creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

**저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.**

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

이학석사 학위논문

# 해상풍력단지 건설 및 운영에 의한 소음이 부세 및 넙치의 산소소비율, 삼투압, 카테콜아민 농도에 미치는 영향

**Oxygen consumption rate, osmolality and catecholamine responses of the yellow croaker *Larimichthys crocea* and olive flounder *Paralichthys olivaceus* to windfarm construction and operation noise**

**2023년 2월**

서울대학교 대학원

지구환경과학부

진가영

# 해상풍력단지 건설 및 운영에 의한 소음이 부세 및 넙치의 산소소비율, 삼투압, 카테콜아민 농도에 미치는 영향

지도 교수 김 종 성

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함

**2022년 10월**


서울대학교 대학원

지구환경과학부

진 가 영


진가영의 이학석사 학위논문을 인준함

**2023년 1월**

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

# 초 록

해상풍력 단지 건설 및 운영 등 해양 이용에 의한 수중소음의 증가는 다양한 서식 생물에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 현재까지 수중소음이 생물에 미치는 영향에 관해서는 대부분 해양 포유류 및 조류를 대상으로 연구되었으며, 어류 및 무척추동물에 관한 소음 영향 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 해상풍력 단지 건설 및 운영 시 발생하는 파일항타소음(약 154 dB re 1 μPa)과 터빈운영소음(약 141 dB re 1 μPa)에 의한 부세(*Larimichthys crocea*) 및 넙치(*Paralichthys olivaceus*) 치어의 영향을 각각 산소소비율, 삼투압, 카테콜아민 농도를 통해 평가하였다. 소음원별 비교 결과에서는 두 종 모두 파일항타소음을 1시간 노출하였을 때 산소소비율이 24시간 동안 회복되지 않고 불안정한 양상을 보였다. 반면 터빈운영소음을 24시간 노출한 경우 부세와 넙치 모두 산소소비율 변화량이 비교적 낮게 유지되었다. 이는 소음원의 종류에 따라 소음 수준뿐만 아니라 노출 기간, 간격 또한 제한해야 할 것을 의미한다. 한편, 어종별 영향 비교에서 파일항타소음 노출 시 넙치에 비해 부세에서 산소소비율 변화량이 더 높았으며 터빈운영소음 노출에서 부세의 삼투압이 유의하게 증가하였다($p<0.05$). 부유성 어류인 부세는 저서성 어류인 넙치에 비해 부레 및 청각 기관이 발달하여 소음에 더 민감한 반응을 보이는 것으로 사료된다. 이는 청각 민감도에 따라 상이한 관리 기준이 필요하다는 것을 시사한다. 본 연구는 소음원과 어종에 따른 생리 반응을 평가함으로써 수중소음 관리 기준 마련에 관한 과학적 기초 자료를 제공하였다는 것에 의의가 있다.

**주 요 어** : 해상풍력, 수중소음, 어류, 산소소비율, 삼투압, 카테콜아민

**학 번** : 2021-24224

# 목차

초록 ..... i

목차 ..... ii

약어 ..... iv

표 목차 ..... v

그림 목차 ..... vi

부록 목차 ..... viii

제 1 장 서 론 ..... 1–4
제 1 절 연구의 배경 및 목적 ..... 1

제 2 장 재료 및 방법 ..... 5–18
제 1 절 실험 수조 ..... 5
1. 구조 및 기능 ..... 5
2. QA/QC ..... 8
제 2 절 실험 소음 ..... 10
제 3 절 실험 생물 ..... 12
제 4 절 실험 기간 ..... 14
제 5 절 산소소비율 분석 ..... 15
제 6 절 혈액 분석 ..... 16
1. QA/QC ..... 16
2. 삼투압 및 호르몬 측정 ..... 16
제 7 절 자료 분석 ..... 18

제 3 장 결과 및 고찰 ..... 19–40
제 1 절 산소소비율 영향 ..... 19
1. 소음원별 영향 비교 ..... 19
2. 어종별 영향 비교 ..... 24
제 2 절 삼투압 영향 ..... 29
1. 소음원별 영향 비교 ..... 29
2. 어종별 영향 비교 ..... 31
제 3 절 호르몬 영향 ..... 34
1. 소음원별 영향 비교 ..... 34
2. 어종별 영향 비교 ..... 36
제 4 절 측정항목 간 상관관계 분석 ..... 38

제 4 장 요약 및 결론 ..... 41–43

참고문헌 ..... 44–47

부록 ..... 48–54

영문초록 ..... 55–56

# 약어

| | |
|---|---|
| **OCR** | Oxygen consumption rate |
| **DO** | Dissolved oxygen |
| **QA/QC** | Quality assurance-quality control |
| **NOAA** | National Oceanic and Atmospheric Administration |
| **IRENA** | International Renewable Energy Agency |

# 표 목차

**Table 1.** 39
Pearson's correlation relationships between oxygen consumption rate, osmolality, and catecholamine of the yellow croaker *Larimichthys crocea* exposed to noise.

**Table 2.** 40
Pearson's correlation relationships between oxygen consumption rate, osmolality, and catecholamine of the olive flounder *Paralichthys olivaceus* exposed to noise.

# 그림 목차

**Figure 1.** 7
Schematic diagram of the noise exposure system. The overall system consists of three layers of closed chambers and each layer has a different function; (a) upper: measure dissolved oxygen (DO) before fish respiration and water temperature; (b) middle: fish chamber and noise exposure speaker; and (c) lower: measure DO after fish respiration and water temperature. The measured DO and temperature data are transferred minutely from the optic sensor to the monitoring module.

**Figure 2.** 9
Quality assurance and control of the experimental systems. A three-step process was carried out. (a) Turn on the return motors; (b) Turn on the current motors, return motors, and cooler; (c) Turn on the current motors, the return motors, and the cooler, and increased the flow rate. As a result, 0% mortality and stabilization of the DO concentration.

**Figure 3.** 11
Schematic overview of materials and methods. (a) 2 types of noise as stressors were exposed for 1 or 24 hours. (b) Oxygen consumption rate, osmolality, and catecholamine were measured.

**Figure 4.** 22
Oxygen consumption rate (μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$) of the yellow croaker *L. crocea* under pile driving noise and turbine operation noise. A total of 2 hours of pile driving noise was carried out at 1 hour per day. Turbine operation noise was exposed for 24 hours continuously.

**Figure 5.** 23
Oxygen consumption rate (μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$) of the olive flounder *P. olivaceus* under pile driving noise and turbine operation noise is a total of 2 hours of noise exposure carried out at 1 hour for 1 day. Turbine operation noise exposure for 24 hours continuously.

**Figure 6.** 27
Oxygen consumption rate (μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$) on different species of the yellow croaker *L. crocea* and olive flounder *P. olivaceus* to pile driving noise. 1 hour of noise exposure was carried twice.

**Figure 7.** 28
Oxygen consumption rate (μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$) of the yellow croaker *L. crocea* and olive flounder *P. olivaceus* under operation noise. 1 hour of noise exposure was carried out twice.

**Figure 8.** 30
Comparison of measured osmolality (mOsmol $kg^{-1}$) to the yellow croaker *L. crocea* and olive flounder *P. olivaceus* for background noise, pile driving noise, and turbine operation noise exposure.

**Figure 9.** 33
Comparison of measured osmolality (mOsmol $kg^{-1}$) of the yellow croaker *L. crocea* and olive flounder *P. olivaceus* for background noise and both pile driving noise and turbine operation noise exposure.

**Figure 10.** 35
Comparison of measured catecholamine (ng $mL^{-1}$) of the yellow croaker *L. crocea* and olive flounder *P. olivaceus* exposed to background noise and both piledriving noise and turbine operation noise exposure.

**Figure 11.** 37
Comparison of measured catecholamine (ng $mL^{-1}$) for background noise and both pile driving noise and turbine operation noise exposure on juvenile yellow croaker *L. crocea* and olive flounder *P. olivaceus*.

**Figure 12.** 43
Summary of the overall results of this study. (a) Comparison of physiological effects by noise source; (b) Comparison of physiological effects by species.

# 부록 목차

**Appendix 1.** 48
Flow rate per minute in each closed chamber.

**Appendix 2.** 49
Cultivation conditions for the experimental organism.

**Appendix 3.** 50
Instrumental condition of osmometer for determining plasma osmolality.

**Appendix 4.** 51
Experimental condition for measuring plasma catecholamine (CA) concentration.

**Appendix 5.** 52
Mini-review for prior studies on the effect of noise on marine fishes.

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구의 배경 및 목적

수중소음은 기술 발전에 따른 해양 이용 증대와 함께 급속도로 증가하고 있다. 1950년부터 2000년 사이에 생물이 감지하는 저주파 음역의 소음 크기가 15 dB re 1 μPa만큼 증가하였으며 최근 지구온난화로 인한 북극 빙하침식으로 동시베리아해의 수중소음이 16 dB re 1 μPa만큼 증가하였다(Frisk, 2012; Han et al., 2021). 향후 인구수, 연안 도시화, 해양 교통, 기름 수출 등이 증가하는 가운데 수중 음향환경(soundscape)의 변화는 지속될 전망이다(Di Franco et al., 2020).

특히 최근 지구온난화, 자원 고갈 등의 문제가 심화되어 이에 대한 방안으로 태양열, 지열, 조류, 풍력, 바이오 등의 신재생에너지 개발이 증대되고 있다. 이 중 해상풍력은 부지 확보가 용이하고 에너지 발전원인 바람의 풍속 및 풍향이 육지에 비해 균일하다는 장점으로 주목받으며, 2010년부터 2019년까지 전 세계 해상풍력발전 누적 설치 용량이 연평균 28.1% 증가하였다(IRENA, 2020). 2022년 한국에서 개최된 해상풍력 국제포럼에서는 2050년 글로벌 해상풍력 설비용량이 1,000 GW에 이르리라 전망하였다.

그러나 해상풍력발전기 건설 및 운영 시에는 수중소음(파일항타소음, 터빈운영소음 등), 부유사, 전자기장이 발생하는데 이 중 수중소음은 대부분의 해양생물이 발생 및 감지하는 10–20000 Hz의 음역 내 포함되기 때문에 해양생물의 소통에 혼선을 주어 먹이, 방향 인지, 영역 방어, 생식 활동에 해로운 영향을 미칠 수 있다(Au et al., 2008; Duarte et al., 2021). 한 예로 아귀과 (Lophiidae)의 수컷은 울음소리(Hums)를 통해 둥지를

지키고 암컷을 유인한다고 알려져 있으나 파일항타소음에 노출되었을 때 수정률이 감소하였다(Robert et al., 2002; Erbe et al., 2016). 이러한 결과, 현재 수중소음은 국제적으로 심각한 해양 오염(Marine noise pollution) 중 하나로 규정되었고, 여러 정부 및 연구 기관들은 임계치 설정을 통한 제한 기준 마련을 위해 힘쓰고 있다(Di Franco et al., 2020).

1998년 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)는 해양 포유류에 관한 국제 전문가 패널을 모집하여 처음으로 수중소음에 대한 생물 영향 연구를 시작했다. 그러나 대부분의 연구는 해양 포유류 및 바닷새를 대상 생물로 하며 어류는 상대적으로 주목받지 못하는 실정이다(Jerem and Mathews, 2020). 어류는 해양생태계 먹이망에서 1차 소비자에서부터 최상위 포식자까지 다양한 영양 단계에 분포하며 특정 환경에서는 핵심종(keystone species)이다. 또한, 탄소 및 질소 순환에 기여하는 등 생태적으로 중요한 역할을 하므로 수중소음이 어류에 미치는 영향에 관해 연구될 필요가 있다(Hammerschlag et al., 2019; Pinnegar, 2018).

어류는 부레 유무, 내이 발달 정도에 따라 청각 민감도와 가청 주파수 범위가 달라진다. 현재까지 수중소음에 대한 어류 반응 연구는 주로 부레가 있고 청각이 민감하다고 알려진 부유성 어류를 위주로 이루어졌으며 상대적으로 덜 민감한 저서성 어류에 대한 연구는 극히 드물다. 그러므로 수중소음 영향 범위 내에 서식하며 다양한 청각 민감도를 가진 어류종을 대상으로 생물 영향 평가를 진행할 필요가 있다.

어류의 스트레스 반응은 크게 3가지로 구분된다. 1차 반응은 카테콜아민(catecholamine)과 같은 신경전달 물질 분비; 2차 반응은 삼투압 변화 및 면역 기능 변화; 3차 반응은 행동 변화 등 개체 전반의 변화이다(Barton, 2002). 현재까지 대부분 어류에 대한 수중소음 영향

연구는 3차 반응인 행동 변화 및 물리적 손상에 초점이 맞춰져 있어 1, 2차 반응인 생리 반응에 관한 연구가 부족하고 스트레스를 평가하는 종합적인 연구 또한 미비한 실정이다(Duarte et al., 2021). 행동 연구가 가시적인 변화만을 측정할 수 있는 데 반해 생리 연구는 1) 소음에 덜 민감한 어류가 나타내는 낮은 단계의 스트레스 반응을 확인할 수 있고 2) 소량의 샘플로 분석이 가능하므로 상대적으로 크기가 작고 스트레스에 민감한 치어를 평가할 수 있다는 장점이 있다.

이에 따라 본 연구는 수중소음에 의한 어류의 스트레스 반응을 산소소비율 및 삼투압, 호르몬으로 평가하였다. 스트레스에 노출된 어류는 항상성 유지에 필요한 생화학적 메커니즘과 다양한 생리적 기능을 수행하기 위해 산소를 필요로 한다(Kim et al., 1995). 산소소비율의 변화는 어류의 2차 스트레스 반응으로 잘 알려져 있다. 혈중 삼투압 변화는 호르몬, 글루코스, 활성 산소 등의 생리학적 변화와 함께 어류의 대표적인 스트레스 지표로 이용된다(Lim and Hur, 2018). 현재까지 스트레스에 의한 어류 삼투압 농도 변화는 광염성 어류를 대상으로 한 염분 변화 스트레스 연구에서 주로 확인되었으며 수중소음에 따른 어류 혈중 삼투압 변화는 밝혀진 바 없다. 카테콜아민(catecholamine)은 에피네프린(epinephrine), 도파민(dopamine), 노르에피네프린(norepinephrine) 등을 포함하는 호르몬으로 다양한 환경적 스트레스 상황에서 크롬친화세포(chromaffin cell)로부터 방출되어 순환하며 주로 혈액 내 산소의 적절한 수준을 유지하고 조직에 충분히 공급되도록 심혈관, 호흡 기능을 조절하는 역할을 한다(Reid et al., 1998). 카테콜아민은 아가미 세포의 막투과성을 높임으로써 산소 투과율을 증가시켜 더 많은 산소가 흡수되도록 하며 아가미의 염분 방출을 억제하는 역할을 한다(Isaia et al., 1978; Hoar et al., 1984).

본 연구의 목적은 해상풍력단지 건설 및 운영에 따른 수중소음 노출 시, 1) 소음원별(파일항타소음, 터빈운영소음) 어류 치어의 생리 반응 및 2) 어종별(부유성, 저서성) 생리 영향을 비교하는 것이다. 연구 결과는 향후 해양환경 이용으로 인한 생물 영향 평가 또는 관리 기준 도출 시 유용한 과학적 근거 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

# 제 2 장 재료 및 방법

해상풍력단지 건설 또는 운영 시 발생하는 파일항타소음과 터빈운영소음이 해산 어류의 산소소비율, 혈중 삼투압 농도, 혈중 호르몬(카테콜아민) 농도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 소음 노출 시스템의 환경조건 유지능 검증을 위해 예비 실험을 진행하였다. 실험 생물은 서해 연안에 위치한 양식장에서 수급한 어류 2종을 이용하였다.

## 제 1 절 실험 수조

### 1. 구조 및 기능

본 연구에서는 밀폐 순환식 수조를 이용하여 실시간으로 어류의 산소소비율을 모니터링하였다. 밀폐 순환식 수조는 세 층으로 구성되어 있으며 각 층은 각기 다른 기능을 한다. 상층부 수조는 폭기장치가 설치되어 지속적으로 산소를 공급하며 산소 전극 센서를 통해 호흡 전 용존 산소 농도를 측정한다. 중층부의 대형 중탕 수조로 시스템 전체의 수온을 유지하였으며 수조 내 실험 생물을 투입한 후 수중스피커를 설치하여 소음 노출하였다. 생물이 용존 산소를 소비하고 남은 해수가 하층부로 내려가면 산소 전극 센서에 의해 용존 산소가 측정된다(Fig. 1).

산소소비율 측정 및 소음 노출 시스템의 상세한 기능과 구조는 다음과 같다. 각 층에 배치된 6개의 원형 수조는 10 mm 두께의 강화 플라스틱으로 되어있으며 지름 270 mm 높이 250 mm이다. 원형 수조의 부피는 14 L이고 벽면과 뚜껑은 산소 전극 센서, 공기 배출관, 수류관, 모터 전선 등이 통할 수 있도록 설계하였다. 상층부의 원형 수조 6개는

모두 공기 공급장치(YP-10A; 영남브로와, 대한민국)와 연결하였다. 중층부에는 플라스틱으로 제작된 지름 1200 mm 높이 300 mm의 중탕를 설치하였다. 중탕 수조 내에 담수를 채우고 원형 수조 6개와 수중스피커 1개를 배치하였다. 냉각기(DBA-075; 대일냉각기, 대한민국)를 중탕수조내 모터와 연결함으로써 일정한 온도의 물이 순환하도록 하여 실험 수온을 유지하였다. 중층부의 6개 원형 수조 내에는 지름에 맞는 아크릴망을 설치하여 수조 바닥의 수류모터에 의한 생물 폐사 또는 스트레스를 최소화하였다. 하층부 수조의 모터는 상층부로 올라가는 수류관과 연결되어 해수가 순환할 수 있도록 하였다.

본 시스템에 설치된 산소 전극 센서는 스테인리스강 재질이며 측정 가능 범위는 0–20 mg $L^{-1}$, 분해능은 0.01 mg $L^{-1}$, 오차범위는 0.1 mg $L^{-1}$ 이다. 센서는 상층부와 하층부 수조 뚜껑 가운데에 설치하였으며 실험실 벽면에 배치된 모듈에 연결하였다. 산소 전극 센서에서 1분마다 측정된 용존 산소 데이터는 자동으로 모듈에 저장되며 연결된 컴퓨터에서 실시간으로 모니터링할 수 있다. 실험이 끝난 후 소프트웨어에 저장된 측정값을 엑셀로 변환하여 분석에 사용하였다.

중층부 6개 원형 수조 가운데 설치된 수중스피커(LL916C; Lubell Labs, 미국)를 앰프(PMP550M; Behringer, 독일), 트랜스포머(AC203E; Lubell Labs, 미국), 노트북(15UD50N; LG, 대한민국)과 연결하여 음원 파일을 재생하였다.

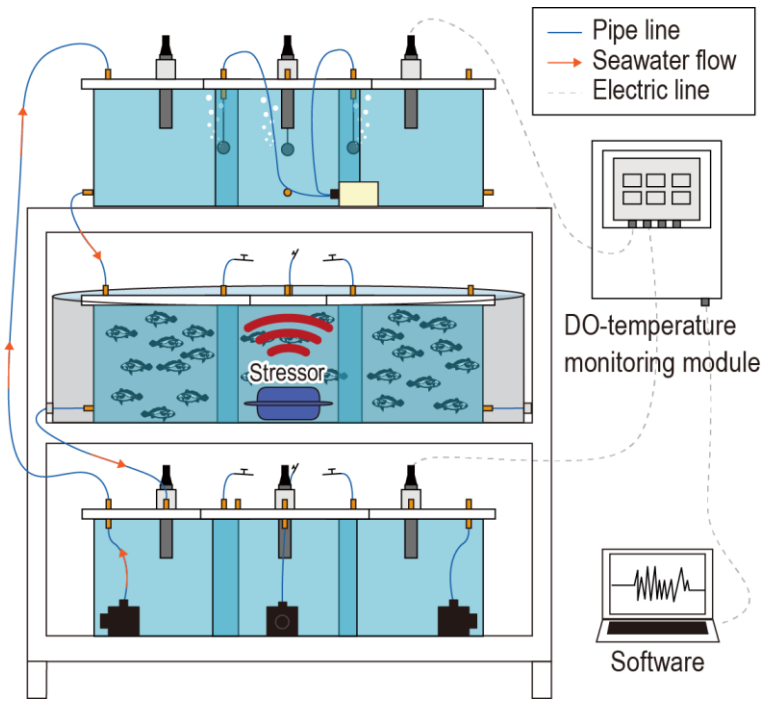


**Figure 1.**
Schematic diagram of the noise exposure system. The overall system consists of three layers of closed chambers and each layer has a different function; (a) upper: measure dissolved oxygen (DO) before fish respiration and water temperature; (b) middle: fish chamber and noise exposure speaker; and (c) lower: measure DO after fish respiration and water temperature. The measured DO and temperature data are transferred minutely from the optic sensor to the monitoring module.

## 2. QA/QC

수중소음 노출에 따른 해산 어류의 생리 영향 실험에 앞서 예비 실험을 진행하였다. 예비 실험에서는 시스템 내 용존 산소 농도 및 수온 유지능과 생물 안정화 여부를 확인하였다. 시스템의 용존 산소 농도 및 수온 유지능을 확인하기 위해 상, 중, 하층부 수조에 해수를 넣고 순환시켰다. 중층부 중탕 수조에 담수를 채우고 냉각기에 호스를 연결하여 순환시켰다. 상, 하층부 총 12개 수조에서 측정된 평균 용존 산소 농도는 7.66 ± 0.31 mg $L^{-1}$, 수온은 20.03 ± 0.61 ℃로 일정하게 유지되는 것을 확인하였다.

다음은 원형 수조 내 생물 안정화 여부를 확인하였다(Fig. 2). 첫 번째 실험에서는 원형 수조에 해수를 채우고 10, 15, 20개체의 어류를 투입하였다. 그 후 수조 내 해수 순환 모터와 냉각기를 끄고 수조 전체 해수 순환 모터를 작동시켰다. 이때 산소소비율이 불안정하였으며 과도하게 소비되었다. 또한 수조당 약 30%의 폐사율을 나타냈다. 두 번째 실험에서는 수조 내 해수 순환 모터, 수조 전체 해수 순환 모터, 냉각기의 전원을 모두 켰다. 첫 번째와 달리 폐사 개체는 없었지만, 여전히 산소소비율이 불안정하고 전반적으로 매우 높았다. 마지막으로 모터 및 냉각기를 모두 켜 놓은 상태에서 해수 순환 호스에 설치한 유량조절기를 풀어 유량을 높였다. 20개체로 실험을 진행하였을 때 폐사, 불안정한 산소소비 등이 발생하지 않았으며 이를 통해 한 수조당 20개체까지 안정화되는 것을 확인하였다.

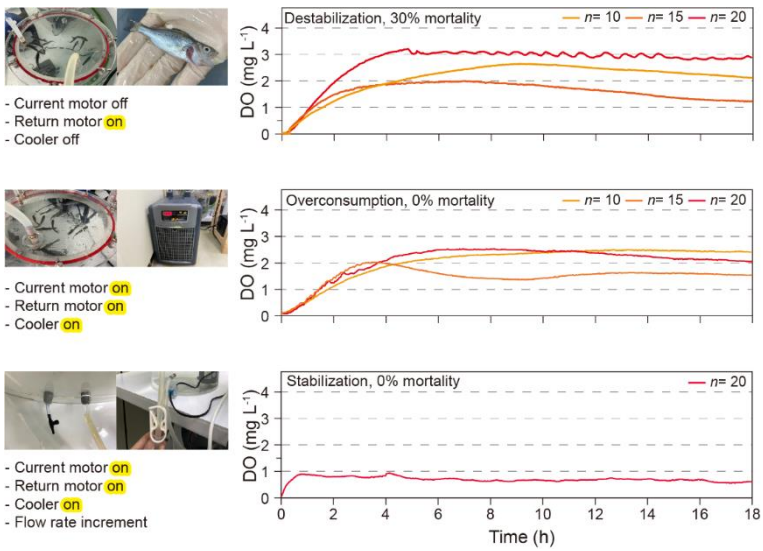


**Figure 2.**
Quality assurance and control of the experimental systems. A three-step process was carried out. (a) Turn on the return motors; (b) Turn on the current motors, return motors, and cooler; (c) Turn on the current motors, the return motors, and the cooler, and increased the flow rate. As a result, 0% mortality and stabilization of the DO concentration.

## 제 2 절 실험 소음

본 연구에서는 해상풍력단지 건설 및 운영 현장에서 녹음한 소음을 Audacity 프로그램을 통해 1시간 길이로 편집하여 사용하였다. 실험에 사용된 소음의 특성은 하이드로폰(TC4013, Reson; 민감도: -210.5 dB re 1V/μPa), 프리앰프(EC6081), 데이터수집 장치(RTS-DAQ), 노트북을 결합하여 측정하였다. 실험구는 총 3가지로 대조구(배경소음, 평균 127.4 dB re 1 μPa), 처리구 1(파일항타소음, 평균 154.1 dB re 1 μPa, 1시간씩 2번 재생), 처리구 2(터빈운영소음, 평균 141.7 dB re 1 μPa, 24시간 1번 재생)이다(Fig. 3).

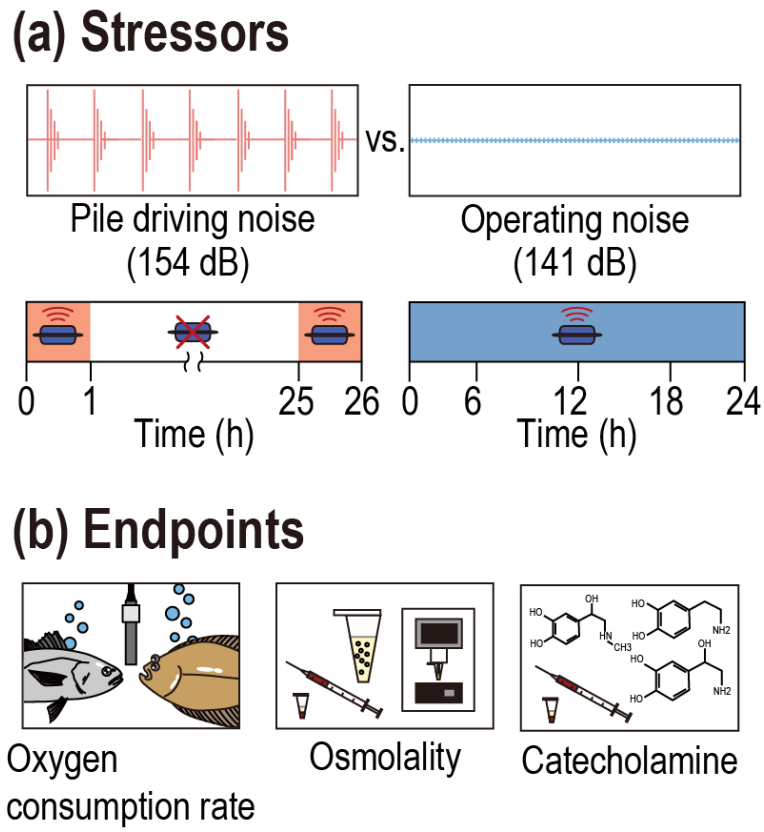


**Figure 3.**
Schematic overview of materials and methods. (a) 2 types of noise as stressors were exposed for 1 or 24 hours. (b) Oxygen consumption rate, osmolality, and catecholamine were measured.

## 제 3 절 실험 생물

국내 해상풍력단지 건설의 주요 설치 지역인 서남해 연안에 서식하는 부세와 넙치를 이용하였다. 종별로 충남 보령, 전남 여수에 위치한 양식장에서 생산된 치어를 수급하였다. 수급 당일로부터 최소 2주간 실험 환경과 동일한 조건으로 순치하고 실험에 사용하였다. 수온은 20.0 ± 1.0 ℃, 광주기 12:12시간(주:야), 염도 35, 용존 산소 농도의 농도는 7.5 mg $L^{-1}$ 이상을 유지하였다.

부세(영명: Yellow croaker, 학명: *Larimichthys crocea*)는 농어목 민어과에 속하는 어류이다. 한국, 일본, 동중국해 등에 서식하며 한국에서는 특히 서남해에서 주로 발견된다. 몸은 측편형으로 몸과 머리가 둥근 비늘로 덮여 있다. 어릴 때는 요각류를 섭식하고 성어가 되면 갑각류(새우, 게, 갯가재 등)와 어류 등을 섭식한다. 많은 계군으로 나누어져 있으며 한국에 회유해 오는 무리는 겨울철에 제주도 남부 해역에서 월동 후 3월 말경 차츰 북상하기 시작하여 5–6월에 경기도 연안까지 올라온다. 10월 이후 수온 하강과 함께 남하하여 12월 이후에 제주도 서남방해역에서 월동하는 것으로 추정된다. 가을 2번에 걸쳐 이루어지며 산란장은 중국 연안이며, 산란 적수온은 18–24 ℃이다. 산란기가 되면 군집으로부터 소리가 발생하는 데 이는 상호 인식을 위한 것으로 추정된다. 성장은 1년생 17 cm, 6년생 46 cm이고 최대 체장 75 cm까지 성장한다(국립수산과학원 수산생명자원 정보센터).

넙치(영명: Olive flounder, 학명: *Paralichthys olivaceus*)는 가자미목 넙치과에 속하는 어류로 한국 전 연안에 분포한다. 저서성 어류로 체형이 납작하며 두 눈이 머리 한쪽 편에 모여 있다. 넙치는 광염성 어류로 서식온도는 10–27 ℃ 범위이고 최적 수온은 21–24 ℃로 수온 10 ℃이하 또는 27 ℃이상에서는 섭식이 감소한다. 서해안에서는 겨울철

흑산도 해역에서 월동하다가 봄이 되면 북쪽 해역으로 이동하여 서해 연안에 분포 서식하다가 가을에 다시 남하하는 남북 회유를 한다. 자연에서 넙치는 어릴 때 요각류, 젓새우류 등 소형 갑각류를 먹으며, 성장하게 되면 주로 작은 어류를 잡아먹는 육식성으로 변하고 그 외 새우류, 갯가재류 등 대형 갑각류와 오징어, 패류 등을 먹는다. 넙치의 성 성숙은 난 부화 후 2–3년 경과 후 이루어지며, 암컷은 체장 30 cm에서 성숙하는 것도 있지만 대부분 체장 45 cm 전후에서 성숙하며 수컷의 성 성숙 체장은 암컷보다 약 5 cm 정도 작다(국립수산과학원, 2007). 넙치는 저서성 어류로 이동성이 적은 정착성 어류에 해당하며 유영이 적고 대부분 서식 해역에서 산란하는 종으로 해상풍력단지 조성을 위한 공사 시 또는 운영 시의 소음과 진동으로부터 회피하지 못하고 직간접적으로 공사의 영향을 받을 것으로 판단된다(Choi et al., 2014).

실험 생물 종별로 분리 사육하였으며 개체 질병 여부를 확인하기 위해 수시로 상태를 확인하였고 폐사 개체는 발견 즉시 처리하였다. 부유성 사료를 먹이 반응이 없을 때까지 급여하였으며 남은 사료는 수질 유지를 위해 수거하였다. 모니터링 시 질병 또는 개체 간 크기 차이로 건강 상태가 좋지 않은 개체는 실험에 이용하지 않았다. 또한 한 번 실험에 사용한 생물은 2-phenoxyethanol (P2428; 삼전화학, 대한민국) 희석액에 안락사하여 순치 수조에 섞이지 않도록 하였다. 각 실험구별로 총 30 개체를 이용하였다.

## 제 4 절 실험 기간

수중소음 노출 실험은 다음과 같은 순서로 실시하였다. 원형 수조에 해수를 투입하고 뚜껑을 닫아 밀폐하였다. 이때 원형 수조 내에 공기가 남아있지 않도록 공기 조절 호스를 열어 모두 제거하였다. 모터 전원을 켜 해수를 순환시키고 산소소비율 측정 센서를 보정하였다. 수조 내 해수의 용존 산소 농도 및 수온 안정화를 위해 약 12시간 동안 생물을 투입하지 않은 상태로 해수를 순환시키며 모니터링하였다. 안정화 후 중층 원형 수조의 뚜껑을 열고 실험 생물을 투입하였다. 투입 후 5시간 동안 어류 안정화를 진행하였다. 그 후 각 실험구별로 소음을 재생하였다. 대조구는 안정화 후 소음을 재생하지 않고 25시간 동안 모니터링 하였다. 파일항타소음 실험구의 경우 어류 안정화가 끝난 후 파일항타소음을 평균 약 154 dB re 1 μPa 수준으로 1시간 동안 재생하였다. 이는 실제 공사 현장의 파일항타 작업 기간을 반영하였다. 소음 종료 24시간 후 같은 소음을 한 번 더 재생하였다. 터빈운영소음 실험구에서는 어류 안정화가 끝난 후 터빈운영소음을 평균 약 141 dB re 1 μPa 수준으로 24시간 재생하였다. 해상풍력발전 설비 용량은 해당 발전기가 24시간 운영되었을 때를 기준으로 설정되므로 추후 설비 용량별 생물 영향 평가에 용이하도록 기간을 설정하였다.

## 제 5 절 산소소비율 분석

산소소비율은 수중소음 실험동안 1분 단위로 연속 측정한 수조 내 용존 산소 농도를 기반으로 산출하였다. 산소소비율은 다음과 같은 공식으로 계산하였다(Jobling, 1982).

$$(\mu g\ O_2\ g^{-1}\ h^{-1}) = [(C_i - C_f) \times F] / W$$

$C_i$: 생물 호흡 전 수조 내 용존 산소 농도

$C_f$: 생물 호흡 후 수조 내 용존 산소 농도

F: 실험수 시간당 유량

W: 실험 생물 총 체중

대조구 및 처리구의 생물 안정화 기간 중 소음 노출 전 1시간 동안의 평균 산소소비율을 각 실험구의 전체 기간의 산소소비율에서 제외하였다. 그 후 일주 리듬(circadian rhythm)에 따른 산소소비량 변화를 고려하여 같은 시간에 측정된 대조구의 산소소비율을 처리구의 산소소비율에서 제외하고 절댓값을 적용하였다. 그러므로 본 연구 결과에서의 산소소비율 변화량은 대조구와 처리구 간 차이의 절댓값을 나타낸다.

## 제 6 절 혈액 분석

### 1. QA/QC

실험 전 어류의 채혈 용량을 확인하기 위해 실험에 사용되는 10 cm 내외의 개체를 채혈하였다. 평균 체장 10.3 cm, 습중량 11.4 g의 어류에서 평균 전혈 약 0.25 mL를 채취하였다. 채취된 전혈을 Microcentrifuge (GYLZ-1730R; Labogene, 덴마크)에 2000 rpm, 15분간 원심분리하였다. 분석에 사용되는 혈장은 개체당 절반 이하인 약 0.1 mL로 샘플당 삼투압과 호르몬을 1회(0.05 mL)씩 분석할 수 있다는 것을 확인하였다.

### 2. 삼투압 및 호르몬 측정

혈액 분석을 위해 어류를 2-phenoxyethanol 용액(300 ppm)에서 10분간 마취하였다. 채혈에 사용할 1 mL 주사기(26 gauge)는 채혈 전 hepain (H3149-10KU; sigma-aldrich, 미국)으로 내부 벽면과 바늘을 코팅하였다. 마취된 어류를 젖은 천 위에 올리고 두부를 덮은 후 미병부에서 채혈하였다. 채취한 전혈을 Microcentrifuge (GYLZ-1730R; Labogene, 덴마크)로 2000 rpm, 15분 조건에서 원심분리하였다. 상층에 분리된 혈장을 멸균 ep-tube에 옮겨 -80 ℃로 설정된 deep freezer에 넣고 급속 냉동하였다.

Deep freezer에 보관된 혈장을 얼음 위에서 시간을 두고 해동하였다. 삼투압 측정 기기(Osmomat 3000; gonotec, 베를린)를 매뉴얼에 따라 스탠다드 용액으로 보정하였다. 피펫을 이용해 해동된 혈장 50 μL를 삼투압 측정용 ep-tube에 분주한 후 측정하였다. 측정값을 이용해 분석을 진행하였다.

카테콜아민 농도는 Fish Catecholamine (CA) ELISA kit (MBS015865; MyBiosource, 미국)와 Microplatereader (Infinite F nano; Tecan, 스위스)를 이용하여 측정하였다. 자세한 방법은 다음과 같다. 96웰 플레이트를 상온(18–25 ℃)에서 개봉한 후 블랭크 웰을 지정한다. 블랭크 웰을 제외한 나머지 웰에 스탠다드 용액을 농도별(500, 250, 125, 62.5, 31.25, 15.6 ng/mL)로 50 μL씩 분주하고 측정할 혈장 샘플 또한 50 μL씩 분주한다. 블랭크 웰을 제외하고 스탠다드 또는 샘플 용액이 분주 된 웰에 키트에 동봉된 HPR-Conjugate reagent를 개봉하여 100 μL씩 분주하였다. 키트에 동봉된 플레이트 커버를 덮은 후 37 ℃에서 60분간 배양하였다. 그 후 동봉된 워싱 용액을 희석하여 모든 웰을 4회씩 워싱하였다. Chromogen Solution A와 B를 블랭크 웰을 포함한 모든 웰에 분주하였다. 37 ℃에서 15분간 암실에서 배양하였다. 모든 웰에 Stop solution을 50 μL씩 분주하였다. Microplatereader에 연결된 컴퓨터에 설치된 프로그램에서 스탠다드 명과 샘플 명을 입력하였다. Stop solution 분주 이후 5분 이내에 흡광도 450 nm으로 플레이트를 측정하였다. 측정된 스탠다드 값으로 스탠다드 커브를 작성한 후 각 샘플의 흡광도를 식에 대입하여 농도를 산출하였다.

## 제 7 절 자료 분석

파일항타소음 및 터빈운영소음 노출에 따른 어류의 산소소비율을 비교하기 위해 맨휘트니 U 분석(Mann-Whitney U test)을 실시하였다. 삼투압 농도, 카테콜아민 농도 결과 비교에서는 일원배치분산분석(One-way analysis of variance)을 사용하였다. 대조구와 처리구 간의 유의성은 사후분석 *p*값으로 확인하였다. 본 실험에서 모니터링 한 산소소비율의 24시간 평균 산소소비율과 삼투압 및 호르몬의 각 처리구별 평균을 통해 피어슨 상관관계(Pearson's Correlation)를 분석하였다. 모든 통계분석은 SPSS 25.0 (IBM, Armonk, NY)을 사용하였으며 분석 전 정규성검정을 수행하였다.

# 제 3 장 결과 및 고찰

## 제 1 절 산소소비율 영향

### 1. 소음원별 영향 비교

파일항타소음에 1시간씩 24시간 간격을 두고 2회 노출한 부세의 산소소비율을 12시간 기준으로 주간(daytime), 야간(nighttime)을 구분하여 확인하였다. 야간의 평균 산소소비율 변화량은 23.4 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 측정되었다. 최댓값은 66.1 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 1차 소음노출 약 5시간 후에 확인되었다. 주간의 평균 산소소비율 변화량은 86.2 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$였으며 야간 평균에 비해 약 3.5배가량 증가하는 것으로 확인되었다. 최댓값은 189.6 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 1차 소음 노출 종료 후 약 22시간 후에 측정되었다(Fig. 4).

터빈운영소음에 24시간 동안 노출된 부세의 산소소비율은 전반적으로 큰 변동이 없었다. 야간의 평균 산소소비율 변화량은 7.8 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$였으며 최댓값은 27.9 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 터빈운영소음 노출 약 10시간 후에 측정되었다. 주간의 평균은 17.2 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$이며 약 2배가량 증가하였다. 최댓값은 46.9 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$이며 소음 노출 약 23시간 후에 확인되었다. 두가지 처리구의 총평균 산소소비율을 비교한 결과 파일항타소음은 약 53.5 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$, 터빈운영소음은 약 12.1 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 약 4배가량 차이를 보였다. 부세를 통해 소음원별 산소소비율 영향을 비교하였을 때 파일항타소음에서 유의하게 더 높은 산소소비율 변화량을 나타냈다($p<0.05$).

소음은 크게 충격음과 연속음으로 구분할 수 있는데 파일항타소음은 충격음, 터빈운영소음은 연속음으로 분류된다. 충격음은 특히 부레가

발달한 어류에 부레 파열과 같은 물리적 영향을 미친다고 알려져 있다(Bae et al., 2009). 부세는 부레가 발달된 부유성 어류로 충격음에 확연히 더 큰 영향을 나타낸 것으로 사료된다. 일반적으로 디젤 해머식의 파일항타소음은 항타 위치로부터 90 m에서 생물의 가청범위인 10–1000 Hz 음역의 소음 크기는 약 143 dB re 1 μPa으로 알려져 있다(Yoon et al., 2006). 파일항타 지점으로부터 10 m 이내에서는 500 Hz 미만의 음역에서 220 dB re 1 μPa까지 증가할 수 있다(Reyff, 2012). 본 연구에서 사용한 파일항타소음 크기는 154 dB re 1 μPa로 파일 공사 현장으로부터 약 10–90 m 이내 거리에서 확인되는 소음으로 부세가 이 범위 내에서 산소소비율에 영향을 받는 것을 확인하였다. 두 소음 처리구에서 모두 주간에 산소소비율이 더 증가하는 것은 소음 누적 스트레스 영향 또는 온도 상승 등의 영향이 있을 것으로 추측된다.

파일항타소음에 넙치를 노출하였을 때 야간의 평균 산소소비율 변화량은 12.2 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 측정되었고 최댓값은 30.4 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 소음 종료 약 10시간 후에 확인되었다. 주간에는 27.1 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$의 산소소비율 변화량을 보였으며 이는 야간에 측정된 평균보다 2배 이상 높다. 주간 최댓값은 64.9 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 2차 소음 노출 종료 시점에 측정되었다. 전반적으로 증가하는 추세를 보였다(Fig. 5).

터빈운영소음을 넙치에 노출한 처리구에서는 파일항타소음과 비교하였을 때 상대적으로 변화폭이 작았다. 야간에는 평균 9.4 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$의 산소소비율 변화량이 측정되었다. 최댓값은 24.6 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$으로 소음 노출 약 4시간 후 확인되었다. 주간의 평균 산소소비율은 13.5 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 두 구간의 평균에 큰 차이가 없었다. 최댓값은 27.7 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$으로 약 소음 재생 시작 후 21시간 후에 나타났고 밤 최대 산소소비율 변화량과 근사하였다. 넙치를 터빈운영소음에 노출하였을 때 전반적으로

대조구와 큰 차이를 나타내지 않았다.

넙치를 이용하여 두 가지 소음의 산소소비율 영향을 비교한 결과 부세와 마찬가지로 파일항타소음에서 유의하게 더 큰 변화를 나타냈다($p<0.05$). 파일항타소음의 전체 평균 산소소비율 변화량은 20.4 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$이며 터빈운영소음의 경우 11.6 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$으로 약 2배의 차이가 난다고 할 수 있다.

넙치는 소음에 둔감하다고 알려져 있으므로 충격음과 연속음에서 비슷한 결과를 나타낼 것으로 예상하였다. 그러나 연구 결과 부세와 마찬가지로 파일항타소음에서 유의하게 더 큰 영향을 나타냈다. 충격음인 파일항타소음을 1시간 노출하였을 때 두 종에서 모두 산소소비율이 안정화되지 않고 지속적으로 불안정한 산소소비율을 보였다. 반면 24시간 노출한 터빈운영소음에서 상대적으로 안정적인 산소소비율을 확인하였다. 결과적으로 노출 시간과 관계없이 두 가지 소음 중 파일항타소음이 어류에 더 큰 산소소비율 변화를 일으키는 것으로 확인되었다.

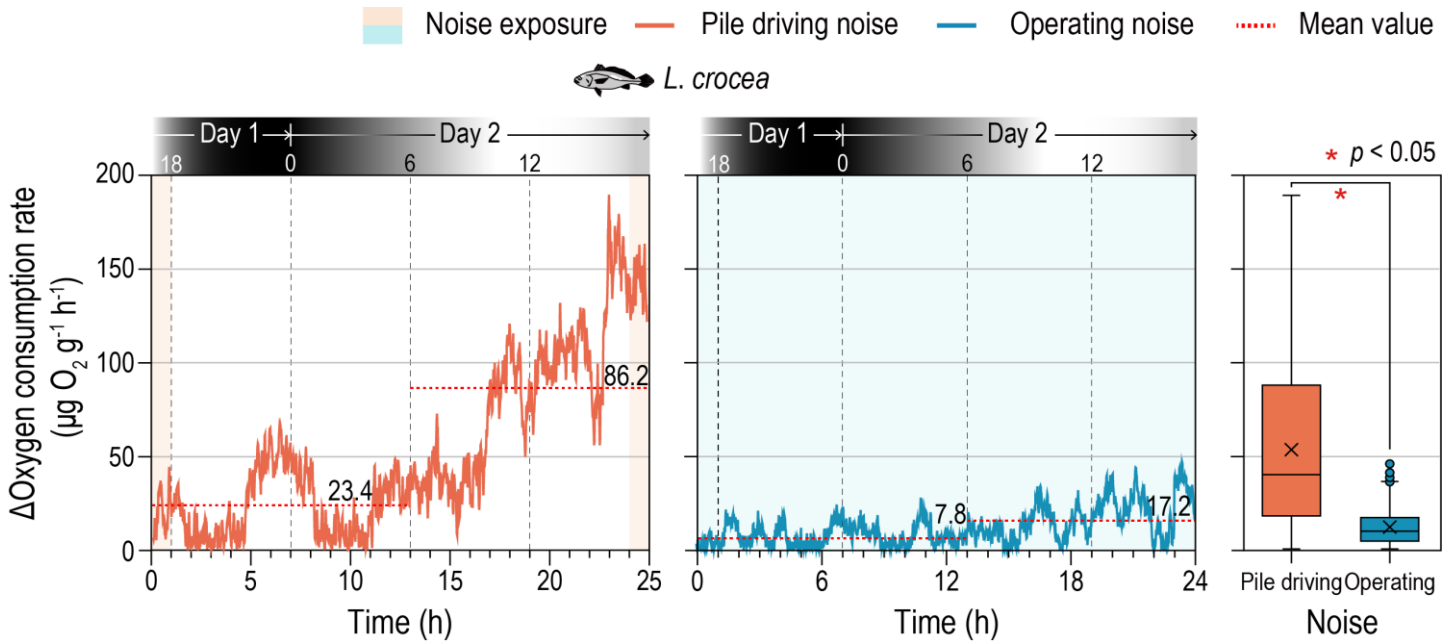


**Figure 4.**
Oxygen consumption rate (μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$) of the yellow croaker *L. crocea* under pile driving noise and turbine operation noise. A total of 2 hours of pile driving noise was carried out at 1 hour per day. Turbine operation noise was exposed for 24 hours continuously.

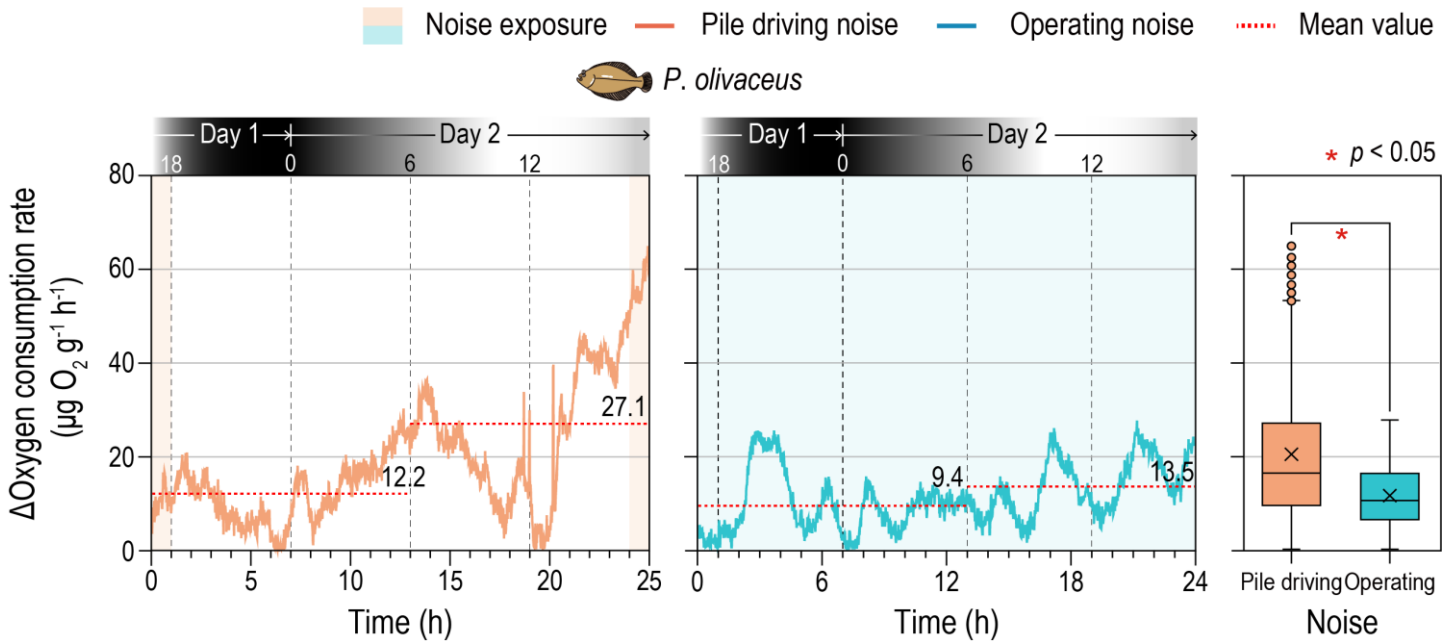


**Figure 5.**
Oxygen consumption rate (μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$) of the olive flounder *P. olivaceus* under pile driving noise and turbine operation noise is a total of 2 hours of noise exposure carried out at 1 hour for 1 day. Turbine operation noise exposure for 24 hours continuously.

## 2. 어종별 영향 비교

부세를 파일항타소음에 1시간씩 2회 노출하였을 때의 산소소비율 변화량을 소음 노출 전, 중, 후로 구분하여 각각의 평균값을 비교하였다(Fig. 6). 1차 소음 노출 전 부세의 산소소비율 변화량은 5.6 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$, 노출 중에는 20.7 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 약 4배가량 증가하였다. 후반에는 약간 감소하는 경향을 나타냈지만, 평균은 17.3 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 높게 유지되었다. 총 3시간 동안의 최댓값은 44.4 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 소음 재생 약 50분 후에 측정되었다. 전반적으로 소음 노출 후 증가하고 종료 후 감소하는 추세를 보였다. 2차 노출 시에는 소음 재생 전부터 평균 29.5 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 산소소비율이 안정화되지 않은 것을 확인하였다. 노출 중에는 증가하여 평균 45.7 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$이었으며 노출이 끝난 후에는 또한 비슷한 폭으로 증가하여 63.7 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$이었다. 최댓값은 86.4 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 소음 종료 40분 후 측정되었다. 2차 노출 때에는 1차 노출과는 다르게 평균값이 계단식으로 점차 증가하는 추세를 보였다.

넙치를 파일항타소음에 1차 노출하였을 때 전반적으로 큰 변화량을 보이지 않았지만, 계단식으로 증가하는 추세를 보였다. 소음 노출 전 평균 산소소비율 변화량은 3.6 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$이며 노출 중 10.6 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$, 노출 후 15.4 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$으로 점차 증가하였지만, 대조구와 큰 차이가 없었다. 최댓값은 21.0 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$으로 소음 종료 후 약 40분에 측정되었다. 24시간 후 2차 노출 시 소음 노출 전에는 16.2 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 1차 소음 노출 후 평균값과 비슷한 수준으로 측정되었다. 소음 노출 중에는 29.6 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$으로 약 2배가량 증가하였으며 소음 종료와 동시에 감소하였다. 소음 노출 후 감소하는 경향을 보였지만 평균 19.8 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 소음 노출 전보다 높게 유지되었다. 최댓값은 35.9 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 소음 종료 3분전 측정되었다.

부세에 터빈운영소음을 24시간 노출하였을 때 노출 전 1시간 동안의 평균값은 2.9 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$, 노출 시작 지점으로부터 한 시간 동안은 3.9 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 거의 변화가 없었다. 소음 재생 2시간째에는 11.3 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$으로 3배가량 증가하였다. 초반 3시간 동안의 최댓값은 21.5 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 소음 노출 약 1시간 30분 후에 측정되었다. 소음 노출 23시간 구간에는 평균 7.5 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$, 24시간 구간에는 7.0 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$으로 유사하였다. 소음 노출이 끝난 후에는 오히려 증가하여 평균 11.1 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$으로 측정되었다. 최댓값 또한 소음 노출 종료 1시간 후에 26.1 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 확인되었다. 전반적으로 파일항타소음 노출 처리구의 측정값에 비해 매우 낮은 수치를 보였다.

넙치를 터빈운영소음에 노출하였을 때 산소소비율은 노출 전 한 시간, 소음 재생 2시간 구간까지 시간대별 평균은 1.7, 2.3, 4.0 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 점차 증가하였지만, 대조구와 거의 차이가 없었다. 최댓값은 7.3 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$으로 소음 노출 2시간 후에 측정되었다. 반면 소음 노출 22–24시간부터 소음 종료 1시간 후까지는 각 평균 17.0, 17.3, 18.3 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$으로 넙치 터빈운영소음 실험 결과 내에서는 상대적으로 높은 산소소비율 변화량을 유지하였다. 이 구간 내의 최댓값은 24.2 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$로 소음 종료 직전에 측정되었다.

같은 소음 내 어종별 산소소비율 영향을 비교하였을 때 1, 2차 파일항타소음에서 모두 부세의 산소소비율 변화량이 더 높았다. 1차에서의 3시간 평균 변화량은 부세에서 14.5 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$, 넙치에서 9.8 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$으로 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p<0.05$). 2차에서도 마찬가지로 부세 및 넙치가 각각 46.1, 21.8 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$으로 부세에서 유의하게 더 높았다. 결과적으로 파일항타소음은 부세에서 더 큰 생리적 영향을 받은 것으로 확인되었다. 터빈운영소음의 경우 첫째 날 평균

부세 6.0 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$, 넙치 2.6 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$으로 부세에서 유의하게 더 높았다. 그러나 둘째 날의 경우 부세 8.5 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$, 넙치 17.5 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$ 넙치에서 유의하게 더 높았다. 터빈운영소음은 넙치에서 더 큰 산소소비율 변화를 나타냈다. 하지만 앞선 소음별 영향 비교 연구에서의 결과로 터빈운영소음 노출 전체 기간 평균은 부세에서 12.1 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$, 넙치에서 11.6 μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$으로 큰 차이가 없었다.

부세는 다른 Sciaenidae과의 어종과 마찬가지로 이석 내 구조물(lapilli, asterisci, sagittae)이 발달하여 청각이 민감하다. 특히 해수에서 음속은 1480 m $s^{-1}$이지만 부세의 이석 내 고밀도 구조물(sagitta)에서는 4828–6000 m $s^{-1}$의 속도로 전파되므로 소음이 크게 인지된다(Zhang et al., 2021). 부세는 1, 2차 모두 불안정한 산소소비율 변화를 나타냈음으로 소음에 의해 생리적 스트레스를 받았다고 할 수 있다. 어류는 스트레스 반응으로 항상성을 유지하기 위해 코르티솔 등의 스트레스 호르몬을 분비하며 이에 따라 미토콘드리아 호흡 및 산화적 인산화 반응이 증가한다(Kammerer et al., 2010). 이러한 메커니즘에 의해 파일항타소음에 노출된 부세의 산소소비율 변화량이 증가하였을 것으로 사료된다.

넙치와 같은 저서성 어류는 독특한 고유 기관인 부레를 갖지 않고 포유류 귀의 청각 기능과 유사하게 작동하는 측선을 통해 소리를 감지하여 소음에 비교적 민감하지 않은 것으로 알려져 있다(Yoon et al., 2006). 그러므로 소음에 민감한 부세에 비해 전반적으로 낮은 산소소비율 변화량을 나타냈을 것으로 생각된다.

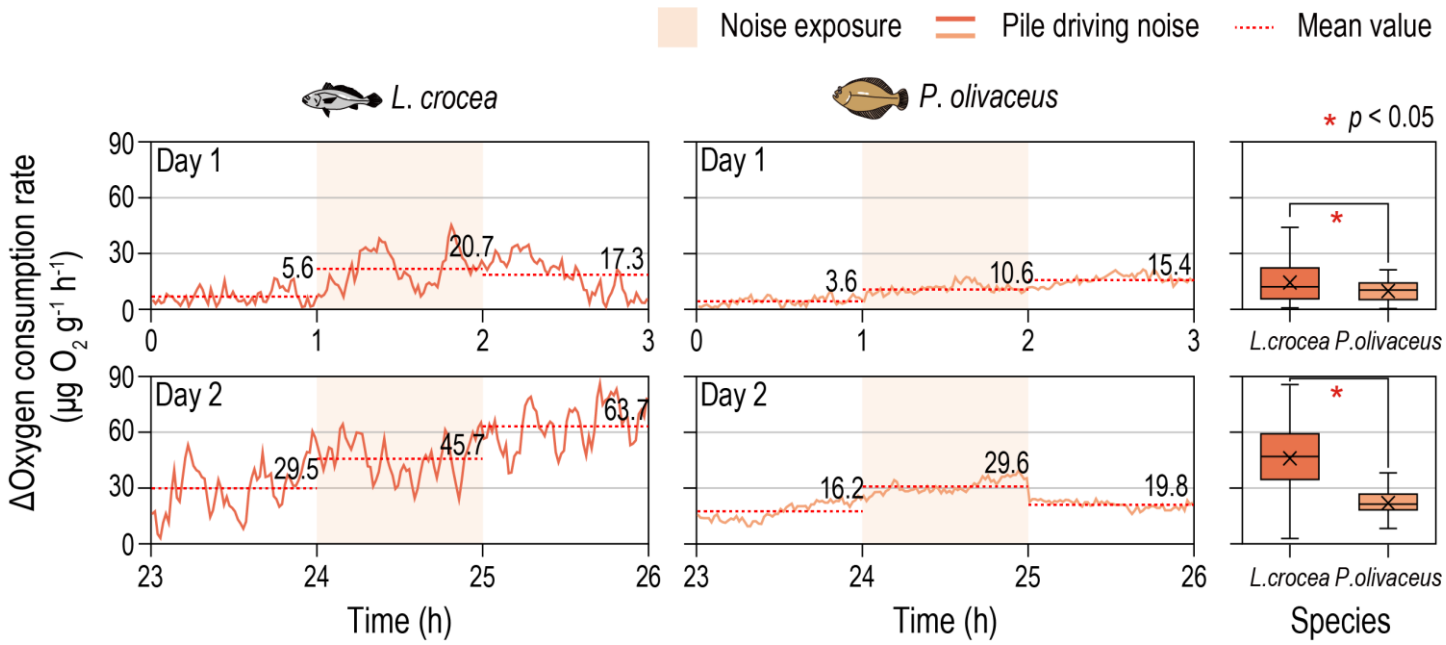


**Figure 6.**

Oxygen consumption rate (μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$) on different species of the yellow croaker *L. crocea* and olive flounder *P. olivaceus* to pile driving noise. 1 hour of noise exposure was carried twice.

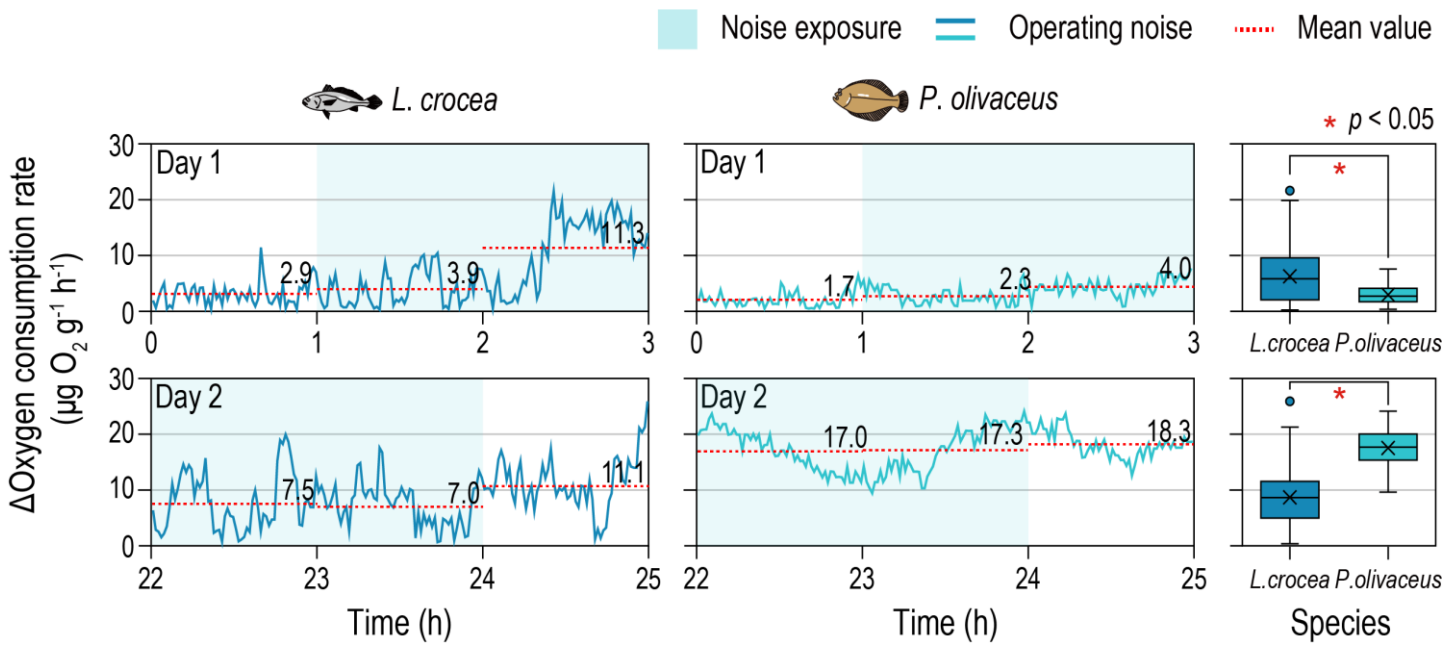


**Figure 7.**
Oxygen consumption rate (μg $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$) of the yellow croaker *L. crocea* and olive flounder *P. olivaceus* under operation noise. 1 hour of noise exposure was carried out twice.

## 제 2 절 삼투압 영향

### 1. 소음원별 영향 비교

파일항타소음 및 터빈운영소음을 부세에 노출하였을 때 대조구 대비 모두 비슷한 수준으로 유의하게 증가하였다($p<0.05$). 대조구에서의 평균 삼투압 값은 216 ± 18 mOsmol $kg^{-1}$이며 파일항타소음에서는 261 ± 34 mOsmol $kg^{-1}$, 터빈운영소음에서는 259 ± 34 mOsmol $kg^{-1}$였다(Fig. 8). 두 가지 소음을 넙치에 노출하였을 때 대조구 대비 파일항타소음에서 삼투압이 유의하게 감소하였다($p<0.05$). 대조구에서 283 ± 20 mOsmol $kg^{-1}$, 파일항타소음에서 258 ± 18 mOsmol $kg^{-1}$, 터빈운영소음에서 288 ± 13 mOsmol $kg^{-1}$으로 나타났다. 결과적으로 두 어종 모두 파일항타소음에서 삼투압이 유의하게 증가하거나 감소하였으며 터빈운영소음에서는 부세의 삼투압이 유의하게 증가하였다. 산소소비율과 마찬가지로 삼투압에서도 터빈운영소음에 비해 파일항타소음에서 비교적 더 큰 변화를 확인할 수 있었다.

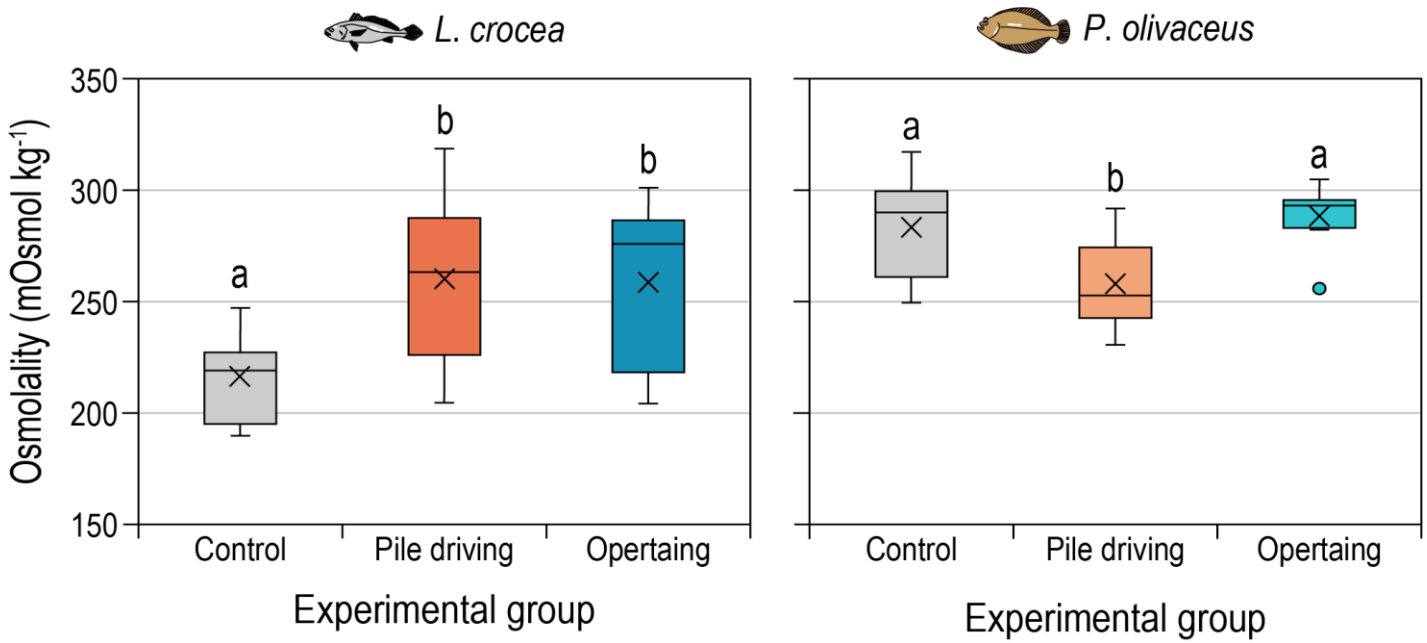


**Figure 8.**
Comparison of measured osmolality (mOsmol $kg^{-1}$) to the yellow croaker *L. crocea* and olive flounder *P. olivaceus* for background noise, pile driving noise, and turbine operation noise exposure.

## 2. 어종별 영향 비교

부유성 어류인 부세 및 저서성 어류인 넙치에 파일항타소음을 노출하였을 때 나타나는 삼투압 영향을 확인하였다. 어종별 대조구 값이 상이하므로 대조구 대비 증가율로 비교하였다. 부세를 파일항타소음에 노출하였을 때 삼투압 평균값은 대조구 대비 1.2배 증가하였으며 통계적으로 유의하였다($p<0.05$). 넙치를 같은 소음에 노출하였을 때 오히려 0.9배 유의하게 감소하는 것을 확인하였다($p<0.05$). 결과적으로 파일항타소음은 부세에 더 높은 비율의 삼투압 변화를 유발하는 것을 확인하였다(Fig. 9).

두 어종에 터빈운영소음을 노출하였을 때 소음 처리구의 부세에서는 대조구 대비 약 1.2배 증가하였으며 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p<0.05$). 넙치의 경우 마찬가지로 약간의 증가율을 보였지만 약 1.0배로 유사하였으며 유의한 차이가 없었다. 같은 소음 내 어종별 삼투압 영향을 확인하였을 때 부세에서 더 큰 증가율을 보였다.

선행 연구에서 부세와 같은 부유성 어류인 농어(*Dicentrarchus labrax*) 치어는 양식 수조 스크러빙(Scrubbing) 스트레스에서 혈장 삼투압이 증가하였다($p<0.05$)(Varsamos et al., 2006). 부유성 어류인 귀족 도미(*Sparus aurata*) 치어를 3분간 공기 노출하였을 때 30분 이내에 삼투압이 증가하였다(Arends et al., 1999). 파일항타소음 및 터빈운영소음에 노출되었을 때 부유성 어류인 부세는 수조 스크러빙 또는 공기노출과 유사한 삼투압 변화 양상을 보였다. 결과적으로 소음 노출이 삼투 불균형의 요인으로 작용한다는 것을 시사한다. 수중에 서식하는 경골어류에 있어 삼투 조절은 생존과 직결된 생리활동이다(Parry, 1961). 지속적으로 이러한 소음에 노출되었을 때 부세 치어에 삼투 조절 장애

등 생존에 치명적인 영향을 미칠 수 있다.

넙치는 광염성 경골어류로 해수에서는 능동적으로 염(NaCl)을 배출하고 담수에서는 주로 아가미 상피를 통해 염(NaCl)을 능동적으로 흡수한다. 본 연구 결과 파일항타소음에 노출되었을 때 해수임에도 불구하고 염 배출이 활발히 일어났을 것으로 추측된다. 선행 연구에서는 넙치 치어를 1–3시간 동안 공기 노출하였을 때 삼투압이 유의하게 증가하였다($p<0.05$)(Lim and Hur, 2018). 또한 넙치 치어는 수온 급하강(20 → 10 ℃) 상태에서 삼투압이 감소하는 경향을 보였으며 수온을 높일 경우(20 → 30 ℃) 삼투압이 증가하는 경향을 보였다(Chang et al., 2001). 파일항타소음에 노출되었을 때 넙치 치어의 사육 수온이 급속히 하강하였을 때와 유사한 반응을 보였다. 결과적으로 파일항타소음 노출에 의한 넙치의 삼투 조절 장애는 광염성 어류인 넙치 치어의 생존에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 결과적으로 산소소비율 영향과 동일하게 두 종 모두 파일항타소음에서 더 큰 삼투압 영향을 나타냈다.

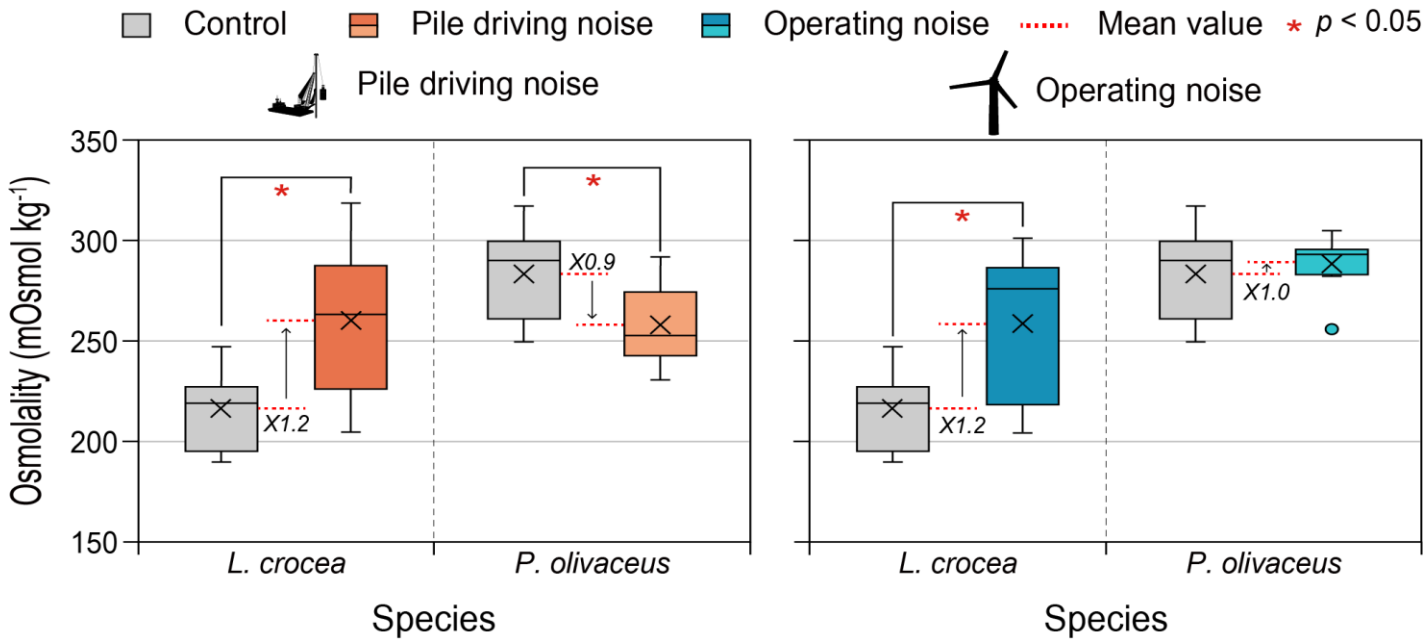


**Figure 9.**
Comparison of measured osmolality (mOsmol $kg^{-1}$) of the yellow croaker *L. crocea* and olive flounder *P. olivaceus* for background noise and both pile driving noise and turbine operation noise exposure.

## 제 3 절 호르몬 영향

### 1. 소음원별 영향 비교

부세에서의 소음원별 카테콜아민 농도를 확인한 결과 대조구의 평균 카테콜아민 농도는 102 ± 29 ng $mL^{-1}$, 파일항타소음은 121 ± 22 ng $mL^{-1}$, 터빈운영소음은 66 ± 9 ng $mL^{-1}$ 로 나타났다. 대조구 대비 두 처리구에서 모두 유의한 변화를 보이지 않았다. 그러나 파일항타소음 및 터빈운영소음 처리구 간에는 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p<0.05$). 넙치의 소음원별 카테콜아민 영향을 비교하였을 때 각각 대조구 103 ± 37 ng $mL^{-1}$, 파일항타소음 처리구 117 ± 30 ng $mL^{-1}$, 터빈운영소음 처리구 118 ± 22 ng $mL^{-1}$로 대조구 대비 유의한 차이가 없었다(Fig. 10).

카테콜아민 호르몬인 에피네프린과 노르에피네프린은 다양한 스트레스 상황에서 크로마핀 세포로부터 순환, 방출된다(Reid et al., 1998). 카테콜아민은 글리코겐 분해를 통해 단기간에 에너지를 공급하는 역할을 한다(Gamperl et al., 1994). 선행 연구에 따르면 사육수의 염분 변화는 혈중 카테콜아민 수준을 증가시킨다(Schreck, 1982). 본 연구에서 부세의 파일항타소음 노출 결과는 염분 스트레스 영향과 유사한 반응을 나타냈다.

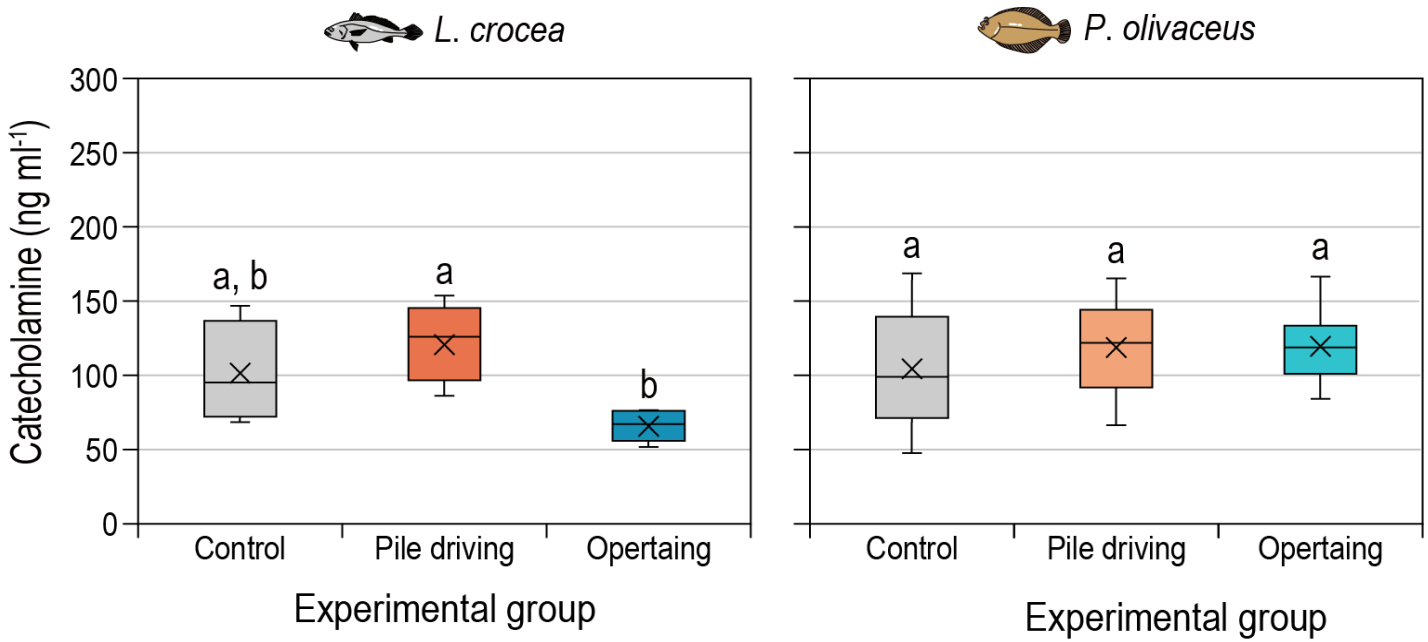


**Figure 10.**
Comparison of measured catecholamine (ng $mL^{-1}$) of the yellow croaker *L. crocea* and olive flounder *P. olivaceus* exposed to background noise and both piledriving noise and turbine operation noise exposure.

## 2. 어종별 영향 비교

파일항타소음을 부세 및 넙치에 노출하였을 때 부세의 혈중 카테콜아민 농도는 1.2배 증가율을 보였으며 넙치의 경우 1.1배의 증가율을 보였다(Fig. 11). 터빈운영소음의 경우 부세에서 0.7배 감소율을 보였고 넙치의 경우 1.2배의 증가율을 나타냈다. 모든 소음원 및 어종에서 대조구 대비 유의한 차이는 없었다. 결과적으로 파일항타소음에서는 부세, 터빈운영소음에서는 넙치가 카테콜아민 농도에 대한 영향을 더 크게 받는 것을 확인하였다. 일반적으로 스트레스를 받은 어류는 내분비계가 자극되며 카테콜아민, 코르티솔 등을 과다 분비한다(Barton, 1991). 본 결과에서의 카테콜아민의 증가는 해당 소음에 대한 어류의 스트레스 반응으로 사료된다.

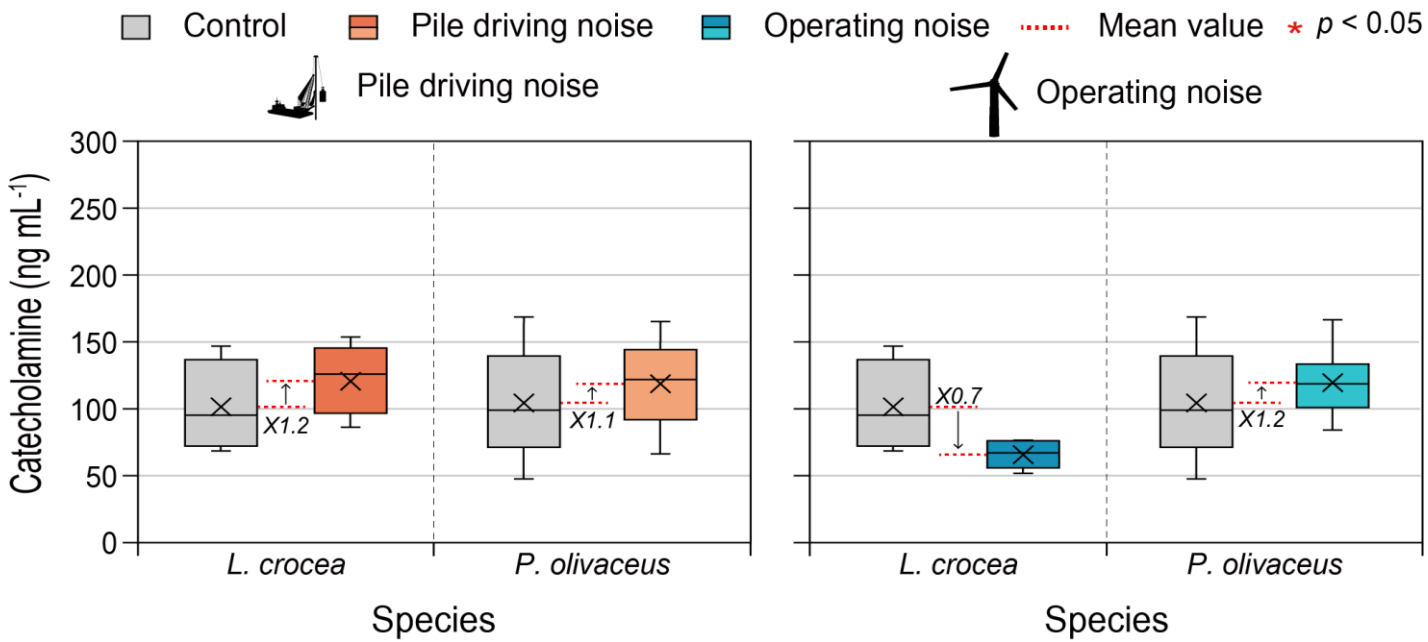


**Figure 11.**
Comparison of measured catecholamine (ng $mL^{-1}$) for background noise and both pile driving noise and turbine operation noise exposure on juvenile yellow croaker *L. crocea* and olive flounder *P. olivaceus*.

## 제 4 절 측정항목 간 상관관계 분석

본 연구에서 측정한 산소소비율, 삼투압 및 카테콜아민 사이의 상관계수를 확인하였다. 부세의 경우 카테콜아민과 산소소비율 간 상관계수가 0.73으로 양의 상관이 매우 높다. 반면 카테콜아민과 삼투압 간의 상관 계수는 -0.13으로 상관이 매우 낮다. 삼투압과 산소소비율 간에는 0.59로 양의 상관이 있다고 할 수 있다(Table 1). 넙치의 경우 카테콜아민과 산소소비율 간의 상관 계수가 0.47로 양의 상관이 있다. 카테콜아민과 삼투압의 경우 -0.36으로 상관이 낮다. 삼투압과 산소소비율 간 상관계수는 0.68로 양의 상관이 매우 높다고 할 수 있다(Table. 2). 본 연구에서는 파일항타소음 및 터빈운영소음 노출에서 카테콜아민과 산소소비율 또는 삼투압과 산소소비율 사이에 양의 상관관계가 나타난다는 것을 확인하였다.

**Table 1.** Pearson's correlation relationships between oxygen consumption rate, osmolality, and catecholamine of the yellow croaker *Larimichthys crocea* exposed to noise.

| | | Oxygen consumption rate | Osmolality | Catecholamine |
|---|---|---|---|---|
| Oxygen consumption rate | Pearson's r | 1 | .588 | .726 |
| | p-value | | .600 | .483 |
| | n | 3 | 3 | 3 |
| Osmolality | Pearson's r | .588 | 1 | -.130 |
| | p-value | .600 | | .917 |
| | n | 3 | 3 | 3 |
| Catecholamine | Pearson's r | .726 | -.130 | 1 |
| | p-value | .483 | .917 | |
| | n | 3 | 3 | 3 |

**Table 2.** Pearson's correlation relationships between oxygen consumption rate, osmolality, and catecholamine of olive flounder *Paralichthys olivaceus* exposed to noise.

| | | Oxygen consumption rate | Osmolality | Catecholamine |
|---|---|---|---|---|
| Oxygen consumption rate | Pearson's r | 1 | .677 | .465 |
| | p-value | | .527 | .692 |
| | n | 3 | 3 | 3 |
| Osmolality | Pearson's r | .677 | 1 | -.336 |
| | p-value | .527 | | .782 |
| | n | 3 | 3 | 3 |
| Catecholamine | Pearson's r | .465 | -.336 | 1 |
| | p-value | .692 | .782 | |
| | n | 3 | 3 | 3 |

# 제 4 장 요약 및 결론

본 연구에서는 소음 노출에 따른 소음원 및 종별 산소소비율, 삼투압, 카테콜아민 영향을 확인하기 위해 파일항타소음 및 터빈운영소음을 부유성 어류인 부세와 저서성 어류인 넙치에 노출하였다. 수중소음에 따른 스트레스 정도를 크게 소음원과 종에 따라 비교하였다.

소음원별 영향 비교에서는 파일항타소음을 부세에 노출하였을 때 터빈운영소음에 비해 산소소비율과 카테콜아민값이 유의하게 높았다($p<0.05$). 또한, 넙치를 파일항타소음에 노출하였을 때 삼투압이 유의하게 증가하였다($p<0.05$). 이를 종합해 볼 때, 세 가지 생리 반응에서 터빈운영소음에 비해 파일항타소음이 부세와 넙치에 더 큰 생리적 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 어종별 영향 비교에서는 파일항타소음을 노출하였을 때 넙치에 비해 부세의 산소소비율 변화량이 유의하게 높았다($p<0.05$). 또한, 터빈운영소음 노출하였을 때도 부세의 삼투압이 유의하게 증가하였다($p<0.05$). 그러나 터빈운영소음 노출에서 카테콜아민의 경우 넙치에서 증가율이 더 높았다.

결론적으로 소음원 중 부세 및 넙치에 더 큰 생리적 영향을 미치는 것은 파일항타소음이다(Fig. 12). 두 종 모두 파일항타소음을 한 시간 노출하였을 때 24시간 동안 회복되지 않고 계속해서 불안정한 산소소비율을 보였다. 이는 소음 수준에 대한 제한 기준뿐 아니라 공사 시간 또는 간격에 대한 규제도 필요하다는 것을 시사한다. 한편, 어종 중 측정 항목별로 유의한 생리 반응을 더 많이 나타내는 종은 부세이다. 부세는 넙치와 달리 청각 기관이 발달해 있어 같은 소음을 비교적 더 크게 인지할 수 있다. 그러나 넙치에서도 파일항타소음에서 유의한

영향이 나타났다. 청각 민감도별로 소음에 대한 반응이 상이한 것을 확인하였으며, 이는 다양한 어종에 대한 수중소음 영향 연구의 필요성을 시사한다.

오늘날 해상풍력단지 건설이 급증하고 있는 가운데 이에 대한 생물 영향 범위 산정은 매우 중요한 문제가 되고 있다. 그러나 현재까지는 주로 선박 소음의 영향에 관하여 소음에 민감한 부유성 어류를 대상으로 하는 행동 변화 연구가 이루어졌다. 본 연구는 해상풍력단지 건설 및 운영 소음의 영향에 대해 부유성 및 저서성 어류를 함께 평가하였다는 것에 의의가 있다. 또한 현재까지 밝혀지지 않은 수중소음에 대한 어류 삼투압 영향을 확인하였다. 본 연구 결과는 추후 해상풍력단지 건설 및 운영 관련 법 제정의 과학적 증거자료로 사용될 것으로 사료된다.

● Significant difference ✕ No significant difference

(a) Comparison by noise sources

| Species | Noise sources | OCR | Osm | CA |
|---|---|---|---|---|
| *L. crocea* | Pile driving | ● | ✕ | ● |
| | Operating | ✕ | ● | ✕ |
| *P. olivaceus* | Pile driving | ✕ | ● | ✕ |
| | Operating | ✕ | ✕ | ✕ |

(b) Comparison by species

| Noise sources | Species | OCR | Osm | CA |
|---|---|---|---|---|
| Pile driving | *L. crocea* | ● | ✕ | ● |
| | *P. olivaceus* | ✕ | ● | ✕ |
| Operating | *L. crocea* | ✕ | ● | ✕ |
| | *P. olivaceus* | ✕ | ✕ | ✕ |

More than 2 of ●

More than 1 of ●

Less than 1 of ●

**Figure 12.**
Summary of the overall results of this study. (a) Comparison of physiological effects by noise source; (b) Comparison of physiological effects by species.

# 참고 문헌


넙치 양식 표준 지침서 (2006) 국립수산과학원

Arends, R.J., Mancera, J.M., Munoz, J.L., Bonga, S.W. and Flik, G., 1999. The stress response of the gilthead sea bream (*Sparus aurata L.*) to air exposure and confinement. Journal of endocrinology, 163(1),p.149.

Au, W.W. and Hastings, M.C., 2008. Principles of marine bioacoustics (Vol. 510). New York: Springer.

Bae, J.W., Park, J.H. and Yoon, J.R., 2009. Characteristics of impulsive noise of waterfront construction site and its effects on fishes. Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 19(9), pp.928−934.

Barton, B.A., 2002. Stress in fishes: A diversity of responses with particular reference to changes in circulating corticosteroids. Integrative and conmparative biology, 42, 517−525.

Chang, Y.J., Hur, J.W., Lim, H.K. and Lee, J.K., 2001. Stress in olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) and fat cod (*Hexagrammos otakii*) by the sudden drop and rise of water temperature. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 34(2), pp.91−97.

Choi, Y., Lee, H.H. and Oh, J.K., 2014. Distribution of fishes around the offshore wind farm at the southern part of Yellow Sea by trawl net. Korean Journal of Ichthyology, 26(3), pp.222−229.

Chu, S.O., Lee, C., Noh, J., Song, S.J., Hong, S., Ryu, J., Lee, J.S., Nam, J., Kwon, B.O. and Khim, J.S., 2020. Effects of polluted and non-polluted suspended sediments on the oxygen consumption rate of olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. Marine Pollution Bulletin, 154, p.111113.

Debusschere, E., Hostens, K., Adriaens, D., Ampe, B., Botteldooren, D., De Boeck, G., De Muynck, A., Sinha, A.K., Vandendriessche, S., Van Hoorebeke, L. and Vincx, M., 2016. Acoustic stress responses in juvenile sea bass *Dicentrarchus*

*labrax* induced by offshore pile driving. Environmental Pollution, 208, pp.747−757.

Di Franco, E., Pierson, P., Di Iorio, L., Calò, A., Cottalorda, J.M., Derijard, B., Di Franco, A., Galvé, A., Guibbolini, M., Lebrun, J. and Micheli, F., 2020. Effects of marine noise pollution on Mediterranean fishes and invertebrates: A review. Marine Pollution Bulletin, 159, p.111450.

Duarte, C.M., Chapuis, L., Collin, S.P., Costa, D.P., Devassy, R.P., Eguiluz, V.M., Erbe, C., Gordon, T.A., Halpern, B.S., Harding, H.R. and Havlik, M.N., 2021. The soundscape of the Anthropocene ocean. Science, 371(6529), p.eaba4658.

Erbe, C., Reichmuth, C., Cunningham, K., Lucke, K. and Dooling, R., 2016. Communication masking in marine mammals: A review and research strategy. Marine pollution bulletin, 103(1−2), pp.15−38.

Frisk, G.V., 2012. Noiseonomics: The relationship between ambient noise levels in the sea and global economic trends. Scientific reports, 2(1), pp.1−4.

Gamperl, A.K., Vijayan, M.M. and Boutilier, R.G., 1994. Experimental control of stress hormone levels in fishes: techniques and applications. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 4(2), pp.215−255.

Hammerschlag, N., Schmitz, O.J., Flecker, A.S., Lafferty, K.D., Sih, A., Atwood, T.B., Gallagher, A.J., Irschick, D.J., Skubel, R. and Cooke, S.J., 2019. Ecosystem function and services of aquatic predators in the Anthropocene. Trends in ecology & evolution, 34(4), pp.369−383.

Han, D.G., Joo, J., Son, W., Cho, K.H., Choi, J.W., Yang, E.J., Kim, J.H., Kang, S.H. and La, H.S., 2021. Effects of geophony and anthrophony on the underwater acoustic environment in the East Siberian Sea, Arctic Ocean. Geophysical Research Letters, 48(12), p.e2021GL093097.

Jerem, P. and Mathews, F., 2021. Trends and knowledge gaps in field research investigating effects of anthropogenic noise. Conservation Biology, 35(1), pp.115−129.

Jobling, M., 1982. A study of some factors affecting rates of oxygen consumption of plaice, *Pleuronectes platessa L*. Journal of Fish Biology, 20(5), pp.501−516.

Kammerer, B.D., Cech Jr, J.J. and Kültz, D., 2010. Rapid changes in plasma cortisol, osmolality, and respiration in response to salinity stress in tilapia (*Oreochromis mossambicus*). Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 157(3), pp.260−265.

Kim, I.N., Chang, Y.J. and Kwon, J.Y., 1995. The patterns of oxygen consumption in six species of marine fish. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 28(3), pp.373−381.

Lim, H.K. and Hur, J.W., 2018. Effects of acute and chronic air exposure on growth and stress response of juvenile olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 18(1), pp.143−151.

Mueller-Blenkle, C., McGregor, P.K., Gill, A.B., Andersson, M.H., Metcalfe, J., Bendall, V., Sigray, P., Wood, D.T. and Thomsen, F., 2010. Effects of pile-driving noise on the behaviour of marine fish.

PARRY, G., 1961. Osmotic and ionic changes in blood and muscle of migrating salmonids. Journal of Experimental Biology, 38(2), pp.411−427.

Pinnegar, J.K., 2018. Why the damselfish Chromis chromis is a key species in the M editerranean rocky littoral–a quantitative perspective. Journal of Fish Biology, 92(3), pp.851−872.

Reid, S.G., Bernier, N.J. and Perry, S.F., 1998. The adrenergic stress response in fish: control of catecholamine storage and release. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Pharmacology, Toxicology and Endocrinology, 120(1), pp.1−27.

Popper, A.N. and Hawkins, A. eds., 2012. The effects of noise on aquatic life (p. 638). New York: Springer.

Thorson, R.F. and Fine, M.L., 2002. Acoustic competition in the gulf toadfish Opsanus beta: acoustic tagging. The Journal of the Acoustical Society of America, 111(5), pp.2302−2307.

Schreck, C.B. and Tort, L., 2016. The concept of stress in fish. In Fish physiology (Vol. 35, pp. 1−34). Academic Press.

Varsamos, S., Flik, G., Pepin, J.F., Bonga, S.W. and Breuil, G., 2006. Husbandry stress during early life stages affects the stress response and health status of juvenile sea bass, Dicentrarchus labrax. Fish & shellfish immunology, 20(1), pp.83−96.

Yoon, J.R., Lee, S.W., Ahn, S.Y., Park, J.H., Bae, J.W. and Ahn, M.S., 2006. Effects of underwater noise on fishes. In Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference (pp. 739−746). The Korean Society for Noise and Vibration Engineering.

# 부록

**Appendix 1.** Flow rate per minute in each closed chamber.

| **Chamber no.** | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Flow rate ($L\ min^{-1}$)** | 1.18<br>1.03<br>1.08 | 1.18<br>1.13<br>1.18 | 1.23<br>0.98<br>0.98 | 1.18<br>1.23<br>1.13 | 0.98<br>0.98<br>0.98 | 0.98<br>1.03<br>1.03 |
| **Average ($L\ hour^{-1}$)** | **65.74** | **69.67** | **63.78** | **70.65** | **58.88** | **60.84** |

**Appendix 2**. Cultivation conditions for the experimental organism.

| | |
|---|---|
| **Temperature (°C)** | 20 ± 1.0 |
| **Salinity (PSU, practical salinity unit)** | 35 |
| **Dissolved oxygen concentration (mg $L^{-1}$)** | 7.5 |
| **Photoperiod (h, light:dark)** | 12:12 |

**Appendix 3**. Instrumental condition of osmometer for determining plasma osmolality.

| | |
|---|---|
| **Instrument** | Osmometer3000 (Gonotec) |
| **Sample Volume** | 50 μL |
| **Resolution** | 1 mOsmol $kg^{-1}$ |
| **Measuring Range** | 0–3000 mOsmol $kg^{-1}$ |
| **Test time (Seconds)** | 60 |

**Appendix 4**. Experimental condition for measuring plasma catecholamine (CA) concentration.

| | |
|---|---|
| **Instrument** | Infinite F nano plus (Tecan) |
| Absorbance range | 230–1000 nm |
| Measurement rage | 0–4 OD |
| Plate formats | 6–384 well plates |
| Software | Magellan advanced program, i-control (basic) |
| | |
| **ELISA kit** | Fish Catecholamine (CA) ELISA kit[a] |
| Plate formats | 96 well plate |
| Sensitivity | 2.0 ng $mL^{-1}$ |
| Detection range | 15.6–500 ng $mL^{-1}$ |

[a]ELISA kit: Enzyme-linked immunosorbent assay kit

**Appendix 5.** Mini-review for prior studies on the effect of noise on marine fishes.

| Habitat | Life stage | Species | Noise level | Frequency | Duration | Field/ Aquaria | Endpoint | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pelagic | Juvenile | *Dicentrarchus labrax* | SELss 181−185 dB re 1* $Pa^2$.s | 125−200 | 90 min | Field | Oxygen consumption rate | Debusschere et al., 2016 |
| | | | SELss 181−185 dB re 1* $Pa^2$.s | 125−200 | 90 min | Field | Whole body cortisol | Debusschere et al., 2016 |
| | | | SELss 181−185 dB re 1* $Pa^2$.s | 125−200 | 90 min | Field | Growth rate | Debusschere et al., 2016 |
| | | | SELss 181−185 dB re 1* $Pa^2$.s | 125−200 | 90 min | Field | Whole body lactate | Debusschere et al., 2016 |
| | | | SELss 181−185 dB re 1*$Pa^2$.s. | 125−200 | 1739 to 3067 strikes | Field | Immediate mortality | Debusschere et al., 2014 |
| | | | SPLcum 154 dB re 1 $\mu Pa^2$*s | 1−2000 | 5 min | Aquaria | Shoaling | Herbert-Read et al., 2017 |
| | | | SPLcum 154 dB re 1 $\mu Pa^2$*s | 1−2000 | 5 min | Aquaria | Speed | Herbert-Read et al., 2017 |
| | | | 146 dB re 1 µPa | n.d. | 2 min | Aquaria | Opecular beat rate | Radford et al., 2016 |
| | | | 146 dB re 1 µPa | n.d. | 12 weeks | Aquaria | Opecular beat rate | Radford et al., 2016 |
| | | | 152 dB RMS re 1 µPa | n.d. | 60 min | Aquaria | Opecular beat rate | Spiga et al., 2017 |
| | | | 152 dB RMS re 1 µPa | n.d. | 60 min | Aquaria | Startle | Spiga et al., 2017 |
| | | | 152 dB RMS re 1 µPa | n.d. | 60 min | Aquaria | Speed | Spiga et al., 2017 |
| | | | 152 dB RMS re 1 µPa | n.d. | 60 min | Aquaria | Turn angle | Spiga et al., 2017 |
| | | *Oncorhynchus tshawytscha* | 208 dB re 1µPa peak-to-peak | n.d. | 24 min | Aquaria | Mortality | Halvorsen et al., 2012 |
| | | | 208 dB re 1µPa peak-to-peak | n.d. | 24 min | Aquaria | Barotrauma | Halvorsen et al., 2012 |

**Appendix 5.** (Continued)

| Habitat | Life stage | Species | Noise level | Frequency | Duration | Field/ Aquaria | Endpoint | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pelagic | Adult | *Spondyliosoma cantharus* | SELcum 184 dB re 1 μ $Pa^2s$ | n.d. | 30 min | Aquaria | Oxygen consumption rate | Bruintjes et al., 2016 |
| | | *Sprattus sprattus* | 163,2 dB peak-to-peak | 50–60 | n.d. | Field | Shoaling | Hawkins et al., 2014 |
| | | *Scomber scombrus* | 163,2 dB peak-to-peak | 50–60 | n.d. | Field | Depth | Hawkins et al., 2014 |
| | | *Gadus morhua* | 140−161 dB RMS re 1 μPa | n.d. | 30 min | Field | Speed | Mueller-Blenkle et al., 2010 |
| | | | 140−161 dB RMS re 1 μPa | n.d. | 30 min | Field | Stop | Mueller-Blenkle et al., 2010 |
| | | | 140−161 dB RMS re 1 μPa | n.d. | 30 min | Field | Startle | Mueller-Blenkle et al., 2010 |

**Appendix 5.** (Continued)

| Habitat | Life stage | Species | Noise level | Frequency | Duration | Field/ Aquaria | Endpoint | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Benthic | Juvenile | *Solea solea* | SPLcum 206 dB re 1uPa2 | 50−1000 | 100 strikes | Aquaria | Mortality | Bolle et al., 2012 |
| | Adult | *Pleuronectes platessa* | SELcum 184 dB re 1μPa²s | n.d. | 30 min | Aquaria | Oxygen consumption rate | Bruintjes et al., 2016 |
| | | *Sebastes schlegelii* | 165 dB RMS re 1 μPa | 50−1500 | 120 min | Field | Direction | Heo et al., 2019 |
| | | | 165 dB RMS re 1 μPa | 50−1500 | 120 min | Field | Speed | Heo et al., 2019 |
| | | | 165 dB RMS re 1 μPa | 50−1500 | 120 min | Field | Distance | Heo et al., 2019 |
| | | *Solea solea* | 140−161 dB RMS re 1 μPa | n.d. | 30 min | Field | Speed | Mueller-Blenkle et al., 2010 |
| | | | 140−161 dB RMS re 1 μPa | n.d. | 30 min | Field | Stop | Mueller-Blenkle et al., 2010 |
| | | | 140−161 dB RMS re 1 μPa | n.d. | 30 min | Field | Startle | Mueller-Blenkle et al., 2010 |

# Abstract

# Oxygen consumption rate, osmolality and catecholamine responses of the yellow croaker *Larimichthys crocea* and olive flounder *Paralichthys olivaceus* to windfarm construction and operation noise



Gayoung Jin

School of earth and environmental sciences

The Graduate School

Seoul National University



Underwater noise generated by offshore wind farms can cause a detrimental effect on various marine organisms. Until recently, research on underwater noise mainly focused on the biological effects on marine mammals and birds, yet lacking in fish. In this study, the effects of pile driving noise (154 dB re 1 μPa) and turbine operation noise (141 dB re 1 μPa) on the pelagic fish *Larimichthys crocea* (yellow croaker*)* and the benthic fish *Paralichthys olivaceus* (olive flounder) were evaluated through oxygen consumption rate, osmolality, and catecholamine concentration. By comparing the noise source, results showed that the oxygen consumption rate did not recover for 24 hours and continued to be unstable, after both types of fish were exposed to pile driving noise for an hour. On the other hand, when turbine operation noise was exposed for 24 hours, the recovery in oxygen consumption rate of both fish remained stable, with relatively low fluctuations. This implies not only the level of noise but also the length of exposure and intervals could affect the physiological stress of fish. Also, comparing the effects by species, the change in oxygen consumption rate in the *L. crocea* was higher than that of *P. olivaceus* when exposed to pile driving noise ($p<0.05$). In addition, a significant positive relationship in *L. crocea* osmolality was observed with increasing turbine operation noise exposure ($p<0.05$). The pelagic fish is considered to be more sensitive to noise due to the development of auditory organs compared to the benthic fish. The results show

different physiological responses for each fish species even when exposed to the same noise source, which suggests that noise limits should be applied regarding the variation of fish auditory sensitivity. Overall, this study provides scientific information to establish stewardship policies for ocean soundscapes and to maintain a healthy ocean.

**Keywords:** Offshore wind farm, Underwater noise, Fish, Oxygen consumption rate, Osmolality, Catecholamine
**Student Number :** 2021-24224