

한국연안에 있는 보름달물해파리의 체내 음속과 밀도 평가

윤은아 · 황두진*
전남대학교 해양기술학부

An estimation of the sound-speed and density of moon jellyfish (*Aurelia aurita*) in Korean waters

Eun-A YOON and Doo-Jin HWANG*

Division of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea

The sound-speed and density contrasts are important factors in estimating the target strength (TS) of moon jellyfish (*Aurelia aurita*). In this study, the sound-speed and density contrasts were measured using time-of-flight and neutral buoyancy methods, respectively. The sound-speed contrast of *A. aurita* was from 0.9966 to 1.0031 (mean \pm SD, 0.9999 ± 0.0017) and no distinct differences in temperature or pulsation activity and weak were found. The density contrast was from 0.9994 to 1.0004 (mean \pm SD, 1.0000 ± 0.0002). The density of *A. aurita* was substantially different but the density contrast of *A. aurita* was shown to be similar to that in the sampling location. The results can be used to estimate of TS of *A. aurita* by acoustic model.

Keywords: *Aurelia aurita*, Sound-speed contrast, Density contrast, Acoustic model

서 론

수중음향을 이용하여 대상 생물의 분포 및 현존량을 평가하기 위한 기초 자료를 구축하기 위하여 초음파산란강도 (target strength, TS)에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. TS는 현장에서 계측된 대상 생물의 강도를 양으로 변환시키기 위한 중요한 요소가 되므로 이에 따른 특성을 명확히 파악하여야 한다.

대상 생물 중 크릴, 요각류, 살파, 해파리 등과

같이 음향산란이 약하게 일어나는 생물에 대해서는 TS를 측정하는 여러가지 방법 (*ex situ*, model, *in situ*) 중 음향 모델로 파악하는 경우가 주를 이루고 있다 (David et al., 2001; Mukai et al., 2004; Chu and Wiebe, 2005; Hirose et al., 2007; Lee and Hwang, 2009; Matsukura et al., 2009; Hwang et al., 2010; Smith et al., 2012). 음향 모델로 대상 생물의 TS를 추정하기 위해서는 사용주파수 (frequency), 파장 (wave length, λ)과 대

*Corresponding author: djhwang@jnu.ac.kr, Tel: 82-61-659-7126, Fax: 82-61-659-7129

상 생물의 체형, 길이, 행동, 체내 음속비 (sound-speed contrast, h) 및 밀도비 (density contrast, g)가 요구된다 (Stanton and Chu, 2000; Demer and Conti, 2003; Forman and Warren, 2010; Smith et al., 2010). 이 가운데 대상 생물의 음속비는 대상 생물이 서식하고 있는 해수 음속에 대한 대상 생물 음속의 비를 나타낸 것이고, 밀도비도 대상 생물이 서식하고 있는 해수 밀도에 대한 대상 생물 밀도의 비를 말한다 (Mukai et al., 2004; Kang et al., 2006; Smith et al., 2010). 또한, 음속비는 음파 도달 시간차 (time-of-flight) 방법을 이용하여 음속 탱크에 대상 생물과 주변 해수를 함께 넣어서 측정하거나 대상 생물과 주변 해수를 따로 넣어서 측정한다. 밀도비는 부피체적법, dual-density법, 중성부력법, density bottles법, pipette법, titration법을 이용하여 측정이 이루어진다.

한편, 음속비와 밀도비는 대상 생물이 같은 종이라도 측정 방법이나 조사해역, 시기, 사이즈 등에 따라 다르게 나타나기 때문에 TS의 오차를 줄이기 위해서는 이러한 요소를 고려한 평가가 이루어져야 할 필요가 있다 (Mukai et al., 2004; Hirose et al., 2007; Matsukura et al., 2009). 본 연구의 대상 종인 보름달물해파리의 음속비와 밀도비는 Lynam (2006), Hirose et al. (2009), Kang et al. (2012)에 의해 측정되었으나 소수 개체에 대한 보고가 이루어졌고, 측정 방법, 조사 해역 및 시기가 본 연구와 차이가 있었다.

따라서, 본 연구에서는 보름달물해파리의 TS를 평가하기 위한 신뢰성 있는 음속비와 밀도비를 제공하기 위하여 충분한 개체수에 대한 실험을 실시하였고, 타 연구와 다른 측정 방법을 이용하여 측정 방법에 따른 결과 차이를 비교하였다.

재료 및 방법

표본 채집방법

보름달물해파리의 체내 음속을 측정하기 위한 표본은 2011년 5월과 6월, 2012년 6월과 7월에 보름달물해파리가 대량 발생하는 여수의 가막만

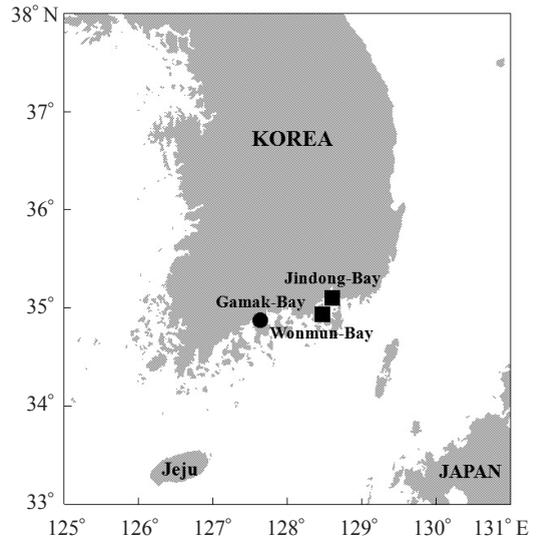


Fig. 1. Location of samples used to measure the sound-speed contrast (h) and density contrast (g) of *A. aurita*. The filled circles indicates the location of samples used to measure the sound-speed contrast (h) and density contrast (g). The filled squares represent the locations of samples used to measure density contrast (g).

연안 해역에서 채집하였고, 체내 밀도를 측정하기 위한 표본은 2010년 10월에 창원의 진동만, 2011년 9월은 통영의 원문만, 2012년 5월과 6월은 여수의 가막만 연안에서 채집하였다 (Fig. 1).

현장에서의 표본 채집은 모두 육지와 바다가 연결된 곳이나 바지선에서 이루어졌으며, 채집 전에는 채집 해역의 수온과 염분을 측정하였다 (30M-100 FT, YSI Incorporated). 채집 방법은 먼저 아이스박스에 아이스팩을 깔고, 아이스팩 위에 비닐주머니를 넣은 후 비닐주머니에 해파리의 주변에 있는 해수를 투입하였다. 그 후 미성체의 보름달물해파리는 바구니가 부착된 뜰채, 성체는 바구니가 부착된 뜰채와 망지로 이루어진 뜰채를 이용하여 해파리가 손상되지 않도록 조심스럽게 채집하여 비닐주머니에 넣고, 비닐주머니의 입구를 고무줄로 밀봉하였다. 해파리는 살아있는 상태를 유지시키며 실험 장소로 이동하여 체내 음속과 밀도를 측정하였다.

보름달물해파리의 음속비 측정

보름달물해파리의 체내 음속은 음파 도달 시간차를 이용한 time-of-flight 방법을 이용하였다. 이 방법은 아크릴로 제작된 음속 탱크 양쪽에 주파수 400 kHz의 송수신기를 설치하고 신호발생기 (WF1944A, NF Electronic Instruments)로 발생한 신호를 송신 진동자에서 발사하여 수신 진동자에 도달된 시간 (T , μs)을 오실로스코프스 (LC534AM, LeCroy)로 측정하는 것이다 (Fig. 2).

먼저, 해수를 최대한 제거한 보름달물해파리를 음속 탱크에 가득 차도록 넣어 보름달물해파리의 음속을 측정하였다. 측정 후에는 음속 탱크에서 보름달물해파리의 샘플을 꺼내고 남은 해수를 매스실린더에 넣어 부피 (ml)를 측정하였으며, 측정 후에는 보름달물해파리의 공기 중 우산의 직경 (cm)과 습중량 (g)도 측정하였다. 다음, 보름달물해파리와 함께 샘플해 온 해수를 망지로 여과 시킨 후 음속 탱크에 넣어 해수의 음속을 측정하였다. 보름달물해파리와 해수의 음속 측정시에는 30 cm의 센서 (LK-700WP, CUSTOM)로 구성된 방수 온도계 (CT-800WP, CUSTOM)를 이용하여 온도의 변화를 기록하면서 한 회당 10~15회 반복하여 측정하였다.

보름달물해파리를 넣고 측정한 음파 도달 시간 (μs)에는 보름달물해파리 뿐만 아니라 약간의 해수도 포함되었기 때문에 식 (1)을 이용하여 보름달물해파리만의 T_{jelly} 를 구하였다.

$$T_{total} = (1 - V) T_{sw} + VT_{jelly} \quad (1)$$

여기서, T_{total} 은 보름달물해파리와 해수가 포함된 음파 도달 시간 (μs)이고, T_{sw} 와 T_{jelly} 는 각각 해수, 보름달물해파리만의 음파 도달 시간 (μs)이며, V 는 음속 탱크에 들어간 보름달물해파리만의 부피이다.

식 (1)로 T_{jelly} 를 구하면, 음속비는 식 (2)로 계산할 수 있다.

$$h = \frac{T_{sw}}{T_{jelly}} = \frac{C_{jelly}}{C_{sw}} \quad (2)$$

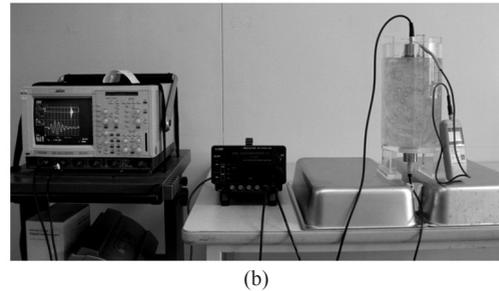
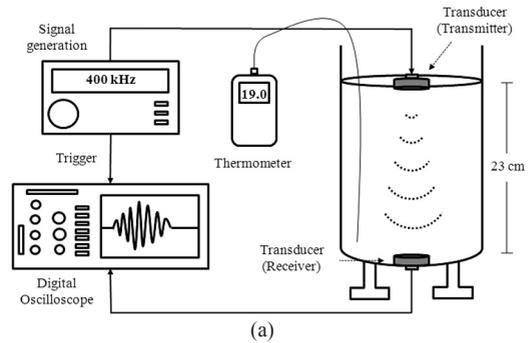


Fig. 2. Equipment used to measure the sound-speed of *A. aurita* and seawater (a); measuring the sound-speed of *A. aurita* and seawater (b).

C_{sw} 는 해수의 음속 (m/s), C_{jelly} 는 보름달물해파리의 음속 (m/s)이며, C_{sw} 는 측정시 보름달물해파리의 온도 ($^{\circ}\text{C}$)와 해수의 염분 (psu)을 기준으로 Mackenzie (1981) 식을 이용하여 구한 후, C_{jelly} 도 계산하였다.

보름달물해파리의 체내 음속은 총 32회 측정하였고, 그 중 25회 측정에서는 보름달물해파리의 박동이 활발하였으며, 7회는 박동이 미약하였다. 또한, 음속 측정 1회당 음속 탱크에 넣은 보름달물해파리의 개체수는 보름달물해파리의 사이즈에 따라 17~74개체이었고, 부피는 0.73~0.95이었다.

보름달물해파리의 밀도비 측정

보름달물해파리의 밀도비는 중성부력법으로 측정하였다. 중성부력법은 비커에 보름달물해파리와 함께 샘플해 온 여과된 해수와 보름달물해파리를 넣은 후 밀도계 (DMA 35, Anton Paar)

를 이용하여 해수의 밀도를 측정하고, 실험에 사용된 보름달물해파리는 살아있는 개체이기 때문에 보름달물해파리의 움직임을 자제시키기 위하여 염화마그네슘 (MgCl₂, JUNSEI)을 넣어 보름달물해파리를 마취시킨다. 마취가 되면 보름달물해파리는 해수의 표면으로 떠오르게 되고, 증류수를 넣어 보름달물해파리가 Fig. 3에서 보는 바와 같이 중성부력 상태가 될 때 보름달물해파리의 밀도를 측정하였다. 본 연구에서는 총 109개체 (우산의 크기: 2.0~22.5 cm, 습중량: 0.3~440.0 g)에 대한 실험을 실시하였다.

보름달물해파리의 밀도비는 보름달물해파리와 함께 샘플 해온 해수의 밀도 (ρ_{sw})와 보름달물해파리의 밀도 (ρ_{jelly})의 비로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g = \frac{\rho_{jelly}}{\rho_{sw}} \quad (3)$$



Fig. 3. Density measurement of *A. aurita* using the neutral buoyancy method. The photo shows *A. aurita* at neutral buoyancy.

음속비와 밀도비를 이용한 음향반사계수

음향 모델로 보름달물해파리의 TS를 평가하기 위해서는 음속비와 밀도비가 TS에 영향을 미치는 중요한 요소이고, 음속비와 밀도비를 이용하여 음향반사계수 (reflection coefficient, R)을 계산함으로써 실측치와 비교할 수 있는 값을 얻을 수 있다.

여기서, R 은 다음 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{gh - 1}{gh + 1} \quad (4)$$

결 과

보름달물해파리의 음속비

Fig. 4는 해수의 음속과 보름달물해파리의 음속을 나타낸 것이다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 해수의 음속은 1507.3~1527.1 m/s이었고, 보름달물해파리의 음속은 1508.8~1529.7 m/s로 온도가 높아짐에 따라 음속이 빠르게 나타났으며, 온도에 대한 해수와 보름달물해파리의 음속 회귀선은 다음 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_{sw} &= 2.8412(T) + 1461.6 \quad (R=1.00, p<0.01) \\ C_{jelly} &= 2.6892(T) + 1464.6 \quad (R=0.89, p<0.01) \end{aligned} \quad (5)$$

위의 식으로 수온 20°C에 대한 해수와 보름달물해파리의 음속을 비교한 결과 해수의 음속은

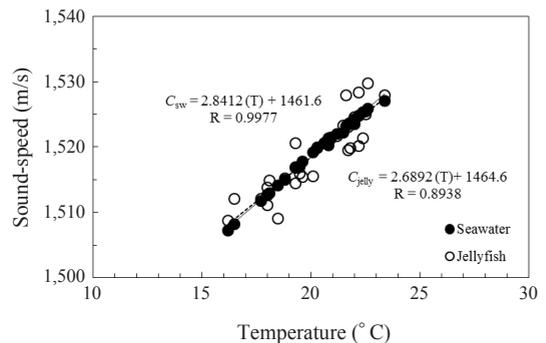


Fig. 4. Relationship between sound-speed and temperature of *A. aurita* and seawater.

1518.4 m/s, 보름달물해파리의 음속도 1518.4 m/s로 해수와 보름달물해파리의 음속이 같게 나타났다.

또한, 보름달물해파리의 음속을 측정할 때 보름달물해파리의 박동이 활발한 상태와 미약한 상태가 있어 Fig. 5에 보름달물해파리의 박동 상태에 따른 음속을 비교하여 나타내었다. 보름달물해파리의 박동이 활발할 때와 미약할 때 모두 음속은 온도가 증가하면 빨라지고, 비슷한 온도대에 비슷한 음속을 나타내는 것으로 박동 상태에 따른 음속의 차이는 없는 것을 알 수 있었다.

해수의 음속과 보름달물해파리의 음속으로부터 음속비를 구한 결과 박동이 활발한 상태는 0.9966~1.0031사이의 값을 가지며, 평균값 (표

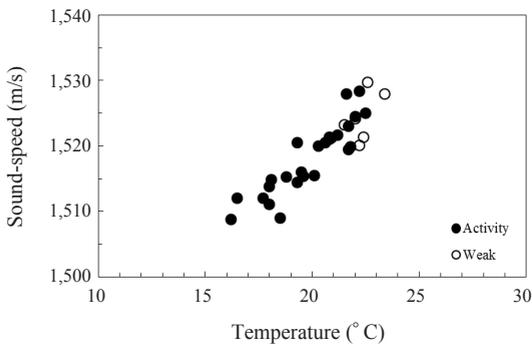


Fig. 5. Relationship between sound-speed and temperature of *A. aurita* during pulsation while active and weak.

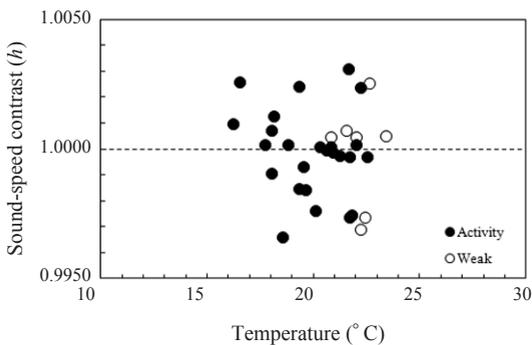


Fig. 6. Relationship between sound-speed contrast (h) and temperature of *A. aurita* during while active and weak.

준편차, \pm SD)은 0.9999 (\pm 0.0016)로 나타났고, 박동이 미약한 상태는 0.9969~1.0026, 평균값 (표준편차, \pm SD)은 0.9999 (\pm 0.0020)로 박동이 활발한 상태와 미약한 상태의 음속비는 큰 차이가 나타나지 않았다. 전체에 대한 음속비의 최소값은 0.9966, 최대값은 1.0031, 평균값 (표준편차, \pm SD)은 0.9999 (\pm 0.0017)이었다 (Fig. 6).

이와 같이 보름달물해파리의 음속비는 거의 1에 가까워 해수의 음속과 보름달물해파리의 음속이 유사하다는 것을 의미하였다.

보름달물해파리의 밀도비

밀도비 측정에 사용한 표본은 채집 해역이 달라 채집 해역별로 보름달물해파리의 밀도를 구분하였다 (Fig. 7). 진동만에서 채집한 보름달물해파리의 밀도는 1.0209~1.0222 g/cm³이었고, 원문만에서 채집한 보름달물해파리의 밀도는 1.0188~1.0210 g/cm³, 가막만에서 채집한 보름달물해파리의 밀도는 1.0232~1.0250 g/cm³이었다. 보름달물해파리의 밀도는 원문만, 진동만, 가막만 순으로 높게 나타났고, 해역별로 해파리의 밀도가 다르게 나타남을 알 수 있었다.

한편, 보름달물해파리와 함께 샘플해온 해수의 밀도와 보름달물해파리의 밀도 변수를 이용하여 계산한 밀도비는 진동만의 경우 0.9995~1.0004, 평균 (표준편차, \pm SD)은 0.9999 (\pm 0.0002)이었고, 원문만은 0.9995~1.0004로 평균

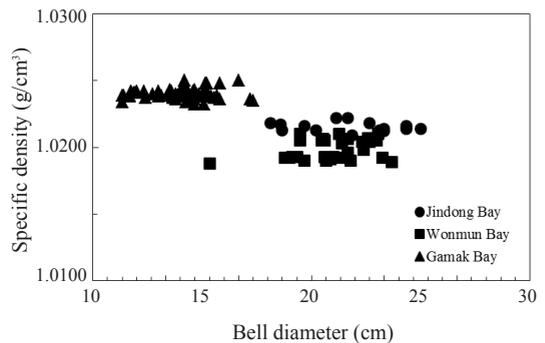


Fig. 7. Relationship between specific density and bell diameter in the air at each sampling location.

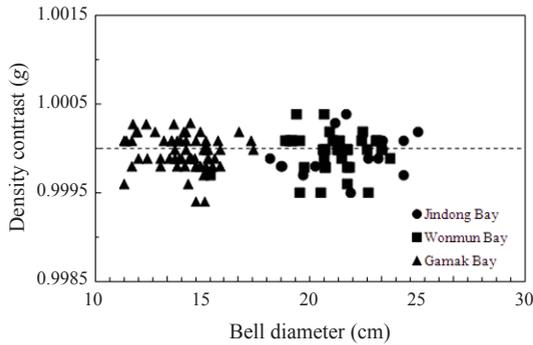


Fig. 8. Relationship between density contrast (g) and bell diameter in the air.

(표준편차, \pm SD)은 1.0000 (\pm 0.0002)이었으며, 가막만은 0.9994~1.0003으로 평균 (표준편차, \pm SD)은 1.0000 (\pm 0.0002)으로 나타났다. 밀도비는 해역마다 주변 해수와 보름달물해파리의 밀도의 차이가 크지 않아 해역별로 비슷하였다 (Fig. 8). 전체 해역에 대한 밀도비는 0.9994~1.0004로 평균 (표준편차, \pm SD)은 1.0000 (\pm 0.0002)이었다.

고 찰

음속비와 밀도비

본 연구에서 측정된 보름달물해파리의 음속비는 0.9966~1.0031 사이로 평균값 (표준편차, \pm SD)은 0.9999 (\pm 0.0017)로 나타났다. Lynam (2006), Hirose et al. (2009), Kang et al. (2012)는 보름달물해파리의 음속비 연구 결과를 보고하였고, 음속비는 각각 1.0000, 1.0001, 1.0005로 본 연구의 결과보다 0.0001~0.0006으로 미세하게 높게 나타났으나, 거의 해수와 유사한 1에 가까운 값을 나타내었다. 노무라입깃해파리의 경우 평균 음속비가 1.0008로 보름달물해파리와 유사한 값을 보였으나, 유령해파리는 1.0380으로 타해파리에 비하여 상당히 높은 값을 나타내었다 (Hirose et al., 2009). 또한, Lynam (2006)은 *Cyanea capillata*의 우산과 촉수 부위로 따로 나누어 음속비를 측정하였고, Warren and Smith (2007)는 전체에 대한 음속비를 측정하였다. 그

결과 우산은 1.0010, 촉수는 0.9980, 전체는 1.0004로 우산 부위의 음속비가 가장 높게 나타났으며, 해파리의 부위에 따라 음속비가 다름을 시사하였다. 또한, *Mnemiopsis leidyi*의 음속비는 1.007 (Warren and Smith, 2007)으로 나타났으며, 해파리의 음속비는 보름달물해파리, *C. capillata*, 노무라입깃해파리, *M. leidyi*, 유령해파리 순으로 높게 나타났다.

중성부력법으로 측정된 보름달물해파리의 밀도비는 평균값이 1.0000로 나타내었다. Lynam (2006)과 Hirose et al. (2009)는 부피체적법으로 보름달물해파리의 밀도비를 측정하였고, 그 결과 각각 1.0030과 0.9890으로 본 연구의 결과와 0.0030~0.0110의 차이를 나타내었다. Kang et al. (2012)는 dual-density법으로 측정된 결과 0.9808으로 본 연구와는 0.0192만큼 낮게 나타나 같은 종의 밀도비 일지라도 측정 방법에 따라 많은 차이를 보였다. Warren and Smith (2007)도 *C. capillata*와 *M. leidyi*의 밀도비를 pipette와 titration법으로 측정하였고, 그 결과 측정 방법에 따라 약간의 차이가 나타났다. *C. capillata*의 평균 밀도비는 pipette와 titration법에서는 각각 1.0088, 1.0096으로 0.0008의 차이를 나타내었고, *M. leidyi*의 평균 밀도비는 pipette법에서 1.0071, titration법에서 1.0102로 0.0031차이를 보였다. 또한, 다른 종에 대한 해파리 밀도비 결과를 보면 노무라입깃해파리의 경우 1.0040으로 측정되었고, 유령해파리는 1.0730으로 보름달물해파리에 비하여 높은 경향을 보였다 (Hirose et al., 2009). Lynam (2006)의 연구 결과 *C. capillata*의 우산 밀도비는 0.9950, 촉수 밀도비는 1.0001이었고, Warren and Smith (2007)의 연구에서 *C. capillata*의 전체 밀도비는 pipette법에서 1.0088, tritration법에서 1.0096으로 밀도비 역시 측정 부위마다 다르게 나타남을 알 수 있었다. 해파리의 평균 밀도비는 보름달물해파리, 노무라입깃해파리, *M. leidyi*, *C. capillata*, 유령해파리 순으로 높게 나타났다 (Table 1).

이와 같이 보름달물해파리의 음속비와 밀도비는 다른 종의 해파리에 비하여 낮은 값을 가지는 것을 알 수 있었다.

음속비와 밀도비에 따른 TS 오차

음향 모델에서 대상 생물의 음속비와 밀도비는 TS를 평가하는데 중요한 요소로 작용한다. 본 연구에서 측정된 보름달물해파리에 대한 음속비와 평균 밀도비 (본 연구와 타 연구)를 이용하고, 식 (4)를 이용하여 R을 계산하였다. Table 2에서 보는 바와 같이 각각의 음속비와 밀도비에 따라 R이 0.0001~0.0114 (-86.0~-38.9 dB)으로 계산되어 적용하는 음속비와 밀도비에 따라 R이 크게 달라지는 것을 알 수 있었다.

따라서, 음향 모델을 이용한 보름달물해파리의 TS는 적용하는 음속비와 밀도비에 따라 크게 달라지므로 신뢰성 있는 TS를 평가하기 위해서는 실측 TS와의 비교를 통하여 적절한 음속비와 밀도비 적용이 필요할 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 음향 모델을 이용하여 보름달물해파리의 TS를 평가하기 위한 중요한 변수인 음속비와 밀도비를 측정하였다. 보름달물해파리의 음속비는 음속 도달 시간차 (time-of-flight) 방법을 이용하였다. 측정된 음속비는 0.9966~1.0031으로 평균값 (표준편차, ±SD)은 0.9999 (±0.0017)이었으며, 온도도와 박동이 활발할 때와

Table 1. Comparisons of sound-speed contrast (h) and density contrast (g) of jellyfish

Species	Sound-speed contrast (h)			Density contrast (g)			Reference
	Min	Max	Mean±SD	Min	Max	Mean±SD	
<i>A. aurita</i>	0.9966	1.0031	0.9999±0.0017	0.9994	1.0004	1.0000±0.0002	This study
<i>A. aurita</i>	—	—	1.0000	0.9861	1.0168	1.0030	Lynam (2006)
<i>A. aurita</i>	—	—	1.0001±0.0250	—	—	0.9890±0.0190	Hirose et al. (2009)
<i>A. aurita</i>	0.9982	1.0025	1.0005±0.0012	0.9527	0.9986	0.9808±0.0214	Kang et al. (2012)
<i>N. nomurai</i>	—	—	1.0008±0.0090	—	—	1.0040±0.0150	Hirose et al. (2009)
<i>C. nozakii</i>	—	—	1.0380	—	—	1.0730	Hirose et al. (2009)
<i>C. capillata</i> (umbrella)	—	—	1.0010	0.9711	1.0248	0.9950	Lynam (2006)
<i>C. capillata</i> (tentacles)	—	—	0.9980	0.9781	1.0287	1.0001	Lynam (2006)
<i>C. capillata</i> (total)	—	—	1.0004	1.0037*	1.0176*	1.0088*	Warren and Smith (2007)
				1.0043**	1.0165**	1.0096**	Warren and Smith (2007)
<i>M. leidyi</i>	—	—	1.007±0.001	1.0018*	1.0140*	1.0071*	Warren and Smith (2007)
				1.0045**	1.0153**	1.0102**	Warren and Smith (2007)

*pipette method, **titration method

Table 2. Reflection coefficient (R) using sound-speed contrast (h) and mean density contrast (g) of *A. aurita*

h	g	R	R (dB)
<i>h</i> _{max}	g _{This study}	0.0015	-56.2
	g _{Lynam (2006)}	0.0030	-50.3
	g _{Hirose et al. (2009)}	0.0040	-48.0
	g _{Kang et al. (2012)}	0.0081	-41.8
<i>h</i> _{mean}	g _{This study}	0.0001	-86.0
	g _{Lynam (2006)}	0.0014	-56.8
	g _{Hirose et al. (2009)}	0.0056	-45.1
	g _{Kang et al. (2012)}	0.0097	-40.2
<i>h</i> _{min}	g _{This study}	0.0017	-55.4
	g _{Lynam (2006)}	0.0002	-73.8
	g _{Hirose et al. (2009)}	0.0072	-42.8
	g _{Kang et al. (2012)}	0.0114	-38.9

활발하지 않을 때의 값은 차이가 거의 나타나지 않았다. 밀도비는 중성부력법으로 측정하였고, 계측값은 0.9994~1.0004 범위로 평균값 (표준편차, \pm SD)은 1.0000 (\pm 0.0002)이었으며, 채집해역에 따라 보름달물해파리의 밀도는 차이가 있었으나 주변 해수에 대한 밀도비는 거의 유사하게 나타났다. 이 연구의 결과는 음향 모델을 이용하여 보름달물해파리의 TS를 평가하는 기초 자료로 사용되질 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원 수산시험연구사업 (RP-2013-FE-036)의 지원에 의해 수행되었으며, 본 논문을 사려 깊게 검토하여 주신 심사위원님들과 편집위원님께 감사드립니다.

REFERENCES

- Chu D and Wiebe PH. 2005. Measurements of sound-speed and density contrasts of zooplankton in Antarctic waters. *ICES J Mar Sci* 62, 818–831.
- David P, Guerin-Ancey O, Oudot G and Van Cuyck JP. 2001. Acoustic backscattering from salp and target strength estimation. *Oceanologica Acta* 24, 443–451.
- Demer DA and Conti SG. 2003. Validation of the stochastic distorted-wave Born approximation model with broad bandwidth total target strength measurements of Antarctic krill. *ICES J Mar Sci* 60, 625–635.
- Forman KA and Warren JD. 2010. Variability in the density and sound-speed of coastal zooplankton and nekton. *ICES J Mar Sci* 67, 10–18.
- 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.
- 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 J Mar Sci* 66, 1233–1237.
- Hwang BK, Shin HO, Lee DJ and Lee YW. 2010. Examination of theoretical acoustic scattering models for copepods in an acoustical zooplankton biomass survey. *Kor J Fish Aquat Sci* 43, 380–385.
- Kang DH, Lee CW, Lee HB and Kim MR. 2012. Measurements of sound speed and density contrasts of the moon jellyfish (*Aurelia aurita* s.l.) for hydroacoustic model. *Ocean and Polar Res* 34, 85–91.
- Kang DH, Iida K, Mukai T and Kim JM. 2006. Density and sound speed contrasts of the Japanese common squid *Todarodes pacificus* and their influence on acoustic target strength. *Fish Sci* 72, 728–736.
- 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.
- Lynam CP. 2006. Ecological and acoustic investigations of jellyfish (Scyphozoa and Hydrozoa). Ph.D. Thesis, University of St Andrews, UK, 189–228.
- Mackenzie KV. 1981. Nine-term equation for sound speed in the oceans. *J Acoust Soc Am* 70, 807–812.
- Matsukura R, Yasuma H, Murase H, Yonezaki S, Funamoto T, Honda S and Miyashita K. 2009. Measurements of density contrast and sound-speed contrast for target strength estimation of *Neocalanus* copepods (*Neocalanus cristatus* and *Neocalanus plumchrus*) in the North Pacific Ocean. *Fish Sci* 75, 1377–1387.
- Mukai T, Iida K, Ando Y, Mikami H, Maki Y and Matsukura R. 2004. Measurements of swimming angles, density, and sound speed of the krill *Euphausia pacifica* for target strength estimation. Proceeding of MTTTS/IEEE Techno-Ocean' 04, Kobe, Japan, 9–12 Nov 2004, 383–388.
- Smith JN, Ressler PH and Warren JD. 2010. Material properties of euphausiids and other zooplankton from the Bering Sea. *J Acoust Soc Am* 128, 2664–2680.

- Smith JN, Ressler PH and Warren JD. 2012. A distorted wave Born approximation target strength model for Bering Sea euphausiids. ICES J Mar Sci 70, 204–214.
- Stanton TK and Chu D. 2000. Review and recommendations for the modelling of acoustic scattering by fluid-like elongated zooplankton: euphausiids and copepods. ICES J Mar Sci 57, 793–807.
- Warren JD and Smith JN. 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.
-
- 2013년 10월 16일 접수
2013년 11월 11일 1차 수정
2013년 11월 12일 수리