

돌돔(*Oplegnathus fasciatus*)에 대한 인위적인 해상풍력발전소 건설소음의 면역학적 영향

최광민 · 주민수 · 강경식 · 우원식 · 김경호 · 손민영 · 손하정 · 박찬일[†]

경상국립대학교 양식생명과학과

Effect of Artificial Noise from Offshore Wind Power Generation on Immunological Parameters in Rock Bream (*Oplegnathus fasciatus*)

Kwang-Min Choi, Min-Soo Joo, Gyoungsik Kang, Won-Sik Woo, Kyung Ho Kim,
Min-Young Son, Son Ha Jeong and Chan-Il Park[†]

Department of Aquaculture science, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

Offshore wind power generation is an energy generation field that is rapidly developing owing to the increasing demand for clean energy. However, the physiological response of fish to the underwater noise generated during construction or operation of wind turbines is unclear. We confirmed the effects of sound pressures of 125, 135, 145, and 155 dB/ μ Pa, including 140 dB/ μ Pa (the standard sound pressure for noise damage recognition in South Korea), through serum analysis in rock bream (*Oplegnathus fasciatus*). High mortality induced by reduced immunity through artificial infection after stimulation was confirmed. These results suggest that rock bream is negatively affected by the noise generated during the construction of offshore wind power plants.

Key words: Offshore wind power generation, Noise-stress, Rock bream, *Oplegnathus fasciatus*

서 론

어류의 청각기관은 부화 후 이틀 내 완전히 발달하여 수중의 압력 변화 및 입자의 움직임 등을 감지할 수 있게 되어 사냥, 의사소통, 번식 등과 같은 생물학적 행동에서 중요한 역할을 하게 된다(Leis *et al.*, 2011; Popper & Hawkins, 2018). 그러나 지난 수십 년간 인간의 활동으로 인해 의도치 않게 발생한 인위적인 소음은 해양생태계에 커다란 변화와 영향을 초래했고, 이에 대한 해양생물의

영향 및 피해는 1970년대 이후부터 본격적으로 연구되기 시작했다. 소리는 전파되는 매체의 특성에 따라 속도 및 전달되는 거리가 달라지는데 바다 속에서는 높은 밀도의 매질에 의해 약 1,500 m/s의 속도로 공기 중에서 보다 일반적으로 5배 정도 빠르게 전파되고, 상대적으로 흡수, 산란, 반사 등의 영향을 받지 않기 때문에 상황에 따라 음원으로 부터 수십 킬로미터까지 전파될 수 있다(Rahman *et al.*, 2012).

풍력발전은 2020년 기준 전 세계 발전전력 중 6.1%를 차지하고 있으며, 이는 수력발전에 이어 두 번째로 많이 이용되고 있는 재생에너지원이다(Our World in Data, 2020). 이러한 풍력발전은 발

[†]Corresponding author: Chan-Il Park
Tel: +82-55-772-9153, Fax: +82-55-772-9159
E-mail: Parkci@gnu.ac.kr

전효율을 향상시키기 위해 터빈의 로터 직경과 높이가 2000년대 초와 비교하여 2배 이상 증가했으며, 발전단지의 규모 또한 점점 커지고 있기 때문에 운전 시 발생하는 소음 및 영향 등의 문제를 차단하기 위해 해안에서 더 멀리 떨어진 지역에 대규모 단지로 건설되는 해상발전소의 비율이 증가하고 있는 추세이다(Murdock *et al.*, 2019; Soares-Ramos *et al.*, 2020). 발전시설은 해양생물에게 인간의 어업 활동으로 부터 피난처 및 인공어초로도 제공될 수 있지만 발전기 설치공사 및 운전 시 발생하는 충격음과 진동은 어류의 일일적인 청력손실 및 스트레스 반응을 유발하는데, 약 180 dB의 강한 소음에 노출될 경우 2시간 안에 1/3이 폐사했고, 살아남은 개체에서도 균형감각 및 청각의 심각한 손상이 관찰되었다(Scholik & Yan, 2001; Amoser & Ladich, 2003; Wilhelmsson & Malm, 2008). 또한 지속적인 소음의 경우 만성적인 스트레스로 작용해 해양동물에 산화스트레스, 성장을 감소, 행동 변화 등의 영향을 초래했다(Weilgart, 2007; Chang *et al.*, 2018; Guh *et al.*, 2021). 이러한 결과들은 해상풍력발전소에 의한 주변의 배경 소음의 변화가 주변 양식장 내 어류에게도 직간접적인 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

그래서 이번 연구는 우리나라 고부가가치 양식 어종인 돌돔(*Oplegnathus fasciatus*)의 해상풍력발전소 건설 시 발생하는 수중소음에 대한 영향을 평가하기 위해 2013년 수행한 연구이며, 혈청 생물학적 분석과 유전자 발현분석, 인위감염 실험을 통해 돌돔에 대한 소음 스트레스의 면역학적 영향을 확인하고자 하였다.

재료 및 방법

실험생물 및 실험장치

돌돔은 경남수산자원연구소로부터 미성어(평균 전장: 15 ± 1.5 cm, 평균체중: 75 ± 25.5 g)를 분양받아 내부용적이 5톤인 원통형 수조에서 일주일간 순치시켰고, 급이는 시판용 사료로 하루 1회, 여과해수를 공급하는 유수방식으로 수온은 히터를 이용해 21°C로 유지시켰다. 소음노출 실험구는 2009년 중앙환경분쟁조정위원회에서 육상양식장

을 대상으로 제시한 소음피해 인정기준치 root mean square (RMS)값인 140 dB/ μ Pa (RMS값)의 범위를 포함하는 네 실험구로(125, 135, 145, 155 dB/ μ Pa) 설정하여 순환여과식 수조(폭: 1.0 m, 높이: 1.2 m)에 순치시킨 돌돔을 40마리씩 수용시켰으며, 대조구와 실험구의 수조시설은 소음을 차단하기 위해서 독립적인 공간에 설치하여 1일 1회 급이 조건으로 실험을 수행하였다. 실험기간 동안 대조구 수조시설의 소음수준은 106 dB/ μ Pa로 측정되었고, 이는 통상적인 수준인 110 dB/ μ Pa와 유사한 수준이었다.

해상풍력발전소 건설현장에서 항타 작업 시 발생하는 소음원을 재현하기 위해 거리 감쇠를 고려한 디지털 음원으로 제작하였고, 음향의 출력은 Hydrophone type 8105와 8106으로 실시간 모니터링하며 조절하였다.

스트레스 자극 후 세균감염에 대한 생존을 확인을 위해 인위감염실험을 수행하였으며, 세균은 국립수산물과학원으로부터 분양받은 *Streptococcus iniae* FP5228을 1% NaCl이 첨가된 brain heart infusion (BHI, BD Difco, USA) 배지에 27°C로 배양하여 준비하였다.

혈청 채취 및 성분 분석

소음자극 후 어류의 영향은 분자지표 및 혈청학적 평가를 실시하였다. 음압별 자극 후 1, 3시간과 3, 7, 14일째 3마리씩 무작위로 선별하였고, benzocaine (Sigma-Aldrich, USA)을 이용하여 안락사시킨 뒤 혈청학적 분석을 위해 미부정맥을 통해 채혈을 수행하였다. 혈액은 상온에서 1시간 반응 뒤 4°C에서 24시간 동안 반응시켰고, 4,000 rpm으로 10분간 원심분리를 통해 혈청을 분리하여 -80°C의 초저온냉동고에서 보관하였다.

혈청학적 주요 지표인 albumin (ALB), glucose (GLU), glutamic oxalacetic transaminase (GOT), glutamic pyruvate transaminase (GPT), total cholesterol (TCHO)의 측정은 건식 자동생화학분석기인 DRI-CHEM 4000i (Fujifilm, Japan)를 이용하였고, 분석 결과의 통계처리는 SPSS 19.0 프로그램(IBM, USA)을 이용하여 one-way ANOVA와 Duncan's multiple test로 유의성(* $P < 0.05$)을 검정하였다.

인위감염 및 폐사율 측정

14일 동안 연속적인 소음에 노출시킨 돌돔은 세균성 질병에 대한 감수성 및 영향을 확인하기 위해 20마리씩 무작위로 선별한 뒤 PBS에 5×10^6 CFU/fish의 농도로 희석시킨 *S. iniae*를 100 μ L씩 복강 내에 주사하였고, 수온은 21°C를 유지하며 10일 동안 누적폐사율을 관찰하였다.

결과 및 고찰

항상성을 회복할 수 없을 정도로 반복 또는 장

기적인 스트레스에 노출된 어류는 성장 감소, 생식력 감소, 면역력 감소 등이 나타나며, 이러한 체내 반응은 스트레스 호르몬 및 혈액 내 성분의 농도 변화 등으로 확인할 수 있다(Barton, 2002). 이번 연구에서 14일 간의 소음 노출 기간 동안 대조구와 실험구의 성장률은 유의적인 차이가 확인되지 않은 반면 일부 혈청학적 항목에서 유의적인 변화가 확인되었다(Table 1). 먼저 혈청 ALB는 전적으로 간에서 생성되기 때문에 간 건강 및 염증에 관한 대표적인 지표이며, 10일 동안 선박 소음에 노출된 도미과 어류인 *Sparus aurata*의 혈장 내

Table 1. Clinical biochemistry tests including ALB, GLU, GOT, GPT and TCHO in rock bream

Time course	Decibel levels	Total length (cm)	Body weight (g)	Serum levels				
				ALB (g/dL)	GLU (mg/dL)	GOT (U/L)	GPT (U/L)	TCHO (mg/dL)
1 h	Control	15.4 $\pm$ 1.4 ^a	93.3 $\pm$ 24.6 ^a	1.7 $\pm$ 0.2 ^a	128.0 $\pm$ 55.7 ^a	45.3 $\pm$ 50.9 ^a	8.0 $\pm$ 1.0 ^a	184.0 $\pm$ 43.5 ^a
	125 dB	14.8 $\pm$ 2.0 ^a	64.1 $\pm$ 17.6 ^a	1.8 $\pm$ 0.2 ^a	77.3 $\pm$ 51.2 ^a	54.3 $\pm$ 38.6 ^a	15.3 $\pm$ 13.5 ^a	247.3 $\pm$ 12.5 ^a
	135 dB	14.0 $\pm$ 1.7 ^a	52.8 $\pm$ 23.1 ^a	1.4 $\pm$ 0.4 ^a	112.0 $\pm$ 44.8 ^a	25.0 $\pm$ 26.9 ^a	6.7 $\pm$ 4.9 ^a	203.7 $\pm$ 60.5 ^a
	145 dB	15.3 $\pm$ 2.1 ^a	80.9 $\pm$ 35.9 ^a	1.5 $\pm$ 0.1 ^a	109.7 $\pm$ 37.3 ^a	12.0 $\pm$ 4.4 ^a	7.3 $\pm$ 1.2 ^a	213.3 $\pm$ 34.8 ^a
	155 dB	15.3 $\pm$ 1.0 ^a	83.9 $\pm$ 15.0 ^a	1.5 $\pm$ 0.3 ^a	133.7 $\pm$ 62.9 ^a	17.3 $\pm$ 9.2 ^a	7.3 $\pm$ 0.6 ^a	217.3 $\pm$ 11.4 ^a
3 h	Control	14.1 $\pm$ 1.4 ^a	70.1 $\pm$ 12.8 ^a	1.4 $\pm$ 0.1 ^a	63.0 $\pm$ 16.1 ^a	53.7 $\pm$ 23.7 ^b	7.0 $\pm$ 1.0 ^a	169.3 $\pm$ 49.3 ^{ab}
	125 dB	15.9 $\pm$ 1.5 ^a	100.1 $\pm$ 19.1 ^a	1.5 $\pm$ 0.1 ^a	71.0 $\pm$ 42.3 ^a	17.7 $\pm$ 4.9 ^a	10.3 $\pm$ 1.2 ^a	244.7 $\pm$ 35.3 ^{ab}
	135 dB	13.2 $\pm$ 1.7 ^a	60.2 $\pm$ 16.7 ^a	1.3 $\pm$ 0.1 ^a	83.7 $\pm$ 55.9 ^a	22.3 $\pm$ 10.5 ^a	7.0 $\pm$ 1.7 ^a	197.3 $\pm$ 37.0 ^{ab}
	145 dB	13.9 $\pm$ 1.0 ^a	75.9 $\pm$ 38.3 ^a	1.5 $\pm$ 0.6 ^a	77.7 $\pm$ 11.8 ^a	17.0 $\pm$ 6.6 ^a	6.7 $\pm$ 2.1 ^a	163.0 $\pm$ 60.9 ^a
	155 dB	15.7 $\pm$ 1.2 ^a	88.4 $\pm$ 7.2 ^a	1.3 $\pm$ 0.1 ^a	84.3 $\pm$ 11.9 ^a	18.3 $\pm$ 6.4 ^a	9.0 $\pm$ 3.6 ^a	252.0 $\pm$ 15.7 ^b
3 d	Control	14.8 $\pm$ 0.7 ^a	74.2 $\pm$ 19.8 ^a	1.0 $\pm$ 0.1 ^a	32.5 $\pm$ 7.8 ^a	12.7 $\pm$ 5.5 ^a	7.0 $\pm$ 0.0 ^a	173.7 $\pm$ 30.9 ^a
	125 dB	14.6 $\pm$ 1.7 ^a	78.4 $\pm$ 26.3 ^a	1.1 $\pm$ 0.1 ^a	99.0 $\pm$ 19.0 ^{ab}	25.0 $\pm$ 22.5 ^a	9.7 $\pm$ 4.6 ^a	160.3 $\pm$ 27.0 ^a
	135 dB	15.5 $\pm$ 1.0 ^a	83.5 $\pm$ 13.8 ^a	1.0 $\pm$ 0.1 ^a	114.7 $\pm$ 38.2 ^{ab}	35.7 $\pm$ 20.0 ^a	8.7 $\pm$ 4.6 ^a	151.3 $\pm$ 34.6 ^a
	145 dB	15.2 $\pm$ 2.2 ^a	79.0 $\pm$ 38.8 ^a	1.1 $\pm$ 0.3 ^a	160.0 $\pm$ 63.5 ^b	23.0 $\pm$ 3.0 ^a	7.3 $\pm$ 3.2 ^a	174.3 $\pm$ 40.5 ^a
	155 dB	15.2 $\pm$ 0.8 ^a	73.4 $\pm$ 9.0 ^a	1.0 $\pm$ 0.1 ^a	71.3 $\pm$ 70.0 ^{ab}	18.7 $\pm$ 9.1 ^a	6.7 $\pm$ 2.1 ^a	168.3 $\pm$ 2.1 ^a
7 d	Control	14.9 $\pm$ 1.3 ^a	76.5 $\pm$ 27.6 ^a	0.9 $\pm$ 0.1 ^{ab}	46.7 $\pm$ 17.6 ^a	13.7 $\pm$ 7.4 ^a	5.7 $\pm$ 1.2 ^a	184.7 $\pm$ 24.1 ^b
	125 dB	14.7 $\pm$ 0.7 ^a	66.6 $\pm$ 7.0 ^a	0.8 $\pm$ 0.2 ^a	87.7 $\pm$ 78.0 ^a	54.3 $\pm$ 50.8 ^a	5.0 $\pm$ 0.0 ^a	104.0 $\pm$ 27.1 ^a
	135 dB	15.3 $\pm$ 0.3 ^a	81.2 $\pm$ 9.5 ^a	1.0 $\pm$ 0.2 ^{ab}	97.7 $\pm$ 32.7 ^a	21.0 $\pm$ 1.7 ^a	9.7 $\pm$ 4.6 ^a	148.7 $\pm$ 20.1 ^{ab}
	145 dB	15.4 $\pm$ 0.6 ^a	73.9 $\pm$ 7.0 ^a	1.0 $\pm$ 0.0 ^{ab}	65.3 $\pm$ 31.0 ^a	24.7 $\pm$ 16.8 ^a	8.0 $\pm$ 2.6 ^a	136.7 $\pm$ 4.5 ^{ab}
	155 dB	15.4 $\pm$ 0.6 ^a	80.5 $\pm$ 0.7 ^a	1.1 $\pm$ 0.1 ^b	96.0 $\pm$ 31.0 ^a	42.7 $\pm$ 49.0 ^a	5.7 $\pm$ 3.1 ^a	146.3 $\pm$ 36.5 ^{ab}
14 d	Control	15.3 $\pm$ 1.5 ^a	77.2 $\pm$ 30.5 ^a	1.2 $\pm$ 0.2 ^a	85.7 $\pm$ 4.2 ^b	52.3 $\pm$ 36.1 ^a	6.7 $\pm$ 1.2 ^b	244.3 $\pm$ 33.7 ^b
	125 dB	15.6 $\pm$ 1.9 ^a	85.6 $\pm$ 22.9 ^a	0.9 $\pm$ 0.3 ^a	34.0 $\pm$ 27.6 ^a	29.3 $\pm$ 18.0 ^a	4.3 $\pm$ 0.6 ^a	86.3 $\pm$ 22.2 ^a
	135 dB	14.2 $\pm$ 2.0 ^a	62.2 $\pm$ 20.9 ^a	0.9 $\pm$ 0.4 ^a	69.3 $\pm$ 47.7 ^{ab}	15.7 $\pm$ 8.1 ^a	4.0 $\pm$ 1.7 ^a	91.0 $\pm$ 62.2 ^a
	145 dB	16.4 $\pm$ 2.3 ^a	96.6 $\pm$ 49.9 ^a	1.0 $\pm$ 0.4 ^a	31.0 $\pm$ 2.6 ^a	15.3 $\pm$ 3.1 ^a	4.3 $\pm$ 0.6 ^a	118.0 $\pm$ 64.1 ^a
	155 dB	14.7 $\pm$ 1.2 ^a	66.6 $\pm$ 9.8 ^a	0.9 $\pm$ 0.1 ^a	73.3 $\pm$ 9.7 ^{ab}	38.3 $\pm$ 11.6 ^a	5.0 $\pm$ 1.0 ^{ab}	116.7 $\pm$ 38.5 ^a

※ Abbreviation: decibel (dB), albumin (ALB), glucose (GLU), glutamic oxalacetic transaminase (GOT), glutamic pyruvate transaminase (GPT) and total cholesterol (TCHO)

※ Data are presented as means $\pm$ S.D. for three fish. Significant differences were noted at * $P < 0.05$ when compared to the control group.

ALB 수준은 유의적으로 증가되었다(Celi *et al.*, 2016). 이번 연구에서도 돌돔 ALB는 자극 초기에 대조구와 비교해 유의적인 변화가 확인되지 않았지만 7일째 가장 높은 음압인 155 dB/ μ Pa 그룹에서 유의적으로 상승했고, 이러한 결과는 이전의 연구 결과들과 참고하면 지속적인 스트레스로 손상된 조직을 복구하기 위한 항상성 유지 활성으로 생각된다(Himmelfarb & McMonagle, 2001).

이번 연구에서 GLU는 3시간째부터 7일째까지 실험구에서 비교적 높은 농도로 측정되었으며, 3일째 145 dB/ μ Pa 그룹에서 유의적으로 상승한 반면 14일째에는 125 dB/ μ Pa와 145 dB/ μ Pa 그룹에서 대조구 보다 두 배 이상 유의적으로 감소하였다. GLU는 어류의 지속적인 스트레스와 관련 있으며, 나일틸라피아(*Oreochromis niloticus*)의 양식 시 높은 사육밀도로 인해 혈청 내 농도가 상승한 반면 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*)에서는 반복적인 핸들링 스트레스에 의해 일시적인 스트레스 보다 GLU 수치가 감소했다(Odhiambo *et al.*, 2020; Jentoft *et al.*, 2005). GLU는 체내 에너지 생산에 필요한 성분이기 때문에 이러한 농도 변화는 소음 스트레스가 체내 에너지 수요를 변화시켰거나 corticosterone과 같은 스트레스 호르몬에 의한 신생합성 유도과 관련한 체내 대사와 관련 있을 것으로 판단되며, 소음스트레스에 의한 실험구 돌돔 내 사료흡수율에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다(Davison *et al.*, 1985).

GOT와 GPT는 세포 내에 분포하여 단백질 및 탄수화물 대사에서 중요한 역할을 하는 transaminase 이지만 스트레스와 같은 외부 자극에 의한 손상 시 세포 밖으로 누출될 수 있기 때문에 증가한 혈장 내 농도는 주요 간 손상 지표로 사용되어 왔다(Van der *et al.*, 2003). 하지만 이번 연구에서 돌돔의 GOT 수치는 3시간째 모든 실험구에서 유의적으로 감소했고, GPT 수치도 14일째 125, 135, 145 dB/ μ Pa 그룹에서 유의적으로 감소되었지만 유의적인 증가는 확인되지 않았다.

TCHO는 자극 3시간째 155 dB/ μ Pa 그룹에서 유의적으로 상승했다. TCHO 또한 간 손상 지표로 알려져 있고, 어류의 체내에서 TCHO의 산화적 변형은 혈관 내피세포에 심각한 손상을 일으키고,

혈액순환의 장애를 초래하기 때문에 증가된 혈청 내 수준은 혈관계에 문제를 일으킬 수 있다(Nakano *et al.*, 1999). 하지만 7일째 125 dB/ μ Pa 그룹에서 혈청 내 TCHO 수준은 유의적으로 감소한 뒤 14일째 모든 실험구에서 유의적인 감소되었는데, 이때 14일째 유의적 감소는 대조구의 비이상적으로 증가한 TCHO 수준 때문이며, 이러한 대조구 결과의 원인은 정확하게 파악하기 어려웠다. 혈청학적 지표의 측정값은 어종, 발달단계, 측정시기, 측정법 등의 요인에 따라 차이가 발생하며, 이번 연구에서 사용한 건식 자동생화학분석기의 측정 범위는 Jung 등(2016)의 연구에서 검증되었고, 결과적으로 이번 연구에서 측정한 다섯 가지 항목 중에서 GLU를 제외한 모든 항목이 이전의 보고에서 확인된 양식산 돌돔의 정상 범위에 포함되는 수준이었다(Jung *et al.*, 2016). 하지만 GLU 또한 사료 급여 후 측정된 값이기 때문에 그룹 간 혈중 수준이 크게 차이가 발생한 것으로 생각되며, 아직까지 어종별 혈청학적 지표의 정상 기준은 명확하게 정립되지 않았기 때문에 이번 연구는 소음 처리에 의한 혈청성분 지표의 변화와 스트레스와의 관련성을 확인하는데 의미가 있을 것으로 판단된다. 그래서 우리는 소음 스트레스에 대한 면역학적 영향을 비교하기 위해 인위감염 실험을 수행하였다.

인위감염 실험에서는 145 dB/ μ Pa 그룹이 비교적 가장 빠른 속도로 폐사가 발생해 5일 만에 전량 폐사했으며, 나머지 모든 실험구도 6일 만에 전량 폐사하였다(Fig. 1). 반면, 대조구는 관찰 10일째까

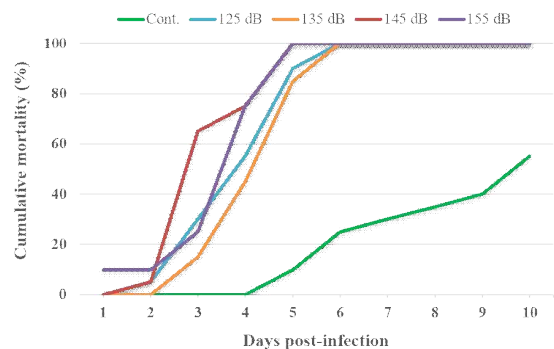


Fig. 1. The cumulative mortality rate of rock bream artificially infected with *Streptococcus iniae* during 10 day after noise exposure.

지 55%의 폐사율이 기록되었다. Simpson 등(2016)의 연구에서 암초에 서식하는 damselfish인 *Pomacentrus amboinensis*는 주변에서 발생하는 보트의 모터 소음에 의해 포식자에 대한 반응이 크게 감소하였고, 이는 현장 실험에서 2배 이상 생존율이 감소하는 현상이 발생했다(Simpson *et al.*, 2016). 또한 관상어종인 구피(*Poecilia reticulata*)는 만성적인 소음 스트레스에 의해 기생충 감염에 대한 내성이 감소했다(Masud *et al.*, 2020). 반면 무지개송어에서는 8개월간의 만성적인 소음 스트레스에 의해 세균인 *Yersinia ruckeri*에 대한 감수성의 변화가 관찰되지 않았다(Wysocki *et al.*, 2007). 이러한 결과들은 어종 또는 개체별 스트레스 감수성 및 회복 등의 여러 요인에 따라 영향 달라질 수 있기 때문에 모든 어종과 상황에 적용하기에는 어려울 것으로 판단할 수 있다. 그러나 자연 환경 내 어류들은 소음원으로 부터 회피 및 이주가 가능하지만 양식장 내 환경에서는 불가능하기 때문에 소음에 대한 관리 및 대책이 더욱 필요하며, 지속되는 스트레스에 적응하여 혈청학적지표들이 회복되는 것으로 보이지만 누적된 체내 손상은 세균성 질병에 대한 저항력에 심각한 영향을 초래할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 연구에 사용된 수조 시설 및 음향장비는 실제 복합적인 바닷속 환경을 재연하는데 한계가 있고, 실험에 사용한 수조벽의 아크릴 재질 때문에 소음 및 진동이 실험어에게 더욱 민감한 반응을 가했을 수 있을 것으로 판단된다.

결과적으로 해상풍력발전소 건설 시 발생하는 소음 스트레스에 의해 돌돔에서 혈청생물학적 지표의 변화를 유도했고, 세균 인위감염에 의해 나타난 높은 폐사율은 소음 스트레스가 돌돔의 면역 체계에 유해한 영향을 초래할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 말

이 논문은 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(수산생물 검역용 신속 및 정밀진단 기술 개발)

References

- Amoser S and Ladich F (2003). Diversity in noise-induced temporary hearing loss in otophysine fishes. *J. Acoust. Soc. Am.* 113, 2170-2179.
- Barton BA (2002). Stress in Fishes: A Diversity of Responses with Particular Reference to Changes in Circulating Corticosteroids. *Integr. Comp. Biol.* 42, 517-525.
- Celi M, Filiciotto F, Maricchiolo G, Genovese L, Quinci EM, Maccarrone V, Mazzola S, Vazzana M and Buscaino G (2016). Vessel noise pollution as a human threat to fish: assessment of the stress response in gilthead sea bream (*Sparus aurata*, Linnaeus 1758). *Fish Physiol. Biochem.* 42, 631-641.
- Chang HY, Lin TH, Anraku K and Shao YT (2018). The Effects of Continuous Acoustic Stress on ROS Levels and Antioxidant-related Gene Expression in the Black Porgy (*Acanthopagrus schlegelii*). *Zool Stud.* 57, e59.
- Davison TF, Freeman BM and Rea J (1985). Effects of continuous treatment with synthetic ACTH1-24 or corticosterone on immature *Gallus domesticus*. *Gen. Comp. Endocrinol.* 59, 416-423.
- Guh YJ, Tseng YC and Shao YT (2021). To cope with a changing aquatic soundscape: Neuroendocrine and antioxidant responses to chronic noise stress in fish. *Gen. Comp. Endocrinol.* 314, 113918.
- Himmelfarb J and McMonagle E (2001). Albumin is the major plasma protein target of oxidant stress in uremia. *Kidney Int.* 60, 358-363.
- Jentoft S, Aastveit AH, Torjesen PA and Andersen O (2005). Effects of stress on growth, cortisol and glucose levels in non-domesticated Eurasian perch (*Perca fluviatilis*) and domesticated rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol.* 141, 353-358.
- Jung SH, Byun SG, Jee BY and Choi HS (2006). Application of Veterinary Chemistry Analyzer Used to Hematological Analysis of Marine Fish Cultured in Floating Netcage. *J. Fish Pathol.* 19, 253-265.
- Leis JM, Siebeck U and Dixon DL (2011). How Nemo finds home: The neuroecology of dispersal and of population connectivity in larvae of marine fishes. *Integr. Comp. Biol.* 51, 826-843.
- Masud N, Hayes L, Crivelli D, Grigg S and Cable J (2020). Noise pollution: acute noise exposure increases susceptibility to disease and chronic exposure reduces host survival. *R. Soc. Open Sci.* 7, 200172.

- Murdock HE, Gibb D, André T, Appavou F, Brown A and Epp B (2019). Renewables 2019 global Status report. 8
- Nakano T, Kanmuri T, Sato M and Takeuchi M (1999). Effect of astaxanthin rich red yeast (*Phaffia rhodozyma*) on oxidative stress in rainbow trout. *Biochim. Biophys. Acta* 1426, 119-125.
- Odhiambo E, Angienda PO, Okoth P and Onyango D (2020). Stocking Density Induced Stress on Plasma Cortisol and Whole Blood Glucose Concentration in Nile Tilapia Fish (*Oreochromis niloticus*) of Lake Victoria, Kenya. *Int. J. Zool.* 2020, 9395268.
- Our World in Data (2020). Wind power generation, 2020.
- Popper AN and Hawkins AD (2018). The importance of particle motion to fishes and invertebrates. *J. Acoust. Soc. Am.* 143, 470-488.
- Rahman MFA, Arshad MR, Manaf AA and Yaacob MIH (2012). An investigation on the behaviour of PDMS as a membrane material for underwater acoustic sensing. *Indian J. Mar. Sci.* 41, 557-562.
- Scholik AR and Yan HY (2001). Effects of underwater noise on auditory sensitivity of a cyprinid fish. *Hear Res.* 152, 17-24.
- Simpson SD, Radford AN, Nedelec SL, Ferrari MCO, Chivers DP, McCormick MI and Meekan MG (2016). Anthropogenic noise increases fish mortality by predation. *Nature Communications* 7, 10544.
- Soares-Ramos EPP, de Oliveira-Assis L, Sarrias-Mena R and Fernández-Ramírez LM (2020). Current status and future trends of offshore wind power in Europe. *Energy* 202, 117787.
- Van der RO, Jonny B and Vermeulen NPE (2003). Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment, a review. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 13, 57-149.
- Weilgart LS (2007). The impacts of anthropogenic ocean noise on cetaceans and implications for management. *Can. J. Zool.* 85, 1091-1116.
- Wilhelmsson D and Malm T (2008). Fouling assemblages on offshore wind power plants and adjacent substrata. *Estuar. Coast Shelf. Sci.* 79, 459-466.
- Wysocki LE, Davidson JW, Smith ME, Frankel AS, Ellison WT, Mazik PM, Popper AN and Bebak J (2007). Effects of aquaculture production noise on hearing, growth, and disease resistance of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture* 272, 687-697.

Manuscript Received : Nov 03, 2021

Revised : Nov 29, 2021

Accepted : Dec 09, 2021