

Article

남해 연안에 분포하는 해파리(*Aurelia aurita*, *Cyanea nozakii*)의
복수 개체에 의한 음향 표적강도 특성

강돈혁^{1*} · 김정훈² · 임선호³

¹한국해양연구원 해양생물자원연구부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

²한양대학교 과학기술대학 해양환경과학과
(426-791) 경기도 안산시 상록구 사3동 1271

³LIG넥스원(주), 연구개발본부 Maritime 연구센터
(446-912) 경기도 용인시 기흥구 마북동 148-1

Acoustic Target Strength Characteristics of Two Species of Multiple Jellyfishes,
Aurelia aurita and *Cyanea nozakii*, in the Southern Coast of Korea

Donhyug Kang^{1*}, Junghun Kim², and Seonho Lim³

¹Marine Living Resources Research Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Department of Environmental Marine Sciences, College of Science and Technology
Hanyang University, Ansan 426-791, Korea

³LIG Nex1, Maritime R&D Laboratory
Youngin 446-912, Korea

Abstract : Understanding the abundance and distribution of massive jellyfish is necessary to forecast where or when their blooms will happen. The acoustic technique is one of the most useful methods of obtaining information if the acoustic characteristics of the targets are known. This study was conducted to determine the acoustic target strength (TS, dB) of two jellyfish species, *Aurelia aurita* and *Cyanea nozakii*, in the southern coast of Korea. For the *ex situ* measurements, 120, 200, and 420 kHz split beam transducers were used, and jellyfish with various bell lengths were arranged to prepare multiple jellyfish. Under 2 vertical individuals, the mean TS for multiple *A. aurita* at 120, 200, and 420 kHz was -72.7, -71.7, and -68.2 dB, respectively. In the case of 5 vertical individuals, the mean TS of the species was -71.3, -68.2, and -62.0 dB. Finally, the mean TS of *C. nozakii* at 120, 200, and 200 kHz was -62.0, -60.3, and -58.2 dB under 2 individuals and -58.1, -57.4, and -54.0 dB under 4 individuals, respectively. For both species, higher numbers of jellyfish resulted in a higher TS. In addition, higher frequencies were associated with a higher TS for the same jellyfish. These TS results for two species can be used as essential data for the acoustic detection of jellyfish in an open ocean or coastal area.

Key words : acoustic target strength (TS), living multiple jellyfish, *Aurelia aurita*, *Cyanea nozakii*

1. 서 론

최근 전 세계적으로 해파리 대발생이 빈번하게 일어나고 있으며 이로 인해 해파리의 먹이 생물과 관련된 생태계 불균형을 일으키는 원인이 되고 있다(Mills 2001). 생태계 측면의 피해뿐만 아니라 수산자원 측면에서 동물플랑크톤 및 치어에 대한 해파리의 대량 섭식은 어류 자원의 먹이 감소로 인한 어획량 감소를 일으키고, 경제적으로는 해파리 대량 유입에 따른 연안 어망의 손실 피해를, 산업적으로는 연안에서 해수를 이용하는 임해 산업시설로 대량 유입되어 시설 운용에 직접적인 피해를 유발하고 있다(Brierley et al. 2001; Lynam et al. 2004; Kawahara et al. 2006).

세계적인 해파리의 피해는 우리나라, 일본, 중국 등 북서 태평양 인접국의 연안에서도 예외가 아니며(Yoon et al. 2008), 우리나라의 경우에도 해파리의 대량 발생에 따른 직·간접적인 피해액은 연간 약 3,000억 원에 이르고 있을 정도로 피해 정도가 급격히 증가하고 있다(국토해양부 2009).

해파리에 대한 연구는 대상 종의 생리, 생태, 이동, 분포, 양 추정 등의 연구가 생태학 및 수산 자원학 측면에서 다양하게 이루어지고 있다(Behrends and Schneider 1995; Brodeur et al. 1999; 강과 박 2003; Kinoshita et al. 2006; Yoon et al. 2008). 해파리의 생태계 특성 파악 및 피해를 예방하기 위한 이동 및 양 추정 연구는 대부분 선박을 이용한 목시 관측 혹은 어구를 사용하는 전통적인 조사 방법 사용으로 정성 분석 측면에서 장점을 가지고 있다(Purcell 2003; 국토해양부 2009). 그러나 목시 관측은 표층에 한정된 조사 면적 및 시각적인 제한 요소가 있으며, 어구를 이용한 조사는 인력 및 비용 측면의 고비용 구조 및 조사 지역의 한정성으로 인해 정량 분석 측면에는 개선이 요구되고 있다(Lynam et al. 2004).

정량 조사의 한계점을 극복하기 위한 시도로 어류 및 동물플랑크톤의 분포 및 양 추정 연구에 적용하고 있는 음향조사 기법을 최근 들어 해파리의 광역 생태 및 자원 조사에 활용하려는 연구가 시도되고 있다. 이러한 접근법을 통해 해파리의 광역 생태 및 정량 연구를 위한 음향 조사 방법의 적용성이 보고되고 있으며(Brierley et al. 2001; Båmstedt et al. 2003; Colombo et al. 2009), 향후 연안 및 외양에서 해파리 음향 조사의 다양한 가능성을 보여주고 있다.

해양생물의 음향 탐지를 위한 가장 중요한 요소는 생물 고유의 음향 반사 특성으로, 일반적으로 데시벨(dB) 형태의 음향 표적강도(acoustic target strength, TS) 혹은 반사 강도로 표현한다(MacLennan et al. 2002). 대상 생물의 물리적 크기 및 사용 주파수에 따라 고유 값을 갖는 TS 값

혹은 TS 함수는 수신 음향 자료를 이용한 종 분류 및 자원량 계산에서 핵심 변수로 이용되고 있다.

생태계 및 수산 자원학 측면에서 중요한 동물플랑크톤 및 어류의 음향 TS는 1970년 이후로 많은 종에 대한 음향 정보가 있으나(Simmonds and MacLennan 2005), 해파리의 경우 체내 조성에서 물이 차지하는 비율이 큰 이유로 음향 반사 특성이 매우 미약하거나 혹은 없는 것으로 잘 알려져 이에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다. 해파리에 대한 음향 TS 특성은 1990년 중반 이후 현재까지도 극소수의 측정 결과가 제시되고 있으며(Mutlu 1996; Brierley et al. 2004), 우리나라 주변 해역에 분포하는 해파리에 대한 실측 음향 TS 측정 또한 거의 이루어지지 않은 상태로 현재까지 일본에서 측정한 단 한 건의 실측 사례만 보고되었다(Hirose et al. 2009). 현재까지 제시되고 있는 해파리 음향 TS 자료를 이용한 해파리 생태 규명 및 자원량 추정 등을 위한 다양한 음향 기법의 활용은 매우 제한적이다. 향후 음향 기법을 활용한 다양한 해파리 연구를 위해서는 다양한 형태의 추가 실험을 통한 TS 결과를 필요로 하고 있다.

본 연구에서는 우리나라 남해 연안에 분포하는 해파리 생태 및 자원량 등 분포 연구 분야에 음향 기법 도입을 위한 필수적인 자료 구축을 위해 해파리의 음향 TS 특성을 파악하였다. 연구 대상 해파리는 우리나라 전 연안에서 가장 개체수가 많아 다양한 형태의 피해를 일으키고 있는 종으로 알려져 있는 보름달물 해파리(Moon jellyfish, *Aurelia aurita*)와 최근 중국 연안에서 개체수가 증가하여 우리나라 연안으로 이동하는 추세를 보이고 있는 유령 해파리(*Cyanea nozakii*)이다. 채집 해파리 개체수 및 크기 분포의 한정성으로 인해 크기에 따른 개개 해파리의 음향 특성 파악이 아닌 복수 해파리에 대한 음향 특성 파악에 초점을 맞추었다.

2. 재료 및 방법

대상 종과 시료 채집

2000년 이후 우리나라 연안에 해파리의 출현 빈도 및 개체수가 급증하는 추세였으나 실험을 실시한 2008년에는 해파리의 출현 밀도가 매우 낮아 해상에서 해파리를 발견하기가 매우 어려운 조건이었다. 따라서 해파리의 음향 TS 측정을 위해 2008년 하계-추계 시기에 남해 연안에서 채집 가능한 해파리 종을 대상으로 하였으며, 이때 채집 가능한 종은 보름달물 해파리(Moon jellyfish, *Aurelia aurita*)와 유령 해파리(*Cyanea nozakii*) 2종이었다.

음향 실험을 위한 수중 해파리의 채집, 보관 및 실험 설치 과정은 기포에 의한 실험의 오차가능성 때문에 매우 조심스러운 과정을 필요로 한다. 해파리 채집 방법은 수중

다이버의 스킨을 이용하는 방법과 대형 플라스틱 용기를 이용하는 방법을 사용하였다. 수중 다이버를 이용할 경우 다이버가 물속에서 원통형 비닐을 이용하였으며, 대형 플라스틱 용기는 소형 선박에서 직접 주변 해수와 함께 해파리를 담아 채집하였다. 이때 인위적인 영향으로 해파리 체내 혹은 표면에 수중 기포가 포집되는 영향을 없애기 위해 안정된 조건에서 채집을 실시하였다. 채집된 해파리들은 음향 실험 때 크기 및 외형적으로 양호한 개체를 선별하기 위하여 대형 가두리(3 m 가로×6 m 세로×4 m 깊이)에 살아있는 상태로 보관하였다.

복수 해파리의 음향 표적강도 측정을 위해 성체 보름달물 해파리 7개체, 성체 유령 해파리 5개체가 사용되었으며, 복수 해파리를 형성하기에 충분하지 않은 개체수를 보완하기 위하여 상태가 양호한 해파리를 중복으로 사용하였다. 실험에 사용된 해파리의 크기(공기중 우산 직경)와 습중량은 음향 실험이 끝난 후 각각 측정하였다.

실험에 사용된 보름달물해파리의 공기중 우산 직경 범위는 12~18 cm, 습중량은 81~244 g였으며, 유령 해파리의 우산 직경은 26~46 cm, 습중량은 1,985~8,765 g의 범위였다.

실험 장치 및 음향 시스템

복수 해파리의 음향 TS 측정은 경상남도 통영의 한국해양연구원 해양생물자원보존·연구 센터 내의 대형 해상 가두리에서 실시하였다. 사용된 음향 시스템은 복수의 음향 센서로 구성되어 있으며, 해수 체적 내에서 수신되는 신호의 합인 체적 음향산란강도(S_v , dB)와 개개 음향 산란체의 표적강도(TS, dB) 자료를 각 주파수 별로 동시에 수신할 수 있는 통합형 시스템이다(BioSonics 2005).

음향 실험에서 가장 중요한 요소는 대상 생물의 음향 신호에 영향을 주는 다른 생물의 효과를 제거하는 것이다. 복수 해파리의 음향 실험에서 소형 어류가 이동하기 불가능한 좁은 망목을 가진 대형 그물망(6 m×6 m×6 m)을 가두리에 설치하여 해파리 실험 과정에서 해파리 이외의 타 생물에 의한 음향 산란 효과를 제거하였으며, 그물망 내부에 음향 시스템을 설치하였다.

음향 실험을 위한 해파리는 대형 그물망에 보관한 해파리 가운데 활동이 능동적이며, 외관상 기포의 효과가 없는 양호한 해파리를 선택하였다. 선택된 복수의 해파리는 음향 산란이 탐지되지 않는 매우 가느다란 낚싯줄로 체내를 관통시키는 방법으로 센서면 아래의 수심 3.2~4.2 m 부근에 수직 혹은 수평 배열로 위치시켰다. 해파리 이동 및 수중 설치 과정에서 해파리가 공기에 노출되는 모든 가능성을 배제시키기 위해 일련의 모든 과정을 해수 속에서 실시하였다.

해상 가두리 조건에서 이루어지는 실험이므로 해류의 영향으로 해파리가 음향 축(Acoustic axis)에서 벗어나 탐지되는 음향 자료가 감소할 가능성을 방지하기 위하여 해파리 아래의 1.0~1.5 m 위치에 무거운 무게추를 매달아 해파리를 가능한 음향 축 부근으로 유도하여 TS를 측정하였다.

음향 특성 파악에서 대상 생물체의 전체적인 형상 혹은 유영 자세각은 음향 TS 값에서 중요한 변수이다. 따라서 모든 실험 기간 동안 복수 해파리의 수중 움직임을 알기 위하여 수중 카메라 자료를 음향 자료와 함께 시간 동기화시켜 저장하였다. 이때 수중 카메라는 음파의 영향을 받지 않는 측면에 설치하였으며 설치 수심은 해수면으로부터 약 3.5 m이었다(Fig. 1).

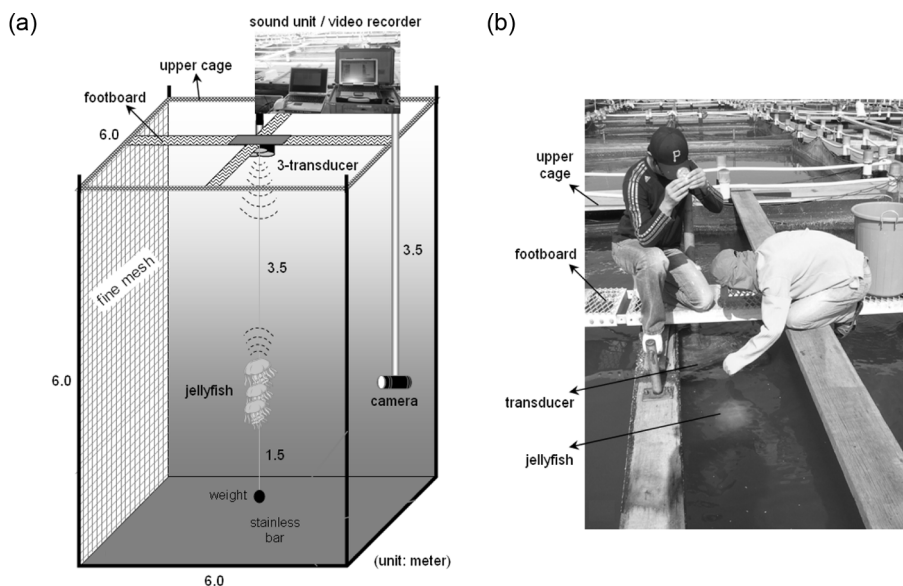


Fig. 1. Experimental scheme for acoustic target strength measurement of multiple jellyfish (a) and its real image (b)

Table 1. Acoustic parameters for jellyfish target strength measurements

Parameter	120 kHz	200 kHz	420 kHz
Beam type	split-beam	split-beam	split-beam
Source level (dB)	221.6	221.5	218.5
Pulse length (ms)	0.4	0.4	0.4
Ping rate (ping/s)	5	5	5
Beam width (°)	7.5	6.6	6.8
Sound speed (m/s)	1527.7	1527.7	1527.7
Absorption coeff. (dB/m)	0.041	0.075	0.133
TVG-function	40logR*	40logR*	40logR*

*R: distance (meter) from transducer face to acoustic target.

복수 해파리 실험에 사용된 주파수는 일반적으로 해파리 체내의 물리적 성질이 해수와 유사하여 저주파 대역에서 탐지가 어려울 거라는 점을 고려하여 해양생물 탐지를 위해 사용되는 표준 주파수 가운데 고주파 영역에 해당하는 120, 200, 420 kHz를 사용하였다. 각각의 주파수에 대한 음향 센서는 수신 신호의 위상 차이로부터 음 측에 대한 대상 생물의 위치와 센서의 빔 형태를 이용하여 최종적으로 보정된 음향 TS 측정이 가능한 분할 빔 센서(split-beam transducer) 형태이다(BioSonics 2005). 음향 센서는 실험 전에 장비 제작사가 제공하는 각각의 주파수에 대한 tungsten-carbide 보정구(calibration sphere)와 센서 보정 표준 절차를 따라 보정하였다. Table 1에 군체 해파리의 음향 TS를 측정하기 위한 각각의 주파수에 대한 음향 변수들을 요약하였다.

복수 해파리 구성

복수 해파리의 음향 TS를 측정하기 위해서 대상 해파리인 보름달물 해파리와 유령 해파리의 개체수에 따라 수평과 수직 형태 및 혼합 배열을 구성하였다. 채집 개체수가 상대적으로 많은 보름달물 해파리의 경우 총 3가지의 복수 형태 해파리 배열을, 개체수가 부족한 유령 해파리의 경우 총 2가지의 복수 형태 해파리 배열을 구성하였다(Fig. 2).

보름달물 해파리와 달리 유령 해파리는 자연 상태에서 공생 어류인 셋돔(Japanese butterfish, *Psenopsis anomala*) 치어와 함께 생존하고 있다. 2가지의 복수 유령 해파리 및 단일 개체에 대한 음향 TS 측정은 공생 어류를 제거한 조건에서 해파리 자체의 음향 TS를 측정하였으나, 자연 조건에서의 효과를 비교하기 위하여 공생 어류인 셋돔이 있는 조건에서의 음향 TS를 참고로 측정하였다.

음향 자료 처리

보정된 음향 센서를 사용한 복수 해파리에 의한 음향







TS experiment	case 1	case 2	case 3
Arranged jellyfish, <i>Aurelia aurita</i>			
Bell diameter in air (cm)	17.8 13.0	17.8 13.0	12.9 13.5 14.5 12.0 16.0
Arranged jellyfish, <i>Cyanea nozakii</i>			
Bell diameter in air (cm)	26.0 27.0	26.0 27.0 42.0 46.0	30.0 * symbiotic fishes

Fig. 2. Vertical or horizontal arrangements and bell diameter in air making multiple jellyfish for *Aurelia aurita* and *Cyanea nozakii*. When considering *Cyanea nozakii*, acoustic TS measurement due to symbiotic fish was added as a reference

TS 측정은 배열 해파리 상태에 따라 3.2~4.2 m 수심에서 24~52분 동안 진행되었으며, 각 주파수 별로는 8~22분 정도 자료를 저장하였다. Table 1에서 기술하였듯이 ping rate가 5 ping/sec이므로 각 주파수 별로 수신된 자료의 총 수는 약 2,400~6,600 ping 정도로 이들 자료에는 군체 해파리가 송신 빔폭(beam width)을 벗어나 있는 상태에서의 수신 신호도 포함되어 있으므로 빔폭 내의 음향 자료만을 이용해야만 한다.

각각의 주파수에 수신된 자료 가운데 해파리에 의한 신호를 분리하기 위하여 센서면과 해파리 사이의 거리 정보와 분할 빔의 수신 위상 차에 의한 음향 측과 해파리 사이의 분포 각도 정보를 이용하여 각각의 주파수 별로 빔폭 내에 위치한 자료만을 추출하였다.

복수 해파리의 음향 실험을 위한 시스템 제어, 신호 송신 및 자료 수신은 장비 제작사가 제공하는 응용 프로그램인 Visual acquisition 소프트웨어를, TS 자료 추출은 Visual analyzer 소프트웨어를 사용하였다(BioSonics 2005). 한편, 수신된 음향 에코그램의 후처리 및 해석을 위하여 수산음향 자료 처리용으로 개발된 응용 프로그램인 Echoview 소프트웨어를 보조용으로 사용하였다(SonarData 2000).

복수 해파리의 평균 음향 TS를 계산하기 위하여 데시벨 형태로 추출된 TS 자료들을 선형 값인 후방산란 단면적(backscattering cross-section, $\sigma_{bs}=10^{TS/10}$)으로 변환한 후, 평균 TS를 계산하였다.

$$\bar{\sigma}_{bs} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{bsi}, \quad TS_{mean} = 10 \cdot \log_{10}(\bar{\sigma}_{bs}) \quad (1)$$

한편, TS 관측 동안에 복수 해파리의 행동 특성을 나타

내는 수신 신호의 안정성을 파악하기 위한 변수(γ)를 계산하기 위하여 후방산란 길이(backscattering length, \mathcal{L}_{bs}) 값을 이용한 “concentrated backscattering cross section (σ_c)”과 “fluctuated backscattering cross section(σ_d)”의 비율($\gamma \equiv \sigma_c / \sigma_d$)을 이용하였다(Medwin and Clay 1988). 변수 γ 가 크면 TS 관측 시기에 음향 산란체인 해파리의 행동 특성이 안정됨을, 작으면 해파리의 행동 변화가 크다는 것을 의미한다. 일반적으로 음향 자료에서 γ 가 3.5 정도면 음향 산란체의 자세 변동이 활발하여 다양한 자세각을 가짐을 의미하며, γ 가 커질수록 산란체의 자세 변동이 상대적으로 안정됨을 의미한다. 각 변수의 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma_{bs} = |\mathcal{L}_{bs}|^2 \tag{2}$$

$$\sigma_c = \langle |\mathcal{L}_{bs}|^2 \rangle, \sigma_d = Var|\mathcal{L}_{bs}| \tag{3}$$

3. 결 과

음향 에코그램과 해파리 수중 영상의 예

Fig. 3은 복수 유령 해파리에 의한 음향 에코그램의 예로 200 kHz 음원에 대한 4개체로 형성한 해파리의 음향 신호 특성을 보여주고 있다. 수신 음향 에코그램에는 표층

에서 실험 준비된 해파리를 임의의 수심까지 하강시킨 후 해파리가 안정된 조건이 될 때까지의 음향 신호가 서로 구별되고 있다. 수신된 에코그램에서 하부의 그물망(약 5.5 m) 및 무게추(약 5.0 m)와 복수 해파리에 의한 신호(약 3.6 m)는 약 1.4 m의 거리를 두고 서로 뚜렷하게 분리되고 있음을 알 수 있다.

한편, 음향 관측과 동일 시간대에 임의의 수심에 존재하는 해파리 유무 및 형상을 파악하기 위한 수중 카메라 영상에서 실험 해파리는 뚜렷한 형태를 보여주고 있었으며, 체내를 관통한 미세 줄에 의해 음향 빔 근처에서 제한적으로 움직이는 모습을 나타내었다(Fig. 4).

보름달물 해파리의 음향 표적강도

복수 보름달물 해파리의 전체 측정 자료 수는 음향 빔 폭 내에 위치한 자료의 수, 관측 시간, 해파리 상태에 따라 다양하게 분포하였다. 120, 200, 420 kHz 음원에 대해 유효한 음향 자료 수는 각각의 TS 실험(case 1~3)에서 각각 281~913, 222~524, 235~650개이다.

Fig. 5는 420 kHz 음원에 대한 보름달물 해파리 5개체의 수직 배열 상태에서의 음향 TS 변동을 나타낸 결과이다. 최대 및 최소 TS는 각각 -56 dB, -71 dB로 TS의 최대 변화 폭은 약 15 dB이었으며 이때 평균 TS는 약

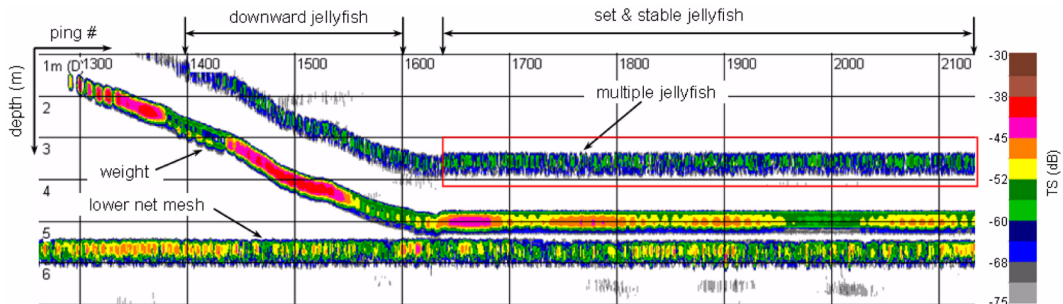


Fig. 3. Example of the representative vertical echogram of 4 multiple jellyfish, *Cyanea nozakii*, at 200 kHz (refer to case 2 in Fig. 2). The jellyfish were distributed at a depth of 3.6 m

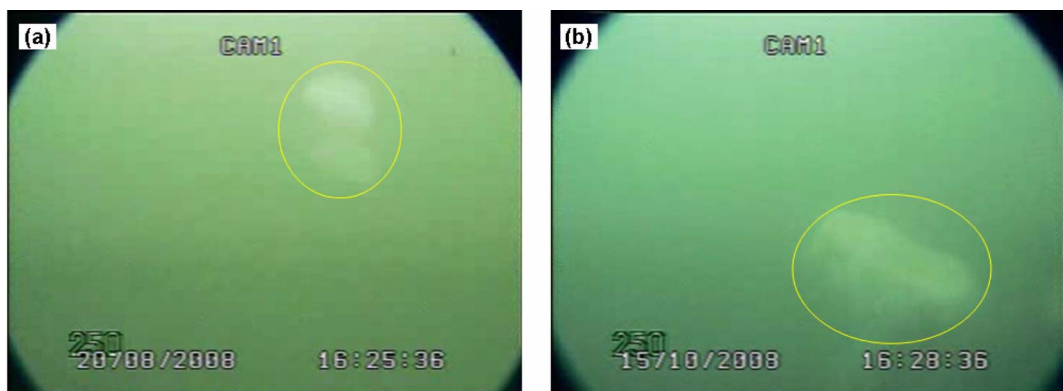


Fig. 4. Underwater photographs of multiple jellyfish. (a) *Aurelia aurita*, (b) *Cyanea nozakii*

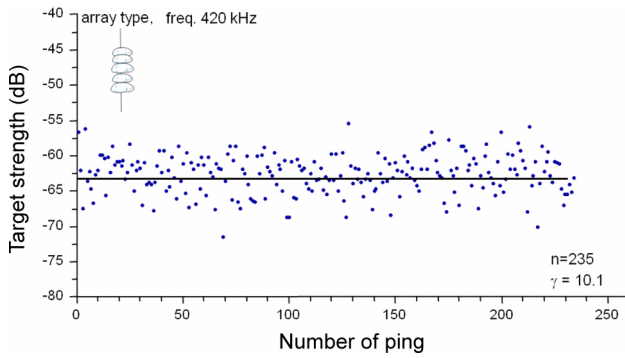


Fig. 5. Example of the target strength vs. the ping number of vertically distributed multiple *A. aurita* at 420 kHz. In this case, the mean target strength was about -62 dB

-62 dB였다. 이러한 변동 요인으로 음파에 대한 해파리의 유영 자세각의 변동을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 해파리보다 낮은 TS를 일으키는 미세줄을 이용하여 해파리 우산 증상을 관통하는 방법을 사용하였으며, 이로 인해 해파리의 다양한 자세각 변화는 제한되었다. 이러한 경향은 대상 해파리에 의한 수신 신호의 변동성을 나타내는 γ 값

이 10.1로 높게 나타나 음향 관측 기간 동안 해파리의 움직임이 매우 안정됨을 보여주고 있으므로 안정된 조건에서의 평균 TS를 의미한다.

120, 200, 420 kHz의 각 주파수에서 보름달물 해파리 2개체를 수직으로 배열한 상태의 평균 TS는 -72.7, -71.7, -68.2 dB로 주파수가 높아질수록 TS 또한 증가하는 경향이 나타나고 있다. 동일한 2개체를 수평으로 배열한 조건에서 평균 TS는 수직으로 배열한 상태보다 각각의 주파수에서 0.8, 2.5, 3.0 dB 높았으며, 이러한 원인은 수평 배열된 해파리에 의한 음향산란 단면적의 증가 때문이다. 개체수를 증가시킨 5개체에 대한 평균 TS 분포는 각각의 주파수에 대해 -71.3, -68.2, -62.0 dB로 2개체에 의한 평균 TS보다 높게 나타나 개체수 증가에 따른 음향 TS가 커지는 경향을 나타내었다(Fig. 6a).

음향 관측기간 동안 해파리의 움직임을 나타내는 변수인 γ 값의 변동은 3.9~11.2 사이였으며 평균적으로는 7.1이었다. 이러한 γ 값의 분포는 실험기간 동안 해파리의 수중 움직임이 상대적으로 안정적이었음을 보여주고 있다.

Table 2에 복수 보름달물 해파리에 대한 음향 TS 결과

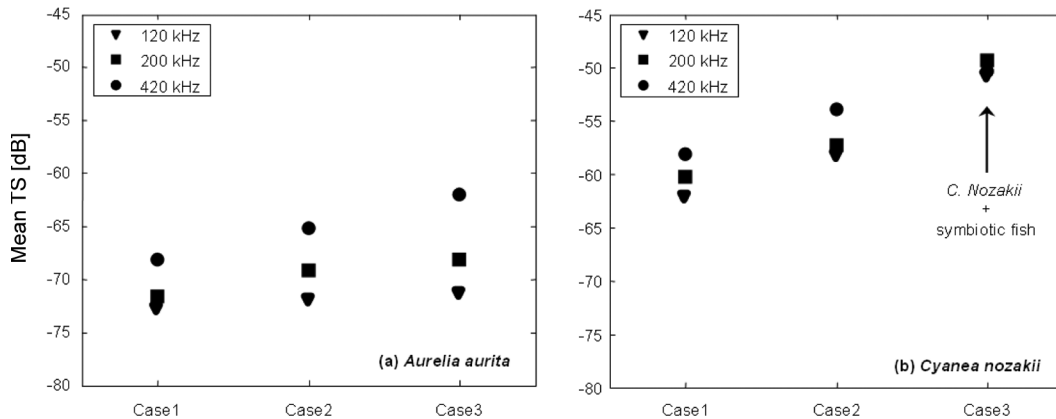


Fig. 6. The mean target strength for each experimental case (a) *Aurelia aurita*, (b) *Cyanea nozakii*

Table 2. Summary of acoustic target strength for multiple jellyfish, *A. aurita*, at each experimental case

Case	Frequency (kHz)	Number of data	Mean L_{bs} (m)	Mean TS (dB)	Coefficient of variance (%)	γ
1	120	281	2.18E-04	-72.7	35.2	8.1
	200	442	2.38E-04	-71.7	43.3	5.3
	420	597	3.73E-04	-68.2	29.9	11.2
2	120	913	2.34E-04	-71.9	43.5	5.3
	200	222	3.10E-04	-69.2	50.9	3.9
	420	650	5.15E-04	-65.2	37.4	7.2
3	120	369	2.56E-04	-71.3	37.2	7.2
	200	524	3.59E-04	-68.2	42.5	5.6
	420	235	7.56E-04	-62.0	31.6	10.1

를 요약하였다. 전체적으로 복수의 보름달물 해파리의 TS는 동일한 주파수일 경우, 개체수 증가에 따른 음향 산란 단면적 증가에 따라 평균 TS가 증가하는 개체수 종속성을 가지고 있다. 한편, 동일한 해파리 배열 조건에서는 고주파로 갈수록 음향 TS가 증가하는 주파수 종속 특성을 나타냈다.

유령 해파리의 음향 표적강도

복수 유령 해파리의 전체 측정 자료 가운데 120, 200, 420 kHz 음원에 대한 유효한 음향 자료 수는 각각의 TS 실험(case 1~2)에서 각각 806과 370, 739와 420, 744와 293개 이다. 자연 상태에서 유령 해파리와 공생하며 존재하는 공생 어류에 의한 TS 효과를 파악하기 위한 실험(case 3)의 자료 수는 각 주파수 별로 1209, 2619, 2082로 상대적으로 관측 자료 수가 많았다.

유령 해파리 2개체를 수평으로 배열한 조건에서의 TS는 120, 200, 420 kHz 주파수에서 각각 -62.0, -60.3, -58.2 dB로 고주파 음원에서 상대적으로 높은 TS를 보이고 있다. 개체수를 4개체로 증가했을 때 TS 값은 각각 -58.1, -57.4, -54.0 dB로 2개체의 TS 값보다 약 3~4 dB 높게 나타나 개체수 증가에 따른 TS 값의 증가 경향을 나타내었다. 동일한 조건에서 주파수에 따른 TS 분포는 고주파로 갈수록 TS 값이 높게 나타나 주파수 종속 특성을 나타내고 있다(Fig. 6b).

자연 상태에서 존재하는 공생 생물을 고려했을 때 각 주파수에 따른 TS 값은 -50.7, -49.3, -50.4 dB로 단일 개체임에도 불구하고 상대적으로 높은 TS 분포를 보여주고 있다. 높은 TS 값의 원인은 해파리 자체와 공생어류에 의한 음향 신호의 합으로 이러한 결과는 자연 상태에서 유령해파리의 음향 TS 값이 매우 클 수 있음을 의미한다.

음향 관측기간 동안 해파리의 움직임을 나타내는 변수인 γ 값의 변동은 3.9~7.1 사이였으며 평균적으로는 5.3이었다. 이러한 γ 값의 분포는 실험기간 동안 해파리의 수

중 움직임이 보름달물 해파리보다 상대적으로 활발했음을 보여주고 있다. 특히 공생어류와 함께 실시한 실험에서 γ 값은 3.0~4.2로 가장 낮은 분포를 보여 해파리의 활동성이 컸음을 의미하고 있다.

Table 3에 복수 유령 해파리 자체와 공생어류가 존재하는 유령 해파리에 대한 음향 TS 결과를 요약하였다. 전체적으로 복수의 유령 해파리의 TS는 동일한 주파수일 경우, 개체수 증가에 따라 음향 산란단면적 증가에 따른 평균 TS가 증가하는 개체수 종속성을, 동일한 해파리 배열 조건에서는 고주파로 갈수록 음향 TS가 증가하는 주파수 종속 특성을 나타냈다.

4. 고찰

최근 세계적으로 생태계 및 수산 자원학 측면에서 중요성이 부각되고 있는 해파리에 대한 연구 가운데 피해를 유발하는 해파리의 분포 및 이동을 파악하기 위한 탐지 분야의 연구가 활발히 진행되는 추세이다(Mutlu et al. 1994; Brodeur et al. 1999). 해파리의 이동, 시·공간 분포 및 양 추정 연구 등 해양에서 선박을 이용한 광역 연구는 고비용 구조로 인해 최근에는 해파리의 음향 특성을 이용하는 음향 탐지 방법이 제안되고 있다(Mutlu 1996; Brierley et al. 2001). 우리나라 연안에 유입되는 해파리의 조사는 목시 관측이 주된 방법이나 표층에 국한되는 조사 방법의 한계로 인해 수 층 전체에 분포하는 해파리 탐지를 위한 음향 탐지 방법이 필요한 시점이다(국토해양부 2009).

해파리 음향 탐지를 위한 음향 표적강도(acoustic target strength, TS) 특성 파악을 위한 연구는 1990년 중반 이후에 시작되어 현재까지도 매우 부족한 상황이다(Mutlu 1996; Hirose et al. 2009). 우리나라 해파리 음향 특성 연구는 2000년 초반에 노무라입깃 해파리를 시작으로 최근에 보름달물 해파리를 대상으로 진행되고 있으나(황두진

Table 3. Summary of acoustic target strength for multiple jellyfish, *Cyanea nozakii*, at each experimental case

Case	Frequency (kHz)	Number of data	Mean L_{bs} (m)	Mean TS (dB)	Coefficient of variance (%)	γ
1	120	806	7.22E-04	-62.0	46.1	4.7
	200	739	8.75E-04	-60.3	45.7	4.8
	420	744	1.10E-03	-58.2	50.7	3.9
2	120	370	1.20E-03	-58.1	36.4	7.1
	200	420	1.30E-03	-57.4	36.7	7.0
	420	293	1.80E-03	-54.0	45.5	5.0
3	120	1209	2.60E-03	-50.7	53.8	3.4
	200	2619	3.10E-03	-49.3	48.4	4.2
	420	2082	2.60E-03	-50.4	57.7	3.0

등 2003; 이 등 2008) 현장 조사에 활용하기에는 여전히 부족한 상황이다. 해파리는 자연 생태계에서 군체 형태로 존재하기 때문에(Magome et al. 2007) 개체 해파리의 음향 TS 이외에 군집을 이루는 복수 해파리의 음향 TS를 이해하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 해파리 시료 채집을 인위적으로 조절할 수 없는 한계로 인해 보름달물 해파리와 유령 해파리 개체수가 충분하지 않았다. 따라서 복수 해파리에 대한 음향 특성을 모두 파악하기에는 부족한 면이 있어 향후 이에 대한 추가 보완 실험이 필요하다. 개체수가 부족함에도 불구하고 현재까지의 실험 결과 2종의 해파리 음향 실험에서 보여주고 있는 TS는 군체를 이루는 개체수 종속성 및 주파수 종속성을 뚜렷하게 보여주고 있으며, 또한 서로 다른 종 사이의 음향 특성 차이를 보여주고 있다.

본 연구에서 사용된 복수 개의 보름달물 해파리에 대한 음향 TS 측정 연구 사례는 없었다. 따라서 간접적으로 비교하기 위하여 단일 개체의 보름달물 해파리를 대상으로 한 TS를 비교 분석하였다. 단일 해파리 개체를 이용한 TS는 지중해와 흑해가 인접한 해역에 분포하는 11.5, 15.5 cm의 우산 직경을 갖는 보름달물 해파리의 경우 200 kHz 음원에서 -62.5, -56.5 dB의 평균 TS를 갖는다고 보고하였다(Mutlu 1996). 이러한 평균 TS 값은 본 연구에서 측정된 동일한 주파수 대역의 복수 해파리 TS 값과는 차이를 보여주고 있다.

흑해에서 실시한 보름달물 해파리는 자유유영 상태로 실시한 실험이고, 본 연구에서는 해파리 우산을 미세줄로 관통시켜 해파리의 움직임에 제한하는 현수법을 사용한 차이점이 있다. 따라서 해파리의 운반 과정에서 공기 중에 노출되지 않은 조건이라면 음향 TS는 다양한 유영각을 가지는 흑해의 실험보다 음향 산란단면적의 차이로 인해 현수법에서 높게 나와야 한다.

실험에 사용한 해파리를 관통한 미세줄 자체의 TS는 -76~-78 dB로 해파리 TS에 영향을 주지 않았다. 따라서 흑해에서 실시한 개개 보름달물 해파리의 TS 값은 다양한 유영 자세각을 가진 것을 고려한다면 해파리 자체보다는 운반 과정에서 미세한 기포 등과 같은 다른 음향 산란체의 영향일 가능성이 있다. 우리나라 연안에서 현수법으로 실시된 8~22 cm의 우산길이를 가진 개개의 보름달물 해파리 TS 실험에서 200 kHz 음원에 대해 평균 TS는 -60.3~-70.6 dB로 모든 개체에서 흑해에서 실험한 TS 보다 낮은 값을 보여 이러한 가능성을 뒷받침하고 있다(한국해양연구원 2009). 보름달물 해파리의 낮은 물리적 특성(음속비 $h=1.0001$, 밀도비 $g=0.989$, Hirose et al. 2009)이 해수와 큰 차이를 보이지 않으므로 미세 기포와 같은 외적 요인이 없으면 TS 범위가 -55 dB까지 증가하기 어렵다. 따라서, 단일 개체의 보름달물 해파리의 TS는 낮은

것으로 예측할 수 있다.

보름달물 해파리의 경우 일부 TS 자료가 보고되고 있으나 유령 해파리의 경우 군체에 의한 TS 측정은 전혀 없고, 개체에 대한 실험만 한 차례에 걸쳐 2개체에 대해 실시되었다(Hirose et al. 2009). 공생어류를 제거하지 않은 조건에서 실시한 120 kHz 음원에 대해 평균 TS는 -48.6 dB(우산 직경 30 cm), -44.8 dB(우산 직경 40 cm)였다. 본 연구에서 공생어류를 제거한 상태로 측정된 복수 유령 해파리의 평균 TS는 120 kHz에서 -62.0, -58.1 dB로 이전 연구 결과에 비해 낮은 범위를 보였다. 그러나 공생어류가 있는 조건(Fig. 3의 case 3, 우산직경 30 cm)에서의 평균 TS 값은 -50.7 dB로 크지 않은 차이를 보였다.

공생어류 유무에 따라 변하는 TS 영향을 파악하기 위해 공생어류 자체의 TS를 독립적으로 측정하였다. 유령 해파리 혹은 노무라입깃 해파리와 공생하는 소형 어류인 셋돔(전장 8.0~6.6 cm)의 TS를 측정한 예비 결과에서 최대 TS는 -56~-52.4 dB, 평균 TS는 -61.0~-58.4 dB였다. 이러한 공생어류의 TS 분포 범위와 유령 해파리 자체의 TS의 합에 의해 자연 상태에서 공생어류와 공존하는 유령 해파리의 음향 TS 특성을 파악할 수 있을 것이다.

본 연구에서 사용된 유령 해파리에는 확인되지 않았으나 노무라입깃 해파리는 공생어류 이외에 매끈등꼬마새우(Medusa shrimp)와 같은 다량의 갑각류가 포함되어 있다. 따라서 해파리의 음향 특성을 고려할 때 해파리 자체 음향 특성 이외에 자연 상태에서의 음향 TS 특성 또한 파악해야 할 것이다. 현장 음향 측정 이외에 해파리 형상과 물리적 성질을 이용하는 음향 모델 접근법도 최근에 시도되고 있다(Monger et al. 1998; 이와 황 2009). 해파리 음향 특성을 파악하기 위한 다양한 실측 자료 확보 및 이론 모델 확립을 통한 다양한 방법론이 필요한 상황이다.

본 연구에서 실시한 복수 해파리의 음향 특성 결과는 지속적으로 필요한 해파리 음향 특성연구의 기초 자료로 활용 가능하며 이러한 자료의 확보는 향후 연근해의 해파리 음향 탐지를 위한 핵심 자료로 사용될 것이다.

5. 결 론

우리나라 연안에 분포하고 있는 해파리 가운데 보름달물 해파리(Moon jellyfish, *Aurelia aurita*)와 유령 해파리(*Cyanea nozakii*)의 음향 특성을 파악하기 위하여 복수의 해파리에 대한 음향 표적강도(target strength, TS)를 측정하였다. 음향 관측은 120, 200, 420 kHz의 3개의 주파수를 사용하였으며, 복수 해파리를 형성하기 위하여 보름달물 해파리는 3개의 형태를, 유령 해파리는 2개의 형태에 대해 음향 TS 관측을 실시하였다.

관측 결과, 복수 보름달물 해파리의 음향 TS는 120,

200, 420 kHz에서 2개체를 수직으로 배열한 상태에서는 -72.7, -71.7, -68.2 dB로 주파수가 높아질수록 TS 또한 증가하는 경향이 나타나고 있다. 동일한 2개체를 수평으로 배열한 조건에서는 수직으로 배열한 상태보다 각각의 주파수에서 0.8, 2.5, 3.0 dB 높았다. 개체수를 증가시킨 5개체에 대한 평균 TS 분포는 각각의 주파수에 대해 -71.3, -68.2, -62.0 dB로 2개체에 의한 평균 TS보다 높게 나타나 개체수 증가에 따른 음향 TS가 커지는 경향을 나타내었다.

유령 해파리의 경우 2개체를 수평으로 배열한 조건에서의 TS는 120, 200, 420 kHz 주파수에서 각각 -62.0, -60.3, -58.2 dB로 고주파 음원에서 상대적으로 높은 TS를 보이고 있었으며, 개체수를 4개체로 증가했을 때 TS 값은 각각 -58.1, -57.4, -54.0 dB로 2개체의 TS 값보다 약 3~4 dB 높게 나타나 개체수 증가에 따른 TS 값의 증가 경향을 나타내었다. 동일한 조건에서 주파수에 따른 TS 분포는 고주파로 갈수록 TS 값이 높게 나타나 주파수 종속 특성을 나타내고 있었다. 공생생물과 유령 해파리를 동시에 고려했을 때 각 주파수에 따른 TS 값은 -50.7, -49.3, -50.4 dB로 단일 개체임에도 불구하고 상대적으로 높은 TS 분포를 보여주고 있다.

본 연구에서 실시한 복수 해파리의 음향 특성 결과는 지속적으로 필요한 해파리 음향 특성연구의 기초 자료로 활용 가능하며 이러한 자료의 확보는 향후 연근해의 해파리 음향 탐지를 위한 핵심 자료로 사용될 것이다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원에서 수행하고 있는 “유비쿼터스 해양 유용/유해생물 관리기술 개발 (PE98474)”과 “통영 MRC를 기반으로 한 남해 연안 해양생물자원 증진 및 활용 연구 (PK07780)”의 지원을 받아 수행되었음. 본 연구를 위해 해파리 채집 및 현장 실험을 도와준 이영욱 부장님, 장석일님, 김미라님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

강영실, 박미선 (2003) 하계 한국 남해안 보름달물해파리 (Scyphozoa: Ulmariidae: *Aurelia aurita*)의 출현 및 먹이 섭취 습성. 한국해양학회지 「바다」 8:199-202

국토해양부 (2009) 유해해양생물 해파리 피해예방 기획연구 보고서. 국립수산물과학원, 225 p

이유원, 황보규 (2009) 유영행동에 따른 대형 해파리의 음향 산란 변동의 이론적 검토. 한국수산학회지 42:165-170

이창원, 강돈혁, 명정구 (2008) 보름달물해파리(*Aurelia aurita*)의 음향 탐지를 위한 음향 산란 특성. In: 2008년 한국수

산과학총연합회 공동학술대회 발표 요지집, pp 282

한국해양연구원 (2009) 유비쿼터스 해양 유용/유해생물 관리 기술 개발. 한국해양연구원, BSPP00710-2040-3, 164 p

황두진, Mukai T, Hirose M, Iida K, 강돈혁, 이유원, 박주삼, 김동연 (2003) 현수법을 이용한 해파리(*Stomolophus nomurai*)의 초음파 산란강도. In: 2003 추계 한국수산학회 학술대회 발표 요지집, pp 11-12

Båmstedt U, Kaartvedt S, Youngbluth M (2003) An evaluation of acoustic and video methods to estimate the abundance and vertical distribution of jellyfish. J Plankton Res 25:1307-1318

Behrends G, Schneider G (1995) Impact of *Aurelia aurita* medusae (Cnidaria, Scyphozoa) on the standing stock and community composition of mesozooplankton in the Kiel Bight (western Baltic Sea). Mar Ecol Prog Ser 127:39-45

BioSonics (2005) X-series echosounder and visual acquisition 5.0 user guide. BioSonics Inc, Seattle, USA

Brierley AS, Axelsen BE, Boyer DC, Lynam CP (2004) Single-target echo detections of jellyfish. ICES J Mar Sci 61:383-393

Brierley AS, Axelsen BE, Buecher E, Sparks CAJ, Boyer H, Gibbons MJ (2001) Acoustic observations of jellyfish in the Namibian Benguela. Mar Ecol Prog Ser 210:55-66

Brodeur RD, Mills CE, Overland JE, Walters GE, Schumacher JD (1999) Evidence for a substantial increase in gelatinous zooplankton in the Bering Sea, with possible link to climate change. Fish Oceanogr 8:296-306

Colombo GA, Benović A, Malej A, Lučić D, Makovec T, Onofri V, Acha M, Madirolas A, Mianzan H (2009) Acoustic survey of a jellyfish-dominated ecosystem (Mljet Island, Croatia). Hydrobiologia 616:99-111

Hirose M, Mukai T, Hwang D, Iida K (2009) The acoustic characteristics of three jellyfish species: *Nemopilema nomurai*, *Cyanea nozakii*, and *Aurelia aurita*. ICES J Mar Sci 66:1233-1237

Kawahara M, Uye S, Ohtsu K, Iizumi H (2006) Unusual population explosion of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* (Scyphozoa: Rhizostomeae) in East Asian waters. Mar Ecol Prog Ser 307:161-173

Kinoshita J, Hiromi J, Yamada Y (2006) Abundance and Biomass of Scyphomedusae, *Aurelia aurita* and *Chrysaora melanaster*, and Ctenophora, *Bolinopsis mikado*, with estimates of their feeding impact on Zooplankton in Tokyo Bay, Japan. J Oceanogr 62:607-615

Lynam CP, Hay SJ, Brierley AS (2004) Interannual variability in abundance of North Sea jellyfish and links to the Atlantic Oscillation. Limnol Oceanogr 49:637-643

- MacLennan DN, Fernandes PG, Dalen J (2002) A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics. *ICES J Mar Sci* **59**:365-369
- Magome S, Yamashita T, Kohama T, Kaneda A, Hayami Y, Takahashi S, Takeoka H (2007) Jellyfish patch formation investigated by aerial photography and drifter experiment. *J Oceanogr* **63**:761-773
- Medwin H, Clay CS (1998) *Fundamental of acoustical oceanography*. Academic Press, London, UK, 712 p
- Mills CE (2001) Jellyfish booms-are populations increasing globally in response to changing ocean conditions. *Hydrobiologia* **451**:55-68
- Monger BC, Chinniah-Chandy S, Meir E, Billings S, Greene CH, Wiebe PH (1998) Sound scattering by the gelatinous zooplankters *Aequorea victoria* and *Pleurobrachia bachei*. *Deep-Sea Res II* **45**:1255-1271
- Mutlu E, Bingel F, Gücü AC, Melnikov VV, Niermann U, Ostr NA, Zaika VE (1994) Distribution of the new invader *Mnemiopsis* sp. and the resident *Aurelia aurita* and *Pleurobrachia pileus* populations in the Black Sea in the years 1991-1993. *ICES J Mar Sci* **51**:407-421
- Mutlu E (1996) Target strength of the common jellyfish (*Aurelia aurita*): a preliminary experimental study with a dual-beam acoustic system. *ICES J Mar Sci* **53**:309-311
- Purcell JE (2003) Predation on zooplankton by large jellyfish (*Aurelia labiata*, *Cyanea capillata*, *Aequorea aequorea*) in Prince William Sound, Alaska. *Mar Ecol Prog Ser* **246**:137-152
- Simmonds EJ, MacLennan DN (2005) *Fisheries acoustics: theory and practice*. 2nd edn. Blackwell Science, Oxford, UK, 437 p
- SonarData (2000) *SonarData EchoView User Guide*. Tasmania Pty Ltd, 46 p
- Yoon WD, Yang JY, Shim MB, Kang HK (2008) Physical processes influencing the occurrence of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* (Scyphozoa: Rhizostomeae) around Jeju Island, Korea. *J Plankton Res* **30**:251-260

Received Feb. 24, 2010

Revised Mar. 17, 2010

Accepted Mar. 24, 2010