

KRM 모델을 이용한 제주바다목장 해역 주요 우점종의 음향반사강도 추정

이승종 · 이유원^{1*} · 김주일² · 오택윤³ · 황보규⁴ · 김병엽 · 이경훈⁵

국립수산과학원 남서해수산연구소 아열대수산연구센터,

¹부경대학교 해양생산시스템관리학부, ²국립수산과학원 남동해수산연구소 자원관리과,
³국립수산과학원 자원관리과, ⁴부경대학교 해양산업개발연구소, ⁵국립수산과학원 시스템공학과

Target strength estimation of dominant species in marine ranching ground of Jeju coastal water by KRM model

Seung-Jong LEE, Yoo-Won LEE^{1*}, Joo-Il KIM², Taeg-Yun OH³, Bo-Kyu HWANG⁴,
Byung-Yeob KIM and Kyoung-Hoon LEE⁵

*Subtropical Fisheries research center, Southwest Sea Fisheries Research Institute,
National Fisheries Research and Development Institute, Jeju 690-192, Korea*

¹*Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

²*Fisheries Resources Management Division, Southeast Sea Fisheries Research Institute,
NFRDI, Busan 619-705, Korea*

³*Fisheries Resources Management Division, NFRDI, Busan 619-705, Korea*

⁴*Research Center for Ocean Industry Development, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

⁵*Fisheries System Engineering Division, NFRDI, Busan 619-705, Korea*

The indirect target strength (TS) estimation method which uses the Kirchhoff ray mode model (KRM model) was discussed to apply for a biomass estimation in the water of mixed species. TS of 25 live scorpion fishes for 120kHz were measured by a tethered method and of others dominant 5 species in the marine ranching ground of Jeju coastal water including a scorpion fish were also estimated by KRM model. The measurement TS of scorpion fish well agreed with the theoretical values and the standard formula of scorpion fish was estimated as $TS_{120kHz} = 20\text{Log}(L) - 72.9$ ($r^2 = 0.67$). TS_{cm} values estimated on trial to each sample of dominant 5 species were from -69.3dB to -75.1dB at 120kHz and they were in the general range of swimbladder fish. It was clarified that TS by KRM model can be used to estimate fish biomass estimation by increasing a sample number and is more effective under the condition that there is rare TS information for inhabiting species in mixed-species area.

Keywords: Target strength, Dominant species, Kirchhoff ray mode model, Marine ranching ground

*Corresponding author: yoowons@yahoo.co.kr, Tel: 82-51-629-5880, Fax: 82-51-629-5885

서 론

우리나라 연근해 어업은 한·일, 한·중 어업 협정의 체결로 인한 어장 축소 및 해양 환경오염에 따른 수산자원의 감소 등으로 큰 어려움에 직면해 있다. 이와 같은 어려움 극복하기 위해 정부는 수산자원의 합리적이고 지속적인 이용을 위하여 1999년부터 고등어, 전갱이, 정어리 및 붉은 대게의 4개 어종에 대하여 총허용어획량(total allowable catch: TAC)을 시범 실시하기 시작하여 2010년에는 11개 어종, 41만여 톤에 대하여 확대 실시하고 있다.

수산자원의 지속적인 이용을 위해서는 수산자원의 현존량을 파악하는 것이 중요하고, 특히, 우리나라와 같이 수심 종이 혼재되어 있는 상태에서는 직접 조사법인 트롤을 이용한 어획조사에 크게 의존하고 있다. 트롤 조사는 수산자원의 종 조성을 명확하게 규명할 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 조사에 소요되는 시간이 많아 다수의 조사 정점을 설정할 수 없는 시간의 제약 때문에 조사하고자 하는 해역 전체에 대한 수산자원의 분포 특성을 보다 정량적으로 추정하는 데에는 그 한계를 나타내고 있다(Kim, 1991). 이에 반해 계량어군탐지기를 이용한 어류자원의 직접적 추정기법은 공간적인 한계를 극복할 수 있는 기술로서 수산선진국뿐만 아니라 동남아시아 국가에서도 음향기술을 이용한 현존량의 정기적인 조사를 수행하고 있다.

음향자료를 생물의 현존량으로 변환하기 위해서는 대상종의 음향반사강도(target strength: TS) 자료가 필요한데, 우리나라 해역과 같이 많은 어종이 혼재하여 분포하는 해역에서는 분포하는 어종만큼 많은 TS 자료가 필요하나, 현재 일부 상업종에 대한 TS 자료만 있을 뿐 측정자료가 부족한 실정이다. TS를 추정하는 방법은 현수법, 케이지법, 및 스프리트빔 등을 이용하여 자유 유영상태에서 측정하는 직접 측정법과 이론모형을 이용하는 간접적인 추정방법으로 대별할 수 있다(Simmonds and MacLennan, 2005).

우리나라 주변해역에서 음향을 이용한 현존량 조사를 위하여 TS 측정은 50, 75, 120, 200kHz를 이용하여 고등어, 전갱이 등 주요 상업종 15 어종에 대하여 측정, 데이터 뱅크를 구축하였으며(Hwangbo et al., 2009; Lee, 2005; Lee and Shin, 2005; Moon et al., 2006), Oh and Ahn (2001)은 제주해역에 주로 서식하는 돌돔과 독가시치를 측정하였고, Kang and Hwang (2003)은 38, 120, 200kHz를 이용하여 통영 바다목장 대상종인 조피볼락 및 참돔을 측정하였고, Kang et al. (2005, 2009)은 살오징어와 멸치에 대하여 측정하였다.

이와 같이, 음향을 이용한 현존량 추정을 위해서는 각 어종에 대한 TS 실측은 필요 불가결하지만, 수심 종에 대하여 계량어군탐지기에서 현존량 추정에 활용하고 있는 38, 70, 120, 200kHz 주파수에 대한 TS 측정만으로도 많은 시간이 소요된다. 이에 반하여, 음향산란 이론모형을 이용한 간접적인 추정방법은 실측치 검증에 주로 사용되고 있으나, 복수의 주파수에 대하여 TS를 추정할 수 있으며, 복수의 서식어종들에 대한 음향산란 특성을 빠르게 검토할 수 있기 때문에 대상해역에 서식하는 많은 어종에 대하여 음향산란 특성을 신속하게 파악할 수 있으므로 우리나라와 같은 해역에서는 적극적으로 활용할 필요가 있다.

그래서 본 연구에서는 제주도 서부해역에 조성되고 있는 바다목장에 서식하는 주요 우점종 5종에 대하여 음향산란 이론모형을 이용하여 추정하고, 그 중 일부 종에 대해서는 활어상태로 현수하여 TS를 실측, 비교함으로써 음향산란 이론모형을 이용한 간접측정법의 이용 가능성에 대하여 고찰하였다.

재료 및 방법

음향산란이론모형

우점 어류의 TS 추정을 위하여 Kirchhoff-ray mode model (Clay and Horne, 1994; 이하 KRM 모델)을 이용하였다. KRM 모델은 어류의 체형과 부레를 잘게 절단된 원통으로 근사하고, 이들 각

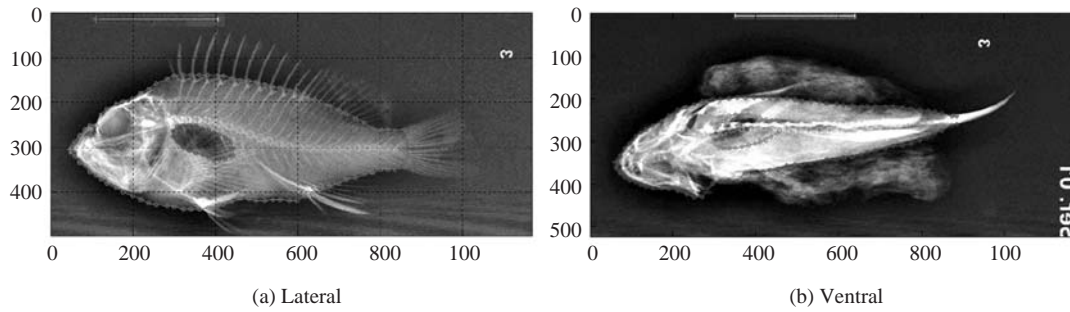


Fig. 1. Example of digitized and reconstructed shape of a fish body and a swim bladder.

체적요소로부터 음향산란성분의 합을 구하여 음향산란을 추정한다. 어체의 몸체에 의한 음향산란진폭(L_{body})은 다음 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$L_{body} = f(f_r, \theta_{tilt}, S_b, \rho_w, \rho_b, c_w, c_b) \quad (1)$$

여기서, f_r 는 주파수, θ_{tilt} 는 체축과 입사각 사이의 각도, S_b 는 반원통형으로 근사한 어체의 체형, ρ_w 는 매질(해수)의 밀도, ρ_b 는 어체의 밀도, c_w 는 매질(해수)의 음속, c_b 는 어체의 음속이다. 그리고, 부레에 의한 음향산란진폭($L_{bladder}$)은 식(2)와 같다.

$$L_{bladder} = f(f_r, \theta_{tilt}, S_{sb}, \rho_b, \rho_{sb}, c_b, c_{sb}) \quad (2)$$

여기서, S_{sb} 는 원통형으로 근사한 부레의 형태, ρ_{sb} 는 부레 내의 밀도, c_{sb} 는 부레 내의 음속이다. 따라서, 어류 몸체와 부레에 의한 음향산란, 즉 어류 전체에 의한 음향산란진폭(L_{fish})은

$$L_{fish} = L_{body} + L_{bladder} \quad (3)$$

으로 구할 수 있으며, 와의 관계는 식(4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$TS = 10 \log_{10} |L|^2 \quad (4)$$

모델파라미터의 추정

KRM 모델을 이용하여 TS를 추정하기 위해서는 어류의 체형자료와 부레형태의 자료를 추출해야 한다. 그래서 제주 서부해역에 조성되고 있는 바다목장해역에서 통발 등에 의해 어획된 활

어상태의 썸뱅이, 참돔, 호박돔, 쥐치, 얼랭이 5종의 샘플을 수중의 자연상태와 가까운 형태를 가지고 냉동될 수 있도록, 드라이아이스와 알콜을 이용하여 급속냉동한 다음, 샘플의 옆방향과 배면방향을 X선으로 촬영하였다. 촬영된 화상은 Fig. 1과 같이 컴퓨터 디지털링을 통하여, 몸체와 부레의 체형좌표를 추출하였다.

음향반사강도 측정시스템의 구성

음향반사강도 실측을 위한 시스템 구성도를 Fig. 2에 나타내었다. TS 측정 실험은 2009년 8월 6 - 8일에 제주대학교 해양과환경연구소 내의 실내수조에서 실시하였다. 수조는 8각 형태의 가로×세로×높이가 각각 5m×5m×3m 대형

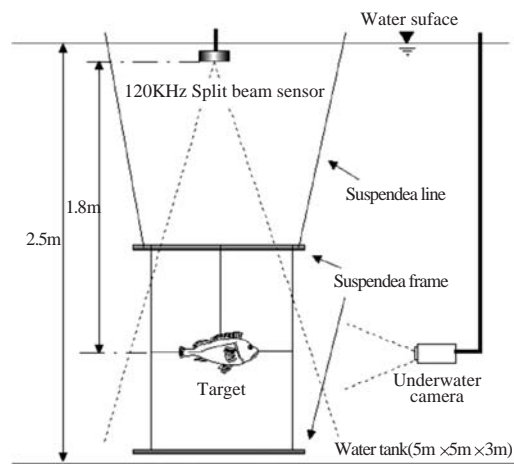
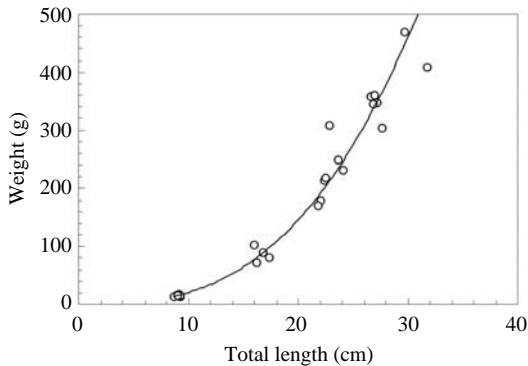


Fig. 2. System configuration to measure target strength of scorpion fish.

Table 1. Specification and parameters of quantitative echosounder for target strength measurement of scorpion fish

Items	Specification
Beam type / Frequency	Split / 120kHz
Beam width(- 3dB)	7.1°
Pulse length	0.256msec
Ping interval	0.8sec
Transmitted power	50W

**Fig. 3. Total length and body weight of individual scorpion fish used in the experiment.**

해수수조로서, 트랜듀서는 수조 상부의 크레인을 이용하여, 수면 하 약 20cm에 수직방향으로 현수하였다. 대상어류를 음향 빔의 가운데에 현수하기 위하여, 길이 약 50cm, 외경이 0.8cm인 스텐제질의 프레임 2개를 사용하였다. 이 2개의 프레임을 모노필라멘트로 연결한 다음, 두 모노필라멘트의 가운데 지점과 상부 파이프의 중심 부분에서 낚시 바늘이 있는 현수줄을 연결하여 어체에 낚시 바늘을 걸어 프레임의 중심에서 제한된 유영행동이 이루어지도록 하였다.

실험에 사용된 음향시스템은 스프리트 빔 방식의 120kHz 계량어군탐지기 (EY60, Simrad Co.)로서, 실험 시 시스템의 파라미터 설정은 Table 1과 같고, 대상어류의 유영행동과 자세를 관찰하기 위하여 적외선 수중카메라를 설치하여 측정시의 행동을 관찰하였다. 이론모델과의 비교를 위하여 실험어는 제주해역에서 어획한 쏨뱅이를 이용하였는데, 전장 및 체중범위는 Fig. 3과 같이 8.7 - 31.8cm, 12.6 - 470.0g이고, 그

평균 전장 및 체중은 19.4cm, 184.8g으로 총 25개체에 대하여 측정하였다.

결과 및 고찰

제주바다목장 해역의 주요 어종, 쏨뱅이 (*Sebastes marmoratus*), 참돔 (*Chrysophrys major*), 호박돔 (*Choerodon azurio*), 쥐치 (*Stephanolepis cirrhifer*), 황놀래기 (*Pseudolabrus japonicus*) 5개종의 X선 촬영, X선 영상으로부터 디지털이징하여 구한 3차원 체형과 부레 및 어류 현존량추정에 주로 사용되는 38kHz와 120kHz에 대한 각 샘플의 음향산란패턴은 Fig. 4와 같다.

Fig. 4의 (a)는 X선 옆방향 촬영으로 모든 어종이 체형과 부레가 선명하게 나타났으나, (b)의 배면방향 촬영에서는 체고가 높은 쥐치와 같은 어종에 있어서는 주 음향산란부분인 부레가 흐리게 나타났다.

Fig. 4의 (d)는 38kHz와 120kHz에 대한 음향산란패턴을 나타낸 것으로서, 부레의 형태에 따라 어종별로 차이를 보였다. 쏨뱅이의 경우 부레의 길이가 짧고 작은 반면, 돔과 호박돔의 경우 부레의 길이에 상대적으로 길고 큰 것으로 나타났다. 황놀래기의 경우는 다른 어종에 비해 상하방향으로 길이가 길었다. 최대 TS값을 나타내는 자세 각은 등방향 (90°)을 기준으로 -15°내에 위치하였는데, 이것은 부레의 축과 체축이 이루는 각도차와 부레의 형태에 의한 것으로 어종별로 다소 차이를 나타내었다.

한편, 쥐치의 경우 체고가 높고 체폭이 좁아 배면방향으로 촬영한 영상에서 부레의 형태가 명확하지 않았는데, 이러한 어종에 대해서는 배면 촬영시 몸통의 상부를 절단 등의 방법을 통하여 영상을 촬영할 필요가 있을 것으로 판단된다. 음향산란 이론모델에 의한 대상어의 음향산란 특성 추정시, 유포어의 경우 음향산란 진폭의 약 90%가 부레에 의하여 생성되므로, X선 촬영에서부터 디지털이징까지 세심한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

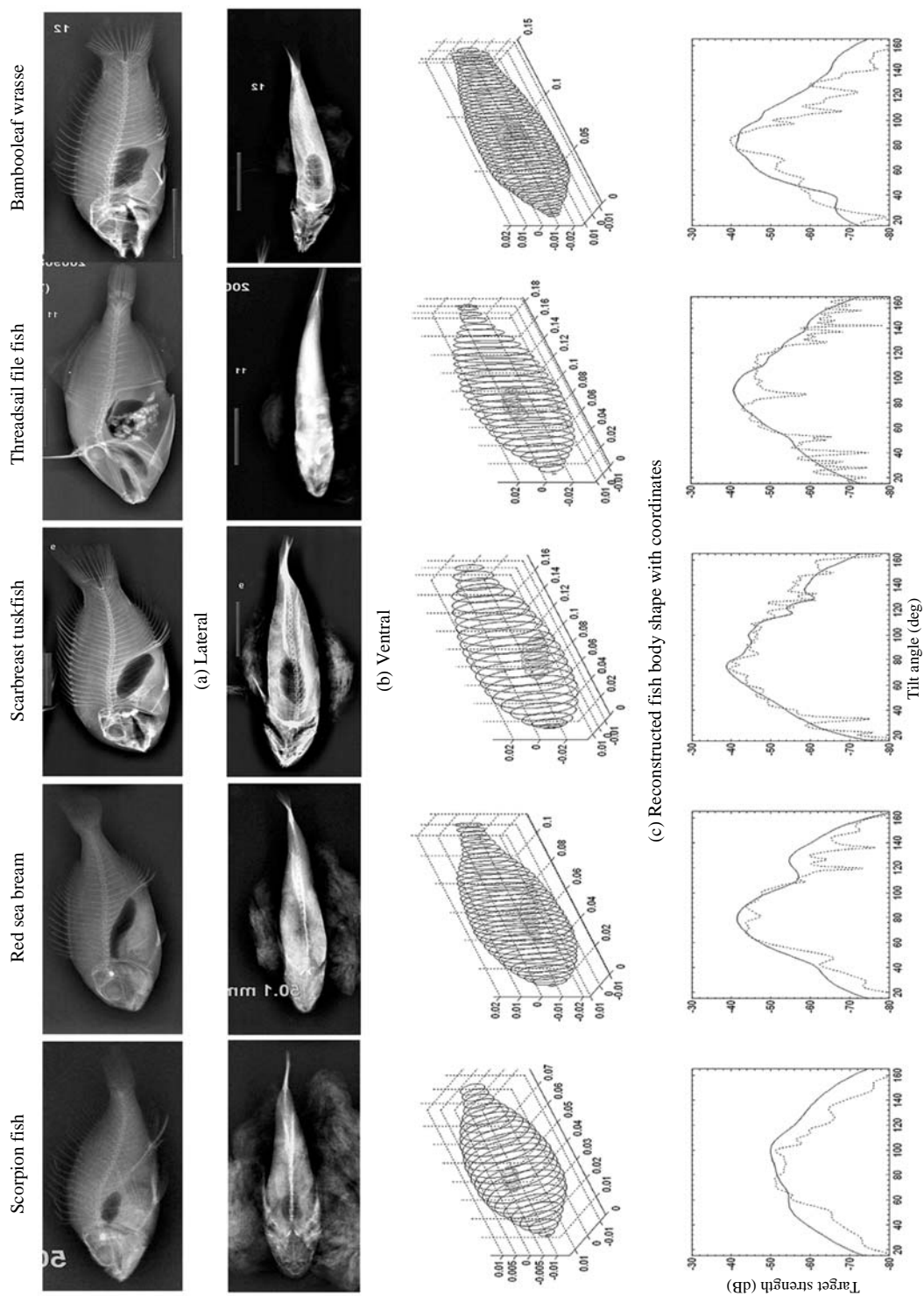


Fig. 4. Estimated target strength patterns of five main species in marine ranching of Jeju coastal water.

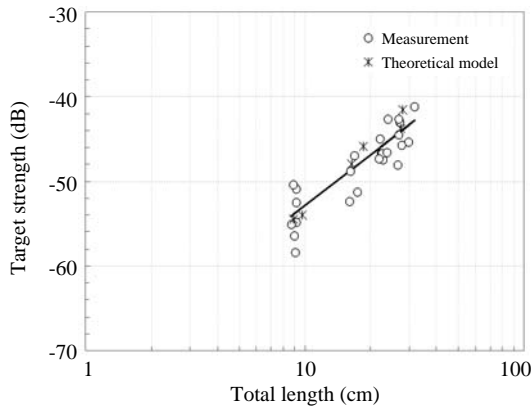


Fig. 5. Comparison of normalized target strengths (TScm) obtained by measurement and theoretical model. Orientation distribution is assumed to be (-5, 15) in theoretical model.

또한, 부레의 형태도 체고방향으로 길고 폭이 매우 좁기 때문에, 이를 평균하여 평균원통반경으로 근사하는 KRM 모델에서는 다소 차이를 나타낼 것으로 판단된다.

음향산란 이론모델과 실측치로부터 추정 한 썸뱅이의 평균 TS를 Fig. 5에 나타내었다. 이론모델의 평균 TS는 유영자세각 분포를 평균이 -5, 표준편차가 15인 확률밀도함수로 가정하였다. 평균 TS의 이론모델 추정치와 실측치를 비교한 결과, 거의 유사한 값을 나타냄으로서 썸뱅이의 이론모델에 의한 TS 추정치가 유의함을 확인하였다. 실측치로부터 구한 평균 TS와 전장 사이의 관계식은 $TS = 20 \log(L) - 72.9$ ($R^2 = 0.673$)로 추정되었다.

제주바다목장 해역의 주요 어종들에 대하여 이론모델을 이용하여 시험적으로 추정 한 기준화 평균 TS는 Fig. 6과 같다. 참돔, 쥐치, 황놀래기, 호박돔에 대해서 이론모델을 통하여 검토한 결과, 120kHz에 대하여 -69.3 - -75.1dB 사이의 값을 나타내었으며, 38kHz가 120kHz에 비해 약 2dB 정도 높은 값을 나타내었다. 한편, 실험에 사용한 어종 중 실측 TS 실험이 이루어진 참돔의 경우 기준화 평균 TS는 38kHz에서 -66.8dB, 120kHz에서 -74.0dB이었다 (Kang and Hwang, 2003). 본

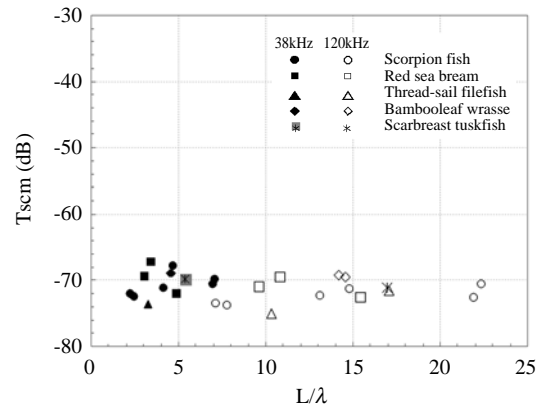


Fig. 6. Normalized averaged target strengths for each samples obtained by KRM model on trial. Orientation distribution is assumed to be (-5, 15).

실험에서 참돔은 3마리밖에 추정하지 않아서 기 보고된 결과와 직접 비교할 수는 없으나, 38kHz에서 -67.2 - -71.9dB, 120kHz에서 -69.5 - -72.5dB로 38kHz에서는 약 2dB 낮게 나타났고, 120kHz에서는 약 2dB 높게 나타났다. 금후 샘플 수를 증가시켜 각각 개체의 음향산란특성을 평균화한다면 보다 신뢰성 높은 기준화 평균 TS가 얻어질 것으로 판단된다.

Fig. 6에 나타낸 TScm 값은 단일 샘플에 대하여 추정한 값으로 어종을 대표할 수 있는 기준화 평균 TS값은 아니지만, 이들 어종의 음향산란특성은 일반적인 유표어의 산란특성을 가지는 것을 확인할 수 있었으며, 이론모델을 이용하여 음향산란특성이 유사한 어종을 판별하는 것이 가능하다는 것을 확인하였다.

한편, TS 측정 시 썸뱅이는 현수장치에 의해 구속된 위치에서 탈출하기 위하여, 수차례의 급격한 유영행동을 보이기도 하였으나, 곧 안정되어 보다 자연스러운 유영행동을 보였다. 이러한 급격한 탈출행동을 제외한 썸뱅이의 유영 자세 각 변동에 따른 TS빈도분포 범위는 약 -70 - -35dB이었으며, 체장이 짧은 개체의 경우 TS 변동폭이 약 15 - 20dB로 좁게 나타났는데, 이것은 체장이 큰 어류는 자세각 변동에 따른 TS 패턴

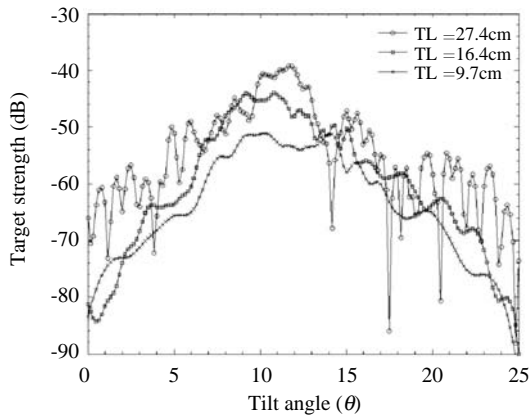


Fig. 7. Target strength patterns of three scorpion fishes estimated by theoretical model.

의 변동이 크고, 상대적으로 체장이 작은 어류는 90°에서 TS 패턴의 변동이 작기 때문에 판단된다(Fig. 7).

이상의 결과로부터 음향산란 이론모델을 이용하여 현존량 산출에 필요한 TS를 추정하는 것이 가능하다는 것을 확인하였다. 실제 우리나라 해역에서 수중음향을 이용한 조사를 수행하여 현존량 추정을 수행할 때, 많은 어종이 혼재하여 분포하기 때문에 고정도의 현존량을 산출하기 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하다. 조사해역 어류자원의 대부분을 차지하는 주요 어종들의 TS는 반드시 실측을 통하여 검증하여야 하며, 그 값을 적용하여 현존량을 산출해야 한다. 그러나, 주요 어종들의 음향산란특성을 빠르게 검토할 수 있다면, 유사한 음향산란특성을 가진 어종들을 통합하여 적용함으로써, TS 실측에 소요되는 시간을 줄임과 동시에 합리적인 수준에서의 현존량 추정이 가능할 것이다. 본 연구에서 나타낸 바와 같이 보다 많은 샘플을 이용하여, 개체특성에 따른 오차를 줄인다면 음향산란 이론모델을 이용하여 비교적 고정도의 현존량 산출을 위한 TS 체장 관계식을 도출하여 현존량 산출에 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

결론

본 연구는 제주도 서부해역에 조성되고 있는 바다목장에 서식하는 주요 우점종 5종에 대하여 음향산란 이론모델을 이용하여 TS를 추정하고, 그 중 일부 종에 대해서는 활어상태로 현수하여 TS를 실측, 비교함으로써 수중음향을 이용한 현존량 추정시 필요한 TS에 음향산란 이론모델을 이용한 간접측정법의 이용 가능성에 대하여 고찰하였다. 솜뱅이를 대상으로 추정된 음향산란 이론모델에 의한 TS의 추정치는 TS 실측치와 매우 유사한 결과를 나타내었고, 바다목장해역의 주요 어종인 참돔, 쥐치, 황놀래기, 호박돔에 대해서 이론모델을 통하여 검토한 결과, 120kHz에 대하여 -69.3 - -75.1dB 사이의 값을 나타내었으며, 38kHz가 120kHz에 비해 약 2dB 정도 높은 값을 나타내었다. 위의 결과로부터 음향산란 이론모델 추정을 위한 샘플 개체수를 증가시켜 개체의 음향산란특성을 평균화한다면 복수 어종이 혼재하고 서식종에 대한 실측 TS가 없는 해역에 있어서는 보다 정도 높은 현존량 추정이 가능할 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 2009년 국립수산물과학원 제주수산연구소에서 시행한 음향자원조사를 이용한 저층어류의 분포 및 자원량 추정에 관한 연구용역 사업(RP-2010-FR-009)에 의해 지원되었음.

참고문헌

- Clay, C.S. and J.K. Horne, 1994. Acoustic models of fish: the Atlantic (*Gadus morhua*). J. Acoust. Soc. Am., 96, 1661 - 1668.
- Hwangbo, Y., D.J. Lee, Y.W. Lee and K. Lee, 2009. The frequency of length dependence of the target strength of the largehead hairtail (*Trichiurus lepturus*) in Korean waters. Fish. Aqua. Sci., 12 (2), 152 - 161.
- Kang, D. and D. Hwang, 2003. Ex situ target strength of rockfish (*Sebastes schlegeli*) and red sea bream

- (*Pagrus major*) in the Northwest Pacific. ICES J. Mar. Sci., 60, 538 - 542.
- Kang, D., S. Cho, C. Lee, J.G. Myoung and J. Na, 2009. Ex situ target strength measurements of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) in the coastal Northwest Pacific. ICES J. Mar. Sci., 66, 1219 - 1224.
- Kang, D., T. Mukai, K. Iida, D. Hwang and J.G. Myoung, 2005. The influence of tilt angle on the acoustic target strength of the Japanese common squid (*Todarodes pacificus*). ICES J. Mar. Sci., 62 (4), 779 - 789.
- Kim, S., 1991. Assessment of fisheries resources. WooSung Publishing, p. 175.
- Lee, D.J., 2005. Fish length dependence of acoustic target strength for 12 dominant fish species caught in the Korean waters at 75kHz. J. Kor. Soc. Fish. Tech., 41 (4), 296 - 305.
- Lee, D.J. and H.I. Shin, 2005. Construction of a data bank for acoustic target strength with fish species, length and acoustic frequency for measuring fish size distribution. J. Kor. Fish. Soc., 38 (4), 265 - 275.
- Moon, J.H., D.J. Lee, H.I. Shin and Y.W. Lee, 2006. Fish length dependence of target strength for black rockfish, goldeye rockfish at 70kHz and 120kHz. J. Kor. Soc. Fish. Tech., 42 (1), 30 - 37.
- Oh, S.W. and J.Y. Ahn, 2001. Studies on dorsal aspect target strengths of rock bream, *Oplegnathus Fasciatus* and dusky spinefoot, *Siganus Fuscescens*. Bull. Kor. Soc. Fish. Tech., 37 (2), 133 - 139.
- Simmonds, E.J. and D.N. MacLennan, 2005. Fisheries acoustics. Blackwell, pp. 217 - 261.
-
- 2010년 4월 15일 접수
2010년 5월 4일 1차 수정
2010년 5월 6일 수리