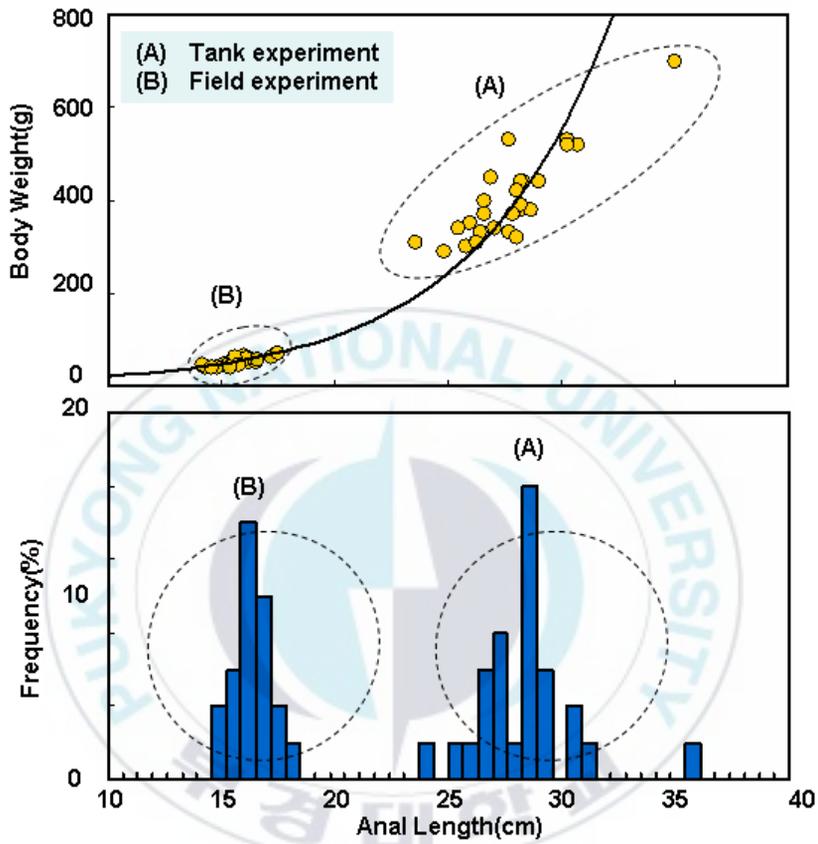


Fig. 1. Relationships between anal length and body weight, frequency distributions and anal length for largehead hairtails.

Fig. 1의 (A)는 2005년 3월, 대형 음향 수조에서 반사강도 측정에 사용한 갈치의 항문장과 체중과의 관계 및 항문장의 빈도분포를 나타낸 것으로써, 갈치의 평균 항문장 및 평균 체중은 각각 27.8cm, 403.9g이었고, 분포 범위는 23.6~35.0cm, 290.0~700.0g이었다. 실험에 사용한 갈치는 제주도 인근 해역에서 채낚기에 의해 어획된 것을 당일 빙장 상태로 운송하여 갈치 표면의 변형과 내부 조직의 손상이 없는 선어만을 선별하여 실험을 행하였다.

또한, Fig. 1의 (B)는 2005년 8월에 부산 수영만에서 자유유영 상태의 갈치에 대한 현장실험 당시, 낚시에 의해 어획된 20마리 갈치(Fig. 2)의 항문장과 체중의 관계 및 체중의 빈도분포를 나타낸 것으로써, 그 평균 항문장과 평균 체중은 각각 15.7cm, 51.6g이었고, 분포 범위는 14.2~17.5cm, 40.0~70.0g이었다.



Fig. 2. Largehead hairtails caught on the fishhook in a location of acoustic survey area.

1.2 계측시스템의 구성

1.2.1. 현수법에 의한 반사강도 측정

2005년 3월 현수법에 의한 갈치의 반사강도 측정은 대형 실험수조 (L5m×W6m×H5m)에서 50, 75, 120 및 200kHz 네 개의 주파수에 대하여 single beam echo sounder를 이용하여 시행되었다.

실험에 사용된 대형 실험수조의 계측시스템의 구성모식도는 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 수조의 상부에 차대장치를 설치하였고, 차대 상면의 1.0m×0.5m 크기의 현수창을 통하여 실험 어류 및 송·수파기를 현수시킨 후, PC를 통하여 구동되는 음향반사강도의 자동 측정 및 해석 장치를 사용하여 반사강도를 측정하였다. 수중으로 초음파 신호를 송·수신하기 위한 장치로서는 현재 어선에 널리 보급되어 있는 상용의 어군탐지기(SF-7000, Samyoung ENC)를 실험 목적에 부합하도록 송·수신부를 개조하여 사용하였다.

반사강도를 측정할 때, 체장에 비례하는 음향산란 신호가 어체의 전부위에서 생성되게 하기 위해서는 어체가 완전히 송·수파기의 sound beam 내에 수용되어야 한다. 그러나, 갈치는 긴 측편형의 형태학적 특성을 가지고 있기 때문에 어체의 sound beam 내 완전수용이 어려운 문제점이 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 실험 수조에서의 잔향, 송·수파기의 side lobe 및 수신기잡음 등의 영향을 고려하여 어체의 현수 깊이를 275cm 이상으로 설정하였으며, 이 지점에서 송·수파기의 -3dB 지향각에 대한 탐지 영역의 폭이 110cm 이상 확보되는 50kHz, 75kHz,

120kHz 및 200kHz의 네 개의 주파수에 대하여 지향각이 45°, 29°, 38° 및 24°인 압전형 송·수파기를 주문 제작하여 실험을 행하였다(이와 신, 2005).

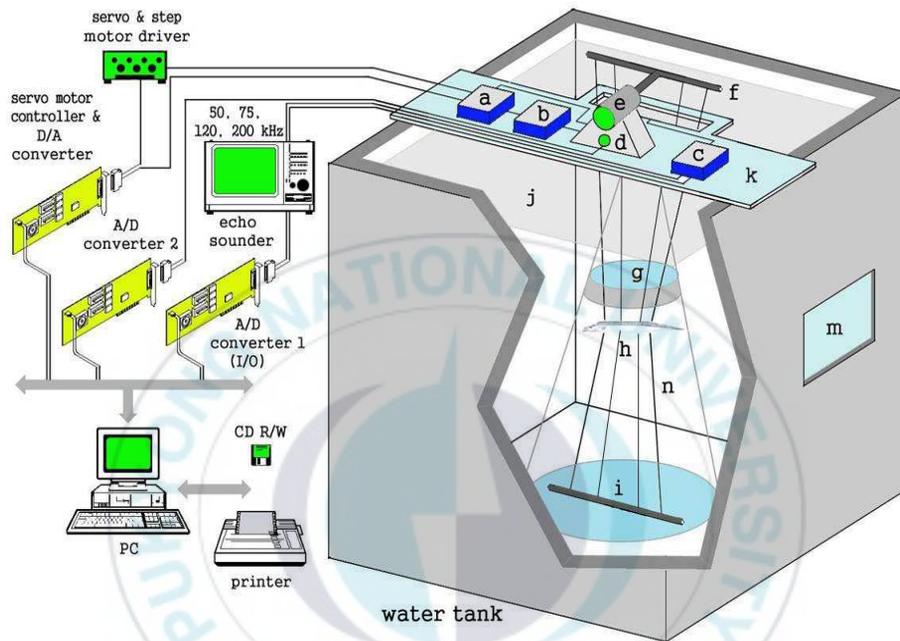


Fig. 3. Block diagram of experimental setup developed in this study.

- | | | | |
|------------------------|---------------------|---------------|------------------|
| a: motor selector | d: potentiometer | g: sound beam | j: water surface |
| b: clutch controller | e: motor | h: fish | k: moving panel |
| c: transducer selector | f: fish support bar | I: weight | m: tank window |

실험은 현수창을 통해 수면 하의 음축상에 현수시킨 갈치로부터 산란되는 초음파 신호를 수신하여 tilt angle에 따른 TS 변동 특성을 분석하였다. 이 때, 어군탐지기 송신신호 펄스폭은 0.5ms이었으며, 갈치의 echo신호를 수신부의 포락선 검파단에서 추출하여 트리거 신호와 함께 신호처리장치 (COMI-LX201, Comizoa)에 입력하였다.

또한, 실험어류를 수중에 현수시켜 제어하기 위한 어류 위치제어장치는 stepping motor 및 구동unit(UDK5114N, Oriental Motor), 감속장치(감속비 1/30), 클러치 제어장치, D/A 변환장치(COMI-SD301, Comizoa) 등으로써 구성하였다. 어류의 반사강도 측정 시스템의 제어 및 데이터 처리를 위한 소프트웨어 모듈의 화면표시 결과의 일례는 Fig. 4와 같다.

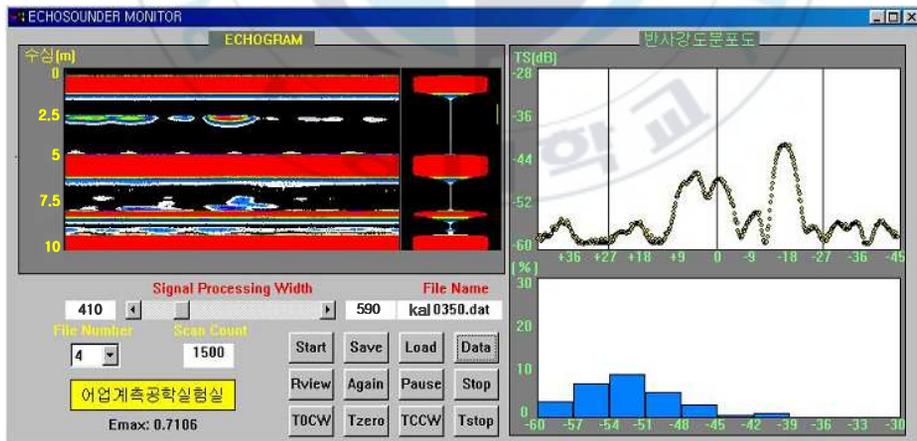


Fig. 4. Layout of the program developed for data acquisition and processing, system parameter setting and tilt control of fish.

갈치의 유영패턴은 서식해역이나 행동습성에 따라 수직이나 수평자세로 변하지만(Kawamura and Ohashi, 1988), 본 연구에서는 수평 유영자세를 가정하여 반사각도를 측정하였다. 따라서 갈치의 자세각을 0.2° 간격으로 -45° (head down)에서 $+45^\circ$ (head up)까지의 각도로 변화시키면서 반복적으로 음향 데이터를 측정하였고, 자세각의 변화에 따른 echo신호의 변동을 정량적으로 측정한 후, 이들 데이터를 Fig. 4와 같이 도식화하였다. 이 때, 자세각의 변화에 따른 echo level의 변동과 반사각도의 빈도분포에 전기적인 잡음 등 기타의 실험상의 문제가 발생할 시에는 이들 실험 데이터를 폐기하고, 다시 실험을 실행할 수 있도록 하였다. 이와 같은 과정을 통하여 실험 데이터의 신뢰성이 인정되면 소프트웨어 모듈의 데이터 수록 명령을 실행하여 하드 디스크에 저장, 데이터의 수 및 자세각별 echo진압 등을 수록하였고, 이들 데이터에 대해서는 후일 실험실에서 정량적인 분석을 행하였다(Foote, 1980b).

또한, 자세각을 변환시킬 때 실험어의 흔들림을 방지하기 위해 0.5mm nylon monofilament로써, 실험어의 머리부 부터 꼬리부 까지 4곳을 고정하여 현수하였고, 실험 전·후에는 황동구(copper sphere)를 사용하여 교정을 실시하였다.

1.2.2. *In Situ* 반사강도 측정

자유 유영상태의 갈치활어에 대한 현장 측정을 위해 부산 수영만에서 2005년 8월, 120kHz split beam echo sounder(EY 500, Simrad)를 이용하여 실험을 행하였다. 실험에 사용한 120kHz split beam 송·수파기의 -3dB에 대한 지향각은 7°이며, 시스템의 교정은 직경이 23.0mm인 표준구(銅球, $TS = -40.4\text{dB}$)를 사용하여 행하였다.

본 실험은 Fig. 5에서와 같이 120kHz의 송·수파기를 예항체(Foil-100, Simrad)의 하부에 장착하고, 삼각형상의 균형추 3개를 예항체 상부의 전부에 고정시킨 후, 조사선의 우현 현측에서 예항체를 수심 약 5m의 깊이에 현수시켰다. 이 때, 조사선에 의한 진동 및 전원 잡음을 제거하기 위하여 조사선과 분리된 자체 전원을 이용하였고, 조사선의 속력을 4knot로 일정하게 유지하면서 예항체에 장착된 송·수파기로부터 수신되는 어군 에코신호를 실시간으로 수록하였다. 특히, 본 연구에서는 음향학적 조사 결과와 실제의 어획 결과를 상호 연관시켜 정량적으로 분석하기 위하여 Fig. 6에 나타낸 정점 A(35° 7' 55" N, 129° 26' 55" E), 정점 B(35° 7' 16" N, 129° 7' 54" E), 정점 C(35° 5' 31" N, 129° 6' 51" E)에서 조사선의 엔진을 정지시킨 후, 표류하면서 echogram에 나타나는 갈치의 영상을 실시간으로 수록하였다.

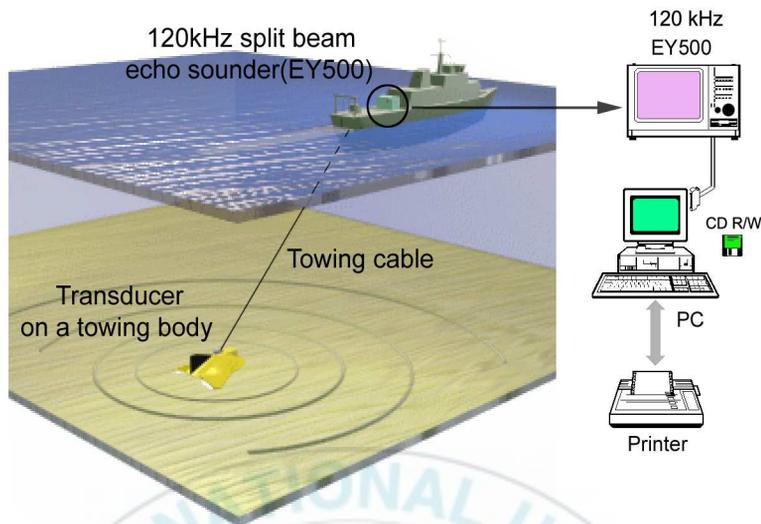


Fig. 5. Block diagram of split beam echo sounder system used in the field experiment.

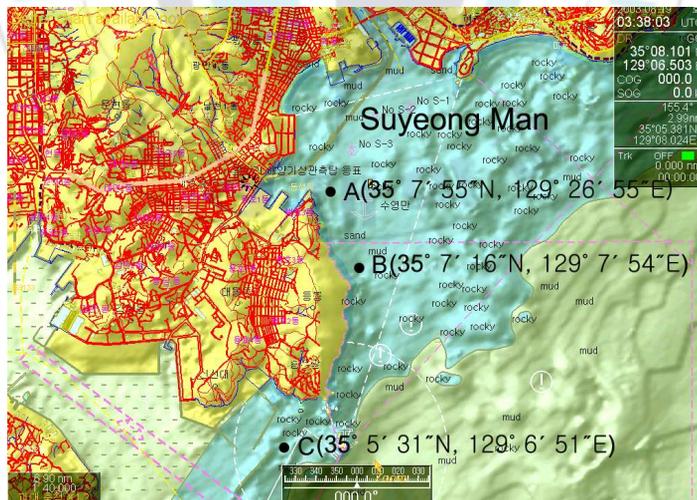


Fig. 6. Acoustic survey locations of largehead hairtail by split beam echo sounder.

2. 분석 방법

대형 수조실험에서 single beam echo sounder에 의한 갈치의 반사강도 TS_f (dB)는 각각의 주파수에 해당하는 교정구(copper sphere)에 의한 간접방법을 이용하여 다음 식에 의하여 구하였다.

$$TS_f = 20 \log \frac{V_f}{V_{ref}} + TS_{ref}$$

여기서, TS_{ref} 는 교정구의 반사강도이며, V_f , V_{ref} 는 각각 실험 어류 및 교정구에 대한 echo신호의 전압(V)이다. 본 실험에서 사용한 50, 75, 120 및 200kHz의 4개의 주파수에 대한 교정구의 직경은 각각 45mm(-36.2dB), 32.1mm(-39.1dB), 23.0mm(-40.4dB) 및 13.7mm(-45.0dB)이었다.

갈치의 평균 반사강도는 어류의 유명 자세각에 대한 확률밀도함수를 정규분포로 가정하여 추정하였다(Foote, 1980a).

송·수파기의 음축상에 어체를 현수시켜 반사강도를 측정할 때, 어체의 자세각(pitch angle) 즉, θ 방향에서의 후방산란단면적을 $\sigma(\theta)$ 라 하면, 그 평균 후방산란단면적 $\langle \sigma \rangle$ 과 개체에 대한 평균 반사강도 $\langle TS \rangle$ 는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$\langle \sigma \rangle = \int_{-\pi/4}^{\pi/4} \sigma(\theta) \mathcal{A}(\theta) d\theta,$$

$$\langle TS \rangle = 10 \log \left(\frac{\langle \sigma \rangle}{4\pi} \right)$$

여기서, $f(\theta)$ 는 어체의 pitch angle θ 에 대한 확률밀도함수이다.

일반적으로 어류의 자세각의 변화에 따른 반사강도는 어체의 연령, 체장, 체고, 체폭, 비만도 등에 따라 매우 불규칙하게 변동하는 특성이 있으므로 어류의 유형 자세각의 변화에 따른 반사강도의 패턴 변화를 예측하는 것은 매우 어렵다(이, 1999; 이, 2005).

따라서, 본 연구에서는 single beam 및 split beam echo sounder의 모든 경우의 실험에 대하여 갈치의 반사강도가 항문장(AL , cm)의 2승에 비례한다는 가정 하에서 다음과 같은 회귀직선 식으로부터 체장변환계수 b_{20} 을 산출하였다.

$$\langle TS \rangle = 20 \log(AL) + b_{20}$$

또한, 부레를 갖는 어류의 경우, 부레(swimbladder)에서 산란되는 에너지는 전 어체로부터 산란되는 에너지의 90~95%를 점유하고, 부레의 크기와 형태 또한 어류의 반사강도 값에 큰 영향을 미친다고 보고되었다(Foote, 1980b). 따라서, 본 실험에서는 실험어의 반사강도와 부레와의 관계를 규명하기 위해 항문장이 28.3cm인 갈치를 대상으로 X-ray촬영을 행하여 부레의 경사각과 평균 반사강도 변동 패턴의 관계를 비교하였다(Fig. 8). 갈치의 자세각에 따른 음향반사강도의 평균적인 변동 패턴을 정량적으로 고찰하기 위하여 모든 실험어의 반사강도 측정치를 자세각에 대하여 평균함으로써 주파수별로 평균적인 반사강도의 변동 패턴을 분석, 고찰하였다.

결과 및 고찰

1. 평균 반사강도 패턴

대형 실험 수조에서 26마리의 갈치를 각각 수중에 현수시켜 tilt angle $\pm 45^\circ$ 범위에 대하여 0.2° 간격으로 변화시키면서 50, 75, 120 및 200kHz 주파수에 대한 반사강도를 측정 한 후, 평균 반사강도 패턴을 나타낸 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 갈치의 평균 항문장 $\langle AL \rangle$ 은 27.8cm이며, 평균 반사강도 패턴에 있어 최대 반사강도는 전 주파수에서 tilt angle이 $-10^\circ \sim 0^\circ$ 의 범위 내에서 출현하였으며, 이를 정량적으로 분석하기 위해 어체의 X-ray 촬영을 행한 결과는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서 갈치의 부레는 중앙부의 흑색부분으로써, 머리와 꼬리의 길이 방향에 대한 부레의 경사각은 -9.5° 이었고, 갈치의 두부가 하방으로 향하는 -9.5° (head down)상태에 있을 때, Fig. 7과 같이 부레의 반사강도가 가장 강하게 측정되었다.

이들의 평균 반사강도 패턴과 X-Ray촬영 결과를 상호 연관시켜 볼 때, Fig. 7의 평균 반사강도 패턴에서 peak TS값이 -9° 전후의 tilt각에서 나타나는 것은 부레의 경사각에 기인하는 것으로 판단된다(Mukai et al., 1993).

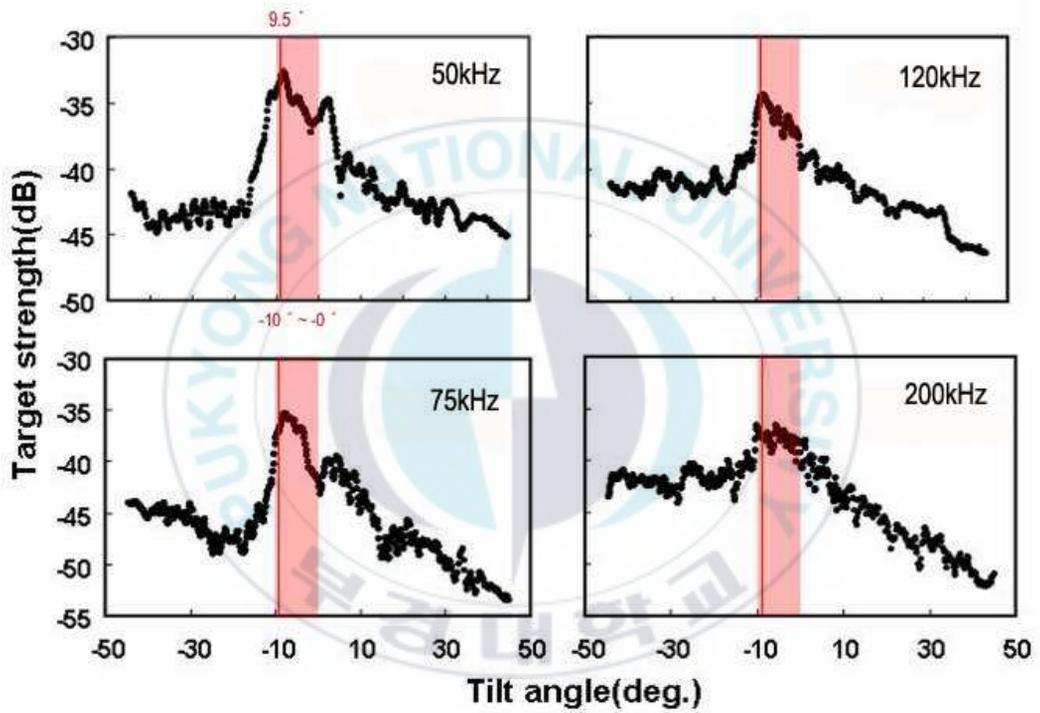


Fig. 7. Average target strength patterns for largehead hairtail at four frequencies of 50, 75, 120 and 200kHz.

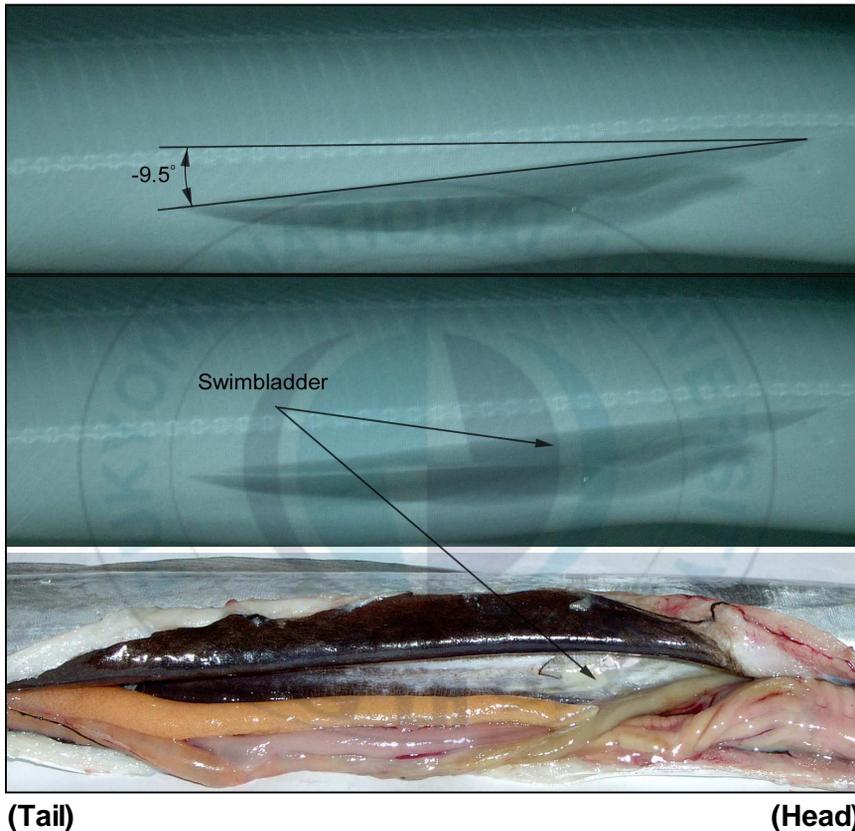


Fig. 8. X-ray photographs for swimbladder of largehead hairtail.

2. 주파수별 반사강도의 체장 의존성

실험 수조에서 갈치에 대한 반사강도의 체장 의존성을 분석한 결과는 Fig. 9 및 Fig. 10과 같다.

Fig. 9는 50, 75, 120 및 200kHz에서 각각 26마리의 갈치에 대하여 측정된 총 12,348개, 12,378개, 12,482개 및 12,430개의 반사강도 데이터에 대한 빈도분포도이다. 이들 데이터를 토대로 산출한 네 개 주파수에 대한 평균 반사강도는 각각 -39.78, -43.32, -40.36 및 -42.26dB이었고, 반사강도가 체장의 2승에 비례한다는 가정 하에서의 평균 반사강도 $\langle TS \rangle$ 와 평균 항문장 $\langle AZ \rangle$ 을 이용하여 갈치의 항문장 1cm에 대한 음향반사강도, 즉, 체장변환계수 b_t 을 산출한 결과, 50, 75, 120 및 200kHz에 대한 각각의 체장변환계수는 -68.65, -72.18, -69.23 및 -71.13dB이었다.

한편, 총 26마리 갈치를 대상으로 측정된 각각의 어체에 대한 반사강도 패턴에 유명 자세각, 즉, tilt angle의 평균과 표준편차가 각각 $[-5^\circ, 15^\circ]$ 인 정규분포를 가정하여 이들에 대한 평균 반사강도를 추정하였는데(Mukai et al., 1993), 반사강도와 항문장과의 관계를 나타낸 결과는 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 ○은 반사강도의 측정치이고, 실선은 반사강도가 항문장의 2승에 비례한다는 가정 하에서의 회귀직선이다. 여기서 산출된 각각의 주파수에 대한 체장변환계수 b_{20} 은 -66.60, -69.53, -67.85 및 -69.57이었다.

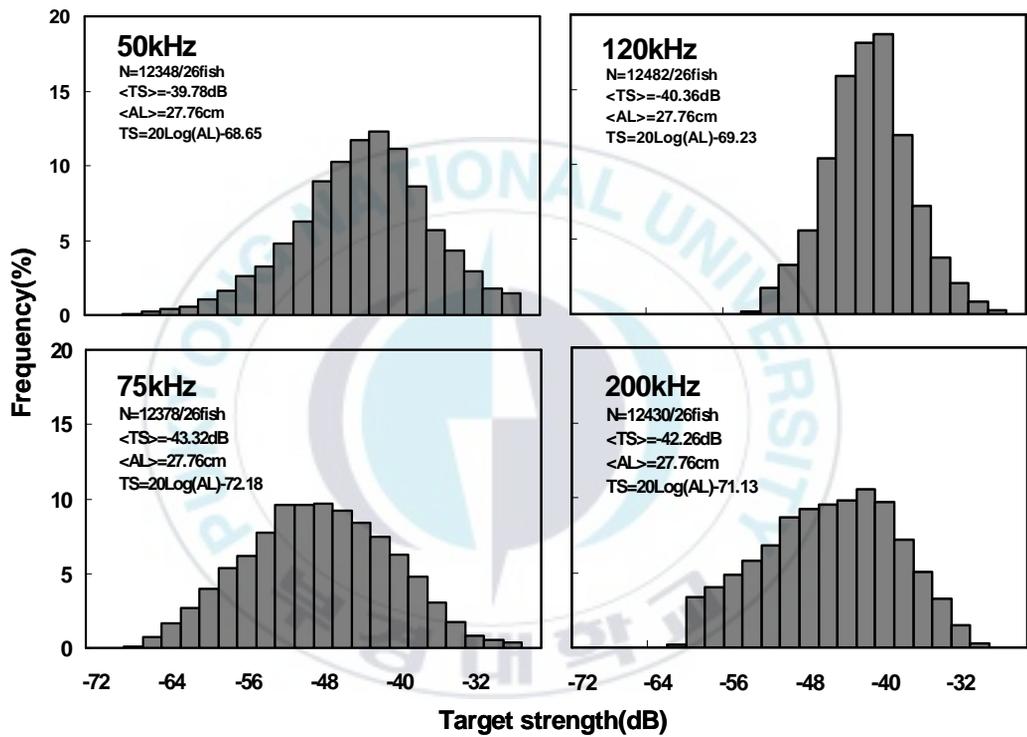


Fig. 9. TS frequency distributions for largehead hairtail at 50, 75, 120 and 200kHz.

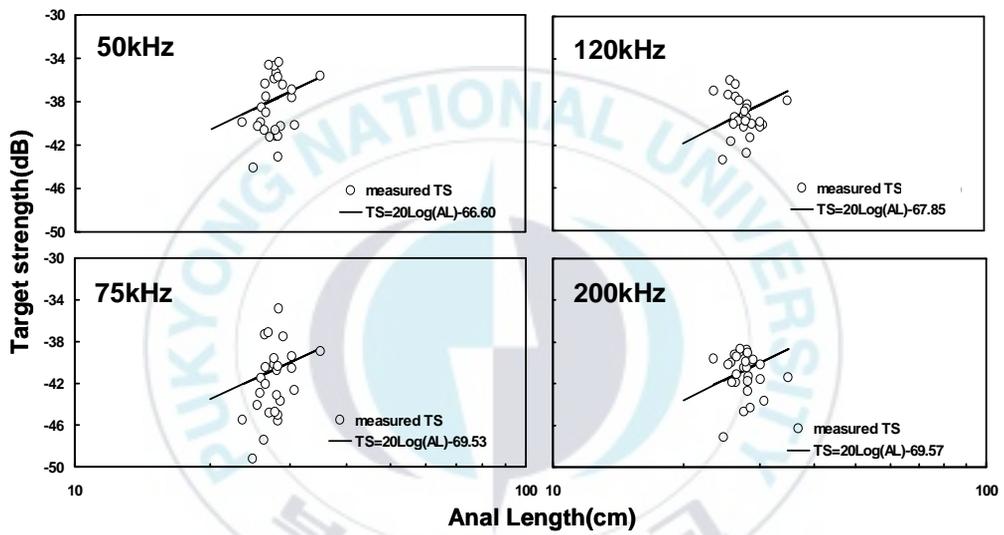


Fig. 10. Fish length dependence on TS of largehead hairtail at frequencies of 50, 75, 120 and 200kHz.

3. 자유 유영상태의 반사강도

2005년 8월 부산 수영만에서 자유 유영상태의 갈치에 대한 echogram을 수록하고, 후일 split beam echo sounder의 TS해석 소프트웨어(EP500, Simrad)를 이용하여 갈치의 순간적인 반사강도를 산출하였다. 그 반사강도의 빈도분포로부터 평균 반사강도를 구하여 갈치 반사강도의 체장 의존성을 분석하였다.

실험당시의 표류 중에 수록한 echogram의 일례는 Fig. 11과 같고, Fig. 11의 echogram에서 추출된 118마리의 갈치 개체에 대한 반사강도의 빈도분포로부터 평균 반사강도를 산출한 후, 이 평균 반사강도가 평균 항문장의 2승에 비례한다는 가정 하에서의 체장변환계수를 구하였는데, 그 결과는 Fig. 12와 같다.

Fig. 12에서 총 118마리의 갈치에 대한 반사강도의 평균값은 -45.9dB 이었고, 이들 데이터에 의한 반사강도의 체장 의존성은 $TS = 20\log(AL) - 69.82$ 로서 산출되었는데, 여기서, 체장변환계수 b_t 는 -69.82dB 이었다. 이 값은 120kHz 선어 실험에서의 체장변환계수(-69.23dB)와 비교하여 볼 때, 0.59dB 의 차이를 나타내었다.

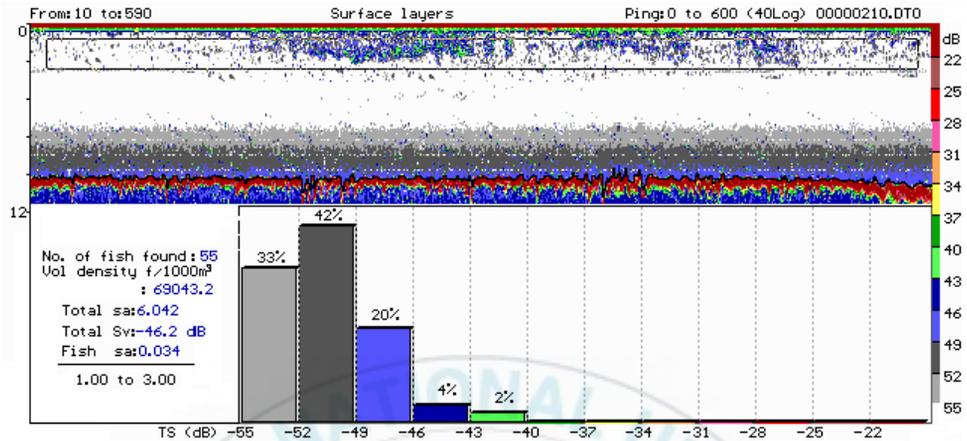


Fig. 11. An echogram of the largehead hairtail by split beam echo sounder.

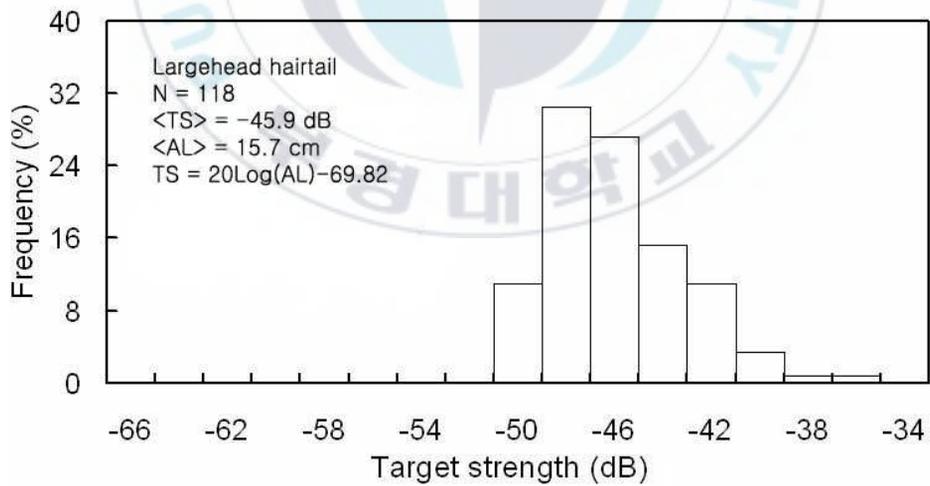


Fig. 12. TS frequency distribution for largehead hairtail at 120kHz.

4. 반사강도의 체장 및 주파수 의존성

본 연구에서는 갈치의 항문장(AL)과 파장(λ)의 비(AL/λ)와 음향산란 단면적(σ)과 파장의 2승(λ^2)의 비(σ/λ^2)에 대한 실험적인 관계를 유도함으로써, 갈치 반사강도의 주파수 및 체장 의존성을 서로 결합시켜 파악하고자 하였다(Love, 1971).

50, 75, 120 및 200kHz의 네 개의 주파수에 대하여 각각 26마리, 즉 총 104 마리를 대상으로 반사강도의 체장 의존성을 종합적으로 분석, 고찰하였는데, 이들에 대한 항문장과 파장의 비와 음향산란단면적과 파장의 2승의 비의 선형성에 대한 회귀분석의 결과는 Fig. 13과 같다.

Fig. 13에서 항문장과 주파수와의 사이에는 다음의 회귀식이 성립하였다.

$$\sigma/\lambda^2 = 0.032042 (AL/\lambda)^{1.75101}, (r^2=0.67)$$

이 식의 양변에 대수의 10배를 취하여 정리하면 다음과 같다.

$$TS = 17.51 \log(AL) + 2.49 \log(\lambda) - 12.4842$$

이 계산식은 갈치에 대한 항문장 및 주파수(λ) 의존성을 동시에 나타내는 실험식이므로써, 이 식을 사용하여 우리나라 주변수역에 분포하는 임의 항문장의 갈치에 대한 반사강도를 추정할 수 있다.

Fig. 13에서 ●은 부산 수영만에서의 갈치활어에 대한 반사강도 측정치이고, ○은 음향수조에서의 갈치 선어를 대상으로 실험한 반사강도의 측정치이다. 이 두 실험 결과를 중첩시켜 나타낸 결과, 현장에서의 반사강도

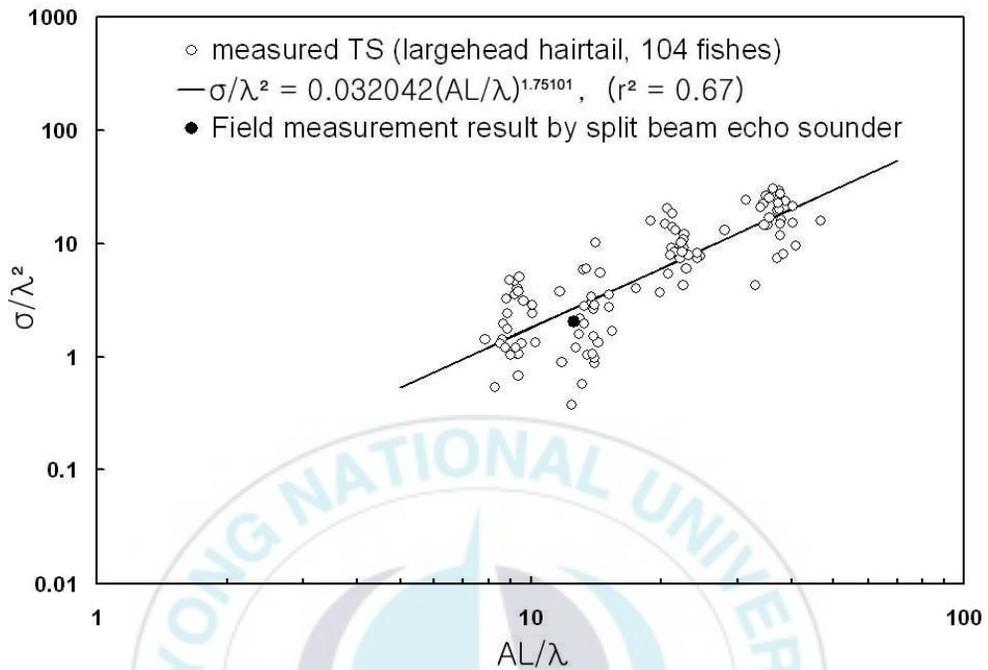


Fig. 13. Length dependence of target strength for largehead hairtail derived from laboratory experiment by single beam system(○) and field experiment by split beam system(●), respectively. The backscattering cross section(σ) is normalized to the square of wavelength (λ) and plotted against the anal length(AL) to wavelength ratio.

측정치는 실험 수조에서 현수법에 의해 측정된 반사강도의 회귀직선으로부터 유도된 예측치와 큰 차이를 나타내지 않았다. 현수법에 의해 네 개의 주파수에서 도출된 체장변환계수 b_{20} 과 b_r 및 120kHz에서 자유유영 하는 갈치활어에 대한 체장변환계수 b_i 을 상호 비교한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Values of length conversion constants derived from the relationship between mean target strength and fish length of largehead hairtail at 50, 75, 120 and 200kHz by tank and field experiments

length conversion constant(dB)	Frequency(kHz)			
	50	75	120	200
tank b_{20}	-66.60	-69.53	-67.85	-69.57
tank b_t	-68.65	-72.18	-69.23	-71.13
field b_t	-	-	-69.82	-

Table 2에서 체장변환계수의 값은 갈치에 대해 이미 보고된 값, 즉, $-68.3 \pm 0.2\text{dB}$ (Zhao, 2006) 및 66.1dB (Ona, 1987)과 비교하여 $1.5 \sim 3.7\text{dB}$ 더 작았다.

본 연구에서 실험적으로 유도된 갈치의 주파수별 반사강도의 체장 의존성에 관한 정보는 현재 우리나라에서 개발 중에 있는 저가용 체장어군탐지기의 고도화에 관한 연구에 실용적으로 활용될 수 있을 것으로 판단되나, 실제 해상에서 갈치의 유영행동 패턴의 변화에 따른 자세각의 변동 및 다른 어종의 혼재 등과 같은 문제가 존재하므로 이에 대한 보다 정량적인 분석이 요구된다. 즉, 혼합 어종이 산재하여 있는 우리나라 연근해 어장의 특성을 고려하여 단일 어종의 TS 연구뿐만 아니라, 혼합 어종에 대한 반사강도 및 반사강도에 영향을 주는 요소에 대한 다양한 연구가 필요하다고 판단된다.

또한, 어류의 체장추정에 관한 신뢰도를 더욱 향상시키기 위해서는 향후 반복적인 실험과 활어를 대상으로 한 현장 실험이 지속적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다.



결 론

본 연구는 연근해에서 채낚기어에 의해 어획된 갈치를 대상으로 하여 대형 콘크리트 음향 수조에서 현수법에 의한 50, 75, 120 및 200kHz(single beam system)의 주파수에 대한 체장별 음향반사강도와 현장에서의 120kHz(split beam system)에 대한 체장별 음향반사강도를 측정하여, 이들 정보를 토대로 우리나라 주변해역에서 서식하는 갈치에 대한 음향반사강도의 체장 의존성을 분석, 고찰하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 네 개의 주파수에 대한 총 104 마리 갈치를 대상으로 음향반사강도의 체장 의존성을 검토한 결과, 50, 75, 120 및 200kHz의 주파수에서 체장의 2승에 근사시킨 체장변환계수는 각각 -66.60, -69.53, -67.85 및 -69.57dB이었다.

2. 50, 75, 120 및 200kHz에 대하여 총 104 마리의 개체를 대상으로 σ/λ^2 과 AL/λ 의 관계를 추정한 결과, $\sigma/\lambda^2 = 0.032042 (AL/\lambda)^{1.75101}$, ($r^2 = 0.67$)의 회귀직선 식을 얻었다. 여기서, σ 는 어류의 음향산란단면적(m^2), λ 는 사용 주파수의 파장(m), AL 는 어류의 항문장(m)이다.

3. 120kHz의 split beam echo sounder를 이용하여 부산 수영만에서 음향학적으로 샘플링 된 총 118마리의 갈치에 대한 평균 반사강도는 -45.9dB이었고,

당해 해역에서 낚시에 의해 어획된 갈치의 평균 항문장 15.7cm과의 관계로부터 체장변환계수 b_f 을 추정된 결과, $b_f = -69.82\text{dB}$ 이었다.

4. 자유유영 상태에 대한 갈치의 반사강도 측정치를 실험수조에서 갈치의 선어를 대상으로 측정된 반사강도의 측정치와 중첩시켜 나타낸 결과, 자유유영 갈치($\langle AL \rangle = 15.7\text{cm}$)에 대한 반사강도 측정치(-45.9dB)는 선어를 대상으로 유도된 회귀직선에 의한 예측치(-44.8dB)와 1.1dB의 차이를 나타내었다.



감사의 글

학부시절부터 본 논문이 완성되기까지 열과 성을 다하여 많은 가르침을 주신 이대재 교수님께 진심어린 감사와 존경의 마음을 드립니다. 바쁘신 중에도 심사를 맡아 많은 조언과 도움을 아끼지 않으신 신형일 교수님과 이유원 박사님께 깊은 감사를 드립니다. 항상 많은 관심과 격려를 보내 주신 강일권 교수님, 김형석 교수님 및 수산물리학과 교수님들께도 깊은 감사를 드립니다.

항상 끊임없는 관심으로 도움과 조언을 주신 이경훈 선배님, 정봉규 선배님, 배문기 선배님, 이원섭 선배님과 수산물리학과 선배님, 후배님, 그리고 바쁜 조교 생활동안 많은 업무를 대신 맡아서 해 주신 김지원 동기님께도 감사드립니다.

그리고 늘상 응원과 격려를 보내주신 어업계측 및 전자해도 실험실 식구들과 언제나 힘이 되어준 친구들, 동기들께도 감사드립니다.

끝으로, 항상 믿음으로 대해 주시고 끊임없는 사랑으로 셋째 딸을 지켜봐 주신 존경하는 부모님과 사랑하는 형제자매님께 작지만 이 영광을 돌립니다.

참고 문헌

- 강희영, 이대재, 2003. 부세에 대한 음향반사강도의 체장 의존성. 한국어업 기술학회지, 39(3), 239-248.
- 이대재, 1999. 어업계측공학 이론과 실제, 태화출판사, 180-207.
- 이대재, 2005. 한국 연근해에서 어획된 주요 12 어종의 75 kHz에 대한 음향 반사강도의 체장 의존성. 한국어업기술학회지, 41(4), 296-305.
- 이대재, 신형일, 2005. 어류 체장의 자동식별을 위한 어종별, 체장별 및 주파수별 음향 반사강도의 데이터 뱅크 구축. 한국수산학회지, 38(4), 265-275.
- Dahl, P.H. and O.A. Mathisen, 1983. Measurement of fish target strength and associated directivity at high frequencies. J. Acoust. Soc. Am., 73(4), 1205-1211.
- Foote, K.G., 1980a. Averaging of fish target strength functions. J. Acoust. Soc. Am., 67(2), 504-515.
- Foote, K.G., 1980b. Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish: A comparison of gadoid and mackerel target strengths. The Journal of the Acoustical Society of America, 67, 2084-2089.
- Foote, K.G., A. Aglen and O. Nakken, 1986. Measurement of fish target strength with split - beam echo sounder. J. Acoust. Soc. Am., 80(2), 612-621.
- Foote, K.G. and D.I. Francis, 2002. Comparing Kirchhoff-approximation

- and boundary-element models for computing gadoid target strengths. *J. Acoust. Soc. Am.*, 111, 1644-1654.
- Kawamura, G. and S. Ohashi, 1988. The habit of cutlassfish as inferred from the retina. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 15, 889.
- Gauthier, S. and G.A. Rose, 2001. Target strength of encaged Atlantic redfish (*Sebastes spp.*). *ICES J. Mar. Sci.*, 562-568.
- Love, R.H., 1971. Measurements of fish target strength: a review. *Fish. Bull.*, 69(4), 703-715.
- Mukai, T., N. Sano, K. Iida and S. Sakai, 1993. Relation between dorsal aspect target strength of fish caught in the East China Sea and their swimbladder. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 60, 215-222.
- Mukai, T., N. Sano, K. Iida and S. Sakai, 1993. Studies on dorsal aspect target strength of ten species of fish collected in the East China Sea. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 59, 1515-1525.
- NFRDI, 1988. Assessment of fisheries resources in Korean waters. pp. 254.
- Ona, E., 1987. Adjustment of the average target strength of hirtail (*Trichirus haumela*). Internal note, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Qingdao. pp. 6.
- Zhao, X., 2006. *In situ* target-strength measurement of young hairtail (*Trichiurus haumela*) in the Yellow sea. *ICES Journal of Marine Science*, 63, 46-51.