

Note

수중음향 모델을 위한 보름달물해파리(*Aurelia aurita* s.l.)의  
체내 음속비 및 밀도비

강돈혁<sup>1\*</sup> · 이창원<sup>2</sup> · 이형빈<sup>1</sup> · 김미라<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국해양연구원 해양방위연구센터  
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787  
<sup>2</sup>한양대학교 과학기술대학 해양환경과학과  
(426-791) 경기도 안산시 상록구 한양대학로 55

Measurements of Sound Speed and Density Contrasts of the Moon Jellyfish  
(*Aurelia aurita* s.l.) for Hydroacoustic Model

Donhyug Kang<sup>1\*</sup>, Chang-Won Lee<sup>2</sup>, Hyungbeen Lee<sup>1</sup>, and Mira Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Marine Security Research Center, KORDI  
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

<sup>2</sup>Department of Environmental Marine Sciences, Division of Science and Technology  
Hanyang University, Ansan 426-791, Korea

**Abstract :** Physical properties such as sound speed contrast ( $h$ ) and density contrast ( $g$ ) of the interested target are key parameters to understand acoustic characteristics by using theoretical scattering models. The density and sound speed of moon jellyfish (common jellyfish, *Aurelia aurita* s.l.) were measured. Sound speed contrast ( $h$ ) was measured from travel time difference (time-of-flight method) of an acoustic signal in a water tank for APOP studies (Acoustic Properties Of zooplankton). Density contrast ( $g$ ) was measured by the displacement volume and wet weight (dual-density method). The sound speed remained almost constant as the moon jellyfish increased in bell length. The mean values  $\pm$  standard deviation of  $h$  and  $g$  were  $1.0005 \pm 0.0012$  and  $0.9808 \pm 0.0195$ , respectively. These results will provide important input for use in theoretical scattering models for estimating the acoustic target strength of jellyfish.

**Key words :** hydroacoustic model, moon jellyfish, *Aurelia aurita* s.l., sound speed contrast, density contrast

1. 서 론

최근 전 세계적인 해파리(Jellyfish) 대발생은 해양 생태계뿐만 아니라 연안 수산자원에 직접적인 영향을 주고 있다(Mills 2001). 또한 연안에 위치하여 해수를 이용하는 원자력발전소 및 화력발전소의 취수구로 대량 유입되어

막대한 피해를 주고 있다(Lee et al. 2006). 해파리의 피해를 최소화하기 위해서는 해파리 서식처 혹은 연안으로 유입되는 지점에서의 개체수 추정이 필요하다. 해파리 개체수 조사는 기존의 목시 관측 혹은 네트를 이용하여 채집하는 방법과 1990년 중반 이후에 제안되고 있는 수중음향 조사 기법이 있다(Mutlu 1996; 국토해양부 2009). 이 가운데 음향 조사 기법은 광범위한 지역에 대해 전 수 층에 대해 연속적으로 조사할 수 있는 장점 때문에 최근에 해파

\*Corresponding author. E-mail : dhkang@kordi.re.kr

리 대발생 지역에서 적용하고 있다(Brierley et al. 2001; Colombo et al. 2003).

해파리 개체수 혹은 분포 파악을 위한 음향 기법 적용에서 가장 중요한 요소는 해파리의 음향 반사강도(target strength, TS)이다. 주파수별 TS 자료 혹은 함수식은 현장 음향 조사 자료로부터 개체 판별 혹은 현존량 변환을 위한 핵심 변수로 TS 자료의 정확도에 따라 분포 및 현존량의 정확도가 결정된다(Medwin and Clay 1998). 중요 상업어종 혹은 생태계의 중요 생물종의 음향 특성 파악과 동일하게 해파리 음향 특성 파악 또한 직접 측정 혹은 대상 생물 체내의 물리적 특성 및 형상을 고려하는 수중음향 이론 모델을 이용한다(Simmonds and MacLennan 2005).

해파리 개체에 대한 음향 특성의 직접 측정에서 Mutlu (1996)는 흑해 연안에 분포하는 해파리(*Aurelia aurita*)를 3개의 개체 크기군으로 분류한 후 자유유영 상태에서 TS 함수를 제시하였으며, Hirose et al. (2009)은 북서 태평양의 *Nemopilema nomurai*(order Rhizostomeae)와 *Cyanea nozakii*(Semaestomeae) 개체에 대한 TS를 음향 수조에서 각각 측정하였다. 그 밖에 아프리카 연안에 분포하는 *Chrysaora hysoscella* (Scyphozoa)와 *Aequorea aequorea* (Hydrozoa)에 대해 개체별 TS 함수를 유도하였다(Brierley et al. 2004). 직접 측정을 통한 해파리의 음향 특성 연구는 젤라틴 성분의 약한 몸체 구성, 시료 확보 및 해수 내에서의 해파리 취급 등 여러 어려움으로 인해 기존의 중요 상업어종 혹은 생태계의 중요 생물 종에 비해 상대적으로 음향 특성 연구가 부족한 상황이다(Simmonds and MacLennan 2005).

실험을 통한 해파리 TS 측정의 여러 어려움을 해결하기 위한 방법으로 음향 이론 모델 방법이 제시되고 있다. 음향 이론 모델을 이용한 해파리 음향 특성 파악 연구에서 Monger et al. (1998)은 실측 자료와 이론 모델을 이용하여 미국 북서 해안에 분포하는 해파리 종인 *Aequorea victoria*와 *Pleurobrachia bachei*에 대한 음향 특성을 제시하였다. 또한 해파리 유영 자세각에 따른 음향 특성 변동을 파악하기 위하여 음향 모델을 적용하기도 하였다(Lee and Hwang 2009).

음향 모델을 이용한 해파리 음향 특성에서 가장 중요한 요소는 모델 입력 값으로 사용하는 해파리 체내의 음속비(sound speed contrast,  $h$ ) 및 밀도비(density contrast,  $g$ )로 이들 물리적 특성 연구는 실제 TS 측정 연구보다 더 제한적으로 이루어졌다. 해파리의 물리적 특성 연구는 미국 북동부 연안에 서식하는 Ctenophore (*Mnemiopsis leidyi*)와 lion's mane jellyfish(*Cyanea capillata*)에 대한 밀도비 및 음속비가 제시되었고(Warren and Smith 2007), 북서 태평양 연안의 해파리 종인 *N. nomurai*, *Cyanea nozakii*, *A.*

*aurita*에 대한 밀도비 및 음속비를 측정하였다(Hirose et al. 2009). 제한적인 해파리의 밀도비 및 음속비 자료는 음향 모델 결과의 안정성 및 정확도 증가를 위하여 동일한 종이라 할지라도 다양한 시기, 환경 변수, 지역 등에서 측정된 신뢰성 있는 자료를 필요로 하고 있다.

본 연구에서는 수중음향 모델을 이용한 연안 해파리의 대표 종인 보름달물해파리(Moon jellyfish, *Aurelia aurita* s.l.)의 음향 특성 파악에서 핵심 입력 변수로 사용되는 대상 해파리의 음속비(sound speed contrast,  $h$ ) 및 밀도비(density contrast,  $g$ )를 제시하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 해파리 채집

대상 생물인 보름달물해파리는 2008년 9월, 우리나라 연안에서 분포 밀도가 높은 지역으로 알려진 시화호와 통영 인근 해역에서 채집하였다. 해파리는 소형 선박을 이용하여 대형 플라스틱 용기(15 l)와 비닐 주머니로 채집하였다. 채집 방법은 직접 주변 해수와 함께 해파리를 담아 채집하였고, 채집 과정에서 미세 기포가 해파리 체내와 표면에 흡착되는 영향을 없애기 위해 최대한 안정된 조건에서 채집하였다. 시료 채집 과정에서 미세 기포가 흡착된 해파리는 측정에서 제외시켰다. 시화호에서 채집한 보름달물해파리는 해수 수조(2 m 가로×2 m 세로×1 m 높이)에, 통영 인근 해역에서 채집한 해파리는 대형 어망(4 m 가로×4 m 세로×4 m 높이)에 보관 후 음속비와 밀도비를 측정하였다.

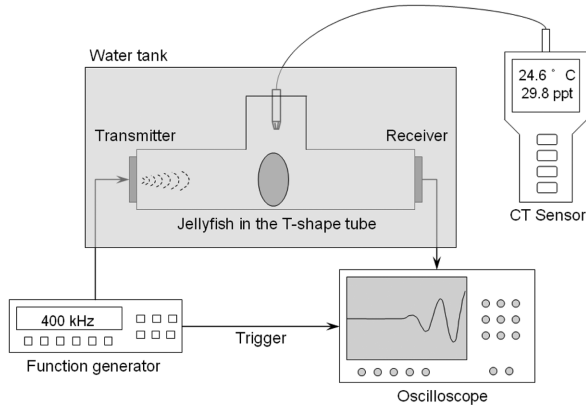
채집한 해파리 중 15개체는 음속비 측정에, 6개체는 밀도비 측정에 이용하였다(Table 1). 실험에 사용된 보름달물해파리는 음속비 혹은 밀도비 측정에 앞서 각 개체에 대해서 1 cm 간격으로 격자를 그린 플라스틱 용기에 해수를 채우고, 보름달물해파리의 각 개체를 넣어 우산(bell)이 퍼지도록 하여 우산 직경(bell diameter, cm)을 측정하였다.

**Table 1. Sample collection of moon jellyfish, *Aurelia aurita* s.l. for measuring sound speed and density contrast**

Sampling site / date	Number of sampling	Measurement
Shiwha lake / September 2008	10 3	sound speed contrast ( $h$ ) <sup>1)</sup> density contrast ( $g$ ) <sup>2)</sup>
Tongyeong coast / September 2008	5 3	sound speed contrast ( $h$ ) density contrast ( $g$ )

<sup>1)</sup> $h=c_j/c_w$ ,  $c$ =sound speed (m/s),  $j$ =jellyfish,  $w$ =seawater

<sup>2)</sup> $g=\rho_j/\rho_w$ ,  $\rho$ =density ( $g/cm^3$ ),  $j$ =jellyfish,  $w$ =seawater



**Fig. 1. Schematic drawing of measuring sound speed contrast of the moon jellyfish, *Aurelia aurita* s.l. One part of bisected or quadrisected bell of the jellyfish samples was measured**

#### 음속비(sound speed contrast, $h$ ) 측정

해파리 음속비( $h$ )는 해파리와 주변 해수 음속의 비로 정의한다( $h=c_j/c_w$ , 여기서  $c_j$ : 해파리의 음속,  $c_w$ : 해수의 음속). 보름달물해파리의 음속비 측정은 어류 및 오징어, 동물플랑크톤 등의 음속을 측정하는데 사용하는 APOP (Acoustic Properties Of zooPlankton) 장치를 이용하였다 (Fig. 1, Chu et al. 2000; Kang et al. 2006). 실험에 사용된 APOP 장치의 실린더 부분 직경이 해파리 우산 부분에 비해 작기 때문에, 전체 우산이 아닌 해파리 우산의 일부를 절개하여 음속을 측정하였다. 우산 직경 범위가 10-21 cm인 해파리를 메스를 이용하여 우산을 중심으로 2등분 혹은 4등분하였고, 이 가운데 하나의 부분을 T형 실린더 내부로 옮겼다. 음속비 측정을 위한 해파리 시료의 이동은 모든 과정이 수중에서 이루어졌으며, 해파리 시료를 자르거나 T형 실린더 내에 삽입할 경우에도 공기방울에 의한 외부 오염의 가능성을 최소화시켰다.

APOP 장치에서 음향 센서는 400 kHz 주파수를 가진 센서로 T형 실린더 양 끝단에 송·수신기를 설치하였다. 음향 신호는 송신 과정에서 총 6 cycle의 sine 파형을 발생시켰으며, 수신 센서는 디지털신호 저장용 오실로스코프에 연결하였다. 첫 번째 단계로 절개된 해파리를 넣기 전에 여과된 해수 만을 이용하여 수온 및 염분 자료(YSI 85 series)와 동시에 해수의 음속을 측정하였다(YSI Inc., Yellow Springs, Ohio, USA). 두 번째 단계로 절개된 해파리를 넣어 음파 도달 시간(time-of-flight)을 오실로스코프를 이용하여 저장하였으며, 동시에 실린더 내부의 수온 및 염분 자료를 기록하였다. 음파 도달 시간으로부터 해파리 음속비를 구하기 위한 식은 (1)과 같다(Chu et al. 2000).

$$h = 1 - \frac{\Delta t_m}{t_D \phi} \quad (1)$$

$\Delta t_m$ 은 T형 실린더 내에서 해파리가 있을 때와 없을 때의 음파의 도달 시간 차이로 ( $t_m - t$ ), 이때  $t_m$ 과  $t$ 는 각각 해파리가 있을 때와 없을 때 송신기로부터 수신기까지 도달하는데 걸리는 시간이다. 또한  $t_D$ 는 해파리 두께( $D$ )를 통과하는 음파의 전달 시간이다. 변수  $\phi$ 는 T형 실린더 내 해파리와 물의 전체 부피 중 해파리 만의 부피 비를 의미하는 것으로 식 (2)와 같다.

$$\phi = \frac{V_j}{V_m} \quad (2)$$

$V_j$ 는 해파리 내부의 물을 제거한 해파리 만의 부피를,  $V_m$ 은 T형 실린더 내부의 물과 해파리가 혼합된 전체 부피로서  $V_m = V_w + V_j$ 로 정의되며,  $V_w$ 는 물의 부피를 의미한다. 식 (1)에서 해파리의 음속이 주변 해수보다 빠른 경우  $\Delta t_m$ 은 음의 부호를 갖게 되어 이때  $h$ 는 1보다 큰 값을 갖는다. 반대로 해파리의 음속이 주변 해수보다 느린 경우는 양의 부호를,  $h$ 는 1보다 작은 값을 갖는다.

#### 밀도비(density contrast, $g$ ) 측정

해파리의 밀도비( $g$ )는 해파리와 주변 해수 밀도의 비로 정의한다( $g=\rho_j/\rho_w$ , 여기서  $\rho_j$ : 해파리의 밀도,  $\rho_w$ : 해수의 밀도). 해파리의 밀도비를 측정하기 위해 채집한 6개체의 보름달물해파리를 메스실린더에 들어갈 정도의 크기로 절단한 후 dual-density 방법을 이용하여 측정하였다. Dual-density 방법은 서로 다른 밀도를 갖는 2개의 용액을 부피와 무게를 알고 있는 용기에 시료와 함께 넣어 시료만의 밀도를 구하는 방법으로 동물플랑크톤이나 크릴 등의 밀도를 측정할 때 사용하는 방법이다(Chu and Weibe 2005).

본 연구에서 사용된 서로 다른 밀도를 갖는 2개의 용액은 각각 증류수와 해파리 시료가 담겨있는 해수를 이용하였다. 해수와 증류수의 밀도는 각각 EOS80(Equation of State 80) 식과 무게-부피의 함수를 이용하여 계산하였다(Pond and Pickard 1986). 해파리의 밀도비( $g$ )를 측정하기 위해 채집한 6개체의 보름달물해파리를 메스실린더에 들어갈 크기로 절단한 후 측정하였다. 밀도비를 구하기 위한 실험식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{cases} w_1 = (v_1 - v_j)\rho_1 + v_j\rho_j \\ w_2 = (v_T - v_j)\rho_m + v_j\rho_j \\ v_T = v_1 + v_2 \\ v_2 = (w_2 - w_1)/\rho_1 \end{cases} \quad (3)$$

$v_1$ 는 해수와 해파리 만의 부피,  $v_2$ 는 증류수 부피,  $v_T$ 는 메스실린더의 총 부피로  $v_1$ 과  $v_2$ 의 양을 조절하여 최대 부피인 1000 ml로 고정하였다.  $w_1$ 는 해수와 해파리 만의 무게,  $w_2$ 는 혼합물의 전체 무게,  $\rho_1$ 와  $\rho_2$ 는 각각 해수의 밀

도와 증류수 밀도,  $\rho_m$ 는 혼합물의 밀도를 의미한다. 최종적으로 측정하고자 하는 해파리의 밀도  $\rho_j$ 는 식 (4)로 표현된다.

$$\rho_j = \rho_m + \frac{w_2 - \rho_m v_T}{v_j} \quad (4)$$

식 (4)에서 해파리의 부피 항인  $v_j$ 는 다음과 같다.

$$v_j = v_T + \left( \frac{w_2 - w_1}{\rho_2} \right) \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 - \rho_m} \right) \quad (5)$$

본 연구에서는 1000 ml로 부피를 최대한 크게 고정하였고, 이에 반해 식 (4), (5)에서 중요한 인자인  $w_1$  및  $w_2$ 의 측정은 0.01 g의 정확도를 가져 오차를 줄였다. 실험에 사용된 해파리의 습중량(wet weight, g)은 음속비 및 밀도비 측정이 모두 완료된 후 절개된 부분을 모두 합쳐 표면 및 우산 내의 물기를 제거한 이후 측정하였다.

### 3. 결 과

#### 우산 직경과 무게 함수

본 연구에서 음속비와 밀도비 측정에 사용한 보름달물해파리 15개체의 우산 직경(bell diameter)에 대한 습중량(wet weight) 관계를 유도하였다. 우산 직경의 범위는 10-21 cm(평균 15.9 cm)이고, 습중량은 75-403 g(평균 232.7 g)

의 범위였다(Fig. 2). 측정에 사용된 전체 개체수에 대한 우산 직경과 체장의 관계식은 다음과 같다(여기서  $R^2$ 는 결정계수임).

$$\text{wet weight (g)} = 0.29 \times [\text{bell diameter, cm}]^{2.39}, (R^2=0.86)$$

#### 보름달물해파리의 음속비( $h$ )

T형 관내 해파리와 물의 전체 부피 중 해파리 만의 부피 비인 변수  $\phi$ 는 실험에 사용된 해파리 조직의 크기에 따라 0.22-0.71까지 다양하였다. 해수 만의 음속과 해파리를 넣었을 때의 음파 도달 시간 차이( $\Delta t$ )는 -0.083-0.093 msec 범위 내에서 측정되었다. 측정 결과 해파리의

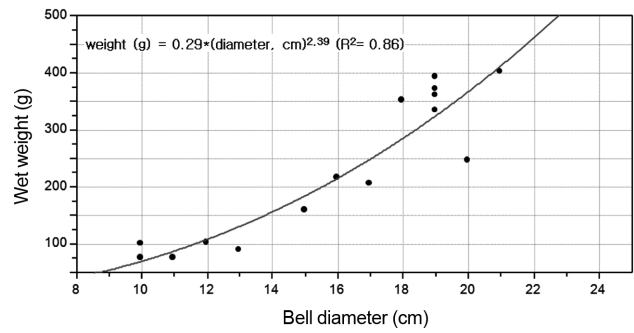


Fig. 2. Relationship between bell diameter (cm) and wet weight (g) of moon jellyfish, *Aurelia aurita* s.l.

Table 2. Summary of the sound speed contrast ( $h$ ) for moon jellyfish, *Aurelia aurita* s.l.

Measurement No.	$\Phi^1$	$c_w$ (m/s) <sup>2</sup>	$c_j$ (m/s) <sup>3</sup>	$h$	Location
1	0.27	1518.08	1515.29	0.9982	Shiwaha lake
2	0.43	1517.02	1520.71	1.0024	
3	0.50	1517.02	1516.17	0.9994	
4	0.51	1517.28	1521.20	1.0025	
5	0.71	1517.02	1518.31	1.0008	
6	0.60	1517.28	1516.79	0.9997	
7	0.25	1523.56	1521.80	0.9988	
8	0.22	1523.67	1524.37	1.0005	
9	0.55	1523.41	1524.27	1.0006	
10	0.53	1523.15	1523.99	1.0005	
11	0.51	1523.15	1525.29	1.0014	Tongyeong coast
12	0.52	1522.89	1524.26	1.0009	
13	0.47	1521.54	1522.25	1.0005	
14	0.37	1522.62	1523.18	1.0004	
15	0.59	1522.85	1523.70	1.0006	
mean ( $\pm$ s.d)				1.0005 ( $\pm$ 0.0012)	

<sup>1</sup>)volume fraction; the ratio of the jellyfish volume to the total volume

<sup>2</sup>)sound speed of the surrounding seawater

<sup>3</sup>)sound speed of the moon jellyfish flesh

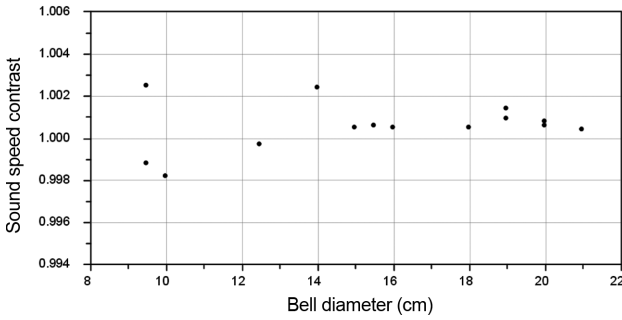


Fig. 3. Sound speed contrast with bell diameter of moon jellyfish, *Aurelia aurita* s.l.

음속은 1515.29-1525.29 m/s의 범위이고, 해수 만의 음속은 측정 당시의 수온 변화에 따라 1517.02-1523.67 m/s의 범위였다. 이들 각각의 측정 변수로부터 보름달물해파리의 음속비( $h$ )는 최소 값은 0.9982, 최대 값은 1.0025이었으며, 평균  $h$  값(표준편차)은 1.0005( $\pm 0.0012$ )이었다 (Table 2). 음속비( $h$ ) 값이 1이면 해파리의 체내 음속이 주변 해수와 동일한 음속 값을 가지는 것을 의미하므로, 본 연구에서 측정한 해파리 음속비 1.0005는 해수와의 음속비에 비해 크지 않고 매우 유사한 음속 값을 가지는 것으로 측정되었다. 해파리의 우산 직경 크기에 따른 음속비 값은 성체와 미성체 사이에 큰 변동성 없이 고른 분포를 보여주고 있어 해파리 체내의 음속비 특성은 크기와는 상관성이 없는 것으로 측정되었다(Fig. 3).

**보름달물해파리의 밀도비( $g$ )**

주변 해수의 밀도 값은 측정 당시의 수온 및 염분의 차이가 크지 않아 1.0207-1.0213 g/cm<sup>3</sup>의 좁은 범위 내에서 분포하였다. 각 시료의 우산 조직의 일부를 떼어내서 측정한 보름달물해파리의 밀도는 0.9866-1.0199 g/cm<sup>3</sup>였다. 이들 각각의 측정 변수를 이용하여 계산한 보름달물해파리의  $g$ 는 0.9527-0.9986이었으며, 평균  $g$  값(표준편차)는 0.9808( $\pm 0.0214$ )였다(Table 3).

**4. 고찰**

실험을 통한 해파리의 음향 특성 파악은 몸체 구성 물질의 특성 때문에 어류나 동물플랑크톤보다 매우 어려운 측면이 있다. 해파리는 몸체의 구성이 대부분 수분으로 이루어져 있어 죽거나 혹은 마취제나 고정액으로 고정시킨 상태에서의 음향 특성 파악이 불가능한 종이므로 음향 특성을 파악하기 위한 모든 실험이 수중의 살아있는 조건에서 이루어져야만 한다.

이러한 어려움을 극복하기 위하여 음향 모델 방법을 이용하고 있으나 핵심 변수인 음속비 및 밀도비 자료의 신뢰성은 음향 모델 결과의 정확성을 결정하므로 해파리 음향 모델의 정확한 구현을 위해 필요한 체내의 물성 자료에 대한 부족은 해결할 요소 가운데 하나이다. Monger et al. (1998)은 *Aequorea victoria*와 *Pleurobrachia bachei*의 음향 모델에서 대상 종의  $g$ ,  $h$  값이 없어 기존의 salp, euphausiid, shrimp, gastropod 등의 측정치로부터 유추된 음향 반사계수( $R$ , reflection coefficient  $\approx (gh - 1)/(gh + 1)$ )를 이용하여 실제 실험 결과와 음향 모델 결과를 비교하는 제한 요소를 가지고 있다. 이러한 대상 해파리의  $g$ ,  $h$  값의 유무 및 정확도는 음향 모델의 효용성을 결정짓는 중요 요소이므로 본 연구에서 측정한 보름달물해파리의  $g$ ,  $h$  값은 음향 모델에 직접적으로 활용할 수 있을 것이다.

본 연구에서 측정한 15개체의 보름달물해파리에 대한 음속비( $h$ ) 측정 결과는 Hirose et al. (2009)이 8개체의 보름달물해파리를 대상으로 측정한 1.0001 보다 미세하게 크지만 거의 유사한 음속비 값의 분포를 보여주고 있다. 음속비 측정의 정확도를 결정짓는 가장 중요한 요소인 음파 도달 시간 차이( $\Delta t$ )와 물의 전체 부피에 대한 해파리만의 부피 비인 변수  $\phi$ 의 측정에서 가질 수 있는 오차를 고려할 때 거의 유사한 음속비 값을 보여주고 있다. 측정된 보름달물해파리의 음속비 값은 다른 해파리 종인 노무라입깃해파리(*Nemopilema nomurai*), 유령해파리(*Cyanea nozakii*, *Cyanea capillata*), 빛해파리(*Mnemiopsis leidyi*) 보

Table 3. Summary of the density contrast ( $g$ ) for moon jellyfish, *Aurelia aurita* s.l.

Measurement No.	Temperature (°C)	Salinity (psu)	$\rho_w$ (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>1)</sup>	$\rho_j$ (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>2)</sup>	$g$
1	22.9	30.9	1.0207	0.9929	0.9727
2	22.7	30.8	1.0208	0.9866	0.9665
3	22.8	30.7	1.0207	0.9724	0.9527
4	21.9	30.5	1.0210	1.0171	0.9962
5	22.1	31.0	1.0208	1.0187	0.9979
6	22.1	31.2	1.0213	1.0199	0.9986
mean ( $\pm$ s.d)					0.9808 ( $\pm 0.0214$ )

<sup>1)</sup>density of the surrounding seawater  
<sup>2)</sup>density of the moon jellyfish flesh

Table 4. Acoustic parameters ( $h$ , the sound speed contrast and  $g$ , the density contrast) of the various marine organisms

Measurement No.	$h^{1)}$	$g^{2)}$	$R^{3)}$	Reference
<i>N. nomurai</i>  tissue	1.0008	1.004	0.0024	Hirose et al. (2009)
<i>C. nozakii</i>  tissue	1.038	1.073	0.0538	Hirose et al. (2009)
<i>A. aurita</i>  tissue	1.0001	0.989	0.0055	Hirose et al. (2009)
<i>M. leidy</i>  tissue	1.007	1.009	0.0080	Warren & Smith (2007)
<i>C. capillata</i>  tissue	1.0004	1.009	0.0047	Warren & Smith (2007)
<b><i>A. aurita</i> tissue</b>	<b>1.0005</b>	<b>0.9808</b>	<b>0.0094</b>	<b>This study</b>
Fish flesh body	1.05	1.04	0.0439	Medwin & Clay (1998)
Swimbladder blad	0.22	0.001	0.9996	Medwin & Clay (1998)
<i>E. superba</i>  entire	1.030	1.025	0.0271	Chu & Wiebe (2005)
<i>Calanus</i> sp. entire	0.959	0.995	0.0234	Chu & Wiebe (2005)
Squid tissue	1.041	1.029	0.0343	Kang et al. (2006)

<sup>1)</sup>sound speed contrast

<sup>2)</sup>density contrast

<sup>3)</sup>pressure reflection coefficient

다 작은 값을 가지며 물성 자체가 해수와 유사하다. 또한 보름달물해파리의 음속비는 어류, 오징어 보다는 작지만 요각류와 같은 작은 동물플랑크톤 보다는 큰 값을 가지고 있다(Table 4).

본 연구에서 측정된 보름달물해파리의 밀도비는 측정 개체수가 충분하지 않은 제한 요소가 있으나 기존의 45개체의 보름달물해파리 대해 실시한 밀도비 결과와 비교했을 때 약 0.008의 매우 작은 차이만을 보인다(Table 4, Hirose et al. 2009). Table 4의 다른 생물들의 밀도비와 비교한 결과 대부분의 생물들은 밀도비가 1 이상인 반면 보름달물해파리는 상대적으로 작은 밀도비를 가지고 있다. 비슷한 다른 종의 해파리들의 밀도비는 모두 1 이상으로 주변 해수의 밀도보다 높은 밀도 분포를 가지고 있으나 보름달물해파리는 요각류 보다 작은 밀도비를 가지는 것으로 나타나고 있다.

본 연구를 통해 측정된 보름달물해파리의 음속비 및 밀도비로부터 구한 음향 반사계수( $R$ )는 0.0094(dB 단위로 환산하면 -40.5 dB)이고, 동일한 해파리 종에 대해 Hirose et al. (2009)가 측정된 반사계수는 0.0055 (dB 단위로 환산하면 -45.2 dB)로 약 1.7배이다. 동일한 해파리 종이라도 음향 반사계수( $R$ )의 차이는  $g$ ,  $h$  측정 단계에서의 오차 발생 가능성을 의미한다. 두 개의 서로 다른 연구에서 측정된  $g$ ,  $h$ 에 의한 음향 반사계수( $R$ ) 차이는 음향 모델 적용 단계에서 TS 결과 값과 실측치와의 비교 과정에서 변동 범위를 제공할 것이다. Table 4에 서로 다른 해파리 종과 기타 해양생물의  $g$ ,  $h$  및 이에 따른 음향 반사계수를 정리하였다. 이들 결과들의 차이로부터 음향 모델을 통한 해파리 음향 특성 예측에서 각각의 종에 맞는 음속비 및 밀도비를 사용해야 함을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 살아있는 보름달물해파리 시료를 이용하여 수중음향 이론 모델의 핵심 변수인 음속비와 밀도비를 측정하였다. 채집의 한계로 인한 한정된 시료를 이용하였지만 다른 시기에 측정된 동일한 종의 자료와 비교하였을 때 유사성을 보이고 있었다. 이러한 유사성은 본 연구에서 측정된 음향 입력변수를 보름달물해파리 이론 모델에 적용 가능함을 보여주고 있다. 추가적으로는 음향 이론 모델에 안정적으로 이들 변수들을 적용하기 위해서는 개체수를 증가하여 자료의 신뢰성을 증가시키는 것이 필요하다.

본 연구 및 이전 연구를 통해 측정된 보름달물해파리와 주변 해수와의 음속비( $h$ ) 및 밀도비( $g$ )는 작은 차이를 보여 매우 낮은 음향 반사강도(TS)가 예측이 되지만 실제 살아있는 조건에서 측정된 해파리의 음향 반사강도는 비교적 높게 보고되고 있다. 보름달물해파리 단일 개체에 대한 TS는 주파수에 따라 차이가 있지만 약 -55~-70 dB 정도이며 실험에 따라 변동폭은 15 dB(Kang et al. 2009), 16-18 dB(Mukai et al. 2009), 10-13 dB(Mutlu 1996) 정도로 보고되었다. 살아있는 보름달물해파리의 TS 변동 요인은 우산 박동에 의한 음향 반사 단면적 차이로 제시되고 있다. 이러한 음향 반사 단면적의 차이를 일으키는 우산 박동의 변화 및 자세각 변동 등에 주파수별 음향 특성 연구는 수중음향 이론 모델로 접근이 가능하며, 이때 본 연구에서 제시하고 있는 보름달물해파리의 체내 물성 자료는 중요한 입력 변수로 활용될 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 수중음향 이론 모델을 이용한 보름달물해파리의 음향 특성 파악을 위한 핵심 변수로 사용되는

음속비( $h$ )와 밀도비( $g$ )를 측정하였다. 보름달물해파리의 음속비는 0.9982-1.0025의 범위에서 평균 1.0005( $\pm 0.0012$ )이였으며, 밀도비는 0.9527-0.9986의 범위에서 평균 0.9808( $\pm 0.0214$ )이었다. 해파리의 우산 직경 크기에 따른 음속비 값은 성체와 미성체 사이에 큰 변동성 없이 고른 분포를 보여주고 있어 해파리 체내의 음속비 특성은 크기와는 상관성이 없는 것으로 확인되었다. 기존의 측정 결과와 비교 분석 결과, 본 연구에서 측정된 보름달물해파리의 체내 물리적 특성 자료는 음향 이론 모델에 입력 변수로 사용 가능함을 보여주고 있다.

## 사 사

본 연구는 한국해양연구원에서 수행하고 있는 유비쿼터스 해양 유용/유해생물 관리기술 개발(PE98753) 과제와 통영 MRC(해양생물자원보존 연구센터)를 기반으로 한 남해 연안 해양생물자원 종 보존 및 활용 연구(PK07920)의 지원을 받아 수행되었습니다. 본 연구를 위해 한국해양연구원 통영 MRC에서 시료 채집 및 현장 실험을 도와준 이영욱님께 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- 국토해양부 (2009) 유해해양생물 해파리 피해예방 기획연구 보고서. 국립수산물과학원, 225 p
- Brierley AS, Axelsen BE, Buecher E, Sparks CAJ, Boyer H, Gibbons MJ (2001) Acoustic observations of jellyfish in the Namibian Benguela. *Mar Eco Prog Ser* **210**:55-66
- Brierley AS, Axelsen BE, Boyer DC, Lynam CP, Didcock CA, Boyer HJ, Sparks CAJ, Purcell JE, Gibbons MJ (2004) Single-target echo detections of jellyfish. *ICES J Mar Sci* **61**:383-393
- Chu D, Wiebe P, Copley N (2000) Inference of material properties of zooplankton from acoustic and resistivity measurements. *ICES J Mar Sci* **57**:1128-1142
- Chu D, Wiebe PH (2005) Measurements of sound-speed and density contrasts of zooplankton in Antarctic waters. *ICES J Mar Sci* **62**:818-831
- Colombo GA, Mianzan H, Madriolas A (2003) Acoustic characterization of gelatinous-plankton aggregations: four case studies from the Argentine continental shelf. *ICES J Mar Sci* **60**:650-657
- 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
- Kang D, Iida K, Mukai T, 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
- Kang DH, Kim JH, Lee HB, Myung JG (2009) Target strength characteristics of multiple gelatinous organisms, *Aurelia aurita*, and *Cyanea nozakii*. In: The 10th Western Pacific Acoustic Conference, Beijing, China, 21-23 Sep 2009, pp 1-8
- Lee JH, Choi HW, Chae JH, Kim DS, Lee SB (2006) Performance analysis of intake screens in power plants on mass impingement of marine organisms. *Ocean and Polar Res* **28**:385-393
- Lee YW, Hwang BK (2009) Theoretical examination of the effects of fluctuation of acoustic scattering on the swimming behavior of giant jellyfish. *J Korean Fish Soc* **42**:165-170
- Medwin H, Clay CS (1998) Fundamentals of acoustical oceanography. Academic Press, San Diego, 712 p
- Mills CE (2001) Jellyfish blooms: 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
- Mukai T, Hirose M, Sawada K, Takahashi H, Iida K (2009) Target strength of moon jellyfish-Variations with pulsation and posture. In: Proceedings of meeting of the Marine Acoustic Society of Japan, pp 19-22
- 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
- Pond S, Pickard GL (1986) Introductory dynamic oceanography, 2nd edition. Pergamon press, Oxford, 329 p
- Simmonds J, MacLennan D (2005) Fisheries Acoustics: theory and practice, 2nd edition. Blackwell Science, UK, 437 p
- Warren JD, 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

Received Oct. 25, 2011

Revised Nov. 18, 2011

Accepted Jan. 18, 2012