

음향 텔레메트리에 의한 변산반도에서의 참돔(*Pagrus major*)의 이동 범위 및 행동 특성

허겸 · 허민아 · 강경미¹ · 황두진² · 신현옥^{3*}

부경대학교 수산물리학과 학생, ¹부경대학교 KOICA-PKNU 국제수산과학협동과정 교수,
²전남대학교 해양기술학부 교수, ³부경대학교 해양생산시스템관리학부 교수

Movement range and behavior characteristics of *Pagrus major* by acoustic telemetry in Byeonsan Peninsular, Korea

Gyeom HEO, Min-A HEO, Kyoungmi KANG¹, Doo-Jin HWANG² and Hyeon-Ok SHIN^{3*}

Student, Department of Fisheries Physics, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

¹Professor, KOICA-PKNU International Graduate Program of Fisheries Science, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

²Professor, Division of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

³Professor, Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

In order to collect basic information of response behavior of red seabream (*Pagrus major*) during pilling, works for constructing wind power station in Byeonsan Peninsular, Korea were investigated. Four cultured red seabream CRB1 to CRB4 [total length (TL): 27.1 ± 1.0 cm; body weight: 359 ± 30 g] were tagged with an acoustic tag and used in experiment. CRB1 and CRB2 to CBR4 were released on the sea surface at same time around the constructing site of the wind power plant on September 22, 2017 and July 18, 2018, respectively. The tracking of the CRB1 to CRB2 and CRB3 to CRB4 were conducted for two hours, approximately, using VR100 receiver including a directional hydrophone and VR2W receivers array consisted of 19 presence/absence receivers (VR2W receivers), respectively. The underwater noise level before (no pile driving works) and during pile driving works was measured 116.0-118.0 dB (re $1 \mu\text{Pa}$) and a maximum of 160 dB (re $1 \mu\text{Pa}$), respectively. CRB1 moved about 6.0 km with average swimming speed of 80.2 ± 20.5 cm/s for 2.1 hours without pile driving work. The average water depth of the sea bed on the route of CRB1 was 9.1 ± 0.4 m. CRB2 moved about 7.3 km with the average swimming speed of 96.8 ± 27.1 cm/s for 2.1 hours with pile driving work. The water depth of the sea bed on the route of CRB2 was 11.9 ± 0.6 m. At results of the Rayleigh's z-test two fishes CRB1 and CRB2 showed significant directionality in the movement ($p < 0.01$). Movement mean angles of CRB1 and CRB2 were 92.7 and 251.8°, respectively. CRB2, CRB3 and CRB4 exhibited the escaping behavioral response from the noise of source during the pile driving work. The swimming speed of the CRB2 exposed on the heavy underwater noise stimuli due to the pile driving work was 1.21 times faster than that of the CRB1 exposed on the ambient underwater

*Corresponding author: shinho@pknu.ac.kr, Tel: +82-51-629-5893, Fax: +82-51-629-5886

noise in the study site.

Keywords: Red seabream, Behavior, Acoustic telemetry, Movement, Swimming speed

서론

참돔(*Pagrus major*)은 우리나라 연근해를 비롯한 일본, 타이완, 남중국해 및 동남아시아 등 북서태평양 연안에 분포한다. 최대 체장이 100 cm 내외이며 수컷의 성장이 암컷보다 빠르다. 식성은 잡식성이며, 새우, 갯지렁이, 어류 등을 주로 먹는다. 수심 10~200 m의 해저 기복이 심한 암초 지역에서 많이 서식한다. 산란기는 4~6월이며, 산란에 적합한 수온은 15~17°C이다(Doopedia, 2016). 참돔은 잉어 볼락 및 농어 등과 함께 부레가 발달한 어종으로 충격파에 민감한 반응을 보인다(Bae JW et al., 2009)

음향 텔레메트리 기술은 최근 20년간 급격하게 발전해왔으며, 이 기술은 서식지 관리, 보호구역 관리, 외래종의 모니터링 및 제어, 관리 단위의 규정, 수산 상호작용, 자원량 추정 관련 요소(폐사, 시간적 변동, 환경요소간의 상관 유무) 파악 등에 응용하고 있다. 이 기술은 해양생물이 크고 작은 규모의 서식지에서 어떻게 상호작용하는지에 대한 정보제공이 용이하므로 서식지 관리에 활용도가 높다는 인식이 최근 크게 증가하였다(Crossin et al., 2017).

수중 환경 요소들은 물고기의 활동에 대하여 생리적으로 또는 행동적으로 영향을 미치며, 물고기의 활동에 영향을 미치는 환경 요소로는 수온(Sogard and Olla, 1998; Staaks et al. 1999, Heo et al., 2016b; Heo et al., 2017), 빛(Shin et al., 2015; Heo et al., 2016a; Heo et al., 2016b; Heo et al., 2017), 소리(Shin et al., 2003, Heo et al, 2019), 포식자(Linehan et al., 2001) 및 서식지의 구조(Cote et al., 2002) 등이 있다. 그 중에서 소리와 관련하여 해양생물은 배경소음과 비교하여 높은 수준의 수중소음에 노출되면 해양생물은 청각 능력의 저하, 생리적 영향 및 도피반응 등을 보인다(An, 2008). 수중에서 발생하는 인위적인 수중소음은 선박, 해양 건설공사의 기초 작업에 주로 쓰이는 파일항타 작업 및 해저탐사용 air gun 등에 의해서 발생할 수 있다(McCauley et al., 2003; Hastings and Popper, 2005; An, 2008). 그중 수중에서 폭발 및 파일항타와 같은 강력한 수중충격음

은 해양생물의 장기손상 등의 치명적인 부상, 장기적인 영향을 미칠 수 있는 부상 또는 청각 장애 및 회피 반응 등을 야기할 수 있다. 이러한 수중소음으로 인하여 해양생물은 번식지, 회유 경로 및 이동 경로를 회피하는 반응을 나타낼 수 있으며, 이와 같은 어류의 회피 반응은 수중충격음 발생 위치 주변의 자원 구성에 중대한 영향을 미칠 수 있다(Nedwell et al., 2003b).

이 연구에서는 변산반도 근처 해역에서 해상풍력발전기 건설공사 중 발생하는 파일 항타에 대한 참돔의 행동 패턴을 분석하기 위해서 두 가지 음향 텔레메트리 기술을 이용하여 추적하였으며, 참돔의 이동거리, 유영속도 및 이동방향의 방향성 유무를 분석하였다.

재료 및 방법

실험 해역

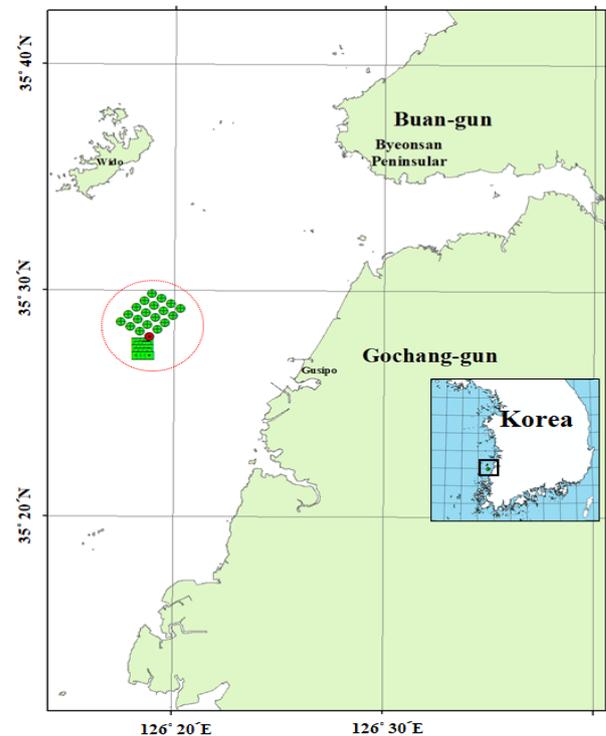


Fig. 1. Study site in the Byeonsan Peninsular, Korea. Black dotted circle denotes the offshore wind power plants (Heo, 2021).

음향 텔레메트리에 의한 참돔의 이동 범위 및 행동 특성에 대한 연구는 Fig. 1과 같이 변산반도 주변해역에서 실시하였다. 이 해역에는 해상풍력발전단지(시범단지)가 조성되었으며, 해상풍력발전기 20기가 각각 약 800 m 간격으로 건설되었다.

해상풍력발전단지 조성을 위한 건설작업은 2017년부터 2019년까지 이루어졌으며, 2017년에는 해상풍력발전기 건설 작업이 없는 조건에서 실험을 실시하였다. 2018년에는 해상풍력발전기 건설 작업을 위한 파일항타 작업이 있는 위치로부터 약 1,026 m 떨어진 위치에서 참돔을 방류하여 실험을 실시하였다.

수중소음 측정

2018년 7월 18일 해상풍력발전단지 건설작업 위치로부터 약 1,026 m 떨어진 위치에 수중음향기록장치(AUSOMS-mini, AquaSound Inc., Japan)를 설치하여 수중소음을 측정하였으며, 수중음향기록장치의 주파수 범위는 100~20 kHz이었고 측정범위는 70~160 dB (re 1μ Pa)이었다. 또한 현장에서 수중음압계(SW1030, Oki, Japan)를 사용하여, 수중음압준위를 측정하여 비교하였다. 수중소음은 파일항타 작업 중일 때와 파일항타 작업이 없을 때를 기록하여 비교하였다.

실험어 음향표지 부착 및 방류

실험에 사용한 참돔, 음향표지, 참돔의 방류 및 추적 정보는 Table 1과 같다. 실험어로는 참돔 4마리를 사용하였으며, 참돔의 전장 및 체중은 27.1±1.0 cm 및 359±30 g이었다.

실험에 사용한 음향표지(V9-1H, Vemco, Canada)는 연속형(continuous type) 및 부호형(coded type)을 사용하였으며, 펄스간격은 각각 1초 및 60초, 배터리 수명은 각각 약 7일 및 약 90일 이었다. 연속형 음향표지는 주파수 60 kHz 및 63 kHz의 음향표지를 사용하였으며, 부호

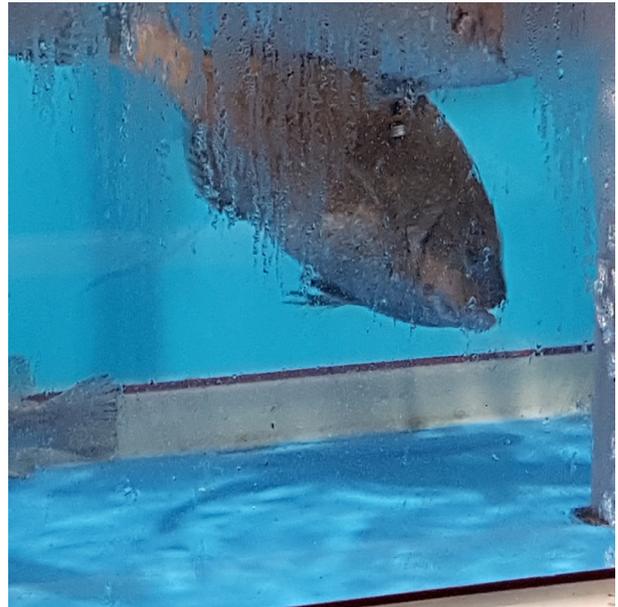


Fig. 2. Experiment fish stored in a tank for recovery from tagging.

형 음향표지는 주파수 69 kHz의 음향표지를 사용하였다. 실험 해역의 수심이 10 m 내외이었으므로 압력센서를 부착하지 않았다.

실험어(CRB1)은 체내태깅법을 이용하여 복강내에 음향표지를 삽입하였으며, 실험어(CRB2~CRB4)는 체외 태깅법을 이용하여 등지느러미 부근에 음향표지를 부착시켰다. 음향표지를 실험어에 삽입 또는 부착 후 회복을 위해 12시간 이상 수조에서 보관하였다(Fig. 2).

실험어(CRB1)는 2017년 9월 22일 해상풍력발전기 건설작업이 없을 때 방류하여 2.1시간 동안 추적하였으며, 실험어(CRB2~CRB4)는 2018년 7월 18일 해상풍력발전기 건설공사 위치로부터 약 1,026 m 떨어진 위치에서 방류하여 약 2.1시간 동안 행동을 관찰하였다.

음향추적 장치

Table 1. Summary of the test fish and tracking times

Fish ID	Total length (cm)	Body weight (g)	Acoustic transmitter -frequency (kHz)	Tagging	Released		Duration of tracking (hours)
					Date	Time	
CRB1	28.0	347	Continuous type-60.0	Internal	2017-09-22	11:22	2.1
CRB2	26.5	327	Continuous type-63.0	External	2018-07-18	10:20	2.1
CRB3	26.0	367	Coded type-69.0	External	2018-07-18	10:20	2.1
CRB4	27.7	397	Coded type-69.0	External	2018-07-18	10:20	2.1

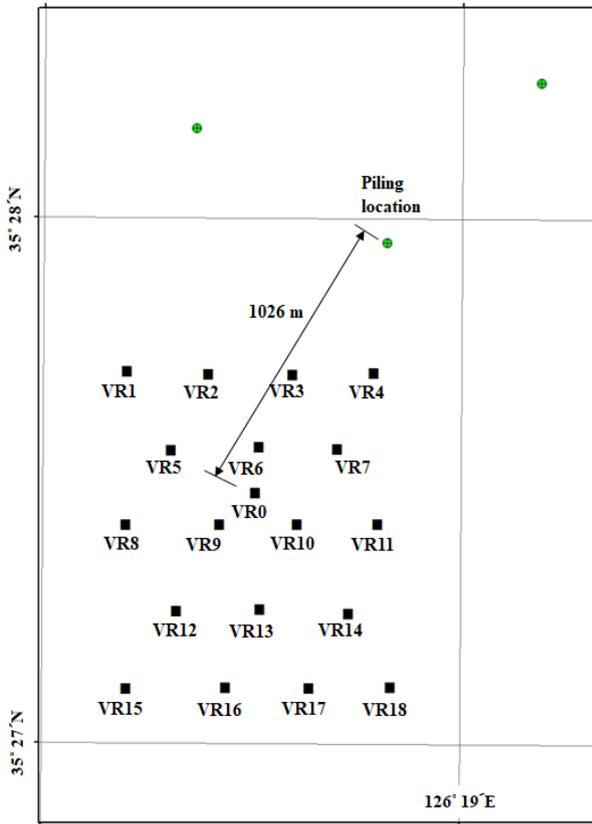


Fig. 3. Array of VR2W receivers on 18 July 2018. VR1 to VR18 denote the location of the VR2W receiver. VR0, an automatic underwater sound monitoring system with a VR2W receiver and releasing location of the test fish.

음향텔레메트리에 의한 실험어의 이동 범위 및 행동 특성을 파악하기 위하여 두 가지 음향추적 방법을 사용하였다. 먼저 선박을 이용한 음향 추적방법은 음향표지를 부착한 실험어의 위치를 선박의 위치와 비교하여 구하는 방법이다. 선박의 위치는 소형 위치정보시스템(Global Positioning System:GPS) 로거(GPS855, Ascen Korea, Korea)를 사용하여 5 sec 간격으로 기록하였으며. 선박으로부터 실험어의 거리 및 방향은 수신기(VR100, Vemco, Canada), 지향성 수파기(VH110, Vemco, Canada) 및 나침반을 사용하여 추정하였다. 어류행동 관찰시 선박의 엔진 소음 등의 영향을 최소화하기 위하여 실험어와 약 50~100 m의 거리를 유지하며 어류를 추적하였다.

어류통과식별장치를 이용한 음향 추적방법은 어류통과식별장치(VR2W, Vemco, Canada)를 사용하는 방법으로, VR2W 수신기는 수신 유효 범위(약 400 m)

내에 있는 음향표지의 식별부호, 날짜 및 시간(1 밀리초까지 기록), 수심, 수온 등의 데이터를 기록하는 장치로서 독립적이며, 동시에 다수의 실험어를 추적할 수 있는 장치이다.

이 실험에서는 실험어의 방류 위치를 중심으로 19개의 VR2W 수신기를 배열하여 실험어의 추적에 사용하였다. Fig. 3은 2018년 7월 17일 설치한 VR2W 수신기의 배열을 나타내고 있다. VR1~VR18은 VR2W 수신기의 위치를 나타낸다. VR0에는 수중음향 기록장치 및 VR2W 수신기를 함께 설치하였으며, VR0위치에서 실험어를 방류하였다. 파일항타 작업 위치로부터 VR0까지의 거리는 약 1,026 m이었다.

연속형 음향표지를 부착한 CRB1 6,하 11및 CRB2는 선박을 이용한 음향 추적방법을 이용하여 추적하였으며, 부호형 음향표지를 부착한 CRB3 및 CRB4는 어류통과식별장치를 이용한 음향추적 방법으로 추적하였다(Heo et al., 2019; Shin et al., 2019; Heo, 2021).

통계 검증

실험어의 이동방향에 대한 방향성 유무는 Rayleigh의 z-Test (Zar, 1999)를 사용하여 검증하였다. 귀무가설 H_0 는‘유영방향은 360° 전 방향으로 고르게 분포 한다’였다. a_i 및 f_i 는 각각 참돔의 유영방향 및 30도 간격의 계급에 대한 발생빈도이다. 5분 간격으로 구한 참돔의 위치는 선박을 이용한 음향추적방법으로부터 구한 거리를 사용하여 보정하였다. 또한 유영방향 a_i 는 30도 간격으로 재추출하였다.

30도 간격의 각 계급에 대한 좌표 x , y 는

$$\begin{aligned} x &= f_i \times \sin a_i \\ y &= f_i \times \cos a_i \end{aligned} \quad (1)$$

이다. X 는 평균 x 좌표, Y 는 평균 y 좌표라 하면,

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (2)$$

이다. 여기서 r 은 집중도를 나타낸다. 평균 유영 방향을 a 라 하면,

$$\cos a = \frac{X}{r} \quad (3)$$

$$\sin a = \frac{Y}{r} \quad (4)$$

$$a = \cos^{-1}\left(\frac{X}{r}\right) \quad (5)$$

이다. 균등 분포를 나타내는 값 R 은,

$$R = n \times r \quad (6)$$

이고, n 은 데이터 개수이다.

Rayleigh의 z 는 균등하게 분포한다는 귀무가설을 확인하는데 활용 될 수 있으며,

$$z = \frac{R^2}{n} = nr^2 \quad (7)$$

이다. z 값은 n 에 대한 통계 임계값과 비교하여, 큰 값을 가질 때 귀무가설 H_0 는 기각되어, 방향성을 가진다. 실험어의 이동방향은 5분 간격으로 측정된 실험어의 위치 좌표를 사용하여 구하였다. 실험어의 위치좌표는 추적 선박의 GPS좌표, 실험어가 위치하는 나침방위 및 실험어로부터 송신되는 음향송신기의 신호강도를 사용하여 보정하였다. 음향송신기의 수신 신호강도와 음향송신기까지의 거리는 미리 측정하여 관계식을 구하였다(Shin et al., 2019; Heo, 2021).

결 과

수중소음

2018년 7월 18일 측정된 수중소음 준위는 Fig. 4와 같다. (a)는 파일항타 전의 수중소음으로 약 116.0~118.0 dB (re 1 μ Pa)이었으며, (b)는 마지막 파일항타 동안의 수중소음으로 약 144 dB (re 1 μ Pa)이었다.

파일항타 동안 기록된 파형은 일부 피크 음압에서 포화되어 수중소음 준위를 적정하게 지시하지 못한 것으로 판단하였다. 당일 현장에서 수중음압계(SW1030, Oki, Japan)로 측정된 파일항타 중의 최대 수중음압 준위는 160 dB (re 1 μ Pa)이었다.

Fig. 5는 Fig. 4의 사각박스로 표시한 시간 동안의 파형 데이터를 파형분석용 소프트웨어를 사용하여 재생하

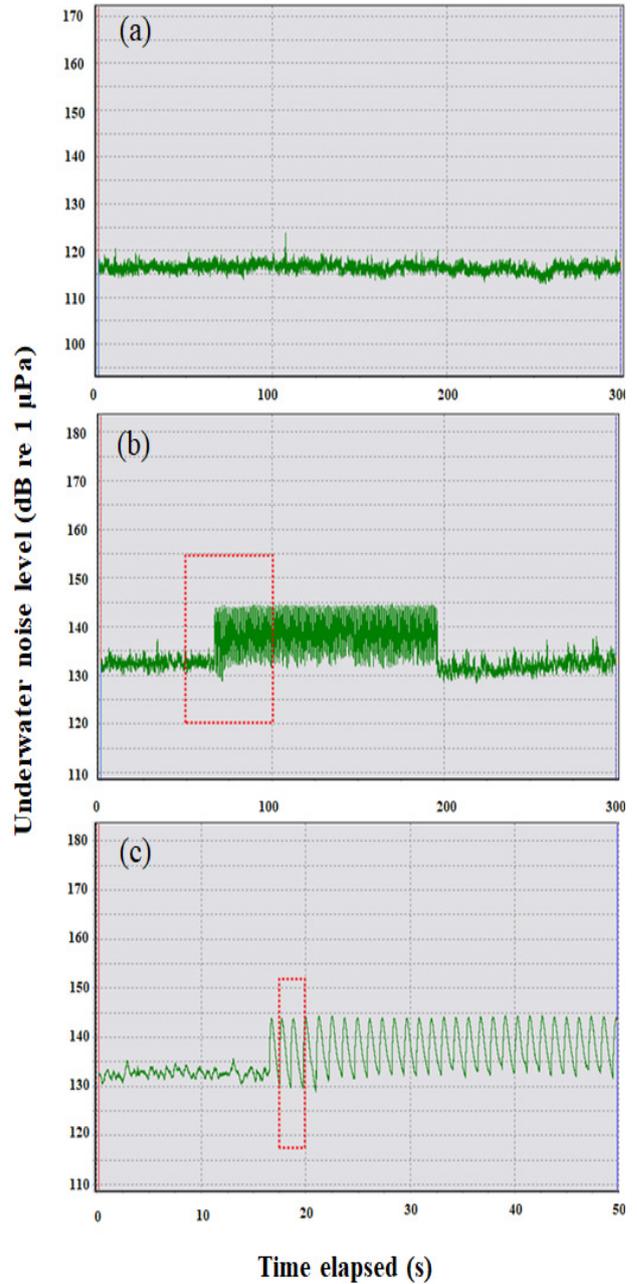


Fig. 4. Wave pattern of the underwater noise recorded by AUSOMS-mini for constructing the offshore wind power plant on 18 July 2018. (a) was recorded before the pile driving work. (b) was recorded during the pile driving work. (c) is Extended wave pattern indicated by dotted red rectangular in figure (b).

면서 다시 녹음하여 나타낸 파형 데이터이며, 경과시간에 따른 파일항타 시의 신호전압 (V)을 나타내고 있다. 이 신호전압은 수중음향기록장치에 기록된 신호전압이

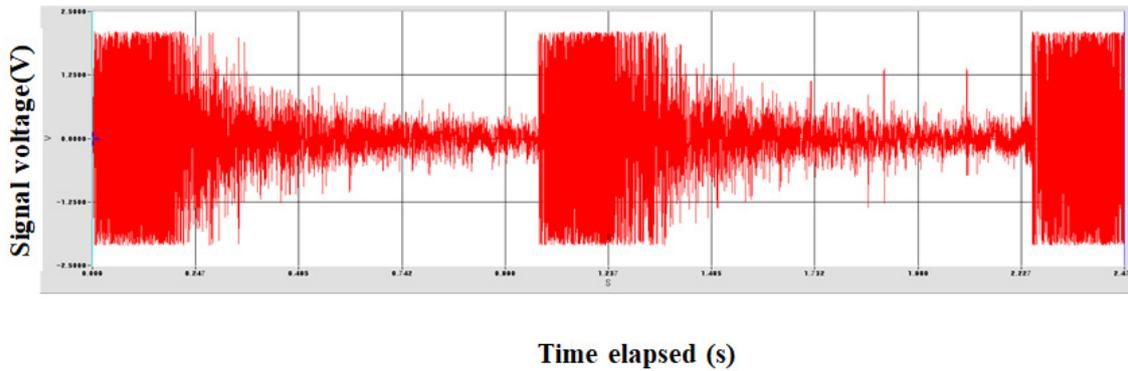


Fig. 5. Signal voltages recorded by AUSOMS-mini during the pile driving work denoted wave pattern in figure 3 (c).

다. 실험 해역에서 있었던 파일항타 작업 시의 항타 충격 음은 약 1초 간격으로 발생함을 알 수 있다.

파일항타 작업 전 어류의 행동

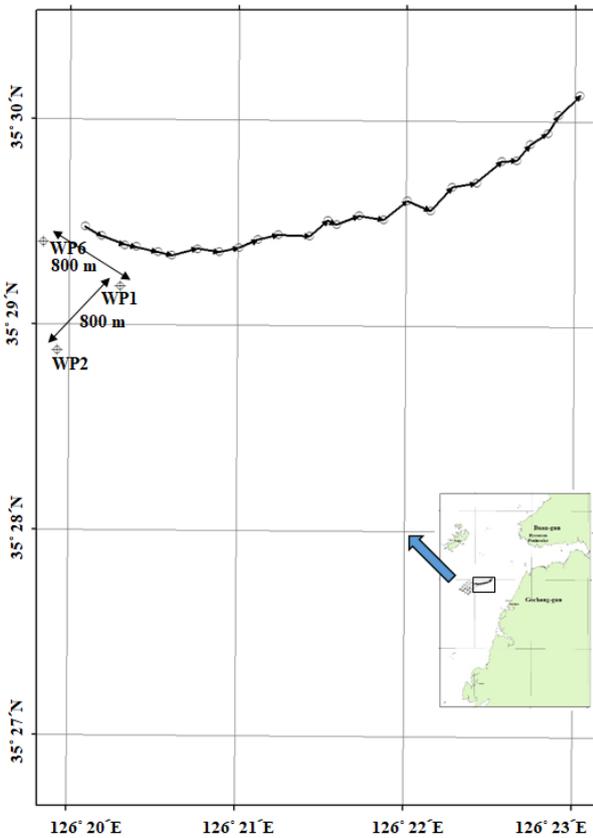


Fig. 6. Horizontal behavior of CRB1 for 2.1 hours acoustic tracking with the VR100 receiver and the directional hydrophone installed on a vessel before the pile driving work on a offshore wind power plant complex on 22 September 2017.

2017년 9월 22일 해상풍력발전단지 건설공사 작업이 없을 때, 선박을 이용하여 2.1시간 동안 추적한 실험어 CRB1의 행동 패턴 및 5분 간격으로 측정한 유영속도는 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다. 11:22에 해상풍력발전단지 조성 부지에서 6호기가 건설될 예정인 위치 부근에서 방류한 실험어 CRB1은 약 2.1시간 동안 평균 80.2 ± 20.5 cm/s의 속도로 약 6.0 km 이동하였다. 실험어 CRB1이 이동한 궤적의 해저 수심은 평균 9.1 ± 0.4 m이었다.

Fig. 8은 실험어 CRB1의 circular histogram을 나타내었다. 실험어 CRB1의 평균 유영방향은 약 2.1시간 동안 추적하여, 5분 간격으로 방향을 구하였다. 유영방향에 대한 방향성 유무는 Rayleigh의 z-test 검정 결과, 실험

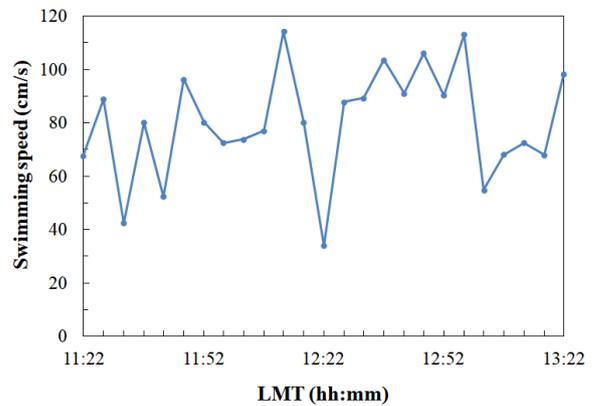


Fig. 7. Swimming speed of CRB1 measured 5-minute-interval for 2.1 hours acoustic tracking with the VR100 receiver and the directional hydrophone installed on the vessel before the pile driving work on a offshore wind power plant complex on 22 September 2017.

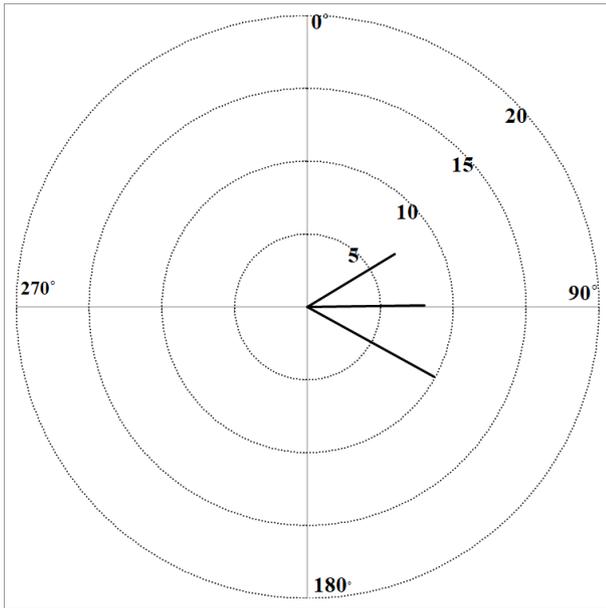


Fig. 8. Circular histogram for the swimming direction of CRB1 for 2.1 hours acoustic tracking with the VR100 receiver and the directional hydrophone installed on the vessel before the pile driving work on a offshore wind power plant complex on 22 September 2017.

어 CRB1의 유영방향에는 유의한 방향성이 있는 것으로 나타났으며, 실험어 CRB1의 평균 유영방향은 92.7° 이었다($n=25$, $r=0.9091$, $z=20.6600$, $z>2.964$, reject H_0).

파일항타 작업 중 어류의 행동

2018년 7월 18일 해상풍력발전기 #5 건설공사의 파일항타 작업 중 선박을 이용하여 2.1시간 동안 추적한 실험어 CRB2의 행동 패턴 및 5분 간격으로 측정된 유영속도는 Fig. 9 및 Fig. 10과 같다. 10:20에 파일항타 위치로부터 1,026 m 떨어진 위치에서 방류한 실험어 CRB2는 약 125분 동안 평균 96.8 ± 27.1 cm/s의 속도로 약 7.3 km 이동하였으며, 파일항타 작업 중인 위치와 반대방향인 남서방향으로 이동하였다. Fig. 10에서 현장에서 기록한 파일항타 작업 시간은 빨간 사각형으로 표시하였으며, 파일항타는 10:21부터 약 15분 동안의 지속적인 항타 작업을 1회 실시하였다. 파일항타 작업이 없을 때의 실험어 CRB2의 유영속도는 97.6 ± 27.2 cm/s이었으며, 첫 파일항타 작업 시작 후 5분 동안의 실험어 CRB2의 유영속도는 49.4 cm/s로 작업이 없을 때와 비교하여 약 0.5배

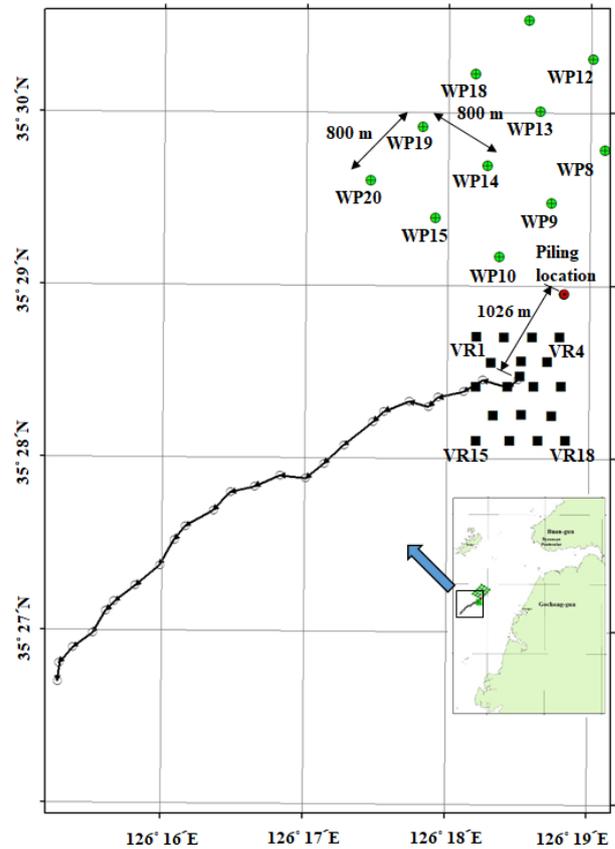


Fig. 9. Horizontal behavior of CRB2 for 2.1 hours acoustic tracking with the VR100 receiver and the directional hydrophone installed on the vessel during the pile driving work at the #5 offshore wind power plant on 18 July 2018.

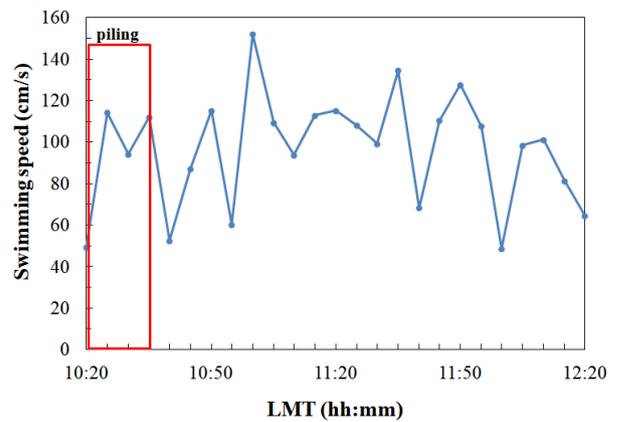


Fig. 10. Swimming speed of CRB2 measured 5-minute-interval for 2.1 hours acoustic tracking with the VR100 receiver and the directional hydrophone installed on the vessel during the pile driving work at #5 offshore wind power plant on 18 July 2018. The width of the solid red rectangular indicates the time of the pile driving work.

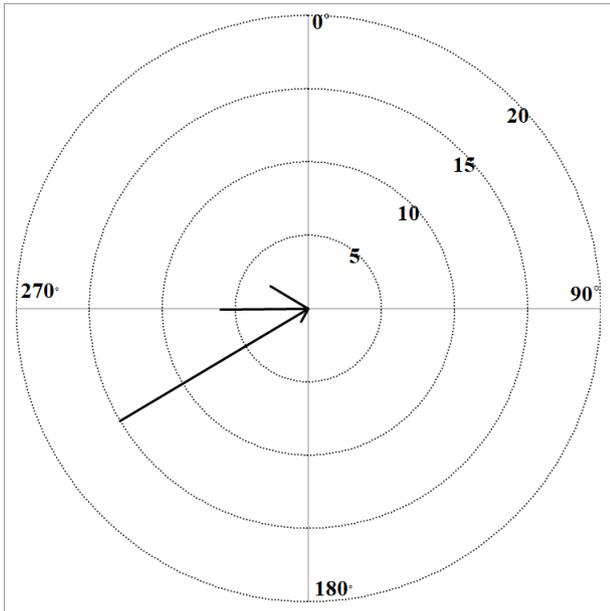


Fig. 11. Circular histogram for the swimming direction of CRB2 for 2.1 hours acoustic tracking with the VR100 receiver and the directional hydrophone installed on the vessel during the pile driving work at #5 offshore wind power plant on 18 July 2018.

중 소음 자극에 노출된 실험어 CRB2의 유영속도는 실험 해역의 평상시 수중 소음에 노출된 실험어 CRB1의 유영속도보다 1.21배 더 빠른 것으로 나타났다.

Fig. 11은 실험어 CRB2의 circular histogram을 나타내었다. 실험어 CRB2의 평균 유영방향은 약 2.1시간 동안 추적하여, 5분 간격으로 방향을 구하였다. 유영방향에 대한 방향성 유무는 Rayleigh의 z -test 검정 결과, 실험어 CRB2의 유영방향에는 유의한 방향성이 있는 것으로 나타났으며, 실험어 CRB2의 평균 유영방향은 251.8° 이었다($n=25$, $r=0.9259$, $z=21.4336$, $z>2.964$, reject H_0).

2018년 7월 18일 해상풍력발전기 #5 건설공사의 파일항타 작업 중 어류통과식별장치를 이용하여 2.1시간 동안 추적한 실험어 CRB3 및 CRB4의 행동 패턴은 Fig. 12와 같다. 10:20에 파일항타 위치로부터 1,026 m 떨어진 위치에서 방류한 실험어 CRB3은 파일작업 위치의 반대 방향인 남서쪽으로 이동하였으며, 실험어 CRB3의 초기 400 체류시간(방류 직후부터 방류지점 기준으로 반경

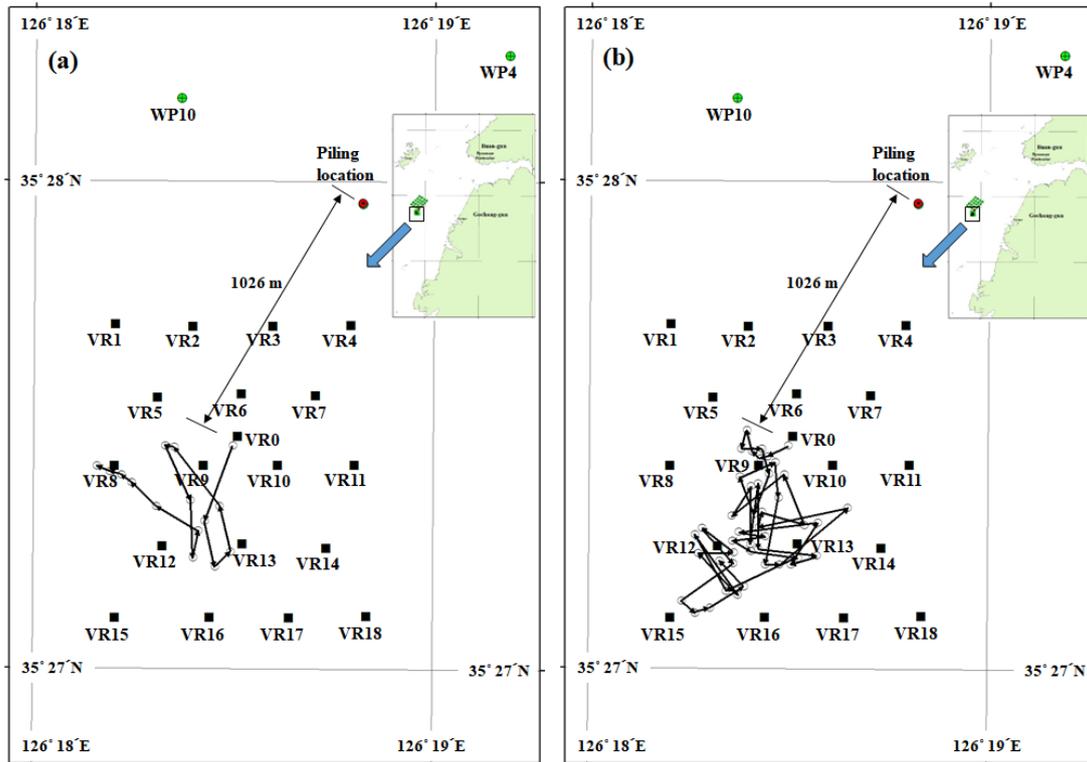


Fig. 12. Horizontal behavior of (a) CRB3 and (b) CRB4 for 2.1 hours acoustic tracking with 19 VR2W receivers array during the pile driving work at #5 offshore wind power plant on 18 July 2018.

400 m 이내에 체류한 시간)은 0분이었다.

10:20에 파일항타 위치로부터 1,026 m 떨어진 위치에서 방류한 실험어 CRB4는 파일작업 위치의 반대 방향인 남서쪽으로 이동하였으며, 실험어 CRB4의 초기 400 체류시간은 약 19분이었다.

고 찰

Mueller-Blenkle et al. (2010)의 연구에서는 파일항타 작업소음이 어류의 행동에 미치는 영향에 대해 연구하였으며, 그물펜스 내의 대구와 서대는 140~161 dB 및 144~156 dB에서 반응 한 것으로 나타났으며, 대구 및 서대 모두 소음원 중심에서 멀어지는 것으로 나타났다. 또한 실험어는 소리에 노출된 초기의 10분 동안 유영속도가 증가한 개체가 있는 반면에 일부 개체는 수중소음에 노출된 즉시 동결반응을 나타냈다. 이러한 연구결과는 본 연구에서 파일항타 작업소음이 발생할 때 방류한 실험어 3마리 모두 파일항타 작업소음원에서 멀어지는 방향으로 유영한 것과 유사한 것으로 판단되며, 이러한 행동패턴은 수중소음에 노출된 초기에 더 뚜렷하게 나타났다. 5분 간격으로 유영속도를 측정된 실험어 CRB2는 수중소음에 노출된 초기 5분 동안의 유영속도가 파일항타가 없을 때의 유영속도와 비교하여 약 0.5배 느린 것으로 나타났다. 이러한 결과에서 파일항타 수중소음에 대해 동결반응을 나타낸 것으로 추측을 할 수 있지만 개체수가 적고 유영속도의 측정간격의 한계로 초기의 동결반응을 확인하는데 어려움이 있다. 이를 보완하기 위해서는 실험 개체수를 늘이고 유영속도 측정 간격을 세밀히 하여 추가 실험을 할 필요가 있다고 판단된다.

국내의 연구에서 파일항타 소음이 평상시 수중소음과 비교하여 약 36.5 dB/ μ Pa 높은 환경에서 가물치의 평균 유영속도가 약 1.4배 높은 것으로 나타났으며, 유영속도의 변화는 파일항타 작업 초기에 크게 나타났다(Shin, 1995). 또한 발파작업소음이 평상시 수중소음과 비교하여 약 40 dB/ μ Pa 높은 환경에서 향어의 평균 유영속도가 약 1.6배 높은 것으로 나타났다(Shin, 2000). 또한 본 실험과 같은 방법으로 실시한 Heo et al. 2019의 연구에서 파일항타 수중소음에 대해서 조피볼락이 회피반응을 보이는 것을 확인 할 수 있었다.

이와 같이 선행 연구 결과 및 본 연구 결과를 토대로 해상에서의 건설작업 등으로 인해 발생하는 수중소음은

수중소음원의 특성 및 해역의 특성에 따라 수중소음원의 영향범위 및 피해수준이 다르게 나타날 수 있다. 또한 어종별로도 수중소음원에 대한 반응 행동이 다르게 나타날 수 있다. 어류 회피반응은 서식지를 피하고 이동 경로를 변경하는 결과로 나타날 수 있으며, 이러한 결과는 수산 자원 확보에 영향을 미치는 중요한 원인 중 하나가 될 수 있으며, 이는 어민들의 생산활동 및 경제활동에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 해상에서의 건설 작업은 서식지 및 이동 경로 등에 대한 부정적인 영향을 줄이기 위해 충분한 선행 조사를 수행 한 후 이루어져야 한다(Nedwell et al., 2003b; Heo, 2021).

해상에서 어류의 생태 조사를 위하여 음향텔레메트리 기술이 다양하게 활용되고 있으며(Crossin et al., 2017), 이 연구에서는 두 가지 방법을 사용하였다. 먼저 선박을 이용한 음향추적방법은 음향표지를 부착한 하나의 개체를 추적하는 방법으로 장시간 동안의 개체어 추적에 유리하다. 어류통과식별장치를 이용한 음향추적방법은 음향표지를 부착한 다수의 개체를 추적하는 방법으로 한정된 공간에서 다수의 개체어 추적에 유리하다. 이러한 이유로 본 실험에서는 두 가지 방법을 동시에 활용하여 파일항타 수중소음에 대한 참돔의 행동 반응을 관찰하였으며, 수중소음에 대한 실험어의 초기 반응 행동 데이터 확보 및 장시간 행동 관찰을 통한 실험어의 유영방향의 방향성 유무에 대한 데이터를 확보 할 수 있었다. 이와 같이 해상에서의 어류의 행동 관찰에는 다양한 음향텔레메트리 기술을 활용하는 것이 데이터 확보에 효과적일 것으로 판단된다(Heo et al., 2019; Heo, 2021).

결 론

본 연구는 변산 반도에서 해상풍력발전소 건설공사 중 일 때 실험어의 행동 패턴에 대한 기초 정보를 수집하기 위해 실시하였다. 양식산 실험어 CRB1~CRB4 [체장 (TL): 27.1 \pm 1.0 cm; 체중 359 \pm 30 g]에 음향표지를 부착하여 실험에 사용하였다. 실험어 CRB1과 CRB2~CRB4는 각각 2017년 9월 22일 해상풍력발전소 건설작업 없을 때와 2018년 7월 18일 해상풍력발전소 건설작업 중일 때 해상풍력발전소 건설현장 주변에서 방류하였다. 실험어 CRB1 및 CRB2는 선박을 이용한 음향추적 방법을 사용하였으며, 실험어 CRB3 및 CRB4는 19개의 어류통과식별장치를 사용하여 각각 약 2시간 동안 추적

하였다. 2018년 7월 18일 측정한 파일항타 작업 전의 수중소음 준위는 약 116.0~118.0 dB (re 1 μ Pa)이었으며, 파일항타 중의 최대 수중음압 준위는 160 dB (re 1 μ Pa)이었다. 실험어 CRB1은 2.1 시간 동안 평균 유영속도 80.2 \pm 20.5 cm/s로 약 6.0 km 이동하였다. 실험어 CRB1의 이동경로의 해저 수심은 9.1 \pm 0.4 m이었다. 실험어 CRB2는 파일 항타 작업 중에 실시하였으며 2.1 시간 동안 평균 유영속도 96.8 \pm 27.1 cm/s로 약 7.3 km 이동하였다. 실험어 CRB2의 이동경로의 해저 수심은 11.9 \pm 0.6 m이었다. Rayleigh의 z-test 결과 실험어 CRB1과 CRB2의 유영방향에는 유의한 방향성이 있는 것으로 나타났으며 ($p < 0.01$), CRB1과 CRB2의 평균 유영방향은 각각 92.7° 및 251.8 °이었다. 실험어 CRB2, CRB3 및 CRB4는 파일 항타 작업 중 수중 소음원으로부터 회피하는 행동 반응을 나타냈다. 파일 항타 작업으로 인한 높은 수중 소음 자극에 노출된 실험어 CRB2의 유영속도는 실험 해역의 평상시 수중 소음에 노출된 실험어 CRB1의 유영속도보다 1.2배 더 빠른 것으로 나타났다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음

References

- An SY. 2008. Behavioral response of goldfish on anthropogenic underwater sound. Master Thesis, Pukyong National University, 1-34.
- Bae JW, Park JH and Yoon JR. 2009. Characteristics of impulsive noise of waterfront construction site and its effects on fishes. Korean Soc Noise Vib Eng 19. 928-934.
- Chyung MK. 1977. The fishes of Korea. Iljisa, Seoul, Korea, 257-259.
- Cote D, Ollerhead LMN, Gregory RS, Scruton DA and McKinley RS. 2002. Activity patterns of juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*) in Buckley Cove, Newfoundland. Hydrobiologia 483, 121-127. <https://doi.org/10.1023/A:1021367225993>.
- Crossin GT, Heupe MR, Holbrook CM, Hussey NE, Lowerre-Barbieri SK, Nguyen VM, Raby GD and Cooke SJ. 2017. Acoustic telemetry and fisheries management. Ecological Applications 27, 1031-1049. <https://doi.org/10.1002/eap.1533>.
- Doopedia. 2016. Retrieved from http://www.doopedia.co.kr/doopedia/master/master.do?_method=view&MAS_IDX=101013000855037. Accessed 31 Jan 2019.
- Hastings MC and Popper AN. 2005. Effects of sound on fish, California DOT Contract No. 43A0139, 1-80.
- Heo G, Kim MS and Shin HO. 2016a. A study for behavior analysis of rockfish (*Sebastes inermis*) corresponding to the LED light by image analysis. J Korean Soc Fish Technol 52, 96-102. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2016.52.2.096>.
- Heo G, Kim MS and Shin HO. 2016b. Behavior analysis of rockfish (*Sebastes inermis*) depending on the temperature and LED lights. J Korean Soc Fish Technol 52, 103-110. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2016.52.3.103>.
- Heo G, Kim MS and Shin HO. 2017. Effect of water temperature and LED lights on the behavior of rock bream (*Oplegnathus fasciatus*). J Korean Soc Fish Technol 53, 240-245. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2017.53.3.240>.
- Heo G, Hwang DJ, Min EB, Oh SY, Park JW and Shin HO. 2019. Analysis of the behavior of gray rockfish (*Sebastes schlegelii* Hilgendorf) on the construction of wind power generators in the sea area around Byeonsan Peninsula, Korea. J Korean Soc Fish Ocean Technol. 55, 129-137. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2019.55.2.129>.
- Heo G, 2021. Analysis of fish behavior response to the stimuli of LED red and green light, and pile driving noise. Ph.D. Thesis, pukyeong national university, Korea, 147.
- Linehan JE, Gregory RS and Schneider DC. 2001. Predation risk of age-0 cod (*Gadus*) relative to depth and substrate in coastal waters. J exp mar Biol Ecol 263, 25-44. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(01\)00287-8](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(01)00287-8).
- McCauley RD, Fawcett J and Popper AN. 2003. High intensity anthropogenic sound damages fish ears. J Acoust Soc Am 113, 638-642.
- Mueller-Blenkle C, McGregor PK, Gill AB, Andersson MH, Metcalfe J, Bendall V, Sigray P, Wood DT and Thomsen F. 2010. Effects of pile-driving noise on the behaviour of marine fish. COWRIE Ref: Fish 06-08, Technical Report 31st March 2010, 1-57
- Nedwell JR, Langworthy J and Howell D. 2003b. Assessment

- ofsub-sea acoustic noise and vibration from offshore wind turbines and its impact on marine wildlife; initial measurements of underwater noise during construction of offshore windfarms, and comparison with backgroundnoise, Subacoustech Report No. 544 R 0424 for the Crown Estate, COWRIE, 1-68.
- Shin HO, 1995. Effect of dynamite explosion work noise on the behavior of snakehead, *Channa argus*. J Kor Fish Soc 28, 492-502.
- Shin HO, 2000. Effect of the filing work noise on behavior of Israeli carp, *Cyprinus carpio* in the cage of aquaculture. J Kor Fish Soc 33, 348-355.
- Shin HO, Heo G and Heo MA. 2015. The effect of LED light wavelength on the growth of fingerling *Sebastes inermis*. J Korean Soc Fish Technol 51, 179-187. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2015.51.2.179>.
- Shin HO, Lee DJ and Shin HI. 2003. Behavior of Israeli carp *Cyprinus carpio* traced by long baseline telemetry techniques during dynamite explosion work. Fish Sci 69, 27-36. <https://doi.org/10.1046/j.1444-2906.2003.00584.x>.
- Shin HO, Heo G, Heo MA and Kang GM. 2019. Behavioral analysis of Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) released to the entrance of Jinhae Bay, Korea. J Korean Soc Fish Ocean Technol 55, 29-38. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2019.55.1.029>.
- Sogard SM and Olla BL. 1998. Contrasting behavioural responses to cold temperatures by two marine fish species during their pelagic juvenile interval. Envir Biol Fishes 53, 405-412. <https://doi.org/10.1023/A:1007485417486>.
- Staaks G, Kirschbaum F and Williot P. 1999. Experimental studies on thermal behaviour and diurnal activity rhythms of juvenile European sturgeons (*Acipenser sturio*). J appl Ichthyol 15, 243-247.
- Zar JH. 1999. Biostatistical analysis, 4th edition. Prentice Hall International, London, UK. 616-624.

2021. 02. 01 Received

2021. 02. 23 Revised

2021. 02. 26 Accepted