

도루묵의 체내 임피던스 및 수영자세각 평가

윤은아 · 황두진¹ · 오우석² · 이형빈 · 이경훈^{1*}

국립수산과학원 수산자원연구센터 연구원, ¹전남대학교 해양생산관리학과 교수, ²전남대학교 수산과학과 학생

Estimation of swimming angle and body impedance of sandfish (*Arctoscopus japonicus*)

Euna YOON, Doo-Jin HWANG¹, Wooseok OH², Hyungbeen LEE and Kyoungsoon LEE^{1*}

Researcher, Fisheries Resource Research Center, National Institute of Fisheries Science, Tongyeong 53064, Korea

¹Professor, Department of Marine Production Management, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

²Student, Division of Fisheries Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

Density and sound speed contrasts (g and h , respectively), and swimming angle were measured for sandfish (*Arctoscopus japonicus*) without swimbladder. The density contrast was measured by the volume displacement method while the sound speed contrast was measured by the acoustic measurements of travel time (time-of-flight method). The swimming angle was measured by dividing it into daytime, nighttime, daytime feeding and nighttime feeding. The g was 1.001 to 1.067 with an average (\pm standard deviation) of 1.032 (\pm 0.017), and the h was 1.007 to 1.022 with an average (\pm standard deviation) of 1.015 (\pm 0.003). The swimming angles (mean \pm standard deviation) were $16.8 \pm 10.3^\circ$ during the daytime, $1.9 \pm 12.3^\circ$ during the nighttime, $30.2 \pm 12.6^\circ$ in the daytime feeding and $35.0 \pm 13.2^\circ$ in the nighttime feeding. These results will provide important parameters input to calculate theoretical scattering models for estimating the acoustic target strength of sandfish.

Keywords: Sandfish, Acoustic, Density contrast, Sound-speed contrast, Swimming angle

서론

도루묵(*Sandfish, Arctoscopus japonicus*)은 주로 우리나라 동해에 분포하고 계절적으로 연안과 대륙사면을 이동 및 남북회유를 한다(Lee et al., 2009; Seo et al., 2014; Kim, 2015; Yoon et al., 2016). 우리나라에 서식하고 있는 도루묵은 추계시기인 9~10월부터 산란을 위해 연안으로 이동하고, 산란이 끝난 2~3월에는 수심이 깊은 곳으로 이

동한다. 수심이 2~10 m 정도로 낮은 연안까지 산란을 위해 내유하는 도루묵은 연안자망과 통발로, 수심이 100~200 m로 깊은 곳에 분포할 때는 주로 동해구기선저인망에 어획된다. 동해 중부 및 남부해역인 삼척과 포항에서 트롤을 이용하여 수심 300, 500, 700, 900 m의 수층에서 어획한 결과 모든 수심에서 도루묵을 어획되어 다양한 서식 수심에 분포하는 것을 알 수 있다(Shon et al., 2010).

*Corresponding author: khlee71@jnu.ac.kr, Tel: +82-61-659-7124, Fax: +82-61-659-7129

우리나라에서 도루묵은 총허용어획량(Total allowable catch, TAC) 대상종 중 하나이고, 상업적으로 중요한 자원이다. 효율적으로 도루묵 자원을 이용하기 위해서는 지속적인 자원 상태 모니터링을 통한 수산자원 평가와 관리가 필요하다. 국내에서 도루묵의 자원량 추정에 관한 연구는 자원생태학적 특성치(생산율, 순간자연 및 어획 사망계수, 어획개시연령 등)의 코호트 분석법으로 이루어졌다(Lee et al., 2009). 수산자원량 추정은 간접적인 추정 방법과 직접적인 추정 방법이 사용되고 있고, 코호트 분석법을 이용한 자원량 추정은 간접적인 추정 방법으로 직접적인 추정 방법을 병용한다면 수산자원 추정에 신뢰도를 높일 수 있다.

직접적인 수산자원 추정 방법 가운데 과학어탐을 활용한 수산자원조사는 빠른 시간내에 넓은 해역에 분포하고 있는 수산자원의 밀도 및 현존량을 파악할 수 있어 수산자원을 평가하는 도구로 활발하게 이용되고 있다. 음향기법을 이용한 수산자원의 현존량은 현장에서 획득한 체적산란강도(Volume backscattering Strength, S_v)를 어종별 음향산란강도(Target strength, TS)를 이용하여 환산하여 평가할 수 있기 때문에 TS는 정확한 수산자원량 산정에 중요한 정보가 된다. 수산생물의 TS는 대상 어종의 길이, 유영자세각, 부레 유무, 부레의 형태, 매질의 임피던스, 사용주파수 등 다양한 요소에 따라 변화한다. 하지만, 직접적인 측정 방법은 이러한 모든 요소를 고려하여 TS를 파악하기에 많은 시간이 소요되기 때문에 간접적인 측정 방법인 음향 산란모델 방법이 이용된다. 음향 산란모델로 대상 생물의 TS를 추정하기 위한 주요 요소로 사용주파수(frequency), 파장(wave length, λ), 대상 생물의 체형, 체장, 유영자세각, 체내 음속비(sound-speed contrast, h) 및 밀도비(density contrast, g)가 필요하다(Stanton and Chu, 2000; Demer and Conti, 2003; Forman and Warren, 2010; Smith et al., 2010). 특히, 음속비와 밀도비는 대상 생물이 같은 종이라도 측정 방법이나 조사해역, 시기, 조사 환경, 사이즈 등에 따라 다르게 나타나기 때문에 TS의 오차를 줄이기 위해서 모델 구현시 이와 같은 요소를 고려하여 평가가 이루어져야 한다(Mukai et al., 2004; Hirose et al., 2007; Matsukura et al., 2009). 또한, 어류의 TS는 유영자세각, 사용주파수, 체장, 수심 순으로 큰 영향을 받고, 이 가운데 유영자세각의 영향이 가장 크기 때문에 유영자세각

을 관측하는 것도 중요하다(Hazen and Horne, 2003; Kang et al., 2004).

본 연구에서는 우리나라 주요 상업종 중 하나인 도루묵의 밀도비(g)와 음속비(h)를 측정하고, 비디오 카메라를 이용하여 주간과 야간의 평상시와 섭이시 유영자세각을 관측하였다.

재료 및 방법

실험 샘플

도루묵 샘플은 2014년 12월 24일 강원도 강릉시 주문진항 근처 통발에서 어획하였다. 어획된 샘플은 살아있는 상태를 유지하며 전라남도 여수시 전남대학교 수산과학연구소 내에 있는 사육수조로 운반하였다. 도루묵의 밀도 및 음속 측정은 2015년 1월 6일에 수행하였고, 측정할 샘플 14개체(Fork length: 15.5~18.4 cm, Weight: 26.6~51.4 g)는 해수와 샘플을 플라스틱 통에 담고 급속 냉동하여 실험시 플라스틱 통을 흐르는 물에 서서히 녹였다. 도루묵의 유영자세각을 관측할 샘플은 사육수조에서 크릴새우를 작게 나누어 먹이를 주면서 사육하였고, 2015년 5월 1일 12개체(Fork length: 16.0~19.2 cm, Weight: 27.2~53.2 g)를 살아있는 상태로 실험 장소로 이동하여 3일간 실험을 수행하였다.

밀도비

어류의 밀도는 Lowndes (1942)로 변형된 부피체적법(Warren and Smith, 2007; Forman and Warren, 2010)을 이용하여 측정하였다. 샘플하여 운반한 어류는 체내 수분을 페이퍼 타올로 충분히 제거한 후 전자저울(0.01g, MWII-300H, CAS)로 어류의 무게를 측정하였다. 어류의 부피는 일정 양의 해수가 담긴 매스실린더에 어류를 넣고 물속에 잠긴 어류에 의해 떠오른 해수를 스포이드로 비커에 옮겨 담은 후 비커에 담긴 해수의 무게를 측정하였다. 또한, 밀도계를 이용하여 이 해수에 대한 밀도를 계측하였다. 어류의 부피(V_{fish})는 제거된 해수의 무게(m_{rw})와 해수의 밀도(ρ_{sw})로 구할 수 있고, 어류의 체내 밀도(ρ_{fish})는 어류의 무게(m_{fish})에 대한 부피로 나누어 계산했다(식 1).

$$\rho_{fish} = \frac{m_{fish}}{V_{fish}} = \frac{m_{fish}}{\left(\frac{m_{rw}}{\rho_{sw}}\right)} \quad (1)$$

밀도비(g)는 어류의 밀도(ρ_{fish})를 해수의 밀도(ρ_{sw})로 나누면 된다(식 2).

$$g = \frac{\rho_{fish}}{\rho_{sw}} \quad (2)$$

밀도비 측정 실험은 각 개체마다 3번 반복하여 실시하였고, 평균값이 실험 결과의 오차범위 10% 내의 자료만을 결과에 제시하였다(Warren and Smith, 2007).

음속비

어류의 체내 음속은 음파 도달 시간차인 time-of-flight 방법으로 측정하였다. 실험 방법은 아크릴로 제작된 T-tube 양쪽에 주파수 400 kHz의 송수신기를 설치 후, 신호발생기(WF1944A, NF Electronic Instruments)로 발생한 신호를 송신센서에서 발사하여 수신센서에 도달된 시간(T , μs)을 오실로스코프스(LC534AM, LeCroy)로 계측하는 것이다(Fig. 1).

먼저, 해수와 어류가 혼합된 음파 도달 시간차(T_{total})를 측정하고, 측정 후에 T-tube (지름: 8 cm, 길이: 25 cm)에 어류가 차지하는 부피(V)를 측정하였다. 또한, T-tube에 해수만을 넣고 해수의 음파 도달 시간차(T_{sw})를 계측하였다. 어류의 음파 도달 시간차(T_{fish})는 이 관계식 (3)으로 구할 수 있다.

$$T_{fish} = (1 - V)T_{sw} + VT_{fish} \quad (3)$$

또한, T_{fish} 를 구하면 음속비(h)는 식 (4)

$$h = \frac{T_{sw}}{T_{fish}} = \frac{C_{fish}}{C_{sw}} \quad (4)$$

으로 주어진다. 여기서, C_{sw} 와 C_{fish} 는 각각 해수와 어류의 음속이다. C_{sw} 는 샘플 해수의 염분과 실험시의 온도를 MacKenzie (1981)의 식 (5)를 이용하여 구하였다.

$$C = 1448.96 + 4.591T - 5.304 \times 10^{-2}T^2 + 2.374 \times 10^{-4}T^3 + 1.340(S-35) + 1.630 \times 10^{-2}D + 1.675 \times 10^{-7}D^2 - 1.025 \times 10^{-2}T(S-35) - 7.139 \times 10^{-13}TD^3 \quad (5)$$

여기서, T ($^{\circ}C$)는 수온이고, S (PSU)는 염분, D (m)는 수심이다.

음파 도달 시간 측정시에는 T-tube내의 온도를 온도 조절기를 이용하여 4 $^{\circ}C$ 에서 19 $^{\circ}C$ 까지 1 $^{\circ}C$ 간격의 변화를 주면서 측정하였고, 어류가 차지하는 부피(V)는 0.40 이었다.

유영자세각 관측

유영자세각을 관측할 샘플 도루묵 12개체를 수온 10 $^{\circ}C$

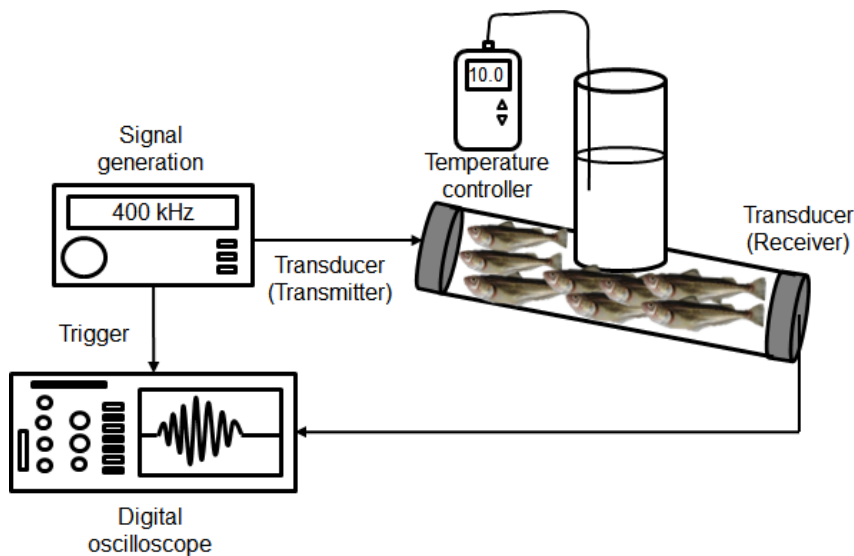


Fig. 1. Equipment used to measure the sound-speed contrast of sandfish.

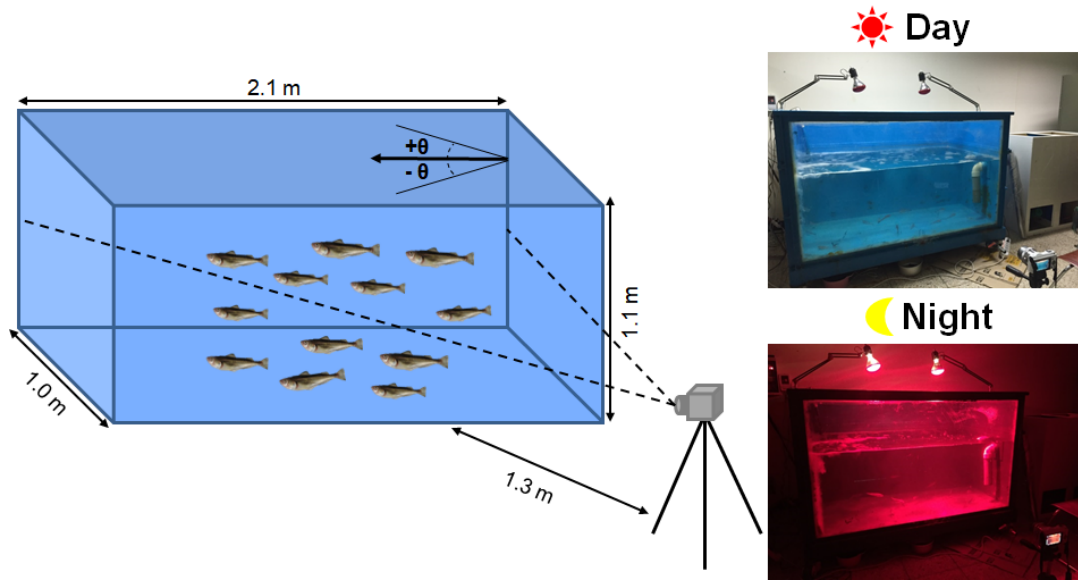


Fig. 2. Observation of swimming behavior of sandfish in seawater tank during daytime and nighttime.

로 컨트롤 유지할 수 있고 정면이 아크릴로 만들어진 실험수조(2.1 m (L)×1.1 m (H)×1.0 m (D))에 이동하여 하루는 자연 불빛에, 하루는 불빛이 없는 상태로 순치시켰다.

실험은 주간과 야간 평상시와 주간과 야간 섭이시인 4가지 형태로 구분하고 수조 바깥쪽 직선거리 1.3 m에 비디오 카메라를 설치하여 도루묵의 유영자세각을 연속적으로 촬영하였다(Fig. 2). 주간과 야간의 유영자세각 촬영 전에 도루묵을 각각 약 2시간 동안 순치한 후 1시간 동안 유영자세각을 관측하였다. 표면에 입사된 조도는 주간과 야간 각각 300 lux와 0 lux였다. 야간에는 불빛이 없기 때문에 수조 양쪽에 적외선 램프(각각 150 w)를 부착하여 불빛 영향을 받지 않고 유영자세각을 촬영하였다. 섭이시 촬영 때 먹이는 사육수조에서 주었던 동일한 크릴새우를 주었고, 먹이를 섭이 할 때 촬영을 하였다. 도루묵의 유영자세각은 측면 도루묵 이미지의 중심라인을 설정하고 꼬리지느러미 끝의 중심에서 주둥이까지 중심라인을 그어 측정하였다. 여기서, 어류의 head up은 + (positive) 각도, head-down은 - (negative) 각도로 정의하였다.

결 과

밀도비 및 음속비

도루묵의 체내 밀도의 범위는 1.026~1.093 g/cm³로,

평균(± 표준편차)은 1.058 g/cm³ (± 0.017 g/cm³)이었다. 도루묵의 가랑이 체장과 체내 밀도는 음의 상관관계를 나타내었다(Pearson correlation, $R = -0.13$). 도루묵의 밀도비는 1.001~1.067으로 평균(± 표준편차)은 1.032 (± 0.017)으로 나타났다(Fig. 3). 밀도비 역시 도루묵의 가랑이 체장과 음의 상관관계를 보였다(Pearson correlation, $R = -0.13$).

도루묵의 체내 음속은 1494.3 m/s로 수온이 4℃로 가장 낮을 때 낮았고, 최대 음속은 1541.0 m/s로 수온이 19℃일 때 가장 빠르게 나타났다. 체내 음속은 수온이 증가하면 빨라지는 양의 상관관계를 나타내었다(Pearson

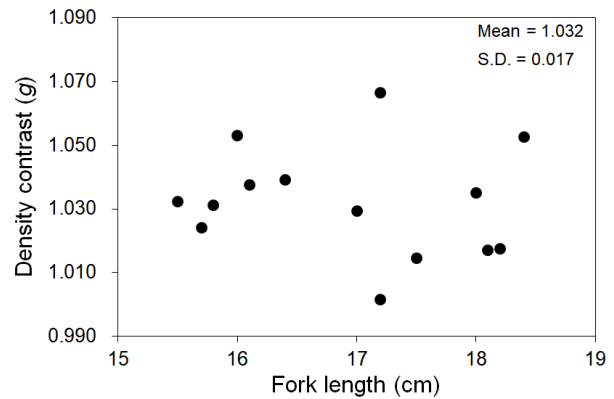


Fig. 3. Density contrast with fork length (cm) of sandfish.

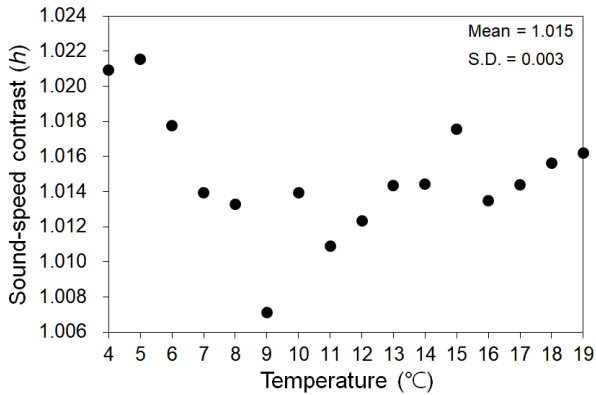


Fig. 4. Sound-speed contrast of sandfish with temperature in t-tube.

correlation, $R=0.96$). 도루묵의 음속비의 범위는 1.007 ~1.022으로 평균(\pm 표준편차)은 1.015(\pm 0.003)이었다 (Fig. 4). 도루묵의 음속비는 수온이 증가하면 감소하는 음의 상관관계를 보였다(Pearson correlation, $R=-0.24$).

유영자세각

도루묵의 주간과 야간 평상시, 주간과 야간 섭이시 유영자세각을 Fig. 5에 나타내었다. 사진으로부터 주간 평상시 1278개, 야간 평상시 975개, 주간 섭이시 94개, 야간 섭이시 81개로 총 2428개 유영자세각을 추출하였다. 도루묵의 유영자세각(평균 \pm 표준편차)은 주간 평상시 $16.8\pm 10.3^\circ$, 야간 평상시 $1.9\pm 12.3^\circ$, 주간 섭이시 $30.2\pm 12.6^\circ$, 야간 섭이시 $35.0\pm 13.2^\circ$ 이었다. 주간과 야간동안 섭이시는 평상시보다 평균 유영자세각이 더 높았다. 또한, 주간과 야간 평상시 유영자세각은 큰 차이를 나타내었고, 섭이시는 큰 차이를 나타내지 않았다.

고 찰

어류의 밀도비와 음속비

부레가 없는 어류는 체내 밀도와 음속의 작은 변화가 TS에 영향을 미치기 때문에 음향 산란모델에 대상 생물의 정확한 밀도비 및 음속비 값을 적용하여야 한다

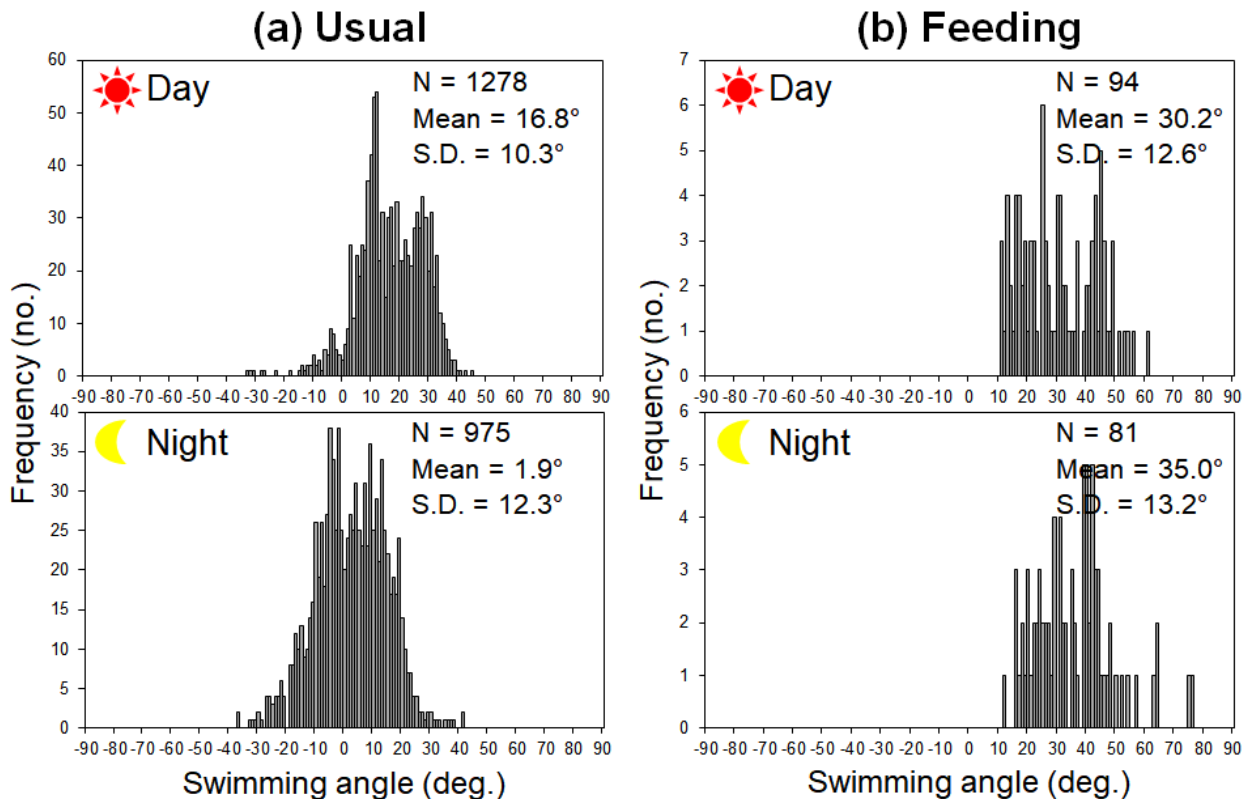


Fig. 5. Histograms of swimming angle of sandfish at daytime and nighttime during usual (a) and at daytime and nighttime during feeding (b).

Table 1. Comparison of density and sound-speed contrasts of fishes

Species	Density contrast (g)			Sound-speed contrast (h)			References
	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean	
Sandfish	1.001	1.067	1.032	1.007	1.022	1.015	This study
Jack mackerel			1.041			1.053	Shibata, 1970
Herring			1.026			1.018	Shibata, 1970
Yellow tail			1.039			1.011	Shibata, 1970
Chub mackerel			1.041			1.026	Shibata, 1970
White croaker			1.036			1.027	Shibata, 1970
Japanese bluefish			1.028			1.030	Shibata, 1970
Cod (Larval)			1.017			1.007	Shibata, 1970
Dogfish			1.038			1.045	Shibata, 1970
Orange roughy			1.040			1.040	McClatchie and Ye, 2000
Anchovy (Larval)			1.029			1.031	Yasuma, 2004
Northern lampfish			1.010			1.036	Yasuma et al., 2006
Japanese sandeel (Juvenile)	1.017	1.024	1.021				Yasuma et al., 2009
Japanese sandeel (Adult)	1.026	1.038	1.032	1.016	1.023	1.020	Yasuma et al., 2009
<i>Fundulus majalis</i>	0.958	1.023	0.996	0.8977	1.1410	1.0196	Forman and Warren, 2010
<i>Fundulus hetericlitus</i>	0.942	1.016	0.999	0.9682	1.01410	1.0245	Forman and Warren, 2010
Cod (Juvenile)	1.003	1.029	1.014	1.039	1.041	1.041	Iqbal et al., 2015
Sebastes sp.			1.019				Becker and Warren, 2014
Pacific hake	1.023	1.036	1.029	0.986	1.027		Becker and Warren, 2015
California lantern fish	0.9919	1.0140	0.9992			1.015	Becker and Warren, 2015

(Yasuma et al., 2006).

본 연구에서 음속비는 온도가 높아짐에 따라 감소하는 경향을 보였고, Yasuma et al. (2009)은 까나리의 음속비를 온도 7~23℃사이로 1℃ 간격으로 변화를 주며 측정된 결과 본 연구 역시 온도가 높아짐에 따라 음속비가 감소하는 경향을 보였다. 따라서, TS의 오차를 줄이기 위해서는 현장 실험이 수행된 수온과 동일한 음속비를 적용하여야 할 것으로 생각된다.

본 연구에서 도루묵의 밀도비는 1.001~1.067으로 평균(±표준편차)은 1.032 (±0.017), 음속비는 1.007~1.022으로 평균(±표준편차)은 1.015 (±0.003)으로 나타났다. Shibata (1970)은 전갱이(Jack mackerel), 청어(Herring), 방어(Yellow tail), 고등어(Chub mackerel), 보구치(White croaker), 게르치(Japanese bluefish), 대구(Larval cod), 돛발상어(Dogfish)의 밀도비와 음속비를 측정하였다. 전갱이, 청어, 방어, 고등어, 보구치, 게르치, 미숙한 대구, 돛발상어의 밀도비는 1.041, 1.026, 1.039, 1.041, 1.036, 1.028, 1.017, 1.038이었고, 음속비는 1.053, 1.018, 1.011, 1.026, 1.027, 1.030, 1.007, 1.045이었다. Orange roughy의 밀도비와 음속비는 1.040로 동일하게 나타났

으며(McClatchie and Ye, 2000), 멸치(Larval anchovy)는 각각 1.029, 1.031이었다(Yasuma, 2004). Northern lampfish의 밀도비는 1.010, 음속비는 1.036이었고(Yasuma et al., 2006), 까나리(Japanese sandeel)의 미성어와 성어 밀도비는 1.021, 1.032, 성어 음속비는 1.020로 나타났다(Yasuma et al., 2009). *Fundulus majalis*와 *Fundulus hetericlitus*의 밀도비는 0.996, 0.999, 음속비는 1.0196, 1.0245이었다(Forman and Warren, 2010). Iqbal et al. (2015)은 대구의 밀도비와 음속비를 측정하였고, 밀도비는 1.014, 음속비는 1.041이었으며, Sebastes sp.의 밀도비는 1.019로 나타났다(Becker and Warren, 2014). Becker and Warren (2015)의 연구 결과 Pacific hake와 California lantern fish의 밀도비는 각각 1.029, 0.9992이었고, California lantern fish의 음속비는 1.015으로 나타났다(Table 1). 이와 같이 부레가 있는 어류와 도루묵과 까나리같이 부레가 없는 어류의 밀도비와 음속비의 차이는 크지 않은 것을 알 수 있었다.

어류의 유영자세각

TS를 평가하기 위해서는 어류의 유영자세각이 중요

한 요소이다. 본 연구에서 주간과 야간 평상시와 섭이시 유영자세각을 관측한 결과 유영자세각의 변화가 다양하였다. 부레가 없는 어종은 일반적으로 *negatively buoyant*하여 모든 자세각에서 *positive* 자세각을 가진다. 부레가 없는 어종인 Japanese sandeel (Safuruddin et al., 2013), lesser sandeel (Kubilius ad Ona, 2012)은 본 연구의 주간 평상시와 유사하게 각각 20.4°, 23.7°로 Head-up 유영자세각을 보였다. 하지만, lesser sandeel은 *in situ* 해저에서 관측한 자세각은 1.8°이었고, 어류를 케이지에 넣고 선박 아래와 수심 20 m에서 관측한 자세각은 각각 23.3°, 23.7°로 해저와 표·중층은 큰 차이를 나타내었다 (Kubilius ad Ona, 2012). 이러한 차이는 빛의 유무에 의한다고 보고하였다. 본 연구에서도 빛이 있는 주간과 빛이 없는 야간 평상시 유영자세각은 큰 차이를 나타내었고, 빛이 없는 야간시기는 수평을 이루면서 유영하였다. 또한, 청어의 경우 Huse and ona (1996)은 주간에 -10°(수심 200 m), 야간에 0° (62 m), 40° (330-370 m)로 유영한다고 보고하였고, Ona (2001)은 주간에 -0.06°, 야간에 -3.1°로 유영자세각을 나타낸다고 하였다. 이와같이 주간과 야간의 시간뿐만 아니라 수심에 따라서도 큰 차이를 나타내었다. 대서양 대구는 오후에 저층에서 2~4°의 head-up으로 유영하고, 해가 진 이후에는 유영자세각이 점점 head-up하고, 2시간 이후 10°까지 증가하다가 그 후에는 점차 감소하는 경향을 나타내었다 (McQuinn and Winger, 2003).

본 연구에서는 수조에서 시간과 섭이시에 따라 유영 자세각을 관측하였으나, 어류의 유영자세각은 시간과 수심에 따라 크게 달라지는 것으로 추후에는 현장에서 해양 환경 요소를 고려한 시간대별 유영자세각을 관측할 필요가 있다고 사료된다.

결론

본 연구에서는 음향 산란모델을 이용하여 도루묵의 TS를 평가하기 위한 중요한 변수인 음속비와 밀도비, 유영자세각을 측정하였다. 도루묵의 밀도비와 음속비는 각각 부피체적법과 음속 도달 시간차법(time-of-flight)으로 측정하였다. 또한, 도루묵의 유영자세각은 주간과 야간 평상시, 주간과 야간 섭이시로 구분하여 측정하였다. 도루묵의 밀도비는 1.001~1.067으로 평균(±표준편차)은 1.032 (± 0.017), 음속비는 1.007~1.022으로 평균(±

표준편차)은 1.015 (± 0.003)이었다. 도루묵의 유영자세각(평균±표준편차)은 주간 평상시 16.8±10.3°, 야간 평상시 1.9±12.3°, 주간 섭이시 30.2±12.6°, 야간 섭이시 35.0±13.2° 이었다. 주간과 야간시기 동안 섭이시는 평상시보다 평균 유영자세각이 더 높았다. 이 연구의 결과는 음향 모델을 이용하여 도루묵의 TS를 계산하는 파라미터로 제공될 수 있는 것으로 판단된다.

사사

이 논문은 2022년도 국립수산물과학원 수산과학연구소 사업(R2022030) 및 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원(AI 기반 스마트어업관리시스템 개발 사업, No. 20210499)의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 본 논문을 사려 깊게 검토하여 주신 심사위원님들과 편집위원님께 감사드립니다.

References

- Becker KN and Warren JD. 2014. Material properties of Northeast Pacific zooplankton. ICES J Mar Sci 71, 2550-2563. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu109>.
- Becker KN and Warren JD. 2015. Material properties of Pacific hake, Humboldt squid, and two species of myctophids in the California Current. J Acoust Soc Am 137, 2524-2532. <https://doi.org/10.1121/1.4919308>.
- Demer DA and Conti SG. 2003. Reconciling theoretical versus empirical target strengths of krill: effects of phase variability on the distorted-wave Born approximation. ICES J Mar Sci 60, 429-434. [https://doi.org/10.1016/S1054-3139\(03\)00002-X](https://doi.org/10.1016/S1054-3139(03)00002-X).
- 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. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp217>.
- Hazen E and Horne J. 2003. A method for evaluating the effects of biological factors on fish target strength. ICES J Mar Sci 60, 555-562. [https://doi.org/10.1016/S1054-3139\(03\)00053-5](https://doi.org/10.1016/S1054-3139(03)00053-5).
- 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. <https://doi.org/10.3135/jmasj.34.109>.
- Huse I and Ona E. 1996. Tilt angle distribution and swimming speed of overwintering Norwegian spring spawning herring. ICES J Mar Sci 53, 863-873. <https://doi.org/10.1006/jmsc.1996.9999>.
- Iqbal AH, Hwang BK, Shin HO and Kim MS. 2015. Physical parameter measurement and theoretical target strength estimation of Juvenile Cod (*Gadus macrocephalus*). Ocean and Polar Research 37, 333-340. <https://doi.org/10.4217/opr.2015.37.4.333>.
- Kang DH, Sadayasu K, Mukai T, Iida K, Hwang DJ, Sawada K and Miyashita K. 2004. Target strength estimation of black porgy *Acanthopagrus schlegeli* using acoustic measurements and a scattering model. Fish Sci 70, 819-828. <https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2004.00875.x>.
- Kim DH. 2015. Evaluating the TAC Policy in the Sandfish Stock Rebuilding Plan. J Fish Bus Adm 46, 29-39. <https://doi.org/10.12939/fba.2015.46.1.029>.
- Kubilius R and Ona E. 2012. Target strength and tilt-angle distribution of lesser sandeel (*Ammodytes marinus*). ICES J Mar Sci 69, 1099-1107. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss093>.
- Lee SI, Yang JH, Yoon SC, Chun YY, Kim JB, Cha HK and Choi YM. 2009. Biomass estimation of sailfin sandfish, *Arctoscopus japonicus*, in Korean waters. Kor J Fish Aquat 42, 487-493. <https://doi.org/10.5657/kfas.2009.42.5.487>.
- Lowndes AG. 1942. The displacement method of weighing living aquatic organisms. J Acoust Soc Am 25, 555-574. <https://doi.org/10.1017/S0025315400055144>.
- MacKenzie KV. 1998. Nine-term equation for sound speed in the oceans. J Acoust Soc Am 70, 807-812. <https://doi.org/10.1121/1.386920>.
- MacQuinn IH and Winger PD. 2003. Tilt angle and target strength: target tracking of Atlantic cod (*Gadus morhua*) during trawling. ICES J Mar Sci 60, 575-583. [https://doi.org/10.1016/S1054-3139\(03\)000390](https://doi.org/10.1016/S1054-3139(03)000390).
- 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. <https://doi.org/10.1007/s12562-009-0172-3>.
- McClatchie S and Ye Z. 2000. Target strength of an oily deep-water fish, orange roughy (*Hoplostethus atlanticus*) II. Modeling. J Acoust Soc Am 107, 1280-1285. <https://doi.org/10.1121/1.428416>.
- 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 MTTS/IEEE Techno-Ocean' 04, Kobe, Japan, 9-12 Nov 2004, 383-388.
- Ona E. 2001. Herring tilt angles measured through target tracking. In Herring: expectations for a new millenium. Lowell Wakefield Fisheries Symposia Series, Fairbanks, Alaska. 509-519.
- Safuruddin, Kawauchi Y, Ito Y, Minami K, Itaya K, Maeda K, Matsukura R, Abe K, Yasuma H, Miyashita K. 2013. Tilt angle and theoretical target strength of the Japanese sandeel, *ammodytes personatus* captured on the northern coast of Hokkaido. J Marine Acoust Soc Jpn 40, 329-338. <https://doi.org/10.3135/jmasj.40.329>.
- 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. <https://doi.org/10.1006/jmsc.1999.0517>.
- Seo YI, Chung YH and Kim DH. 2014. An analysis on the relationship between prices and catch amounts of sandfish using a cointegration test. J Kor Soc Fish Technol 50, 502-510. <https://doi.org/10.3796/ksft.2014.50.4.502>.
- Shibata K. 1970. Study on details of ultrasonic reflection from individual fish. Bull Fac Fish Nagasaki Univ 29, 1-82.
- 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. <https://doi.org/10.1121/1.3488673>.
- Sohn MH, Lee HW, Hong BK and Chun YY. 2010. Seasonal variation of species composition by depths in deep sea ecosystem of the East Sea of Korea. J Kor Soc Fish Tech 46, 376-391. <https://doi.org/10.3796/ksft.2010.46.4.376>.
- 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. <https://doi.org/10.1121/1.2739433>.
- Yasuma H, Nakagawa R, Yamakawa T, Miyashita K and Aoki

- I. 2009. Density and sound-speed contrasts, and target strength of Japanese sandeel *Ammodytes personatus*. *Fish Sci* 75, 545-552. <https://doi.org/10.1007/s12562-009-0091-3>.
- Yasuma H, Takao T, Sawada K, Miyashita K and Aoki I. 2006. Target strength of the lanternfish, *Stenobrachius leucopsarus* (family Myctophidae), a fish without an airbladder, measured in the Bering Sea. *ICES J Mar Sci* 63, 683-692. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.02.016>.
- Yasuma H. 2004. Studies on the acoustical biomass estimation of myctophid fishes. PhD Thesis, The University of Tokyo. 1-237.
- Yoon EA, Lee KH, Hwang KS, Lee HB, Han IW and Hwang DJ. 2016. Acoustical backscattering characteristic depending on the changes in the body of sandfish (*Arctoscopus japonicus*). *J Korean Soc Fish Technol* 52, 36-41. <https://doi.org/10.3796/ksft.2016.52.1.036>.
-
2022. 02. 07 Received
2022. 03. 24 Revised
2022. 04. 01 Accepted