

유영행동에 따른 대형 해파리의 음향산란 변동의 이론적 검토

이유원 · 황보규^{1*}

부경대학교 해양생산시스템관리학부, ¹부경대학교 해양산업개발연구소

Theoretical Examination of the Effects of Fluctuation of Acoustic Scattering on the Swimming Behavior of Giant Jellyfish

You-Won LEE and Bo Kyu HWANG^{1*}

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

¹Research Center for Ocean Industry Development, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Recently, wide spread distribution of the giant jellyfish, *Nemopilema nomurai*, has occurred in the East China Sea. This increased distribution has caused serious problems in inshore and offshore fisheries in Korea and Japan. As a result, it is necessary to evaluate the damage caused to the fisheries by jellyfish. Accordingly, several hydroacoustic studies have been conducted to estimate the target strength (TS) of the giant jellyfish. However, the effects of fluctuation in the acoustic scattering characteristics on swimming patterns have not yet been elucidated. Therefore, in this study, we theoretically estimated the effects of changes in the acoustic scattering pattern on the swimming behavior of jellyfish using the Distorted Wave Born Approximation (DWBA) model. The results confirmed that acoustic scattering of jellyfish results in a significant change in their swimming pattern. Specifically, our theoretical estimation indicated that the TS of giant jellyfish ($d=40$ cm) fluctuated until 8.5 dB at 38 kHz, 13.8 dB at 70 kHz, and 15.1 dB at 120 kHz based on changes in their swimming patterns.

Key words: Giant jellyfish, Target strength, Swimming motion, DWBA model

서 론

최근 지구온난화에 따른 수온 상승으로 동중국해 부근에서 대량 발생한 대형 해파리 (*Nemopilema nomurai*)가 한국과 일본 연안으로 유입되어 연안 수산업에 큰 피해를 입히고 있다. 이 해파리는 직경이 15-60 cm, 무게 0.3-7.5 kg 정도의 유체이지만 성숙시기인 9-10월에는 직경 1 m 이상, 무게 200 kg에 달하는 대형 종으로, 주로 연안정치망이나 끌어구류에 유입되어 피해를 주고 있으며 (Honda et al., 2005), 2003년에는 우리나라 전 해역에 걸쳐 높은 밀도로 분포하여 수산업에 막대한 피해를 초래하였다. 이에 대형 해파리에 의한 어업피해를 줄이기 위해 대형 해파리 분리장치의 개발 (Matsushita et al., 2005; Honda et al., 2005; Kim et al., 2008) 등의 연구뿐만 아니라 생태학적 조사가 우리나라와 일본에서 동시에 이루어지고 있다 (NFRDI, 2005).

현재, 수중생물의 분포량 조사에는 트롤에 의한 채집, 목시 조사 등이 주를 이루고 있으나, 전 수층에 분포하는 해파리 분포를 파악하기 위해서는 음향기법이 유용하다 (Lee et al., 2007). 음향기법을 이용하기 위해서는 대상생물의 음향산란 특성을 정확하게 파악할 필요가 있는데, 현수법을 이용한 음

향반사강도 (Target Strength, 이하, TS라 함)의 측정 (Hirose et al., 2005), 음향산란 이론모델 이용을 위한 음속비와 밀도비의 측정 (Hirose et al., 2007) 등의 연구가 이루어지고 있다.

음향산란특성인 TS는 음향학적 조사 자료를 대상생물의 자원량으로 변환하기 위한 파라미터로서, 사용주파수, 체형, 체내밀도, 체내음속, 유영행동 및 유영자세 등과 관련하여 복잡하게 나타난다. 따라서, 이러한 요인들에 따른 음향산란 특성을 검토해야 정확하고 안정된 값을 얻을 수 있다. 한편, 해파리의 경우는 어류와는 달리, 유영행동 패턴에 따라 체형이 크게 변화하므로, 측정 자료를 정확하게 해석하기 위해서는 이와 같은 특성에 대해 검토할 필요가 있다. Lee et al. (2007)은 과학어군탐지기를 이용하여 단일 개체에 대한 연속적인 추적조사에서, TS가 11.7 dB까지 변화하였다고 보고하였으며, 이것이 유영행동에 따른 영향일 가능성에 대해 언급하였다. 이에 본 연구에서는 해파리의 유영행동을 분석하고, 음향산란의 이론모델을 이용하여 유영행동에 따른 음향산란강도의 변동특성에 대해 검토하였다.

재료 및 방법

최근 수중 생물의 음향산란 이론모델은 생물의 체형을 매우 미세하게 분할하여 근사시킬 수 있는 고주파에 적용 가능한

*Corresponding author: bokyuhwang@naver.com

정확도 높은 모델들이 개발되었다. 이에 따라, 실측이 어렵거나 불가능한 수중 생물에 대해서 이론모델을 적용하여 음향산란을 추정함으로써 실측치를 검증하거나, 다주파수 특성을 이용한 어종판별의 연구에 많이 이용되고 있다. 현재, 어류에 대해서는 어류 체형과 부레를 절단된 원통으로 근사하는 Kirchhoff Ray Mode (KRM) 모델 (Clay and Horne, 1994)이 많이 사용되고 있고, 동물플랑크톤과 같은 미소생물에 대해서는 유체구 모델 (Holliday and Pieper, 1984)을 사용하고 있으나, 최근에는 대상 생물의 체형을 잘게 절단한 원통으로 엄밀하게 근사하는 Distorted Wave Born Approximation (이하, DWBA라 함) 모델이 개발되어, 크릴과 같은 동물플랑크톤의 음향산란특성을 검토하는데 많이 사용되고 있다 (Chu et al., 1993; McGehee et al., 1998; Demer and Conti, 2003; Amakasu and Furusawa, 2006). 현재, 해파리의 복잡한 체형을 정확하게 묘사할 수 있는 모델은 없으나, DWBA 모델은 비교적 복잡한 체형을 묘사할 수 있는 모델이기 때문에, 본 연구에서는 DWBA 모델을 이용하여 해파리의 음향산란특성을 추정하였다. DWBA 모델에 의한 원거리 음장에서 음향산란의 산란 진폭 f_{bs} 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{bs} = \frac{k_1}{4} \int_{\vec{r}_{pos}} a(\gamma_k - \gamma_p) e^{2i\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_{pos}} \frac{J_1(2k_2 a \cos\beta_{iilt})}{\cos\beta_{iilt}} |d\vec{r}_{pos}| \dots (1)$$

여기서, k 는 파수를 나타내는데, 아랫첨자 1은 매질인 해수, 2는 산란체를 의미한다. 그리고, a 는 절단원통의 반경, γ_k 는 밀도비, γ_p 는 음속비, J_1 은 제 1종 베셀함수, β_{iilt} 는 입사하는 음파와 원통 축 사이의 각도이다. 그리고, 산란 진폭과 구하고

자 하는 TS와의 관계는 식 (2)와 같다.

$$TS = 10 \log(|f_{bs}|^2) \dots (2)$$

위 식에서 나타난 바와 같이, 이론모델의 계산을 위해서는 산란체의 체형에 대한 정보, 매질인 해수와 산란체 사이의 밀도비 g 와 음속비 h 가 필요하다. 먼저, 유영행동별 체형자료는 동영상 자료 (Nakada, 2001)로부터 유영행동 패턴을 관찰하여, 샷갓의 수축과 팽창과정에서 4가지의 주요 행동패턴을 추출하여 사용하였다. Fig. 1은 대형해파리의 유영행동 패턴에 따른 체형의 변화를 나타내었다. 해파리는 (a)-(d)를 하나의 주기로 하여 지속적인 유영행동을 보였는데, 유영에서 해파리의 샷갓은 넓게 펼쳐졌다가 접는 형태로 복잡하게 나타났으며, 구완(口腕)의 움직임은 상대적으로 미약하였다. 대형해파리의 유영행동 패턴에 대한 연구결과는 찾아보기 힘들지만, 음향카메라를 이용하여 대형해파리의 유영행동을 관찰한 Honda and Watanabe (2007)의 결과를 보면, 유영에 따라 Fig. 1과 같은 샷갓의 운동이 포착되었다.

음향모델을 통하여 유영행동 패턴에 따른 음향산란특성의 변화를 추정하기 위해서는 대상생물의 형태변화를 정확하게 묘사해야 하지만, 이용 가능한 정보의 한계로 인하여 개체의 크기를 샷갓 직경 40 cm로 가정하고, 아래의 3가지 조건을 이용하여 유영행동 패턴을 단순화하였다.

- 1) 샷갓의 안쪽의 빈 공간은 무시한다.
- 2) 구완은 전체 유영행동 패턴에서 동일하다.
- 3) 촉수에 의한 음향산란은 촉수가 밀집된 부분의 형태만

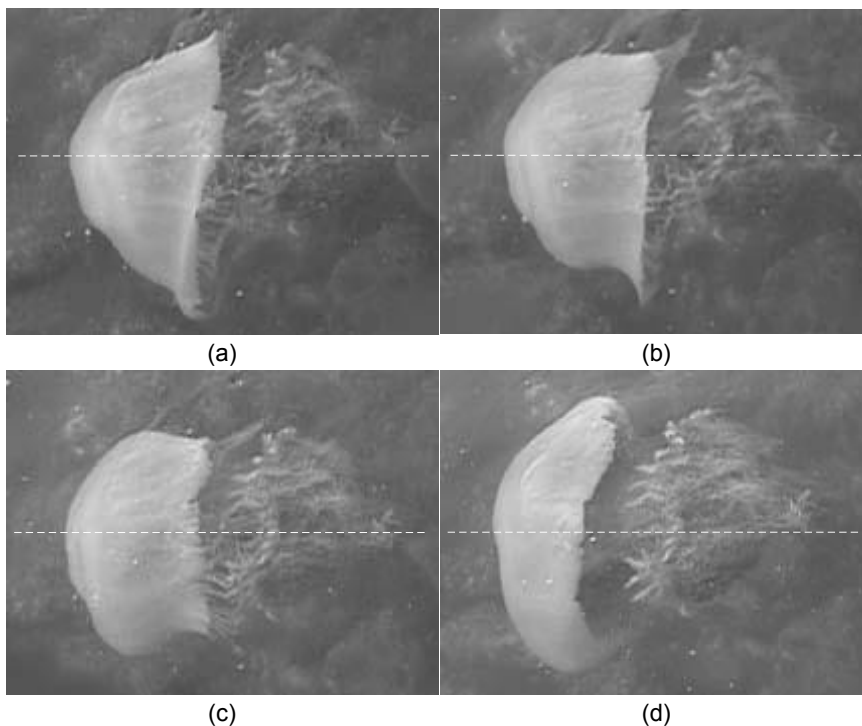


Fig. 1. Swimming behavior of giant jellyfish captured from movie file.

Table 1. Parameters to calculate acoustic scattering characteristics by DWBA model

Parameters	Values	Remark
Sound speed contrast (h)	0.984	Hirose et al.,2007
Density contrast (g)	1.013	
Sound speed	1,500 m/s	
Frequency	38 kHz, 70 kHz, 120 kHz	
Size of jellyfish (d)	40 cm	

을 고려한다.

Table 1은 이론모델의 계산에 사용된 파라미터들을 나타내었다. Greenlaw and Johnson (1982)은 주요 동물플랑크톤의 체내 밀도와 음속을 측정함과 동시에, 기존의 연구결과들을 종합한 결과, 동물플랑크톤의 평균 밀도비는 1.04 ± 0.008 , 평균 음속비는 1.01 ± 0.005 로 보고하였다. 그리고, Lavery et al. (2007)은 동물플랑크톤 음향산란층을 다주파로 측정하고, 주요 동물플랑크톤에 대해 음향산란 이론모델을 적용하여 음향산란을 추정하여 분포밀도를 추정할 때, 해파리류에 대해서는 밀도비와 음속비를 1.02를 사용하였는데, 그 결과가 채집망 및 광학장치에 의한 추정치와 일치하였다고 보고 하였다. 그러나, Waren and Smith (2007)는 사자갈기 해파리에 대한 밀도비와 음속비를 측정된 결과, $g=1.009 \pm 0.004$, $h=1.0004$ 로 주변매질과 거의 유사한 값들을 보고 하였다. 또한, Hirose et al. (2007)은 대형해파리의 밀도비와 음속비를 측정하고, 이론추정치와 실측치를 비교한 결과, 측정치의 평균 밀도비 1.013, 최소 음속비 0.984로 추정된 값이 가장 유사하였다고 보고하였다. 이와 같이, 대상종에 따라 조금씩 차이가 있고, 적용값들에 대한 더 많은 검토가 필요한 상태이지만, 본 연구는 절대적인 산란값의 추정보다는 유영패턴에 따른 음향산란의 변화 정도를 추정하기 위한 것이므로, 밀도비 g와 음속비 h는 대형 해파리에 대한 측정치인 Hirose et al. (2007)의 값을 사용하였다.

결과 및 고찰

동영상으로부터 추출한 대형 해파리의 유영행동 패턴을 Fig. 2에 나타내었다. 여기서, x축은 체장을, y축은 체폭을 나타내며, 구원 부분은 전체 자료를 평균하여 근사함으로써 구원에 의해 음향산란의 차가 발생하지 않도록 한 것이다. 대형 해파리는 샷갯이 펼쳐진 (a)와 같은 형태로 조류 또는 해류에 대한 저항을 증가시켜 함께 이동하고, 샷갯의 수축과 팽창을 반복하면서 추진력을 얻는 것으로 사료된다.

3개의 과학어군탐지기 주파수에 대한 각 유영 행동별 음향산란 패턴을 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 자세각에 의한 변화를 비교해 보면, TS는 샷갯을 수면이나 해저면으로 향할 때인 수직방향 유영 (90° 또는 -90°)일 때 높고, 수평방향으로 유영할 때인 -180°과 0°에서는 매우 낮았는데, null값을 제외하면 이러한 유영 자세각의 변동에 의해 약 30 dB의 차이를 나타내었다. 유영행동 패턴에 의한 변화는 유영 자세각에 의한 변화에 비해 다소 작은 것으로 나타났으나, (a)의 경우는 다른 유영

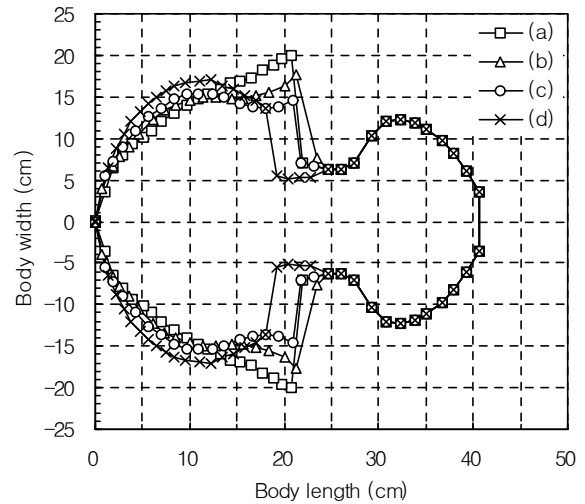


Fig. 2. Umbrella shape change of giant jellyfish (d=40 cm) by swimming behavior. Coordinates of oral arms were averaged from four data.

행동 패턴에 비해 음향산란의 패턴의 차가 크게 나타났다. 또한, 유영행동 패턴에 따른 음향산란은 체축이 많이 기울어진 상태인 약 -130°--100°, -70°--40°, 50°-80°, 110°-140° 부근에서는 샷갯의 운동에 의하여 크게 변화하는 것으로 보아, 이러한 유영 자세각에서는 다소 크게 영향을 받을 것으로 판단된다.

대형 해파리는 주로 샷갯을 옆으로 하여 유영하는 수평유영을 하지만 (Lee et al., 2007), 뚜렷한 일주행동을 가지는 것으로 알려져 있으므로, 일주행동에 따른 급격한 수심 이동시에는 유영행동 패턴에 따른 영향이 클 것이고, 이를 제외하면, 대부분 수평의 유영자세를 유지하면서 유영할 것이 예상된다. 따라서, 현장에서는 종래 현수법의 TS측정시 수면과 수직방향의 유영상태와는 달리 수평유영상태인 -180°과 0° 부근의 낮은 값을 나타낼 것으로 예측된다.

일반적인 수평유영을 자세각 0°를 기준으로 $\pm 15^\circ$ 라고 가정하였을 때, 유영자세각과 유영행동 패턴에 따른 TS변동을 Fig. 4에 나타내었다. 38 kHz에서 유영자세각에 의한 TS의 표준편차는 3.5 dB, 유영행동 패턴에 의한 TS의 표준편차는 4.7 dB이었고, 70 kHz에서는 각각 5.0 dB와 5.2 dB로 유영행동 패턴에 따른 변동이 더욱 컸다. 그러나, 120 kHz에서는 각각 6.2 dB, 5.3 dB로 유영자세각에 의한 편차가 더욱 크게 나타났으며, 주파수가 증가할수록 유영행동 패턴보다는 유영자세각에 의한 TS변동이 더욱 커지는 현상을 보였다.

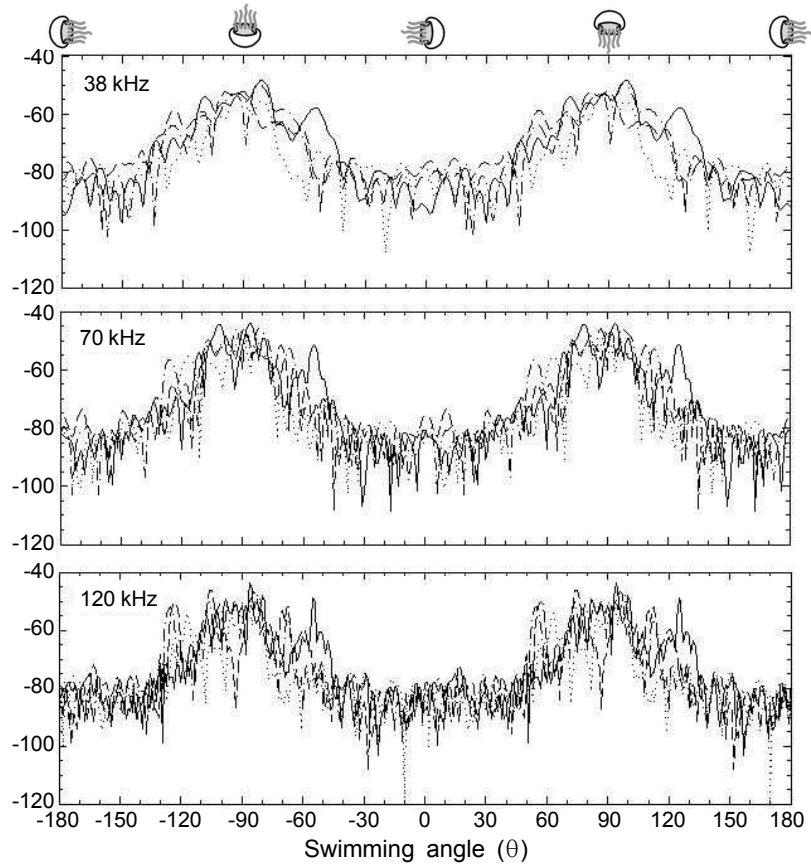


Fig. 3. Acoustic scattering patterns changes of giant jellyfish by swimming behavior theoretically estimated by DWBA model ($d=20$ cm, $\rho=0.984$, $h=1.013$). Solid line (motion (a)), dash line (motion (b)), dot line (motion (c)) and dash-dot line (motion (d)). 0° indicated swimming angle when the body axis is horizontal and + is head up and - is head down.

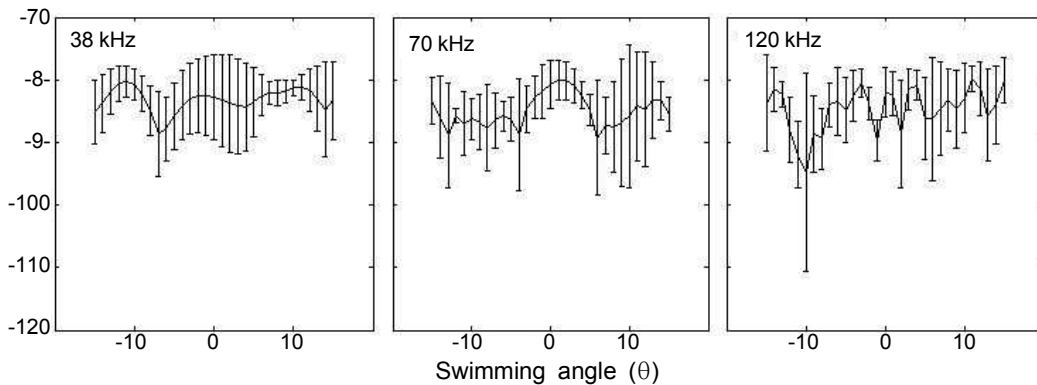


Fig. 4. Fluctuation of target strength by swimming behavior within horizontal swimming angles ($0^\circ \pm 15^\circ$).

수직방향 유영자세각 ($\theta=90^\circ$)에 대한 대형 해파리의 각 주파수별 및 유영행동 패턴별 TS 추정값을 Table 2에 나타내었다. 기존의 대형 해파리의 TS 측정은 현수의 용이함 등의 이유로 체축을 수직으로 한 방향으로 측정이 이루어지고 있다. 물론, 90° 에서의 음향산란레벨의 변동이 수직방향 측정에서의 TS 변동을 대표하는 것은 아니지만, 자세각을 유지하면서 유영행동 패턴만이 변화한다고 가정하였을 때, TS는 주파

수에 따라 8.5-15.1 dB까지 변화하였고, 주파수가 높아질수록 변화폭도 커지는 경향을 나타내었다. Mutru (1996)는 듀얼빔을 이용하여 수조 내에서 자유유영하는 해파리류 (*Aurelia aurita*)의 TS 측정하여, 120 kHz에 대한 직경 15.5 cm의 해파리의 TS값이 유영행동에 따라 약 12 dB까지 변동하는 것을 관찰하였다. 또한, 그는 이러한 변동은 주로 샷갯의 움직임과 깊이가 관계하고, 그 다음으로 유영자세각의 변동에 의해 영향

Table 2. TS estimated at 90° of aspect angle for the four swimming pattern of giant jellyfish (d=40 cm)

Frequency (kHz)	Target Strength				Mean (dB)	Max. - Min. (dB)
	(a)*	(b)*	(c)*	(d)*		
38	-54.3	-52.5	-54.2	-61.0	-54.6	8.5
70	-52.0	-46.7	-46.8	-60.5	-49.1	13.8
120	-51.4	-65.5	-50.4	-56.5	-53.3	15.1

*Swimming pattern.

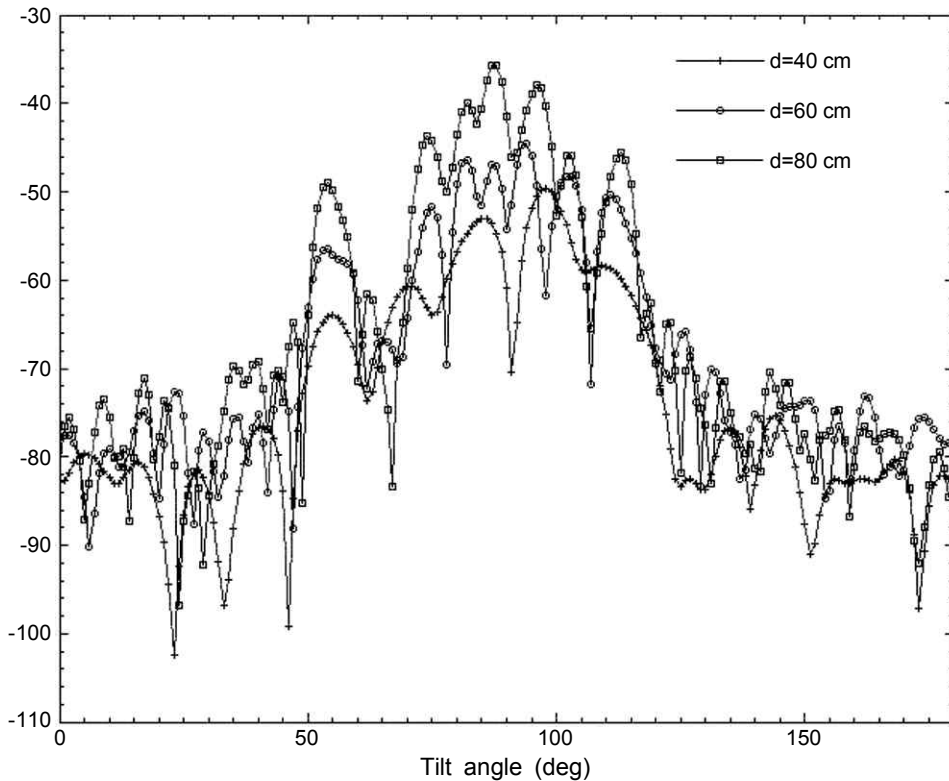


Fig. 5. Acoustic scattering patterns of giant jellyfish (motion (d)) for three sizes at 38 kHz.

을 받을 것이라고 보고하였다. 또한, Hirose et al. (2005)은 120 kHz에 대한 직경 27 cm의 대형 해파리의 TS 측정에서 샷갓의 유영자세와 유영형상의 변화에 의해 약 10 dB의 변동이 발생하였음을 보고한 것과 비교해 보면, 본 검토와 매우 유사하였다.

대형 해파리의 일반적인 형태로 간주되는 유영행동 패턴 (d)를 기준으로 하여 구한 직경 40 cm, 60 cm, 80 cm에 대한 음향산란 패턴을 Fig. 5에 나타내었다. 개체의 크기가 커질수록, 자세각 변동에 따른 TS의 변화가 급격해지는 것을 알 수 있다. 실제로는 연안에 피해를 주고 있는 대형 해파리의 크기는 직경이 보통 40-60 cm, 큰 개체는 1 m에 이르는 것으로 알려져 있으므로, 주파수와 대상생물의 크기에 대한 산란특성의 관계 (ka, k는 파수, a는 산란체의 크기)를 고려한다면, 실제 조사에서는 더욱 복잡한 산란패턴을 가질 것으로 예상됨으로, 가능한 한 낮은 주파수를 이용하여 조사하는 것이 안정적일 것으로 판단된다.

본 연구에서는 대형 해파리의 유영행동 패턴을 추출하여 음향산란특성을 검토한 결과, 유영행동 패턴이 TS추정에 큰 영향을 줄 수 있다는 것이 확인되었다. 따라서, 유영행동 패턴에 따른 TS변동의 영향을 극복하기 위하여, 대형 해파리의 음향산란특성에 대한 연구뿐만 아니라, 다주파 특성을 이용하는 다주파 계측법이나 Echo-trace 법을 이용한 개체판별 등의 연구도 필요할 것으로 판단된다. 또한, 대형 해파리는 일반적으로 체축을 수평으로 하여 유영하는 수평유영 행동을 보이는 것으로 알려져 있기 때문에, 음향조사 시 상대적으로 낮은 값을 나타낼 가능성이 있으므로, 수평유영 자세에 대한 음향산란특성의 측정연구가 더욱 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

Amakasu, K. and M. Furusawa. 2006. The target strength of Antarctic krill (*Euphausia superba*) measured by the split-beam method in a small tank at 70 kHz.

- ICES J. Mar. Sci., 63, 36-45.
- Chu, D., P.H. Weibe, T.K. Stanton, T.R. Hammer, K.W. Doherty, N.J. Copley, J. Zhang, D.B. Reeder and M.C. Benfield. 2000. Measurement of the material properties of live marine organism and their influence on acoustic scattering. Proceedings of the oceans 2000 Rhode island MTS/IEEE, 3, 1963-1967.
- Clay, C.S. and J.K. Horne. 1994. Acoustic models of fish: the Atlantic cod (*Gadus morhua*). J. Acoust. Soc. Am., 96, 1661-1668.
- Demer, D.A. and S.G. Conti. 2003. Reconciling theoretical versus empirical target strength of krill: effects of phase variability on the distorted-wave born approximation. ICES J. Mar. Sci., 60, 429-434.
- Furusawa, M., T. Asami and E. Hamada. 1994. Prediction of krill target strength by liquid prolate spheroid model. Fish. Sci., 60, 261-265.
- Hirose, M., T. Mukai, D.J. Hwang and K. Iida. 2005. Target strength measurements on tethered live jellyfish *Nemopilema nomurai*. Nippon Suisan Gakkaishi, 71, 571-577.
- Hirose, M., T. Mukai, T. Simura, J. Yamamoto and K. Iida. 2007. Measurement of specific density and sound speed in Nomura's jelly fish *Nemopilema nomurai* to estimate their target strength. J. Marine Acoust. Soc. Jpn., 34, 37-46.
- Honda, N., Y. Matsusita, T. Watanabe and H. Iizumi. 2005. The countermeasures for migrating impacts of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* to fishing industries. Nippon Suisan Gakkaishi, 71, 975-976.
- Honda, N. and T. Watanabe. 2007. Observation of the giant jellyfish *Nemopilaema nomurai* using an underwater acoustic camera. Nippon Suisan Gakkaishi, 73, 919-921.
- Kim, I.O., H.C. An, J.K. Shin and B.J. Cha. 2008. The development of basic structure of jellyfish separator system for a trawl net. J. Kor. Soc. Fish. Tech., 44, 99-111.
- Lee, K.H., I.O. Kim, W.D. Yoon, J.K. Shin and H.C. An. 2006. A study on vertical observation of giant jellyfish (*Nemopilema nomurai*) using acoustical and optical methods. J. Kor. Fish. Tech., 43, 355-361.
- Matsusita, Y., N. Honda and S. Kawamura. 2005. Design and tow trial JET (Jellyfish Excluder for Towed fishing gear). Nippon Suisan Gakkaishi, 71, 965-967.
- McGehee, D.E., R.L. O'Driscoll and L.V.M. Traykovski. 1998. Effects of orientation on acoustic scattering from antarctic krill at 120 kHz. Deep-Sea Res. II, 45, 1273-1294.
- Mutru, 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.
- Nakada, K. 2001. Calling behavior by virgin diacamma worker. Movie achives of animal behavior data No: momo031013sn01b. (<http://www.momo-p.com/show-detail-e.php?movieid=momo031013sn01b>).
- National Fisheries Research & Development Institute (NFRDI). 2005. Annual report of jellyfish research. Report of NFRDI, 1-117.
- Warren, J.D. and J.N. Smith. 2007. Density and sound speed of two gelatinous zooplankton: Ctenophore (*Mnemiopsis leidyi*) and lion's mane jellyfish (*Cyanea capillata*). J. Acoust. Soc. Am., 122, 574-580.

2009년 2월 18일 접수
 2009년 3월 26일 수정
 2009년 4월 2일 수리