J. Kor. Fish. Soc. 38(4), 265-275 한수지, 38(4), 265-275, 2005

어류 체장의 자동 식별을 위한 어종별, 체장별 및 주파수별 음향 반사 강도의 데이터 뱅크 구축

이대재*· 신형일
부경대학교 해양생산시스템공학과

Construction of a Data Bank for Acoustic Target Strength with Fish Species, Length and Acoustic Frequency for Measuring Fish Size Distribution

Dae-Jae LEE* and Hyeong-Il SHIN
Department of Marine Production System Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

A prerequisite for deriving the abundance estimates from acoustic surveys for commercially important fish species is the identification of target strength measurements for selected fish species. In relation to these needs, the goal of this study was to construct a data bank for converting the acoustic measurements of target strength to biological estimates of fish length and to simultaneously obtain the target strength-fish length relationship. Laboratory measurements of target strength on 15 commercially important fish species were carried out at five frequencies of 50, 70, 75, 120 and 200 kHz by single and split beam methods under the controlled conditions of the fresh and the sea water tanks with the 389 samples of dead and live fishes. The target strength pattern on individual fish of each species was measured as a function of tilt angle, ranging from -45° (head down aspect) to +45° (head up aspect) in 0.2° intervals, and the averaged target strength was estimated by assuming the tilt angle distribution as N (-5.0°, 15.0°). The TS to fish length relationship for each species was independently derived by a least-squares fitting procedure. Also, a linear regression analysis for all species was performed to reduce the data to a set of empirical equations showing the variation of target strength to a fish length, wavelength and fish species. For four of the frequencies (50, 75, 120 and 200 kHz), an empirical model for fish target strength (*TS*, dB) averaged over the dorsal sapect of 602 fishes of 10 species and which spans the fish length (L, m) to wavelength (λ, m) ratio between 5 and 73 was derived: $TS = 19.44\,Log(L) + 0.56\,Log(\lambda) - 30.9$, ($r^2$=0.53).

Key words: Averaged target strength, Length and frequency dependence, Single and split beam methods, Laboratory measurement, Data bank construction

서 론

현재, 한반도 주변수역에 인접한 일본, 중국은 물론 세계 모든 연안국이 자국의 배타적 경제수역과 공해수역에 대한 어업생물자원의 관리를 한층 강화하고 있어 우리나라 어선은 국내에서 뿐만 아니라 해외어장에 있어서도 조업해역의 확보에 많은 어려움을 겪고 있다. 이에 대응하여 우리나라에서도 EEZ 경제수역내에서의 외국어선에 대한 조업규제를 강화하면서 연근해 주요 해역에 대한 주요 어종별 TAC(총허용어획량, Total Allowable Catch) 제도를 도입하여 어업자원을 효율적으로 관리하기 위한 대책의 수립에 많은 노력과 비용을 투입하고 있는 실정이다.

그러나, TAC 제도의 시행이 원만하게 추진되기 위해서는 무엇보다도 개개의 어민들이 할당받은 어획량을 어획하는 과정에서 그들이 희망하는 어체 보다 크기가 작은 소형의 어류가 어획된 경우, 그것을 바다에 그대로 폐기해 버릴 우려가 있기 때문에 이를 방지하기 위해서는 어민이 어느 크기 이상의 어체만을 선택적으로 어획할 수 있도록 하기 위한 어종별, 체장별, 주파수별 어류의 음향반사강도의 data bank를 구축하고, 이 정보의 활용을 위한 저가형 체장어군탐지기의 개발 및 보급이 절실히 요구되고 있다.

우리나라 해양수산부 산하 국립수산과학원과 일부 대학의 연구팀은 매년 한반도 주변수역 및 북태평양 해역 등에 대한 어업자원조사를 실시하고 있는 데, 여기서는 네 개의 분할된 초음파 진동자를 이용하여 어군 echo 신호를 측정하는 split beam 방식 계량어군탐지기에 의한 음향학적 조사, 저층 및 중층트롤에 의한 시험조업 등이 병행되고 있다(Lee et al. 1996; Lee et al., 1998a,b; Lee, 2002). 그러나, 대상 어류의 체장 추정을 위한 어류 반사강도의 체계적인 연구는 아직까지 수행되고 있지 않아 TAC 제도를 시행하고 있는 우리나라로서는 한반도 주변 수역에 서식하는 어종별, 체장별, 사용주파수별 어류의 체장추정에 필요한 음향반사강도의 data bank를 구축하는 것이 시급한 선결과제가 되고 있다.

*Corresponding author: daejael@pknu.ac.kr

일반적으로 어류의 음향반사강도를 측정할 때, 송·수파기의 지향성에 대한 영향을 제거하기 위해 선어를 음축상에 매달아 내려 측정하는 현수법(Dahl et al., 1983; Kang et al., 2003; Foote et al., 2002)과 현장에서 직접 split beam 방식에 의한 어군탐지시스템을 이용하여 측정하는 직접법 등이 이용되고 있다(Foote et al., 1986; Gauthier et al., 2001; Kang et al., 2004). 전자의 현수법은 어종별, 체장별, 주파수별에 대한 반사강도의 측정이 비교적 정확하게 이루어지는 장점은 있지만, 음파의 입사방향, 즉 어류의 자세에 따른 반사강도의 불규칙한 변동을 평균화하여 평균적인 반사강도를 추정하는 데 많은 노력이 필요하다. 반면, split beam 방식은 활어를 대상으로 자연상태와 동일한 환경조건하에서 어류의 소재위치를 측정한 후 지향성을 보정하여 반사강도를 구하기 때문에 실제의 유영상태에 가장 근접한 측정법이고, 이 때문에 세계적으로 가장 널리 사용되는 방식이다.

본 연구에서는 이와 같이 어류 반사강도의 측정법에 대한 각종의 문제점을 고려하여 대형음향수조에서 선어에 대해서는 현수법에 의해, 또한 활어에 대해서는 split beam 방식에 의해 어종별, 체장별, 주파수별에 대한 음향반사강도을 측정하고, 이들 정보를 토대로 우리나라 주변해역에 서식하는 주요 어종의 체장 식별에 필요한 음향반사강도의 data bank를 구축하고자 하였다.

재료 및 방법

실험장치의 구성

어류의 반사강도는 선어의 경우, 대형실험수조(L 5 m×W 6 m×H 5 m)에서 현수법에 의해 50, 75, 120 및 200 kHz의 single beam system을 이용하여 측정하였고, 또한 활어의 경우에는 투명아크릴수조(L 1.2 m×W 1.2 m×H 1.7 m)에서 70과 120 kHz의 split beam system을 이용하여 측정하였다.

실험에 사용한 대형실험수조와 투명아크릴수조에 대한 실험장치의 구성 모식도는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 (A)는 선어를 위한 실험수조이고, (B)는 활어를 위한 실험수조이다.

먼저, Fig. 1의 (A)에서 선어에 대한 실험장치는 어류를 수중에 현수시켜 자세각(tilt angle)를 0.2° 간격으로 제어하기 위한 어류위치제어장치, 어류 자세 변화에 따른 초음파 echo 신호를 측정하기 위한 어군탐지기, 어류의 echo 신호를 정량적으로 처리하기 위한 신호처리장치, 어류의 반사강도를 계산, 도식화 및 측정 시스템의 종합적인 제어 및 관리를 위한 software 등으로써 구성하였다.

수중에 초음파 신호를 송·수신하기 위한 어군탐지기로서는 50, 75 및 200 kHz의 주파수에 대해서는 삼영ENC의 SF-7000 시스템을, 120 kHz에 대해서는 Simrad의 EQ100 시스템을 사용하였는 데, 펄스폭은 모두 0.5 ms로서 설정하였다. 실험에 사용한 송수파기의 -3 dB에 대한 지향각은 50, 75, 120 및 200 kHz에서 각각 45°, 29°, 38°, 24°이었고, 각 진동자의 측엽레벨은 각각 -20 dB 이하가 되도록 설계하였다.

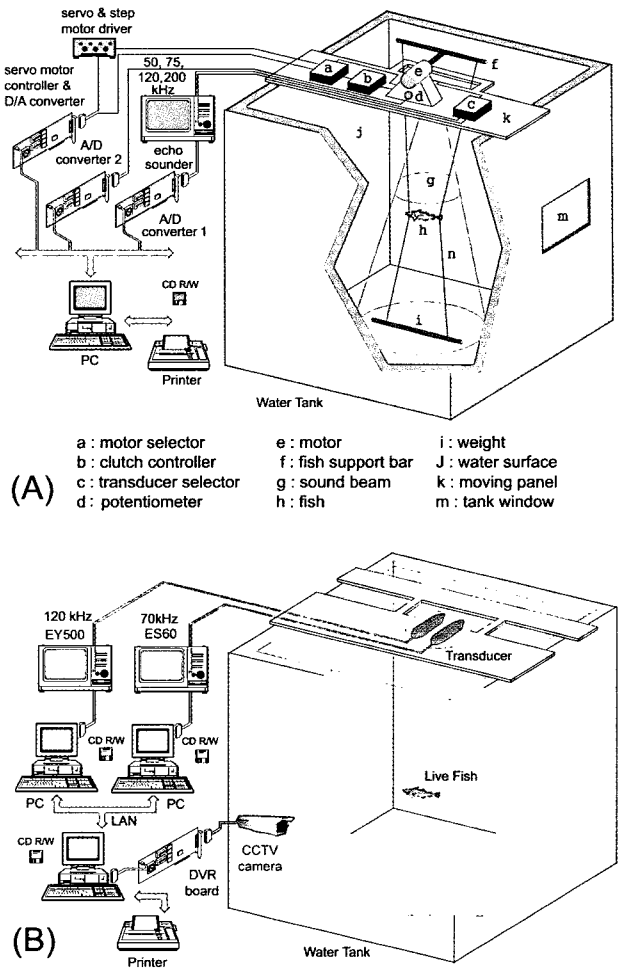

Fig. 1. Schematic block diagrams of a single beam (A) and a split beam TS measuring systems (B).

실험은 이들의 송·수파기를 차대 상면의 L 1 m×W 0.5 m의 현수창을 통해 수면하 0.2 m 위치에 고정시킨 후, 송수파기의 음축상 2.75 m의 위치에 현수시킨 어류로부터 산란되는 초음파 신호를 측정하였다. 실험어류를 수중에 현수시키기 위한 어류위치제어장치는 stepping motor 및 구동장치(UDK5114N, Oriental motor), 감속장치(감속비1/30), 클러치 제어장치, D/A 변환장치(Comi-SD301, Comizoa) 등으로써 구성하였다. 실험은 먼저 어류를 Fig. 1의 (A)와 같이 수중에 현수시킨 후, 자체 개발한 software 모듈을 통해 어류의 자세를 +45° head up으로 초기설정하고, D/A 변환기를 통해 제어신호를 출력시켜 모터의 clutch를 해제하였다. 이 시점으로부터 모터 구동장치가 동작하여 모터 축에 장치된 어체 현수 arm이 CCW 방향으로 0.2° 간격으로 선회하게 된다. 이 때, 실험어류의 자세변화에 따른 어체의 echo 신호는 트리거 신호와 함께 A/D 변환장치(Comi-LX203, Comizoa)에 동시에 입력되어 20 MHz의 주파수로써 샘플링되고, 양자화된 echo 신호는 자세각과 함께 hard disk에 수록된다.

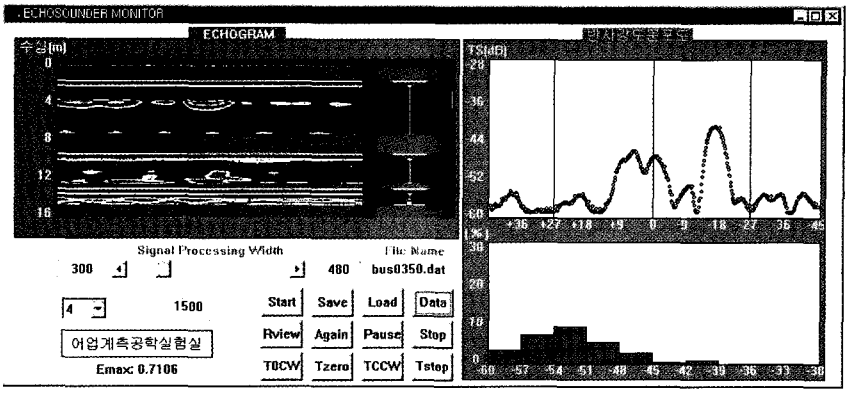

Fig. 2. Layout of the program developed for data acquisition and processing, system parameter setting and tilt control of fish.

어류의 반사강도 측정시스템의 제어 및 데이터 처리를 위한 software 모듈의 화면표시결과의 일례는 Fig. 2와 같다.

한편, Fig. 1의 (B)에서 활어의 반사강도는 투명아크릴 해수수조에 어류를 수용하고 70 kHz (ES60, Simrad)와 120 kHz (EY500, Simrad)의 주파수에 대한 split beam echo sounder를 이용하여 측정하였다. 실험에 사용한 70과 120 kHz split beam 송·수파기의 -3 dB에 대한 지향각은 각각 7°, 11°이고, 70 kHz에 대해서는 직경 32.1 mm의 표준구(銅球, -39.1 dB)를, 120 kHz에 대해서는 직경 23.0 mm의 표준구(銅球, -40.4 dB)를 사용하여 시스템을 교정하였다. 실험은 순치수조에 수용되어 있는 실험 대상 어류를 한 마리씩 기포가 혼입되지 않도록 해수 속에 넣어 실험수조로 옮기고, 약 120 cm 부근의 깊이에서 유영하도록 위치를 제어한 후, 녹화 및 네트워크 전용의 DVR 시스템에 장착된 2개의 CCTV 카메라를 이용하여 어류의 유영행동을 관찰하면서 행하였다. 각각의 주파수에 대한 echogram과 어류의 반사강도, 즉, TS (target strength) 정보는 실시간으로 ethernet data network를 이용하여 PC의 hard disk에 CCTV 영상과 함께 수록한 후, 후일 목적에 따른 분석을 행하였다.

활어 실험 당시 대부분의 어류는 수조의 저면이나 벽면 부근에 정체하려는 경향이 강하게 나타나 완전한 자유유영상태에서의 실험이 매우 어려웠다. 따라서, 공시어의 등쪽 몸체 중앙에 소형의 낚시를 꿰어 두 가닥의 줄로써 어류의 위치를 진동자의 음축 부근으로 유도하여 실험을 행하였다. 이 때, 공시어의 위치는 EY500 및 ES60 어탐 시스템의 모니터상에 실시간으로 나타나는 어류의 순간적인 평면위치의 변동을 관찰하면서 공시어를 가능한 한 sound beam 내부에서 유영하도록 위치를 인위적으로 제어하면서 실험을 행하였다.

본 실험에 사용한 split beam 송·수파기의 근거리 음장의 한계는 70 kHz 송수파기(ES70-11, Simrad)와 120 kHz 송수파기(ES120-7F, Simrad)에 대해 각각 약 22 cm, 약 33 cm이었고, 본 실험에서는 반사강도 측정시 공시어의 평균적인 유영깊이를 가능한 한 120 cm가 유지되도록 하였으므로 근거리 음장에 기인하는 문제는 없다고 판단된다.

어종별 어류 반사강도의 측정

실험에 사용한 어류의 어종별 생물학적 조성은 Table 1과 같다.

실험어류는 전국의 위판장으로부터 공급되는 부산의 활어도소매시장을 통해 활어 또는 선어의 상태로써 구입하여 사용하였다. 실험에 사용한 어류는 고등어, 전갱이, 부세, 청어, 병어, 참돔, 전어, 쥐치, 삼치, 꼼치, 조피볼락, 불볼락, 갈치, 살오징어, 쇠갑오징어의 15어종, 389마리로써, 이중에서 조피볼락, 불볼락, 쥐치, 전어는 활어 상태로 split beam system에 의해 반사강도를 측정하였고, 그 이외의 어종은 선어 상태로 single beam system에 의해 반사강도를 측정하였다.

Single beam system에 의한 반사강도 측정

대형실험수조에서 single beam system에 의한 어류의 반사강도는 교정구를 사용하여 현수법에 의해 측정하였는데, 그 반사강도 TS_f (dB)는

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

에 의해 구하였다. 여기서, TS_{ref}는 교정구의 반사강도, V_f, V_{ref}는 각각 실험 어류 및 교정구에 대한 echo 신호의 전압(V)이다. 본 실험에서 사용한 교정구의 재질은 모두 copper sphere로써, 그 직경은 50, 75, 120 및 200 kHz에서 각각 45 mm (-36.2 dB), 32.1 mm (-39.1 dB), 23.0 mm (-40.4 dB), 13.7 mm (-45.0 dB)이었다.

본 연구에서는 어체가 유영하는 수평자세로부터 수면에 대하여 머리를 쳐든 경우를 양(+), 내린 경우를 음(-)의 pitch 각으로써 정의하여 평균반사강도를 구하였다.

현재, 어류의 반사강도로부터 어체장을 추정하는 경우, 어체의 등방향에 대한 평균반사강도의 정보가 필요하다. 어류의 등방향에 대한 평균반사강도를 구하는 방법으로서는 어류의 반사강도를 pitch 각의 함수로써 측정하고, 이 값을 어류의 유영자세와 사용 송·수파기의 지향성함수를 고려하여 평균화하는 방법이 널리 이용되고 있다(Foote, 1980).

만일, 송·수파기의 음축상에 어체를 현수시켜 반사강도를

Table 1. Biological composition of fish species used in the target strength measurement at five frequencies of 50, 70, 75, 120, and 200 kHz

Common name	Species	Length range (cm)	Weight range (g)	Number of fish
Chub mackerel	*Scomber japonicus*	26.2- 38.3	215-950	35
Japanese horse mackerel	*Trachurus japonicus*	16.8- 34.3	90-635	27
Large yellow croaker	*Larimichthys crocea*	24.3- 37.6	198-810	31
Pacific herring	*Clupea pallasii*	19.3- 26.0	100-235	9
Silver pomfret	*Pampus argenteus*	16.9- 24.8	130-465	27
Red seabream snapper	*Pagrus major*	19.4- 42.5	205-1,570	10
Konoshiro gizzard shad	*Konosirus punctatus*	12.4- 26.0	25-235	41
Black scraper	*Tramnaconus modestus*	13.7- 38.6	55-755	59
Spotted mackerel	*Scomberomorus niphonius*	37.8- 54.5	490-1,325	20
Tanaka's snailfish	*Liparis tanakai*	44.5- 51.5	1,020-1,050	16
Schlegel's black rockfish	*Sebastes schlegeli*	17.5- 32.0	89-380	29
Goldeye rockfish	*sebastes thompsoni*	18.5- 28.0	86-365	35
Largehead hairtail	*Trichiurus lepturus*	74.0-110.0	290-700	26
Japanese flying squid	*Todarodes pacificus*	22.5- 26.1	275-380	14
Japanese spineless cuttlefish	*Sepiella japonica*	7.9- 16.3	62-540	10

측정할 때, 어체의 자세각 θ 방향에서의 후방산란단면적을 $\sigma(\theta)$라 하면, 그 평균후방산란단면적 $<\sigma>$은

$$\langle \sigma \rangle = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sigma(\theta) f(\theta) d\theta$$

에 의해 구할 수 있다. 여기서, $f(\theta)$는 어체의 pitch 각 θ에 대한 확률밀도함수이다.

따라서, 각 어종별 개체어에 대한 평균반사강도 <TS>는

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

에 의해 구할 수 있다.

Split beam system에 의한 반사강도 측정

본 연구에서 주로 연구 대상으로 한 우리나라 연근해 해역에서 선망, 저인망, 트롤, 채낚기 등에 의해 어획되는 주요 상업 어종들은 활어 상태로의 구입이 매우 어렵다. 따라서, 여기서는 바다 목장화 사업의 주요 대상어종인 조피볼락과 불볼락, 또한 활어 상태로 구입이 비교적 용이한 말쥐치와 전어를 대상으로 실험을 행하였다.

본 실험에 사용한 70과 120 kHz split beam echo sounder에서 sound beam의 유효 탐지범위는 수조 깊이 120 cm에 있어서 각각 38 cm, 26 cm이었고, 반사강도의 측정은 이들 탐지한계에 상당하는 체장을 초과하지 않는 활어를 대상으로 행하였다. 또한, 120 kHz의 경우에 대해서는 TS 전용해석 software (EP500, Simrad)를 이용하여 공시어류의 유영행동의 변화에 기인하는 음향반사강도를 측정하고, 이들 순간적인 반사강도의 빈도분포로부터 평균반사강도를 산출하여 어종별 음향반사강도의 체장 의존성을 분석하였다.

일반적으로 어류의 자세각의 변화에 따른 반사강도는 어체의 성숙도, 체장, 체고, 체폭, 비만도, 연령 등에 따라 매우 불규칙하게 변동하기 때문에 어종별 대상 어류의 자세각에 대응하는 반사강도의 표준화된 변화패턴을 예측하는 것은 매우 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 먼저 single beam과 split beam의 모든 경우에 대하여 어류의 평균반사강도가 체장(L)의 2승에 비례한다는 가정하에서 $\langle TS \rangle = 20 Log(L) + b_{20}$의 회귀직선식으로부터 체장변환계수 b_{20}을 산출하였다. 또한, 어종별 어류의 체장, 평균반사강도, 사용주파수의 파장과의 상호관계에 대해서도 다중회귀분석을 통해 반사강도 방정식을 유도, 고찰하였다.

한편, 어류의 자세각에 따른 음향반사강도의 평균적인 변화패턴을 정량적으로 고찰하기 위하여 모든 실험어류의 반사강도의 측정치를 자세각에 대하여 평균함으로써 어종별 평균적인 반사강도의 변동패턴을 분석, 고찰하였다.

결과 및 고찰

어종별 평균반사강도 패턴의 변동특성

어류 반사강도의 자세각 의존성을 고찰하기 위해 각 어류를 수중에 현수시켜 자세각을 0.2° 간격으로 변화시키면서 반사강도를 측정하고, 모든 실험어류에 대한 반사강도를 자세각에 대하여 평균한 평균반사강도패턴의 일례는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3은 50, 75, 120 및 200 kHz의 주파수에 대한 18마리의 부세(평균체장 31.2 cm)에 대한 평균반사강도패턴이다. 그림에서 50, 75, 120 kHz의 경우에는 -15°－-20° 범위에서, 또한, 200 kHz에서는 -20°－-25° 범위에서 가장 높고 예리한 반사강도패턴을 나타내고 있는데, 이 현상은 부레의 경사각과 깊은 관련성을 갖고 있다(Mukai et al., 1993). 특히, 자세각에 따른 반사강도가 주파수가 증가할수록 그 변동 폭이 점차 작아지는 경향을 보다 정량적으로 분석하기 위해 부세의 주파수별(50, 75, 120, 200 kHz) 반사강도의 빈도분포를 Fig. 4에 나타내었다. 이들 주파수에 대한 빈도분포특성은 120과 200 kHz의 경우가 50과 75 kHz의 빈도분포보다 반사강도가 일정한 값에 강하게 집중되는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 파장이 짧을수록 자세각에 따른 각 어체 내부조직에서의 산란

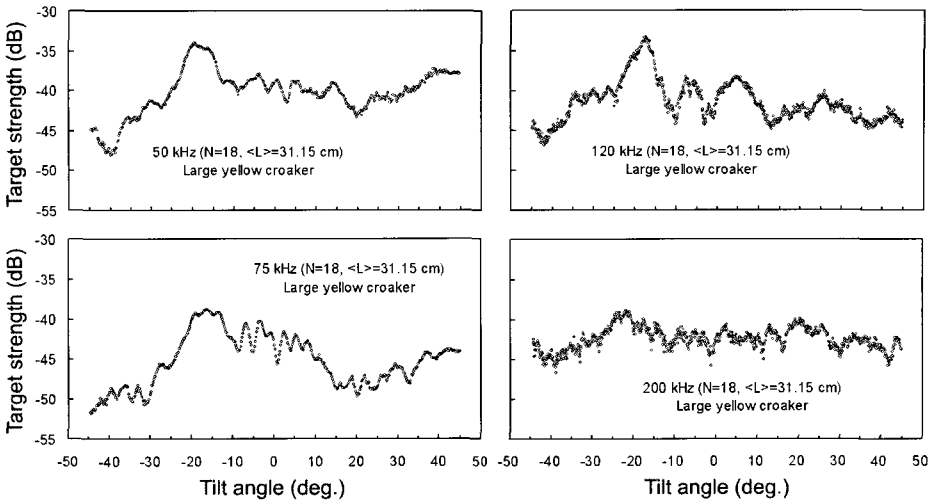

Fig. 3. Averaged target strength patterns for large yellow croaker at 50, 75, 120 and 200 kHz.

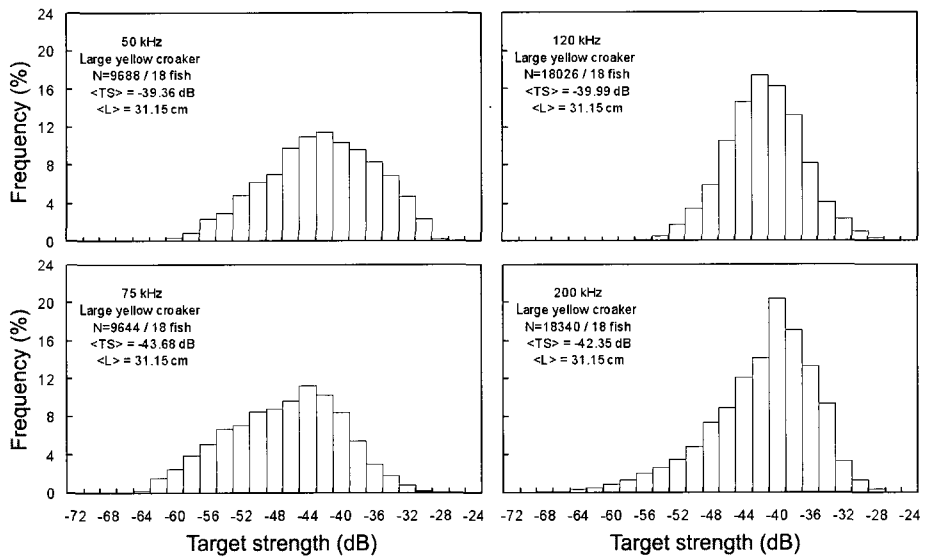

Fig. 4. TS frequency distributions for large yellow croaker at 50, 75, 120 and 200 kHz.

신호가 상호 복잡하게 서로 간섭하여 초래되는 현상이므로, 그 산란진폭의 변동특성을 정량적으로 파악하기 위해서는 통계적인 분석이 필요하다.

가장 많은 어종을 대상으로 실험을 행한 75 kHz에서의 어종별 평균반사강도패턴을 비교, 고찰한 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 고등어와 전갱이는 Fig. 3의 부세와 같이 -10° 부근(head down)의 자세각에서 반사강도가 가장 높고, 예리한 패턴을 보였으며, 청어는 자세각 -5° 부근에서 예리한 반사강도 패턴을 나타내었지만, 삼치, 참돔, 전어의 경우는 0° 부근에 매우 완만한 모드를 갖는 반사강도 패턴을 나타내었다. 그러나, 병어와 쥐치의 경우에 있어서는 자세각에 따른 반사강도 패턴에서 특징적인 변화를 관찰할 수 없었다.

어종별 반사강도의 체장 의존성

대형실험수조에서 선어를 대상으로 어종별 각 어체의 자세각에 따른 반사강도의 측정치로부터 평균반사강도를 산정할 때, 어체의 평균 자세각과 표준편차는 이미 보고된 데이터를 토대로 각각 -5°, 15°로써 가정하여 구하였다(Mukai et al., 1993).

어류의 반사강도는 사용 주파수, 체장, 수심(압력), 수온, 염분, 유영자세, 행동패턴, 위 내용물의 충만도, 성숙도 등과 같은 생물학적 및 물리적 요인에 따라 복잡하게 변동하지만, 현재 어류의 반사강도는 주로 체장(L, cm)과 주파수에 대한 의존성으로써 평가되고 있는 것이 일반적인 추세이다.

따라서, 여기서는 50, 75, 120 및 200 kHz의 주파수에 대한 어류의 반사강도를 체장의 함수로써 분석하였다(Fig. 6).

Fig. 6은 체장범위 37.8-54.5 cm (평균체장 46.0 cm), 체중범

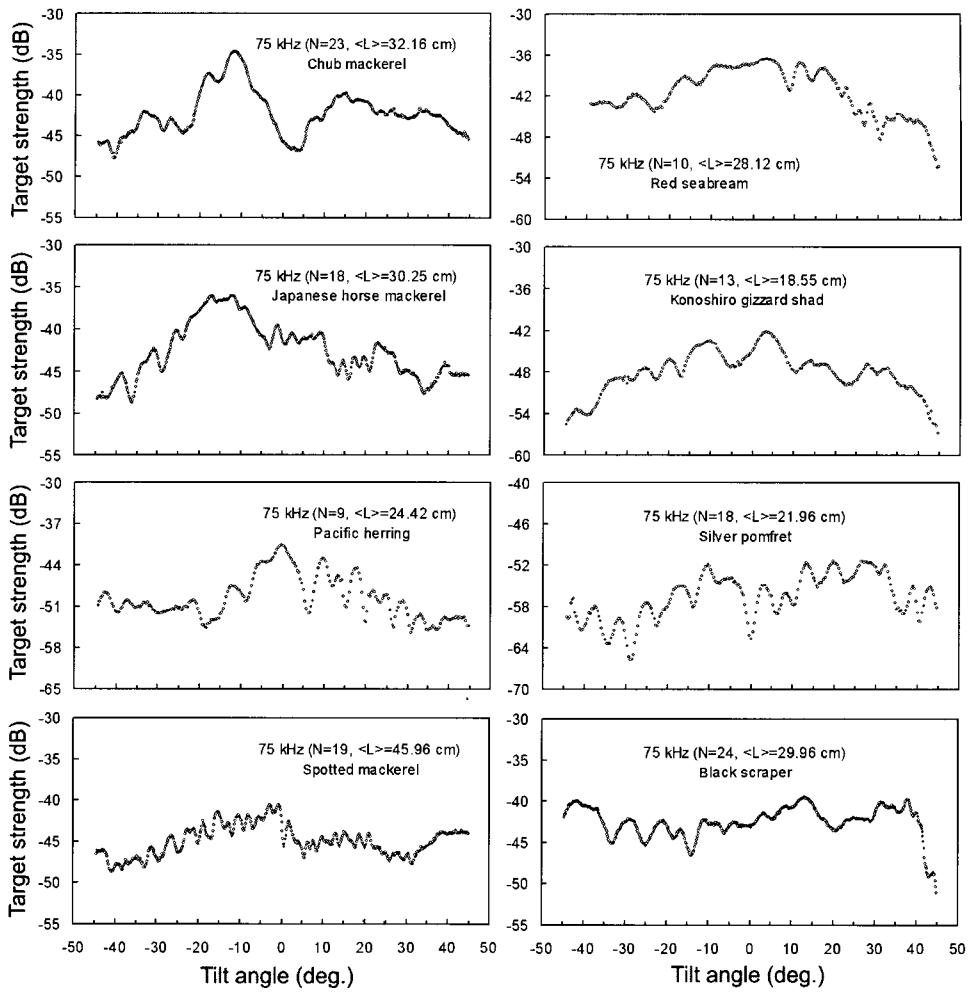

Fig. 5. Averaged target strength patterns for chub mackerel, Japanese horse mackerel, Pacific herring, spotted mackerel, red seabream, konoshiro gizzard shad, silver pomfret and black scraper at 75 kHz.

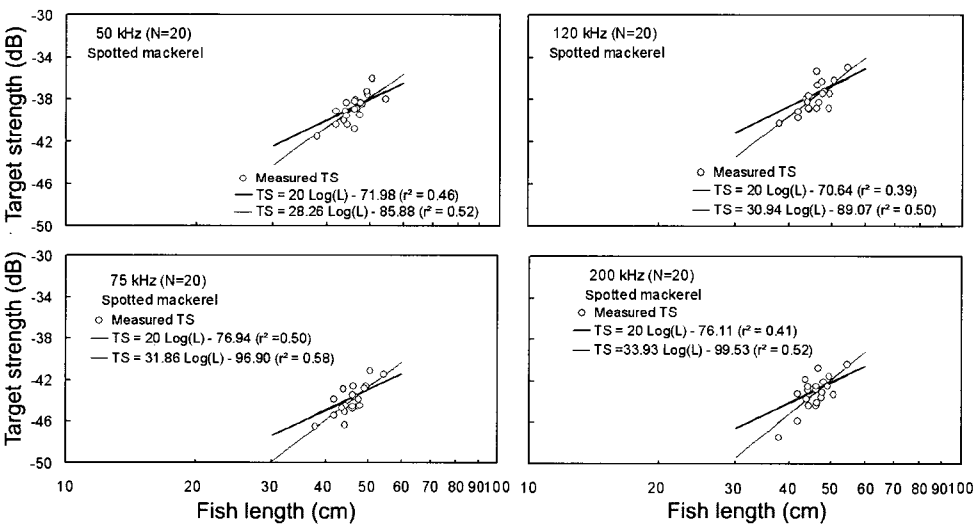

Fig. 6. Length dependence of target strength for spotted mackerel at 50, 75, 120 and 200 kHz. The fine line is the best fit regression of TS on fish length and the thick line is the standard regression.

위 490-1,325 g (평균체중 761.8 g)인 20마리의 삼치를 대상으로 각 어체의 평균반사강도를 산출하고, 평균반사강도와 평균체장과의 관계를 나타낸 결과이다. 그림에서 ○은 반사강도의 측정치이고, 가는 실선은 $TS = aLog(L) + b$ 의 회귀직선, 굵은 실선은 반사강도가 체장의 2승에 비례한다는 가정하에서 구한 $TS = 20Log(L) + b$ 의 회귀직선이다. 전자의 회귀직선에서 a는 반사강도의 체장에 대한 의존성을 나타내는 파라미터(이후 체장의존성계수라 부르기로 한다.)이고, b는 체장 1 cm에 대한 음향반사강도, 즉, 체장변환계수이다. 여기서는 어류의 음향반사강도가 체장의 2승에 비례하는 경우, a=20이 되고, 그 때의 체장변환계수를 b_{20}으로써 표기하였다.

삼치의 유영자세가 통계적으로 정규분포에 따른다는 가정하에서 20마리의 삼치를 대상으로 산출한 회귀직선식의 상수 a, b는 각각 50 kHz에서 a=28.26, b=-85.88 dB (r^2=0.52), 75 kHz에서 a=31.86, b=-96.90 dB (r^2=0.58), 120 kHz에서 a=30.94, b=-89.07 dB (r^2=0.50), 200 kHz에서 a=33.93, b=-99.53 dB (r^2=0.52)이었다. 한편, 반사강도가 체장의 2승에 비례한다는 가정하에서 구한 체장변환계수 b_{20}은 50, 75, 120 및 200 kHz에서 각각 -71.98 dB (r^2=0.46), -76.94 dB (r^2=0.50), -70.64 dB (r^2=0.39), -76.11 dB (r^2=0.41)이었다.

Fig. 6에서 삼치 반사강도의 체장 의존성을 나타내는 파라미터 a 값은 주파수에 따라 28.26-33.93의 범위에서 변동하였고, 또한 체장변환계수는 -85.88－-99.53 dB의 범위에서 변동하였다. b_{20} 역시 -70.64－-76.94 dB의 범위에서 주파수에 따라

Table 2. Linear regression equations for the relationship between mean target strength and fish length for 15 species at five frequencies of 50, 70, 75, 120 and 200 kHz

Species, Frequency (kHz) \ TS equation		TS=a Log(L)−b			a=20		Beam type
		a	b	r^2	b_{20}	r^2	
Chub mackerel	50	27.9	79.5	0.58	67.2	0.52	single
	75	28.6	83.2	0.68	69.9	0.64	single
	120	27.1	77.7	0.67	66.9	0.54	single
	200	25.6	79.8	0.72	71.1	0.66	single
Large yellow croaker	50	18.6	66.8	0.57	68.9	0.59	single
	75	19.6	68.4	0.52	68.8	0.54	single
	120	18.6	66.7	0.51	68.8	0.54	single
	200	20.7	73.1	0.60	72.0	0.54	single
Silver pomfret	50	31.3	90.0	0.67	74.6	0.53	single
	75	28.4	94.4	0.38	82.9	0.23	single
	120	31.0	88.6	0.73	73.6	0.56	single
	200	32.8	94.9	0.62	77.4	0.46	single
Japanese horse mackerel	50	29.6	82.4	0.61	68.0	0.56	single
	75	24.3	76.1	0.93	69.7	0.84	single
	120	31.1	82.2	0.58	65.6	0.48	single
	200	34.2	93.3	0.68	72.1	0.53	single
Spotted mackerel	50	28.3	85.3	0.56	72.0	0.46	single
	75	31.9	96.9	0.58	76.9	0.50	single
	120	30.9	89.1	0.50	70.6	0.39	single
	200	33.9	99.5	0.52	76.1	0.41	single
Black scraper	50	29.9	82.6	0.65	68.2	0.46	single
	75	26.8	82.8	0.70	72.2	0.53	single
	120	26.5	73.0	0.62	62.9	0.51	single
	200	29.8	89.8	0.63	74.5	0.46	single
Tanaka's snailfish	75	35.5	99.0	0.56	72.9	0.43	single
Konoshiro gizzard shad	75	31.2	87.7	0.82	71.9	0.64	single
Red seabream snapper	75	18.9	67.1	0.80	68.9	0.70	single
Pacific herring	75	28.3	83.1	0.54	71.5	0.46	single
Japanese flying squid	75	49.0	105.9	0.35	65.5	0.24	single
Japanese spineless cuttlefish	75	31.2	70.8	0.96	57.7	0.81	single
Goldeye rockfish	70	17.1	68.2	0.37	72.0	0.32	split
	120	24.4	73.7	0.59	67.7	0.64	split
Schlegel's black rockfish	70	19.4	70.5	0.71	71.3	0.70	split
	120	22.4	70.4	0.64	66.9	0.57	split
Black scraper	70	24.1	72.5	0.90	66.9	0.76	split
	120	22.3	68.1	0.87	64.8	0.76	split

비교적 큰 변동을 나타내었다.

우리나라 주변해역에 서식하는 어업생물중에서 상업적으로 널리 이용되고 있는 15개 어종을 대상으로 50, 70, 75, 120 및 200 kHz의 주파수에 대한 어류 반사강도의 데이터 뱅크를 구축할 목적으로 어종별, 주파수별 반사강도의 체장 의존성 및 체장변환계수의 변동특성을 종합적으로 분석, 고찰한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2에서 고등어, 부세, 병어, 전갱이, 삼치, 말쥐치 꼼치, 전어, 참돔, 청어, 살오징어, 쇠갑오징어의 12개 어종에 대해서는 선어 상태로 single beam system에 의해 어종별, 주파수별 반사강도의 체장 의존성을 분석하였고, 조피볼락, 불볼락, 쥐치의 3개 어종에 대해서는 활어 상태로 split beam system에 의해 어종별, 주파수별 반사강도의 체장 의존성을 분석하였다. 이들 15개 어종을 대상으로 50-200 kHz의 주파수 범위에 대해 산출한 반사강도의 회귀 직선식에서 체장 의존성을 나타내는 파라미터 a 값은 연체류를 제외한 어류의 경우, 17.1-35.5의 범위였고, 체장변환계수 b는 -66.7－-99.5 dB 범위였다. 또한, 반사강도가 체장의 2승에 비례한다고 가정한 경우에 대한 체장변환계수는 -62.9－-82.9 dB 범위였다.

일반적으로 활어의 개체어, 또는 cage 수용 어류를 대상으로 single beam, dual beam 및 split beam 등의 방법에 의해 유도된 계수 a와 b의 추정치는 어종에 따라 큰 차이를 나타내고 있지만, 현재 보고되고 있는 값의 범위는 대략적으로 각각 18－30, -60－-90 dB 정도이다(MacLennan and Simmonds, 1992). 본 연구에서 산출된 이들 계수의 추정치 역시 이 범위 내에서 변동하고 있으나, 보다 정량적인 분석을 위해서는 어종과 주파수에 따른 변동특성에 대해 분석, 검토가 필요하다. 특히, 주파수에 따른 어종별 반사강도의 변동특성은 대상어류 고유의 음향산란특성을 나타내는 어종식별정보를 내포하고 있기 때문에 보다 주의 깊은 분석이 요구된다.

Table 2에서 우리나라의 대형선망, 저인망, 트롤의 주요 상업어종인 고등어, 부세, 병어, 전갱이, 삼치, 말쥐치의 경우, 50-200 kHz의 주파수에 대한 체장의존성계수와 체장변환계수를 주의 깊게 살펴보면, 부세의 반사강도는 체장의 1.86-2.07승에 따라 변동하였고, 그 변환계수는 -66.7－-73.1 dB 범위였다. 이에 비해 고등어의 경우는 체장의 2.56-2.86승에 따라 변동하였고, 그 변환계수는 -77.7－-79.8 dB의 범위였다. 즉, 고등어의 반사강도는 부세의 경우보다 더 체장에 의존적인 경향을 나타내었고, 또한, 체장변환계수도 더 작은 특성을 나타내었다. 여기서, 반사강도의 체장 의존성이 강할수록 체장의 증가에 따른 음향산란단면적의 증가, 즉, 회귀직선의 기울기가 커지는 특성을 나타내고, 이 경우, 체장변환계수는 역으로 작아지는 특성을 나타냄을 알 수 있다.

말쥐치는 고등어와 유사한 체장 의존성을 나타내어 그 반사강도는 체장의 2.65-2.99승에 따라 변동하였지만, 그 변환계수는 -73.0－-89.8 dB의 범위로써, 특히, 고등어와 비교할 때, 120과 200 kHz에 대한 체장변환계수 값에 매우 큰 차이를 나타내었다. 이 현상은 쥐치의 음향산란특성에 대한 주파수 의존성과 관계가 있는 것으로 판단되어 현재 계속적인 실험이 진행 중이다.

한편, 병어, 전갱이 및 삼치의 반사강도는 주파수에 따른 체장의존성 계수가 평균 2.83-3.13의 범위에서 변동하고 있지만, 대체적으로 체장의 3승에 근사하는 의존성을 나타내었고, 체장 변환계수는 병어, 전갱이, 삼치의 경우, 각각 -88.6－-94.9 dB, -76.1－-93.3 dB, -85.3－-99.5 dB의 범위 내에서 변동하였는데, 이들 어종 중에서 체장의 크기에 비해 삼치의 체장변환계수가 비교적 작은 이유는 부레가 없는 생물학적 현상과 관계가 있는 것으로 판단된다.

75 kHz의 주파수에 대해서 산출한 꼼치, 전어, 참돔, 청어의 경우에 대한 반사강도는 체장의 1.89-3.55승에 따라 변동하였고, 그 변환계수는 -67.1－-99.0 dB의 범위였다, 살오징어와 쇠갑오징어의 반사강도는 각각 외투장의 4.90승과 3.12승에 따라 변동하였고, 그 변환계수는 각각 -105.9 dB, -70.8 dB이었다.

현재, 우리나라에서 활어의 상태로써 이용률이 매우 높은 조피볼락, 불볼락 및 쥐치의 70과 120 kHz의 split beam system에 의한 반사강도는, 조피볼락의 경우, 체장의존성계수와 체장변환계수는 각각 1.94－2.24, -70.4－-70.5 dB 범위였고, 불볼락의 경우는 각각 1.71－2.44, -68.2－-73.7 dB 범위였으며, 쥐치의 경우는 각각 2.23－2.41, -68.1－-72.5 dB 범위였다. 이때, DVR 시스템에 의해 쥐치에 대한 자세각을 실시간으로 측정, 분석한 결과, 평균 자세각은 약 -5.5°이었다.

주파수별 반사강도의 체장 의존성

자유 유영하는 어류의 체장을 반사강도 정보를 토대로 현장에서 직접 추정하고자 할 때, 체장의존성계수 a 및 체장변환계수 b의 선택에 따라 그 추정 결과에 큰 차이가 발생한다. 특히, 우리나라 주변해역에서와 같이 다수의 어종이 혼재하여 서식하는 경우, 체장어군탐지기를 사용하여 어류 체장을 실시간으로 파악할 때에는, 그 대상어종에 대하여 적용이 가능한 최적의 체장의존성계수 및 체장변환계수를 추정하는 것이 매우 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 어법, 어류의 체형, 서식환경 등을 고려하여 연근해 어장에서 선망, 저인망, 트롤어업의 주요 어획대상 어종인 고등어, 병어, 부세 등을 비롯하여 전갱이, 말쥐치, 전어, 참돔, 청어, 꼼치 등의 모든 어종에 대한 반사강도의 체장 의존성을 분석하였는데, 그 결과는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에서 가는 실선은 반사강도의 체장 의존성을 나타내는 회귀직선이고, 굵은 실선은 반사강도가 체장의 2승에 비례한다는 가정하에서 구한 회귀직선이다. 이들 그림에서, 50, 120, 200 kHz의 주파수에 대한 회귀직선은 고등어, 병어, 부세, 삼치, 전갱이, 말쥐치의 6개 어종을 대상으로 유도한 결과이고, 75 kHz에 대해서는 이들 어종에 부가하여 전어, 참돔, 청어, 꼼치의 10개 어종을 대상으로 반사강도의 체장의존성을 분석한 결과이다.

Fig. 7의 각 주파수에 대한 회귀 직선식에서 체장의존성계수

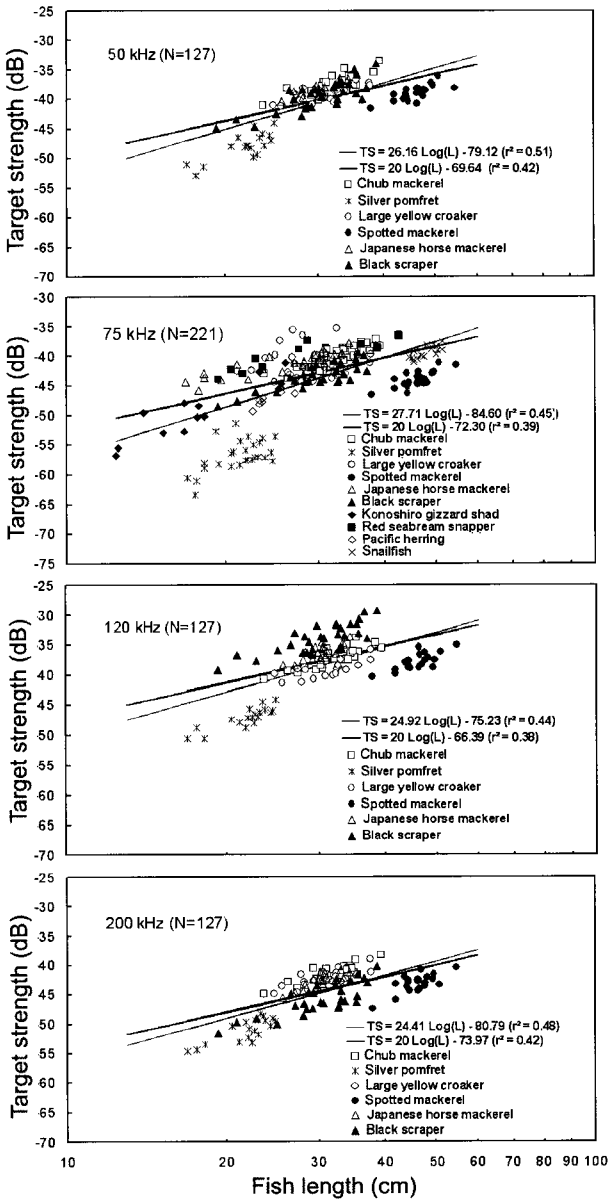

Fig. 7. Length dependence of target strength for 10 fish species at 50, 75, 120 and 200 kHz The fine line is the best fit regression of TS on fish length and the thick line is the standard regression.

a 및 체장변환계수 *b*는 50 kHz에서 각각 a=26.16, b=-79.12 dB (r^2=0.51), 75 kHz에서 a=27.71, b=-84.60 dB (r^2=0.45), 120 kHz에서 a=24.92, b=-75.23 dB (r^2=0.44), 200 kHz에서 a=24.41, b=-80.79 dB (r^2=0.48)이었다. 또한, 이들 어종에 대한 음향반사강도를 체장의 2승에 근사시킨 경우, 그 체장변환계수 b_{20}은 50, 75, 120, 200 kHz의 주파수에서 각각 -69.64 dB (r^2=0.42), -72.30 dB (r^2=0.39), -66.39 dB (r^2=0.38), -73.97 dB (r^2=0.42)이었다. 특히, 이들 결과에서 75 kHz와 120 kHz의 경우, 부레가 없는 삼치(●)와 전형적인 측편형 어류인 병어(∗)의 데이터는 회귀직선으로부터 매우 독립적으로 떨어져 분포하는 특성을 나타내고 있는데, 이와 같은 음향산란특성은 어종 특유의 주파수 의존성에 기인하는 바가 크다고 판단되므로 보다 정량적인 분석이 요구된다. 또한, 현재 계량어군탐지기에서는 체장변환계수의 값으로서 반사강도가 체장에 2승에 비례한다는 가정하에서 구한 값을 주로 사용하고 있으나, Table 2와 Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 어종에 따라, 또한, 체형에 따라 체장의 2-4승의 범위내에서 반사강도가 크게 변동하고 있는 바, 앞으로 체형, 부레의 유무 및 형태, 또한, 어종 그룹별 반사강도의 체장 의존성에 대한 검토가 요구된다. 제주도 인근해역에서 채낚기에 의해 어획된 갈치를 빙장상태로 보장, 운송하여 어체 표면의 변형과 내부 조직의 손상이 없다고 판단되는 어체만을 대상으로 반사강도를 측정, 분석한 결과는 Fig. 8과 같다.

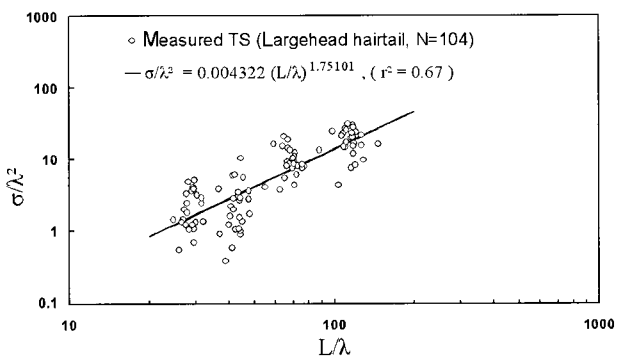

Fig. 8. Length dependence of target strength for largehead hairtail. The backscattering cross section (σ) is normalized to the square of wavelength (λ) and plotted against the fish length (L) to wavelength ratio.

갈치의 반사강도를 측정할 때, 체장이 매우 크고, 긴 측편형의 형태학적 특성 때문에 체장에 비례하는 음향산란신호가 어체 전부위에서 생성되기 위해서는 어체가 완전히 송수파기의 sound beam내에 수용되어야 한다. 현재까지 실험수조에서 갈치에 대한 반사강도 측정이 어려웠던 이유는 바로 이 점 때문이다. 여기서는 이 문제를 해결하기 위해 실험수조에서의 잔향, 송수파기의 side lobe 및 수신기 잡음 등의 영향을 고려하여 어체의 현수 깊이를 275 cm 이상으로 설정하고, 이 깊이에서 송수파기의 -3 dB 지향각에 대한 탐지영역의 폭이 110 cm 이상이 확보될 수 있는 진동자를 주문제작하여 사용하였다. 갈치의 유영 패턴은 서식해역이나 행동습성에 따라 수직이나 수평 자세로 변하지만(Kawamura and Ohashi, 1988), 여기서는 수평유영자세를 가정하여 반사강도를 측정하였다.

따라서, Fig. 8에서는 주파수별 및 어종별 반사강도의 체장 의존성을 종합적으로 분석, 고찰하기 위해 체장(L)과 파장(λ)의 비(L/λ)와 음향산란단면적(σ)과 파장의 2승(λ^2)의 비(σ/λ^2)에 대한 실험적인 관계를 유도함으로써, 어류 반사강도의 주파수 및 체장 의존성을 서로 결합시켜 파악하고자 하였다(Love, 1971).

Fig. 8에서 갈치 104마리에 대한 L/λ의 범위는 24.67-146.67 이었고, σ/λ^2의 범위는 0.37-30.61이었는데, 이들 L/λ과 σ/λ^2의 관계에 대한 회귀분석을 행한 결과,

$$\sigma/\lambda^2 = 0.004322\ (L/\lambda)^{1.75101}$$

의 회귀식을 얻었다(r^2=0.67). 이 식의 양변에 대수의 10배를 취하여 정리하면,

$$TS = 17.51\ \mathrm{Log}(L) + 2.49\ \mathrm{Log}(\lambda) - 34.64$$

으로 변형된다. 즉, 이 식은 갈치 반사강도의 체장 및 주파수(파장) 의존성을 동시에 나타내는 실험식이고, 이 식으로부터 사용 주파수(파장)에 대한 임의 체장의 갈치 반사강도를 추정하는 것이 가능하다.

반사강도, 체장 및 주파수의 상호 의존성

고등어, 부세, 병어, 전갱이, 삼치, 말쥐치, 꼼치, 전어, 참돔, 청어 등 10개 어종, 총 602 마리에 대한 반사강도 데이터를 대상으로 주파수별 및 어종별 반사강도의 체장 의존성을 종합적으로 분석, 고찰하였는 데, 이들 모든 어류에 대한 체장과 파장의 비 (L/λ)와 음향산란단면적과 파장의 2승의 비 (σ/λ^2)의 선형성에 대한 회귀분석의 결과는 Fig. 9와 같다.

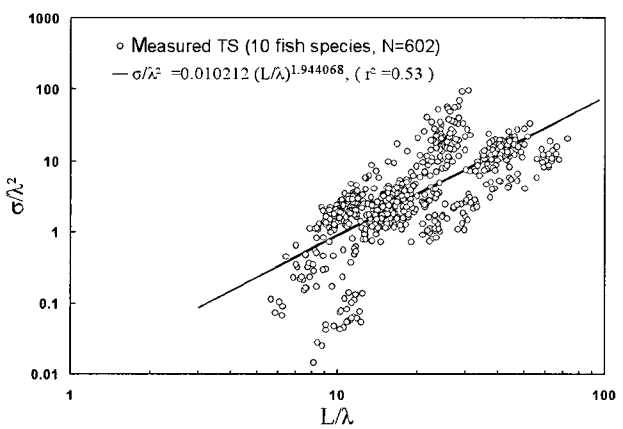

Fig. 9. Length dependence of target strength for 10 fish species: chub mackerel, silver pomfret, large yellow croaker, spotted mackerel, Japanese horse mackerel, black scraper, red seabream, Pacific herring, konoshiro gizzard shad and snailfish. The backscattering cross section (σ) is normalized to the square of wavelength (λ) and plotted against the fish length (L) to wavelength ratio.

Fig. 9에서 총 602마리에 대한 L/λ의 범위는 5.63-72.67, 또한, σ/λ^2의 범위는 0.014-96.6이었는데, 이들 L/λ과 σ/λ^2의 사이에는

$$\sigma/\lambda^2 = 0.010212\ (L/\lambda)^{1.944068}$$

의 회귀식이 성립하였다(r^2=0.53). 이 식의 양변에 대수의 10배를 취하여 정리하면,

$$TS = 19.44\ \mathrm{Log}(L) + 0.56\ \mathrm{Log}(\lambda) - 30.9$$

으로 변형된다. 즉, 이 식은 10개 어종에 대한 체장 및 주파수(파장) 의존성을 동시에 나타내는 실험식으로써, 이 식을 응용하면 한반도 주변수역에 분포, 서식하는 대상어종의 반사강도를 추정할 수 있다.

L/λ의 변화에 따라 어류 반사강도는 매우 불규칙한 변동을 나타내지만, 전반적으로 어류의 체장이 증가하거나 주파수가 높아짐에 따라, 즉 L/λ가 증가함에 따라, 어류의 반사강도, 즉 σ/λ^2는 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 주파수가 높아질수록 반사강도가 증가하는 현상은 다른 연구자들에 의해서도 보고되고 있다(Love, 1971; Goddard and Welsby, 1986). 또한, L/λ과 σ/λ^2의 선형성은 어류의 형태학적 형상에 따라서도 큰 변화를 나타내기 때문에 앞으로 고등어와 같은 방추형, 말쥐치나 병어와 같은 측편형, 칼치와 같은 whiptail형 등에 대한 주파수 및 체장 의존성에 대한 실험적 연구가 요구된다(MacClatchie et al., 2003).

본 연구에서 구축된 어종별, 주파수별 반사강도의 체장 의존성에 관한 데이터 뱅크는 현재 우리나라에서 개발중에 있는 저가용 체장어군탐지기의 고도화에 관한 연구에 실용적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, 어류의 체장추정에 관한 신뢰도를 더욱 향상시키기 위해서는 앞으로 더 많은 반복적인 실험과, 특히, 활어를 대상으로 한 현장 실험이 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00012-0) 지원으로 수행되었습니다. 본 연구를 수행하는 동안 여러 가지 어려운 조건에서도 실험에 적극적으로 참여해준 이유원 박사, 많은 대학원생 및 학부생 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

Dahl, P.H. and O.A. Mathisen. 1983. Measurement of fish target strength and associated directivity at high frequencies. J. Acoust. Soc. Am., 73, 1205-1211.

Foote, K.G. 1980. Averaging of fish target strength functions. J. Acoust. Soc. Am., 67, 504-515.

Foote, K.G., A. Aglen and O. Nakken. 1986. Measurement of fish target strength with split-beam echo sounder. J. Acoust. Soc. Am., 80, 612-621.

Foote, K.G. and D.I. Francis. 2002. Comparing Kirchhoff-approximation and boundary-element models for computing gadoid target strenths. J. Acoust. Soc. Am., 111, 1644-1654.

Gauthier, S. and G.A. Rose. 2001. Target strength of encaged Atlantic redfish (*Sebastes* spp.). ICES J. Mar. Sci., 58, 562-568.

Gawamura, G. and S. Ohashi. 1988. The habit of cutlassfish as inferred from the retina. Nippon Suisan Gakkaishi, 15, 889.

Goddard, G.C. and V.G. Welsby. 1986. The acoustic target strength of live fish. J. Cons. Int. Exlor. Mer., 42, 197-211.

Kang, H.Y. and D.J. Lee. 2003. Fish length dependence of acoustic target strength for large yellow croaker. Bull. Kor. Soc. Fish. Technol., 39, 239-248.

Kang, D.H., D.J. Hwang, T. Mukai, K. Iida and K.H. Lee. 2004. Acoustic target strength of live Japanese common squid (*Todarodes pacifica*) for applying biomass estimation. J. Kor. Fish. Soc., 37, 345-353.

Kang, D.H., K. Sadayasu, T. Mukai, K. Iida, D.J. Hwang, K. Sawada and K. Miyashita. 2004. Target strength estimation of black porgy *Acanthopagrus schlegeli* using acoustic measurements and a scattering model. Fish. Sci., 70, 819-828.

Lee, D.J. 2002. Distribution characteristics of fish schools in the Yellow Sea and the East China Sea in the spring of 1997. Bull. Kor. Soc. Fish. Technol., 38, 241-248.

Lee, D.J., J.K. Kim and H.H. Shin. 1998a. Investigations of the potential fisheries resources in the southern waters of Korea. - Biological composition of demersal trawl catches. Bull. Kor. Soc. Fish. Technol., 34, 241-258.

Lee, D.J., J.K. Kim and H.H. Shin. 1998b. Investigations of the potential fisheries resources in the southern waters of Korea. - Hydroacoustic investigations of abundance and distribution of fish. Bull. Kor. Soc. Fish. Technol., 34, 259-273.

Lee, D.J. and W.W. Lee. 1996. Hydroacoustic investigation of demersal fisheries resources in the southern area of the Cheju island, Korea. - Acoustical estimation of fish density and distribution. Bull. Kor. Soc. Fish. Technol., 32, 266-272.

Love, R.H. 1971. Measurements of fish target strength: a review. Fish. Bull., 69, 703-715.

McClatchie, S., G.J. Macaulay and R.F. Coombs. 2003. A requiem for the use of 20 $\log_{10}$ length for acoustic target strength with special reference to deep-sea fishes. ICES J. Mar. Sci., 60, 419-428.

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.

2005년 7월 1일 접수
2005년 8월 27일 수리