

노무라입깃해파리의 박동에 따른 음향산란 특성

윤은아·황두진*·広瀬 美由紀·김은호¹·向井 徹²·박병수³
 전남대학교 해양기술학부, ¹북해도대학교 대학원 수산과학원,
²북해도대학교 수산과학연구원, ³경상대학교 해양경찰시스템학과

Characteristics of Acoustic Scattering according to Pulsation of the Large Jellyfish *Nemopilema nomurai*

Eun A Yoon, Doo Jin Hwang*, Miyuki Hirose,
 Eun Ho Kim¹, Tohru Mukal² and Byung Soo Park³
 Faculty of Marine Technology, Chonnam National University,
 Yeosu 550-749, Korea

¹Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, 3-1-1 Minato,
 Hakodate, Hokkaido 041-8611, Japan

²Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University, 3-1-1 Minato,
 Hakodate, Hokkaido 041-8611, Japan

³Dept. of Maritime Police & Production System, Gyeongsang National University,
 Tongyeong 650-160, Korea

The large jellyfish *Nemopilema nomurai* causes serious damage to fisheries, particularly around the seas of Korea and Japan. Decreasing this damage requires knowledge of the distribution and abundance of jellyfish. Acoustic technology using quantitative echosounders is one method of studying the distribution and abundance of jellyfish. Such methods are commonly used worldwide because they have the advantage of providing substantial information about all water layers in a wide area in a short time. However, in order to conduct an acoustic survey, the acoustic characteristics of the target organism must be known. These can be altered by a number of factors, including pulsation, swimming angle, frequency and size. Accordingly, this study determined the variation in target strength according to pulsation of *N. nomurai*. Data were analyzed for two jellyfish with bell diameters in air of (a) was 32.0 and (b) 25.0 cm. The pulsation cycle of jellyfish (a) was 1.5~2.0 sec and the target strength (TS) cycle was 1.0~2.5 sec, while jellyfish (b) had a pulsation cycle of 1.0~1.5 sec and TS cycle of 1.0~3.0 sec. The variation width of the TS with the change in pulsation was 7.8 dB (-72.4~-64.6 dB) for jellyfish (a) and 10.3 dB (-71.6~-61.3 dB) for jellyfish (b). The variation in bell diameter was about 0.28 and 0.35, respectively. These results confirmed that the variation in bell diameter caused by pulsation is closely related to the variation in TS.

Key words: Acoustic characteristics, Target strength, Pulsation, Jellyfish

서 론

최근 어류의 남획에 따른 포식자의 생물량이 감소하고, 지구 온난화에 따른 해수 온도 상승으로 인하여 한국, 일본뿐만 아니라 전 세계적으로 해파리가 대량으로 출현하고 있다. 전 세계적으로 출현되고 있는 해파리는 250여종에 이르고, 우리나라 주변해역에는 40~50여종이 서식하고 있다 (Kim, 2009). 이 중 성장 후 지름이 최대 2 m, 중량이 200 kg 이상이 되는 대형 해파리로 알려진 노무라입깃해파리는 우리나라 대표적 연안어업인 정지망, 트롤 및 자망 등의 부수적으로 어획되어 수산생물의 선도를 저하시키고, 어획량을 감소시키는 피해를 주고 있다 (Kang et al., 2003; Kim et al., 2008). 우선, 이러한 피해를 줄이기 위해서는 해파리의 생태, 생활환경 및 이동경로를 파악하는 것도 중요하지만, 특히 해파리의 분포와 현존량을 추정하는 것이 절실히 요구되고 있다.

해파리의 분포와 현존량을 추정하는 방법에는 어구를 이용한 조사와 음향을 이용한 조사가 있는데 어구에 의한 해파리 채집 시 해파리의 조직이 손상되기 때문에 정량적인 데이터를 수집하는데 어려움이 많다. 한편, 계량어군탐지기를 이용한 음향 조사는 짧은 시간에 넓은 면적의 전 수층을 대상으로 많은 정보를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있어 미국, 노르웨이 및 일본 등 전 세계에서 많이 실용화되고 있다. 하지만 계량어군탐지기를 이용하여 음향 조사를 하기 위해서는 대상 생물의 음향산란 특성을 파악하는 것이 가장 중요하다. 해파리의 음향산란 특성은 물리적 요소로 체내 밀도와 음속, 사용주파수 등에 따라 복잡하게 나타나며, 해파리의 몸은 90% 이상 수분으로 구성되어 있기 때문에 체내 음속과 밀도가 해수와 큰 차이가 없어 음향학적으로 탐지가 불가능 할 것으로 인식되어져 왔으나, Mutlu (1996) 등이 수중 음향을 이용하여 해파리의 탐지 가능성을 검증하였다. 또한, 생태학적 요소로는 해파리의 크기, 박동 및 유영자세 등으로, Hirose et al. (2009)는

*Corresponding author: djhwang@jnu.ac.kr

노무라입깃해파리 (*Nemopilema nomurai*)를 이용하여 수중에서 유영자세의 변화에 따른 초음파산란강도 (Target strength, TS)를 측정하였다. Mutlu (1996)에 의하면 보름달물해파리 (*Aurelia aurita*)의 크기와 박동에 따라 TS가 변화한다고 하였고, Monger et al. (1998)와 Lee and Hwang (2009)은 각각 해파리 (*Aequorea victoria*)와 노무라입깃해파리를 대상으로 모델을 이용하여 수중에서 해파리의 박동을 함으로써 우산 직경의 변화에 따른 TS의 변화를 측정하였다. 특히, Mutlu (1996)와 Colombo et al. (2003)는 TS를 변화시키는 여러 요인 중 첫 번째로 우산의 박동에 따라 가장 많은 영향을 받는다고 보고하였다.

따라서, 본 연구에서는 우리나라에 대량으로 출현하는 노무라입깃해파리를 대상으로 음향산란 특성에 영향을 미치는 요소 중 현수법 (*ex situ*)을 이용하여 해파리의 박동에 따른 TS의 변화를 조사하여 보고하고자 한다.

재료 및 방법

2009년 8월 12일~19일 사이에 전남대학교 수산증양식센터 내에 위치한 해수음향수조 (5 m(L)×5 m(W)×5 m(H))에서 노무라입깃해파리의 박동에 따른 음향산란 특성을 알아보기 위한 실험을 실시하였다.

본 실험에 사용된 노무라입깃해파리는 여수시 돌산읍 안도연안 (34°30'N, 127°50'E) 수중에서 스쿠버다이버가 직접 채집하였으며, 해파리 채집 시 해파리에 공기가 유입되지 않도록 하기 위하여 수중에서 비닐봉지를 이용하여 해파리를 자연스럽게 비닐봉지에 담고 수중에서 고무줄로 비닐봉지의 입구를 밀봉하였다. 채집 후 해파리를 이송 시에는 바다에서와 같은 수온을 유지하도록 하기 위하여 아이스박스 안에 아이스 팩을 함께 넣어 수산증양식센터까지 안전하게 수송하였고, 채집해 온 해파리는 1~2일 사육수조에 순치한 후 실험에 사용하였다.

실험에 사용된 해파리는 네 가닥의 모노필라멘트 줄과 바늘, 추를 이용하여 Fig. 1과 같이 고정하였다. 한 가닥의 모노필라멘트 줄을 바늘에 꿰어 해파리의 구완에서부터 우산까지

관통 시키고 구완의 아랫줄에 추를 달았으며, 또 다른 줄을 사용하여 해파리가 상하로 움직이지 못하도록 우산의 윗부분과 구완의 윗부분에 매듭을 주었다. 마지막으로 두 가닥의 모노필라멘트 줄은 해파리를 완전히 통과 시킨 줄의 윗부분에 양쪽으로 연결하여 해파리가 진동자 아래 3.5~4.0 m 사이에 위치하도록 고정하였다. 실험이 끝난 후 해파리의 구완과 측수를 자르고, 해파리의 우산을 접시에 펼쳐 줄자를 이용하여 공기 중의 우산 직경을 측정하였다.

TS 측정에 사용된 시스템은 주파수 38 kHz Split beam 방식의 계량어군탐지기 (EK-500, SIMRAD)이었고, 지름 60 mm의 동구를 이용하여 시스템의 교정을 실시하였으며, 시스템 교정 결과를 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1은 실험에 사용된 시스템 구성도를 나타낸 것이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 신호발생기 (WF1944A, NF)로 구형파 트리거 신호를 만든 후 이것을 계량어군탐지기에 입력하여 펄스 간격을 0.5 sec의 외부 트리거 모드로 구동시켜 음향 데이터를 Echolog500에 수록하였다. 한편, 해파리가 박동하는 모습은 해수음향수조의 측면에 설치한 수중카메라 (T-water-7000DX, WIRELESS TSUKAMOTO)로 관찰하였으며, 트리거 기능부의 비디오 캡처 카드 (VCE-Pro, ImperX)를 이용하여

Table 1. System parameters of the quantitative echosounder used for experiment

Items	Parameters
Frequency (kHz)	38
Beam Type	Split beam
Pulse Length (ms)	0.3
Ping Interval (s)	0.5
TS Transducer Gain (dB)	25.09
3 dB Beamw. Along (deg)	6.43
3 dB Beamw. Athw. (deg)	6.39
Alongship Offset (deg)	-0.15
Athw. ship Offset (deg)	0.02

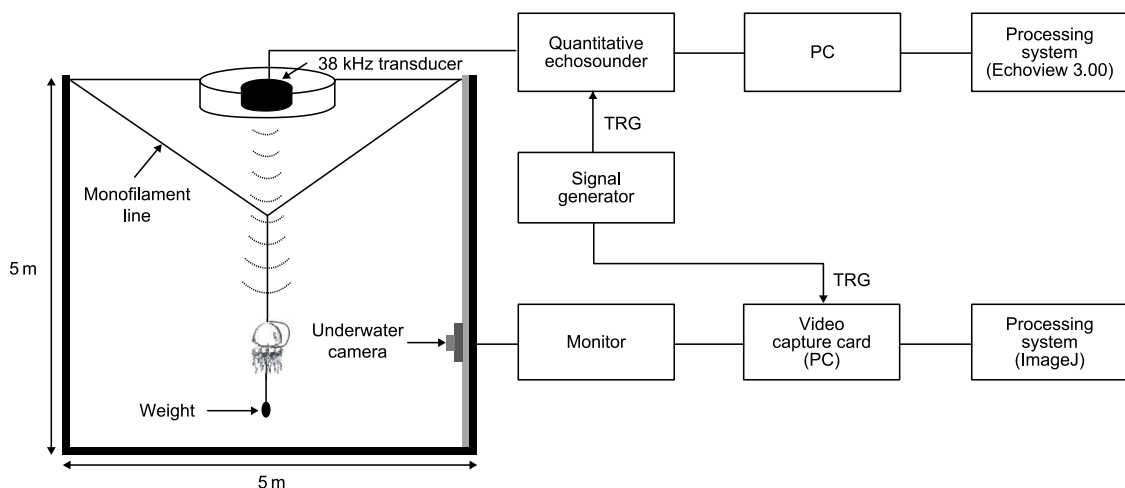


Fig. 1. Block diagram of system composition and experiment method to measure TS of jellyfish.

음향 데이터와 동기한 해파리의 정지 화면을 컴퓨터에 저장하였다. 이와 같은 방법으로 취득한 TS 데이터는 후일에 실험실에서 재생하여 에코데이터 분석 소프트웨어 (Echoview 3.00, SonarData)로 분석하였고, 해파리의 정지 화면은 ImageJ 소프트웨어를 이용하여 박동의 변화에 따른 우산 사이즈와 유영자 세각을 측정하였다.

본 실험에서는 5개체의 노무라입깃해파리를 이용하여 TS를 측정하였으며, 그 중 유영자세각의 변화가 크지 않고, 우산 박동의 변화가 뚜렷한 2개체의 노무라입깃해파리 데이터를 추출하여 박동에 따른 TS의 변화를 분석하였다.

결과 및 고찰

Fig. 2는 실험에 사용된 해파리로 수조 내에서 수중카메라로 촬영한 사진이며, (a)와 (b) 해파리의 공기 중 우산의 직경은 각각 32.0 cm, 25.0 cm이었다. 수중에서 해파리의 우산의 최대 직경은 Hirose et al. (2005) 연구 결과에 의하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다고 하였다.

$$D_{water} = 0.76 \times D_{air} \tag{1}$$

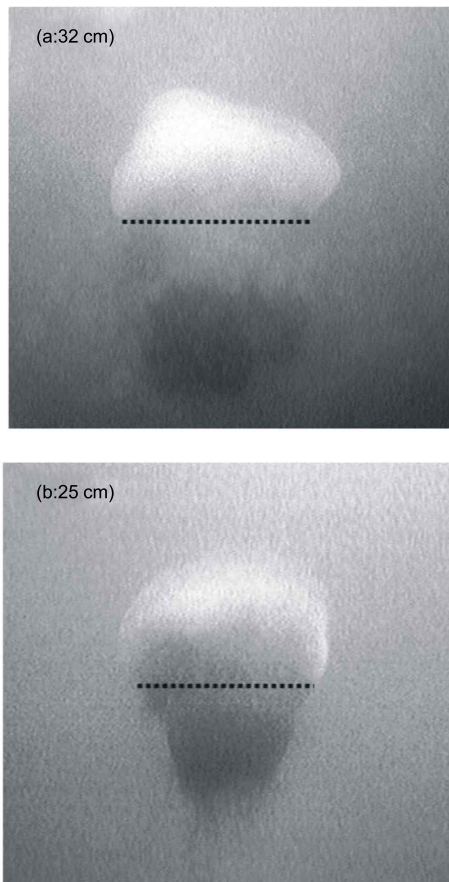


Fig. 2. Pictures of jellyfish in the water (bell diameter in the air: (a) 32 cm, (b) 25 cm, ----- : position measured bell diameter of jellyfish in the water).

여기서, D_{water} 는 수중에서 해파리 우산의 직경, D_{air} 는 공기 중에서 해파리 우산 직경을 의미한다. 해파리는 수중에서 우산의 움직임에 따라 우산의 직경이 변화하는데 수중에서 우산 직경의 변화를 관찰하기 위한 측정 위치는 Fig. 2에 점선으로 나타낸 바와 같이 우산의 끝 부분으로 선정하였고, 식 (1)로 수중에서 우산의 최대 직경을 구한 후, 측면 수중카메라로 캡처된 화면으로부터 ImageJ 소프트웨어를 이용하여 변화하는 해파리의 우산 직경을 측정하였다.

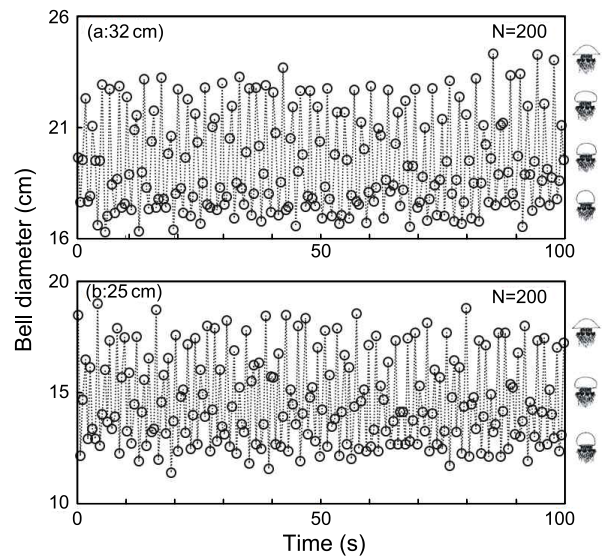


Fig. 3. Pulsation cycle of jellyfish (a) and (b) in the water.

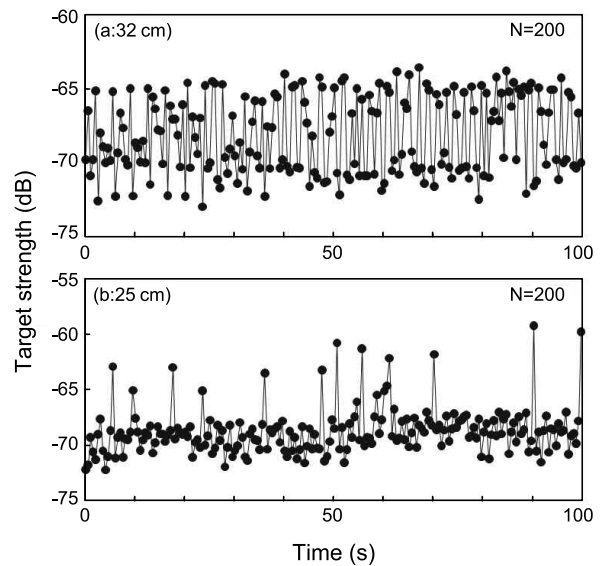


Fig. 4. TS cycle of jellyfish (a) and (b).

그 결과 공기 중의 우산 직경이 32.0 cm인 (a) 해파리의 경우 수중에서 우산의 최대 직경은 24.3 cm, 최소 직경은 16.3 cm이었고, 해파리의 박동 주기는 1.5~2.0 sec로 나타났다. 공기

중의 우산 직경이 25.0 cm인 (b) 해파리의 경우 수중에서 우산의 최대 직경은 19.0 cm, 최소 직경은 11.4 cm로 그 때의 박동 주기는 1.0~1.5 sec이었다 (Fig. 3).

Fig. 4는 해파리 우산의 박동 변화에 따른 TS의 변화를 나타낸 것으로 (a) 해파리의 TS 주기는 1.0~2.5 sec이었고, TS의 변화 범위는 -73.0~63.5 dB로 변화폭은 9.5 dB이었다. (b) 해파리의 TS 주기는 1.0~3.0 sec이었으며, 최소 TS는 -72.2 dB, 최대 TS는 -59.2 dB로 13.0 dB 차이가 나타났다.

또한, 우산의 박동 변화에 따른 TS의 변화를 추출함과 동시에 해파리의 유영자세각의 변화에 대하여 조사하였다. 해파리 유영자세각은 해파리의 박동에 따른 우산 직경을 측정할 동일한 200장의 해파리의 정지 화면으로 분석하였고, 우산이 수면으로 향하여 수직일 때 0°, 오른쪽으로 기울 때 +90°, 왼쪽으로 기울 때 -90°로 하여 측정된 결과를 Fig. 5에 나타내었다. (a) 해파리의 경우 -4°~+3° 사이에서 유영행동을 하였고, 총 200장 정지 화면 중 88 %인 176장이 0°에 유지되었다. (b) 해파리의 경우 유영자세각의 변화 범위는 -4°~+6°로 80 % 이상 대부분 0°에서 유영행동을 하였다. 이와 같이 (a)와 (b) 해파리의 유영자세각은 대부분 우산이 수직인 0°를 유지한 것으로 유영자세각의 변화는 거의 없었고, 박동에 대한 변화만 있었음을 알 수 있었다.

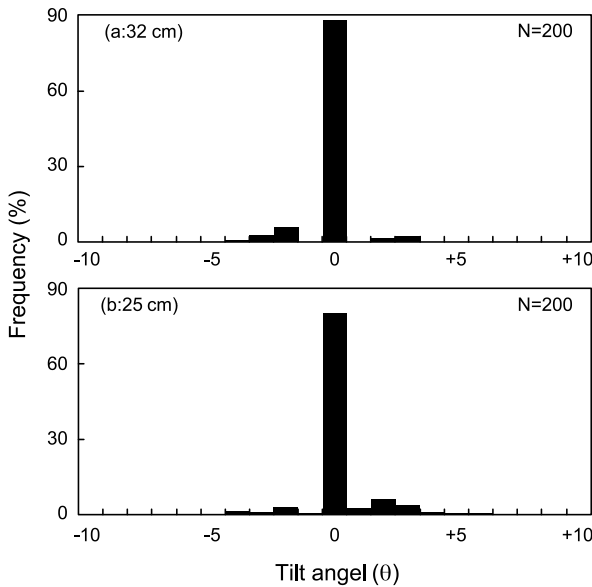


Fig. 5. Changes in swimming angle of live jellyfish tethered to monofilament line.

Fig. 6은 Fig. 5에서 해파리의 유영자세각이 0°에 유지된 데이터 중에서 우산 직경의 크기 변화와 TS의 크기 변화가 가장 잘 일치한 데이터만을 추출한 것으로 TS는 ●, 우산 직경은 ○로 표시하였다. (a) 해파리의 TS 변화 범위는 -72.4~64.6 dB로 변화폭은 7.8 dB이었고, (b) 해파리의 TS 크기는 -71.6~61.3 dB로 10.3 dB 차이를 보였다.

또한, 해파리가 박동을 할 때에 우산 직경의 변화율을 식

(2)로 정의하였으며,

$$\Delta Dia. = \frac{Max.Dia. - Min.Dia.}{Max.Dia.} \quad (2)$$

Max.Dia.는 수중에서 우산의 최대 직경, Min.Dia.는 우산의 최소 직경이다. (a) 해파리의 경우 우산의 최대 직경과 최소 직경은 각각 23.2 cm, 16.6 cm로 우산 직경의 변화율은 약 0.28이었고, (b) 해파리의 경우 최대 직경은 18.6 cm, 최소 직경은 12.0 cm로 변화율은 약 0.35이었다. 이 결과를 Table. 2에 비교하여 나타내 보면 (a) 해파리의 공기 중 우산의 직경은 32.0 cm, (b) 해파리는 25.0 cm로 (b) 해파리는 (a) 해파리 보다 공기 중 우산의 직경은 더 작았지만, 수중에서 우산 직경의 변화율과 TS의 변동폭은 크게 나타난 것으로 TS의 변동폭은 우산 직경의 변화율에 영향을 받는 것으로 예측된다.

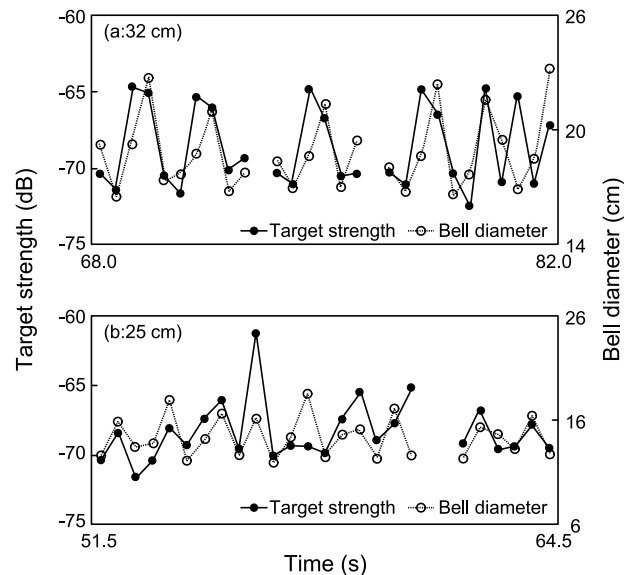


Fig. 6. Variations in TS and bell diameter according to pulsation.

Table 2. Comparisons of bell diameter in the air, ΔDia and ΔTS for jellyfish (a) and (b)

Parameters	(a)	(b)
Bell diameter (air)	32.0 cm	25.0 cm
ΔDia	0.28	0.35
ΔTS	7.8 dB	10.3 dB

Fig. 7은 Fig. 6의 데이터를 바탕으로 해파리 우산의 직경 변화에 따른 TS의 변화 관계를 알아보기 위하여 나타낸 결과로써, (a)와 (b) 해파리의 우산 직경 변화와 TS의 상관관계 R은 각각 0.57 (p=0.002)과 0.39 (p=0.05)로 상관관계는 다소 낮게 나타났으나, Fig. 7에서 보는 바와 같이 해파리의 우산 직경이 커지면 커질수록 TS도 증가하는 정(+)의 상관관계가 나타남을 알 수 있었다.

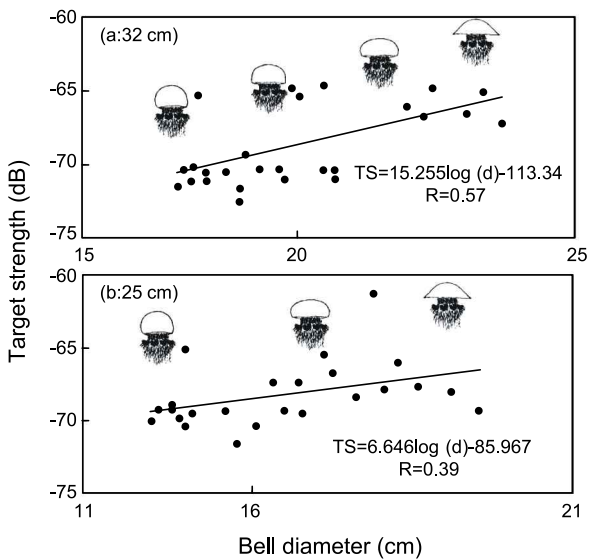


Fig. 7. Relationship between TS and bell diameter of jellyfish.

Hirose et al. (2005)는 우산의 박동에 따른 해파리의 TS가 우산의 면적에 비례한다고 생각하고 TS의 변동폭 ΔTS 를 식 (3)과 같이 나타내었다.

$$\Delta TS = 20 \log \frac{Max.Dia.}{Min.Dia.} \quad (3)$$

본 연구의 결과를 이용하여, 식 (3)으로 TS의 변동폭을 계산해 본 결과 (a) 해파리의 경우 약 2.9 dB, (b) 해파리의 경우 약 3.8 dB이었고, 실제 측정된 (a)와 (b) 해파리의 TS 변동폭은 각각 7.8 dB과 10.3 dB로 실제 측정된 데이터의 값이 더 크게 나타난 것으로 확실히 우산 직경의 변화가 TS의 변화에 영향을 주고 있는 것을 알 수 있었다. Lee and Hwang (2009)의 DWBA (distorted-wave Born approximation) 이론적 모델에서 노무라입깃해파리의 박동 변화에 따른 TS의 변동폭은 주파수 38 kHz에서 8.5 dB 나타났다고 보고하였다. 본 연구에서 7.8 dB의 변화 (주파수 38 kHz)가 나타난 (a) 해파리와 유사한 결과가 나타났는데, 이것은 DWBA 이론 모델에 사용된 노무라입깃해파리의 우산의 최대 직경은 40.0 cm, 최소 직경은 28.0 cm로 우산 직경의 변화폭이 0.3으로 나타나, 우산 직경의 변동폭이 0.28로 비슷하게 나타난 (a) 해파리와 TS 변동폭이 유사한 결과가 나타난 것으로 생각되어진다. (b) 해파리는 우산 직경의 변화율이 0.35로 TS는 10.3 dB 차이가 나타났고, Monger et al. (1998)은 해파리 (*Aequorea victoria*)의 우산 직경의 변화율이 0.4일 때, Reduced TS는 10.0 dB 감소하여 나타난 것으로 본 연구와 타 연구의 결과로 미루어 우산 직경의 변화율이 TS 변동폭에 많은 영향을 미친다고 판단된다. 또한, Lee and Hwang (2009)은 해파리의 우산 박동 변화에 따른 TS의 변동폭은 주파수가 증가함에 따라 커지는 경향이 나타났다고 언급하였다. 해상에서 주파수 120 kHz에 탐지된 노무라입깃해파리의 우산 박동에 따른 TS는 약 11.7 dB의 변화로 (Lee

et al., 2007), 본 연구 결과보다 TS 변동폭이 크게 나타났는데 이것은 38 kHz를 사용한 본 연구보다 고주파수인 120 kHz를 사용하였기 때문이라고 사료된다. 한편, 수조에서 고정된 보름달물해파리 (*Aurelia aurita*)의 경우 주파수 120 kHz와 200 kHz에서 해파리의 박동에 따라 TS가 각각 약 16.0 dB과 18.0 dB 변화 (Mukai et al., 2009)가 나타났고, Mutlu (1996)는 주파수 120 kHz를 이용하여 보름달물해파리 (*Aurelia aurita*)는 자유유영 상태에서 우산의 움직임에 따라 TS는 -67.0~-54.0 dB (우산 직경 15.5 cm)로 13.0 dB, 주파수 200 kHz (우산 직경 11.5 cm)에서는 -68.0~-58.0 dB로 10.0 dB 변화를 보였으며, Brierley et al. (2004)는 주파수 38 kHz에서 해파리 (*Chrysaora hysoscella*)는 박동을 할 때 우산 크기의 변화에 따라 최소 TS와 최대 TS는 15.0 dB 차이가 나타났다는 연구보고가 있다. 위 연구의 해파리는 본 연구에 사용된 해파리와 다른 종으로 해파리의 종류에 따라라도 해파리가 박동을 할 때 TS의 변동폭이 달라짐을 알 수 있었다.

따라서, 본 연구와 타 연구에서 해파리의 박동 변화에 따른 TS를 검토한 결과, 해파리가 박동을 할 때 해파리의 우산 직경의 변화율, 종류 및 주파수에 따라라도 TS가 크게 변화함을 확인하였다.

사 사

본 연구는 한국연구재단의 국제협력연구과제 “한일주변해역에 있어서의 동물플랑크톤의 음향산란특성의 규명(F01-2009-000-10202-0)” 및 한국연구재단과 일본학술진흥회의 Core University Program (연구분야 ; 수산학) 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

Brierley AS, Axelsen BE, Boyer DC, Ilyam CP, Didcock CA, Boyer HJ, Sparks CAJ, Purcell JE and Gibbons MJ. 2004. Single-target echo detections of jellyfish. ICES Journal of Marine Science 61, 383-393.

Colombo GA, Mianzan H and Madirolas A 2003. Acoustic characterization of gelatinous plankton aggregations: four case studies from the Argentine continental shelf. ICES Journal of Marine Science 60, 650-657.

Hirose M, Mukai T, Hwang DJ and Iida K. 2005. Target strength measurements on tethered live jellyfish *Nemopilema nomurai*. Nippon Suisan Gakkaishi 71, 571-577.

Hirose M, Mukai T, Hwang DJ and Iida K. 2009. The acoustic characteristics of three jellyfish species: *Nemopilema nomurai*, *Cyanea nozakii*, and *Aurelia aurita*. ICES Journal of Marine Science 66, 1233-1237.

Hirose M, Mukai T, Shimura T, Yamamoto J and Iida K. 2007. Measurements of specific density of and

- sound speed in Nomura's jellyfish *Nemopilema nomurai* to estimate their target strength using a theoretical scattering model. J. Marine Acoust. Soc. Jpn 34, 109-118.
- Kang YS and Park MS. 2003. Occurrence and food ingestion of the moon jellyfish(Scyphozoa: Ulmariidae : *Aurelia aurita*) in the southern coast of korea in summer. Journal of the Korean Society Oceanography 8, 199-202.
- Kim IO, An HC, Shin JK and Cha BJ. 2008. The development of basic structure of jellyfish separator system for a trawl net. J. Kor. Soc. Tech 44, 99-111.
- Kim SJ. 2009. resources propulsion of jellyfish in jeju. from <http://www.jejunews.com/news/articleView> on August 29.
- Lee KH, Kim IO, Yoon WD, Shin JG and An HC. 2007. A study on vertical distribution observation of giant jellyfish(*Nemopilema nomurai*) using acoustical and optical methods. J Kor Soc Fish Tech 43, 355-361.
- Lee YW and Hwang BK. 2009. Theoretical examination of the effects of fluctuation of acoustic scattering on the swimming behavior of giant jellyfish. J Kor Fish Soc 42, 165-170.
- Monger BC, Chinniah-Chandy S, Meir E, Billings S, Greene CH and Wiebe PH. 1998. Sound scattering by the gelatinous zooplankters *Aequorea victoria* and *Pleurobrachia bachei*. Deep-Sea Research II 45, 1255-1271.
- Mukai T, Hirose M, Sawada K, Takahashi H and Iida K. 2009. Target strength of moonjellyfish-Variations with pulsation and posture-. Proceedings of meeting of the Marine Acoustic Society of Japan 2009, 19-22.
- Mutlu E. 1996. Target strength of the common jellyfish (*Aurelia aurita*): a preliminary experimental study with a dual-beam acoustic system. ICES Journal of Marine Science 53, 309-311.

2010년 7월 26일 접수
 2010년 9월 14일 수정
 2010년 10월 4일 수리