

## 活魚의 後方散亂 斷面的 測定

朴海勳\* · 張志元\*

## Measurement of Backscattering Cross Sections of Live Fish

Hae-Hoon PARK\* and Jee-Won CHANG\*

The backscattering cross sections of live fish and the probability density function of fish echoes were measured at side aspect. The measurements were made at 40 and 170 in KHz. The specimen fishes on the experiments were two catfish-total length of 16.8cm( $L/\lambda$  is about 4.5, where the  $L$  is length, the  $\lambda$  is the sound wavelength) and 23cm( $L/\lambda$ ,  $\sim 6.1$ ), a carp(*Cyprinus carpio*) of 17.5cm( $L/\lambda$ ,  $\sim 4.7$ ), a *Telapia*(*Tilapia mossambica*) of 19.5cm( $L/\lambda$ ,  $\sim 5.2$ ) and several fishes. These lengths ranged from 10.7 to 24.0cm. The results of the measured maximum backscattering cross sections were  $5.62 \times 10^{-5}$  to  $7.23 \times 10^{-4} m^2$ .

Huang and clay reported that, when the fish was moving gently, the probability density function of the fish echoes was approximately the same with the Rayleigh probability density function. Thereafter Ehrenberg et al. also reported that the Rayleigh probability density function on fish was performed at the critical acoustic length ratio or more in theoretical base.

Recently Dahl and Mathisen tested the Rayleigh probability density function on fish when the fish-length-to-wavelength ratios were greater than 100. In this paper the experimental result was also not accorded with the Rayleigh probability density function when the fish-length-to-wavelength ratios were lower than the critical ratio.

## 기호 설명

## 서론

$A_0$  : 기준 면적( $m^2$ )  
 $f_0$  : 공진 주파수(Hz)  
 $l_s$  : 산란길이(평방평균 산란길이)( $m$ )  
 $P_0$  : 압력( $N/m^2$ )  
 $R$  : 부레의 모델로서의 기포반경( $m$ )  
 $TS$  : 물체의 표적강도(dB)  
 $W_R$  : Rayleigh 확률밀도함수  
 $\rho$  : 액체 밀도( $kg/m^3$ )  
 $\gamma$  : 비열  
 $\sigma_{bs}$  : 어체의 후방산란 단면적( $m^2$ )  
 $L_0$  : 기준 길이( $m$ )  
 $W_{TS}$  : Target Strength 확률밀도함수

수중에서 음파는 광파·전자파보다 감쇠가 적어서 어군탐지기, 음향측심기, sonar 등에 이용되고 있으며 최근에는 어군량의 추정<sup>1)2)</sup>, 수중통신, 해저탐사 및 지진측정, 수중영상 시스템 등에도 많이 이용되고 있다.

특히, 어군탐지기는 어군의 분포형태, 어군 뒷 DSL의 수직이동 범위와 이에 따른 투양망시간, 장역 물의 판별, 어군의 이동속도 및 회유경로 등을 알 수 있어 현재까지도 유용하게 사용되고 있으나 작열의 효과를 더욱 높이기 위해서는 어종을 식별하는 방법과 정확한 어군량을 추정하는 것이 필요하다.

일반적으로 어군량은 단위체적당 마리수 즉, 어군

\*釜山水産大學: Fisheries National University of Pusan

밀도(fish density)로 나타낼 수 있으며, 이것은 어체의 후방산란단면적과 체적 잔향으로 구할 수 있다.

이러한 어체의 후방산란단면적과 어군량에 대해선 Love<sup>3),4),5)</sup>, Huang and Clay<sup>6)</sup> 등이 연구한 바가 있으나 마취된 고기나 죽은 고기에 대한 자료가 대부분이고 활어에 대한 것은 적다.

본 논문은 활어를 대상으로 하여 어체가 움직일 때의 어체로부터의 반사파를 측정하여 어체의 후방산란단면적을 구하였고, 그 확률분포와 Rayleigh 분포와의 적합도를  $\chi^2$  검정법으로 검정하였다.

### 표적강도와 유효산란길이

수중에서 물체를 측정할 때 사용하는 음파의 전파 이론으로는 wave theory와 ray theory가 있다. Wave theory에 의하면, 송파기에서 발생된 음압  $P$  는 거리와 수신과 시간의 함수로써 나타낼 수 있으며 이들 상호 간에는 (1)식과 같은 관계가 있다<sup>7)</sup>.

$$P = a_0 \exp\left[i\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)\right] \sum_m \frac{\rho_0 Z_m(z_0) Z_m(z) \exp(-\delta_m \gamma - i\kappa_m \gamma)}{V_m (2\pi \kappa_m \gamma)^{\frac{1}{2}}} \dots\dots(1)$$

단,  $a_0 = (2\pi)^{\frac{1}{2}} \rho / \rho_0 (C_0 C_0 \Pi)^{\frac{1}{2}}$ ,  $\Pi$ : source power

$Z_m(z)$ : 수신에 의존하는 고유함수

$\kappa_m$ :  $m$ 번째 mode 에서의 수평거리에 의한 파장 상수

$$V_m = \int_0^h \rho_0 Z_m^2(z) dz$$

$\gamma$ : 거리

$\rho_0$ : 표층에서의 밀도

$\delta_m$ : 감쇠 계수

그리고, 표적이 활어인 경우, 어체로부터의 반사파의 음압은 어류가 수평, 수직방향으로 움직이거나 명소의 호흡으로 그 형상이나 부레의 크기가 달라지므로 매 측정 때마다 그 값이 달라지기 때문에 확률분포를 형성하게 된다.

또한, 어체의 산란(scattering)현상에 대해 부레가 매우 큰작용을 하고 있는데, 이것은 부레가 있는 경우와 부레만 없는 같은 어체에 대하여 측정실험한 결과, 부레만 없는 경우는 신호가 매우 미약했다고 한다<sup>8)</sup>. 따라서, 어군을 탐지해서 어군량을 추정할 때 사용하는 주파수는 부레의 공진주파수를 고려해야 하며 또한 그보다 높아야 좋다. 부레를 모델화한 기포의 공진주파수  $f$ 는 (2)와 같다<sup>9)</sup>.

$$f = \left(\frac{1}{2\pi R}\right) \left(\frac{3\gamma P_0}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(2)$$

단,  $P_0$ : 압력

$\rho$ : 액체의 밀도

$\gamma$ : 비열

$R$ : 기포의 반경

어체는 그 구성성분이 여러가지로 되어 있으므로, 음압은 부레·척추·살 등의 각 구성성분마다 반사능력이 다른 복잡한 함수인 유효산란길이(effective scattering length)에 비례한다고 볼 수 있다<sup>10)</sup>.

$$P_e(t) = ID^2 \left(\frac{R_0}{R^2}\right) P_0 \left(t - \frac{2R}{C}\right) \dots\dots\dots(3)$$

단,  $P_e(t)$ : 어체로부터의 반사파음압

$l$ : 어체의 유효산란길이

$D$ : Transducer의 지향지수

$$P_0 \left(t - \frac{2R}{C}\right): \text{음원음압}$$

$R$ : 송수파기와 어체와의 거리

이러한 유효산란길이( $l$ )를 제곱평균한 것이 어체의 후방산란단면적이 된다<sup>6)</sup>. 즉, 어체의 후방산란단면적  $\sigma_{bs}$ 는 (4)식과 같다.

$$\sigma_{bs} = \langle l^2 \rangle, l_0 \equiv \sigma_{bs}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(4)$$

단,  $\langle \rangle$ 는 평균기호

또, (4)식의 후방산란단면적을 표적강도  $TS$ 로 표시하면,

$$TS = 10 \log(\sigma_{bs}/A_0) \dots\dots\dots(5)$$

단,  $A_0$ : 기준면적( $1m^2$ )

또한, 학자들에 따라서는 어체의 반사파중 최대값을 이용하여 표적강도와 후방산란단면적을 계산하기도 한다<sup>3),4),5),8)</sup>.

그런데, 확률밀도함수를 구함에 있어서 random한 위상을 가진 harmonic oscillator들의 합의 진폭을 생각하여 Rayleigh는 확률밀도함수를 도출하였는데, 근래에 이것을 어류의 경우에도 적용시키고 있다<sup>6)</sup>.

이 Rayleigh확률밀도함수  $W_R$ 은

$$W_R = (l/l_0) \exp[-l^2/2l_0^2] \dots\dots\dots(6)$$

이고, 이의 최대값은  $l=l_0$ 에서 일어난다.

최근에 Dahl과 Mathisen<sup>11)</sup>은 파장에 대한 어체의 길이의 비가 100보다 큰 경우에 대해서 Rayleigh 분포의 적합도를 처음으로 검정했다.

한편, Rayleigh 확률밀도함수를 Target Strength 확률밀도함수  $W_{TS}(s)$ 로 변환시키면<sup>6),12)</sup>

$$\int_{-\infty}^{s_0} f_S(s) ds = \int_{-\infty}^{l_0 = T^{-1}(s_0)} f_L(l) dl \dots\dots\dots(7)$$

$$f_S(s) = f_L(l) \frac{dl}{ds}$$

여기서,  $s = bL_n(l/L_0)$ ,  $b = 20 \log_{10} e = 8.686 \text{ dB}$

$$\frac{dl}{ds} = \frac{L_0}{b} e^{-\frac{s}{b}}, L_0 = 1m$$

그러므로

$$W_{TS}(s) = (L_0^2 / I_0^2 \sigma) e^{\frac{2s}{b}} \exp[-(L_0^2 / 2I_0^2 \sigma) e^{\frac{2s}{b}}] \dots\dots\dots(8)$$

이 되며 이의 최대값  $s_m$ 은

$$s_m = 10 \log(\sigma_{bs} / A_0) + 3 \text{ dB} \dots\dots\dots(9)$$

이다.

그리고, 실측한 유효산란길이가 분포의 적합도는 (10)식과 같이  $\chi^2$  검정으로 하였으며 유의수준은 5%로 일반적인 기준을 적용하였다.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i} \dots\dots\dots(10)$$

단,  $o_i$  : 어체의 유효산란길이의 측정값

$e_i$  : Rayleigh 분포에 의한 이론적 기대값

그리고, 복잡한 계산은 Microcomputer(Apple II)를 사용하여 계산하였다.

## 장치 및 방법

### 1. 실험수조 및 측정기기

사용한 수조는 목조수조(190L×190W×50Hcm)로서, 내부에 비닐로 방수시키고 벽에 흡유리를 붙였다.

송파기는 일본 Murata제 초음파용 ceramic bimorph microphone을 수밀시킨 진동자와 티탄산바륨 진동자(200KHz)였으며, 수파기는 B & K Hydrophone의 후면을 막은 것과 티탄산 바륨 진동자 (200 KHz)를 사용하였다.

음원의 발생, 제어, 증폭 및 기록을 하기 위하여 Signal Generator(TRIO AG 202A), Gating System(B & K 4440), Amplifier(B & K 2606, 2607), X-Y Recorder(XYR-2A型 東亜電波)를 사용하였다.

### 2. 방 법

현장에 있어서의 측정은 주로 원거리에서 하게되는데, 실험실수조 내에서 이러한 상태와 동일한 효과를 얻도록 수조의 크기와 측정장치를 조정해서 실시하였다.

측정은 Fig. 1과 같이 신호발생기에서 발생된 정현파를 Gating System의 송신부에 인가시켜 펄스파를 내게한 후 증폭기로 증폭시켜 송파기에 보내었다. 이때 Gating System에서의 펄스폭은 0.1ms, 펄스반복주기는 0.5Hz~1Hz로 하였다.

어체로부터 반사되어 돌아온 반사신호를 수파기로

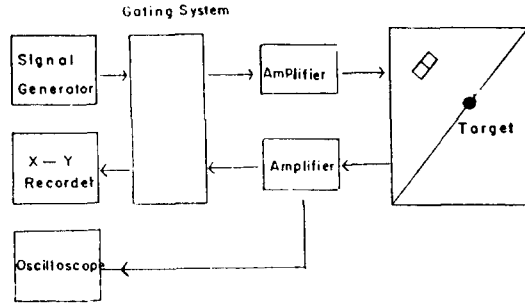


Fig. 1. Block diagram of the experimental set up.

받은 후, Gating System 및 Oscilloscope에 접속시키고 X-Y 기록기로 기록하였다. 여기서 Gating System은 물체에 의한 직접파만 수신하고 그외의 표면, 바닥, 벽 등의 신호는 수신하지 않도록 조정하였다. 또 어체는 얇은 그물에 넣어서 움직일 수 있게 하였으며 송유리 사이에 지지대를 넣어 지지시켰다.

측정은 한 쌍의 전방향 Transducer를 사용하여 상호간 및 송수파기에 대해 식(1)로써 교정시킨 후 직경 3.17cm인 철구로써 System을 테스트 했으며, 물체를 측정하기 전의 암소음(暗騒音)은 -53.2 dB였다.

## 결과 및 고찰

시료로 사용한 활어체의 최대 후방산란단면적 및 표적강도와 유효산란길이에 대한 확률분포 관계는 다음과 같다.

### 1. 후방산란단면적의 측정

실험수조 내에서 측정된 활어체의 최대 후방산란 단면적(Maximum backscattering cross section:  $\sigma_{bs}$ )과 이에 해당하는 표적강도(Target Strength: TS)는 Table 1과 같다.

Table 1에서 표적강도와 어체의 길이와의 관계는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 어체의 표적강도는 어종과 주파수에 따라 다르나 어체의 길이가 클수록 대체로 커짐을 알 수 있다.

Fig. 3, 4는 유효산란길이와 확률밀도함수와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3과 Fig. 4에서 어류의 움직임이 다양할수록 확률밀도 함수의 폭이 커지므로 실험수조 내에서 보다 자유로운 움직임이 요구된다.

Table 1. The measurements of fish and a steel ball

종 류	학 명	(cm) 크 기 (전장)	물	(KHz) 사 용 주파수	( $\times 10^{-4}m^2$ ) 후방산란 단 면 적	(dB) 표적강도 (TS)	측정 회수
메 기	Parasilunus asotus	16.8	담수	40KHz	0.62	-42.10	206
"	"	23.0	"	"	0.96	-40.16	106
잉 어	Cyprinus carpio	17.5	"	"	3.70	-34.21	216
틸라피아	Tilapia mossambica	19.5	"	"	4.71	-33.27	192
불납농어	Sebastes inermis	10.7	해수	170KHz	0.56	-42.50	80
"	Lateolabrax japonicus	14.6	"	"	4.29	-33.68	100
"	"	15.0	"	"	4.17	-33.79	75
"	"	18.1	"	"	3.80	-34.20	75
"	"	19.0	"	"	6.01	-33.21	75
"	"	20.8	"	"	7.20	-31.42	75
"	"	24.0	"	"	7.23	-31.38	75
송어	Mugil cephalus	21.5	"	"	4.81	-33.18	80
용치늘래기	Halichoeres poecilopterus	20.0	"	"	5.81	-32.35	75
불납농어	Sebastes thompsoni	19.0	"	"	5.05	-32.96	75
철구	Steel ball	$\phi 3.17$	담수	40KHz	(-41.99~43.13dB)		80

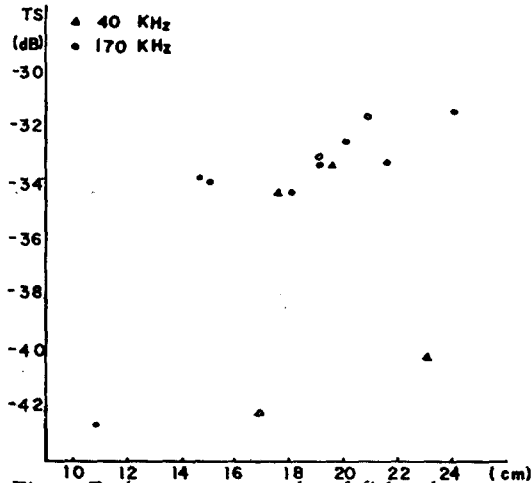


Fig. 2. Peak target strengths of fish echoes versus fish length.

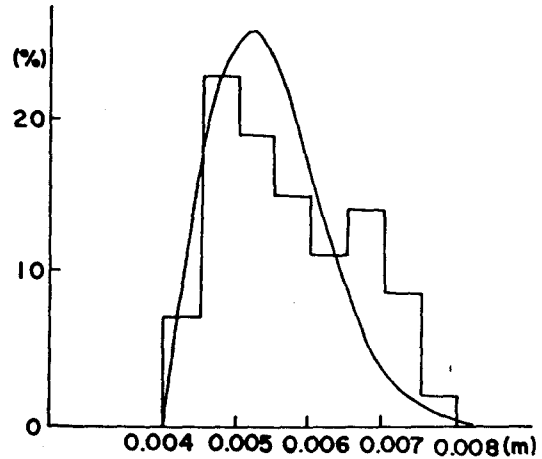


Fig. 3. Probability density function of fish echoes from live catfish(16.8cm).

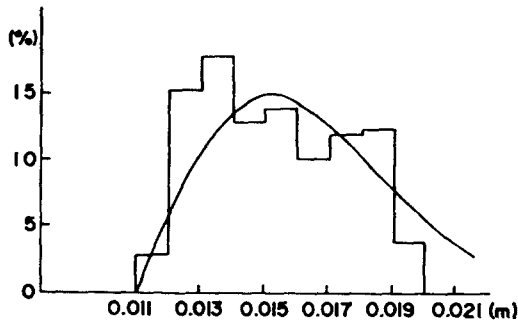


Fig. 4. Probability density function of fish echoes from live carp(17.5cm).

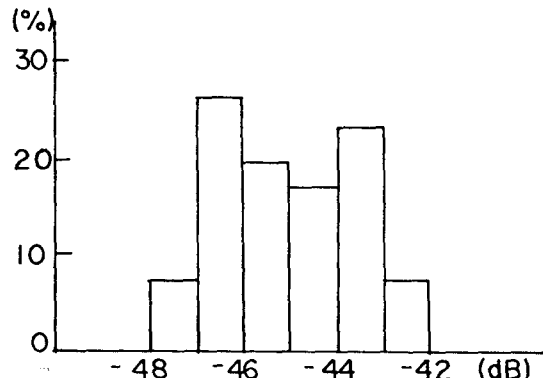


Fig. 5. Target strength distribution of the catfish(16.8cm).

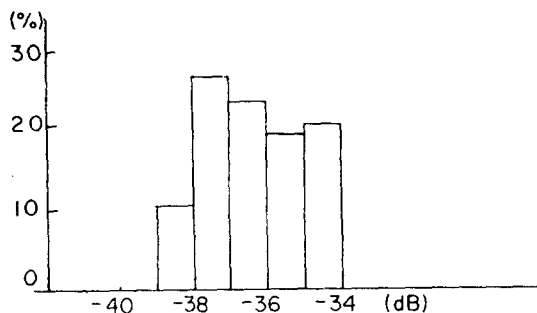


Fig. 6. Target strength distribution of the carp (17.5cm).

## 2. 유효산란길이와 확률밀도함수에 대한 Rayleigh분포

Fig. 3과 Fig. 4에서 측정된 자료와 Rayleigh분포와의 적합도에 대해 유의수준 5%로  $\chi^2$ 검정을 하면

(1) 메기의 경우,  $\chi^2=68 > \chi^2_{0.05}=12.592$

(2) 잉어의 경우,  $\chi^2=60.23 > \chi^2_{0.05}=14.067$

따라서, 두 측정값의 분포가 Rayleigh 분포에 따른다는 것은 기각되어야 한다.

또한, Fig. 3과 5 및 Fig. 4와 6에서, 측정된 data가 Rayleigh분포를 이룬다고 하면,

Fig. 3에서 최대값은  $l_{\sigma}=5.16 \times 10^{-3}m$   
 $\sigma_{bs}=3.16 \times 10^{-5}m^2$   
 $TS=-45.01 \text{ dB}$

Fig. 4에서 최대값은  $l_{\sigma}=1.52 \times 10^{-2}m$   
 $\sigma_{bs}=2.315 \times 10^{-4}m^2$   
 $TS=-36.35 \text{ dB}$

그런데, 위의 값들과 Fig. 5 및 Fig. 6을 비교하면 식 (9)가 성립하지 않는다.

따라서, 파장에 대한 어체의 길이의 비가 4.5 및 4.7로 적은 경우에는 활어체의 반사파(fish echo)들에 대한 Rayleigh 분포는 성립하지 않음을 알 수 있다.

## 요 약

어군량의 추정에 필요한 활어체의 후방산란단면적을 실험수조 내에서 40KHz와 170KHz의 음파로써 담수어인 메기·잉어·틸라피아, 해수어인 불낙·농어·송어·용치놀래기 등에 대해 측면(side aspect)에서 각각 75~216회 측정된 결과는 다음과 같다.

1. 전장(total length)이 10.7~24.0cm인 어체들

의 후방산란단면적은  $5.62 \times 10^{-5}m^2 \sim 7.23 \times 10^{-4}m^2$ 였으며, 그 표적강도는  $-42.50 \text{ dB} \sim -31.38 \text{ dB}$ 이었다.

2. 어체 크기와 표적강도의 일반적인 관계는 어종과 주파수에 따라 다르나, 대체로 큰 어체일수록 잘 반사하는 경향을 나타내었다.

3. 활어에 대한 유효산란길이의 확률분포와 Rayleigh분포와의 적합도를 유의수준 5%에서  $\chi^2$ 검정한 결과, 파장에 대한 어체의 길이의 비(acoustic length ratio)가 4.5 및 4.7처럼 적을 때에는 Rayleigh 분포를 이루지 않는다는 것을 알 수 있다.

## 사 의

본 논문을 작성하는데 여러가지로 이끌어주신 장 지원 교수님께 먼저 감사드립니다. 그리고 논문에 도움주신 김탁곤 교수님과 논문에 유익한 비평과 말씀해주신 신형일 교수님·윤갑등 교수님께 감사드립니다. 또, 실험을 도운 어업학과 졸업생 강영호, 정제천, 전자통신공학과 최희남 군께 감사합니다. 그리고 여기 다 나타내지 못한 모든 분께 감사드립니다.

## 문 헌

- 1) Burczynski, J. (1982): Instruction to the use of sonar systems for estimating fish biomass. FAO, FIRM/T191 Rev.1, 89.
- 2) Forbes, S. T. and O. Nakken (1972): Manual of methods for fisheries resource survey and appraisal. Part 2: The use of acoustic instruments for fish detection and abundance estimation. FAO manuals in Fisheries Science, 133.
- 3) Love, R. H. (1969): Maximum side aspect target strength of an individual fish. J. Acoust. Soc. Am. 46, 746-752.
- 4) Love, R. H. (1971): Measurements of fish target strength: A review. Fish Bull. 69(4), 703-715.
- 5) Love, R. H. (1977): Target Strength of an individual fish at any aspect. J. Acoust. Soc. Am. 62, 1397-1403.
- 6) Huang, K. and Clay, C. S. (1980): Backscattering cross sections of live fish. J. Acoust. Soc. Am. 67, 795-802.

- 7) Clay, C.S. and Medwin, H.(1977): Acoustical Oceanography. Wiley-Interscience, New York, 296-297.
- 8) Batzler, W.E. and G.V. Pickwell(1970): Resonant Acoustic Scattering from gas bladder fish, 168-179. Proceedings of an International Symposium on Biological Sound Scattering in the Ocean. Farquhar, G.B. ed., U.S. Government Printing Office, Washington DC.
- 9) Albers, V.M.(1967): Underwater Acoustics II. Plenum Press, New York, pp.55-56.
- 10) Clay, C.S. and Medwin, H.(1977): Acoustical Oceanography. Wiley-Interscience, New York, 228.
- 11) Dahl, P.H. and Mathisen, O.A.(1983): Measurement of fish target strength and associated directivity at high frequencies. J. Acoust. Soc. Am. 73(4), 1205-1211.
- 12) Peebles, P.Z.(1980): Probability, Random Variables, and Random Signal Principles. McGraw-Hill, New York, 67-70.