Check for updates

JFMSE, 33(6), pp. 1295~1304, 2021.
수산해양교육연구, 제33권 제6호, 통권114호, 2021.
www.ksfme.or.kr
https://doi.org/10.13000/JFMSE.2021.12.33.6.1295

풍력발전 건설 시 발생하는 수중소음이 조피볼락(*Sebastes schlegelii*)의 생리 및 면역요인에 미치는 영향

최광민 · 주민수* · 박찬일†
경상국립대학교(박사후 연구원) · *경상국립대학교(학생) · †경상국립대학교(교수)

Effect of Underwater Noise Generated by Wind Power Plant Construction on Physiological and Immune Factors in Korean Rockfish, *Sebastes schlegelii*

Kwang-Min CHOI · Min-Soo JOO* · Chan-Il PARK†
Gyeongsang National University(post-doctoral associate) · *Gyeongsang National University(student) · †Gyeongsang National University(professor)

Abstract

Wind power generation is a promising power generation facility field that is developing due to interest in environmental protection and technological development. However, disturbance to humans and animals has been reported due to noise generated during construction and operation. Therefore, we attempted to evaluate the immune and physiological effects of stress caused by a sound pressure range of 125-155 dB/μPa in Korean rockfish (*Sebastes schlegelii*), a major aquaculture fish species in South Korea, by reproducing the noise generated during the construction of a wind power plant. Significant effects were confirmed for molecular biological and serological indicators, and serious mortality occurred due to artificial infection. These results indicate a more fatal effect on animals in aquaculture farms, which cannot move or avoid undesirable habitats, unlike animals in natural conditions. Thus, it is important to develop measures for environmental noise management.

Key words : Wind power generation, Noise-stress, Korean rockfish, Microarray, Cortisol

Ⅰ. 서 론

에너지 수요량은 산업발전과 인구증가 등으로 인해 매해 증가하고 있지만, 전통적인 발전방식에 사용되는 화석연료는 온실가스를 발생시키고, 한정된 매장량 때문에 전 세계적으로 신재생에너지를 이용하기 위한 발전시설이 급격히 증가하고 있다. 우리나라 역시 2030년까지 전체 발전설비 중 20%를 신재생에너지로 대체하는 '재생에너지 3020 이행계획'을 발표하였고, 이 중 풍력발전 및 태양광발전이 많은 비중을 차지할 것으로 전망되고 있다.

풍력발전은 설치장소에 따라 육상풍력과 해상풍력으로 구분되며, 이 중 육상풍력은 발전량이 불안정하고, 설치 시 환경파괴와 소음발생 등의 문제로 인해 부지 확보가 어렵다. 그래서 최근에는 발전효율성이 높은 대형터빈의 적용 및 대규모 단지 조성에 유리한 해상풍력기기의 설치가

† Corresponding author : 055-772-9153, Parkci@gnu.ac.kr/orcid.org/0000-0002-2501-1860
※ 이 논문은 국립수산과학원 (R2021066)의 지원으로 수행된 연구입니다.

증가하고 있으며, 우리나라는 2030년까지 전체 풍력발전용량 중 70% 이상을 해상풍력발전으로 구성할 계획을 발표하였다(Musgrove, 1987; Wenzhou et al., 2011). 그러나 해상풍력기기 또한 건설작업 시 발파 및 항타로 인해 진동, 소음, 먼지가 많이 발생하며, 운용 시에는 블레이드의 회전으로 인한 소음 및 진동이 발생해 주변의 주민과 생물들에게 환경공해의 원인이 되고 있다. 특히 건설공사 중 발생하는 간헐적인 충격음은 운전 중 지속적으로 발행하는 소음보다 해양생물의 행동 및 생리적인 영향에 더욱 큰 피해를 초래했으며, 물리적인 영향으로 인한 직접적인 조직손상 및 폐사 등이 보고된 바 있다(Awbrey and Stewart, 1983; Myrberg 1990; Hastings and Popper, 2005).

어류에게 청각은 의사소통, 사냥, 포식자 감지 등의 활동을 위한 중요한 감각이며, 이러한 청각 능력은 내이, 부레, 측선 등의 해부학적 구조에 의해 좌우된다. 일반적으로 어류는 500Hz에서 1000Hz 사이의 주파수를 감지할 수 있지만 부레와 내이가 연결된 조직 구조를 가진 어종들은 부레가 없는 연골어류나 저서어류보다 높은 주파수(최대 3000Hz 이상)의 소리를 감지할 수 있다(Popper et al., 2003; Yoon et al., 2006). 이러한 어종 간 청감의 차이만큼이나 소음에 대한 감수성 및 생물학적 영향도 다르게 나타나는데, 청력이 민감한 종일수록 상대적으로 큰 피해와 영향이 확인되었다(Scholik and Yan, 2001; Amoser and Ladich, 2003; Smith et al., 2004). 그러나 기존의 연구들을 종합해보면 어종에 따라 수중소음에 대한 반응 및 영향은 많은 차이가 있기 때문에 어종별로 세분화된 면역학 및 생리학적 데이터와 분석이 필요한 실정이다.

이 연구는 풍력발전단지의 건설시 수중에서 발생하는 충격음에 대한 양식어종의 영향 및 피해를 평가하고자 2013년에 수행된 연구이며, 우리나라 양식 주력어종인 조피볼락(*Sebastes schlegelii*)을 대상으로 14일간 인위적인 소음에 노출 후 생리학적 및 면역학적 변화를 확인하고, 추가적인 인위감염 실험을 통해 10일간 생존력을 확인하여 소음 스트레스에 대한 면역학적 영향을 확인하고자 하였다.

Ⅱ. 재료 및 방법

1. 실험동물 및 소음자극

실험에 사용된 조피볼락은 지역양식장에서 생산된 미성어(평균전장: 15.8 ± 1.9 cm, 평균체중: 68.1 ± 26.7 g)를 구입하여 연구실의 사육시설에서 일주일간 순치시켰고, 건강상태를 확인하기 위해 세균검사를 실시하였다. 소음 자극실험은 순환여과방식으로 수온이 21℃로 유지되는 폭 1.0 m, 높이 1.2 m의 원통형 수조에서 수행하였으며, 대조구와 실험구의 수조는 서로 독립적인 공간에 설치하여 수조 당 40마리씩 실험어를 수용하였다. 수중소음 출력은 해상풍력단지의 항타작업 시 발생하는 소음의 주파수 대역을 증폭시켜 거리 감쇠를 고려한 뒤 음압이 조절되는 디지털 음원으로 제작하였고, 대조구 및 네 개의 실험구로 나누어 14일간 실험을 진행하였다. 이때 실험구의 소음기준은 2009년 중앙환경분쟁조정위원회에서 육상양식장을 대상으로 제시한 소음피해 인정기준치인 140 dB/μPa를 포함하는 125, 135, 145, 155 dB/μPa를 실험구로 설정해 연구를 수행하였다. 실험과정 시 발생하는 소음은 Hydrophone type 8105와 8106으로 측정하였고, 측정값을 실시간으로 모니터링하며 소음 출력을 조절하였다. 실험기간 동안 사료 급이는 하루에 1회 실시 하였으며, 이때 사용한 사료는 양식장에서 출하 시 사용하던 사료와 동일한 제품을 구입하여 이용하였다.

2. 혈청 분리 및 조직 적출

수중소음 스트레스에 대한 영향을 평가하기 위해 소음자극 후 1, 3시간, 3, 7, 14일 째 무작위로 3마리씩 선별하였고, benzocaine (Sigma-Aldrich,

USA)을 이용하여 안락사 시킨 뒤 샘플링을 진행하였다. 채혈은 1 ml 주사기를 이용하여 미부정맥을 통해 수행하였고, 상온에서 1시간, 4℃에서 24시간 동안 반응시킨 뒤 4,000 rpm으로 10분간 원심분리하여 혈청을 분리하였다. 또한 채혈이 완료된 검체에서 즉시 신장조직을 무균적으로 적출하였고, 실험에 사용하기 전까지 -80℃에서 보관하였다.

3. DNA microarray 분석

소음 스트레스에 의한 조피볼락 내 영향을 분자생물학적 분석으로 확인하기 위해 (주)지노믹트리에 의뢰하여 microarray chip 제작과 분석을 수행 하였으며, chip은 총 380가지의 DNA clone들을 Ultra GAPS2 slide (Corning Inc., USA)에 spotting하여 제작하였다. 유전자 발현분석을 위해 준비한 신장 샘플들은 TRIzol (Invitrogen, USA)을 이용하여 total RNA를 분리하였으며, Cy3 및 Cy5 monofunctional reactive dyes (GE Healthcare, UK)와 역전사(reverse transcription, RT)-PCR을 이용하여 표지한 후 제작한 chip과 hybridization하여 Genepix Pro 6.0 analysis software (Foster City, USA)를 통해 hybridization signal을 분석하였다. 유전자 발현분석 결과는 시각화를 위해 R studio version 4.1 (RStudio, PBC)을 이용해 heat map을 작성하였다.

4. 혈청성분 분석

분리한 혈청은 생화학분석기인 DRI-CHEM 4000i (Fujifilm, Japan)를 이용하여 albumin (ALB), glucose (GLU), glutamic oxalacetic transaminase (GOT), glutamic pyruvate transaminase (GPT), total cholesterol (TCHO)의 5가지 항목을 측정하였고, 혈중cortisol 농도는 Cortisol EIA Kit (Oxford Biomediacl Research, USA)와 Victor 3 microplate reader (Perkin Elmer, USA)를 이용하여 Hur et al.,(2006)의 방법에 따라 수행하였다.

5. 면역학적 분석

스트레스에 의한 혈청 내 비특이적 면역기능에 대한 영향을 확인하기 위해 대표적인 어병세균인 *Streptococcus iniae* FP5228을 이용하여 살균능을 확인하였다. *S. iniae*는 brain heart infusion (BHI) 액체 배지에 배양한 후 PBS 세척하였으며, 540 nm에서 흡광도를 측정하여 0.6이 되도록 PBS로 희석한 후 혈청과 1:1로 혼합하였고, 1시간 30분 동안 실온에서 반응시켰다. 그 후 단계별로 희석하여 BHI 평판배지에 도말하였고, 27℃에서 24시간 동안 배양한 뒤 세균의 집락수를 계수하였다.

6. 인위감염 및 폐사율 측정

소음 노출 후 세균성 질병에 대한 감수성 변화를 확인하기 위해 14일 간 소음에 노출된 실험어를 실험구당 20마리씩 무작위로 선별한 뒤 *S. iniae*를 5×10^6 CFU/mL의 농도로 PBS에 희석하여 100 μL씩 복강 주사하였고, 인위감염 후 21℃에서 10일간 절식시키며 누적폐사율을 관찰하였다.

7. 통계처리

실험결과에서 샘플 및 그룹 간 유의성을 평가하기 위해 SPSS 19.0 프로그램(IBM, USA)을 이용하여 one-way ANOVA와 Duncan's multiple test로 분석하였으며, $*P < 0.05$ 수준에서 유의적인 차이를 검정하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

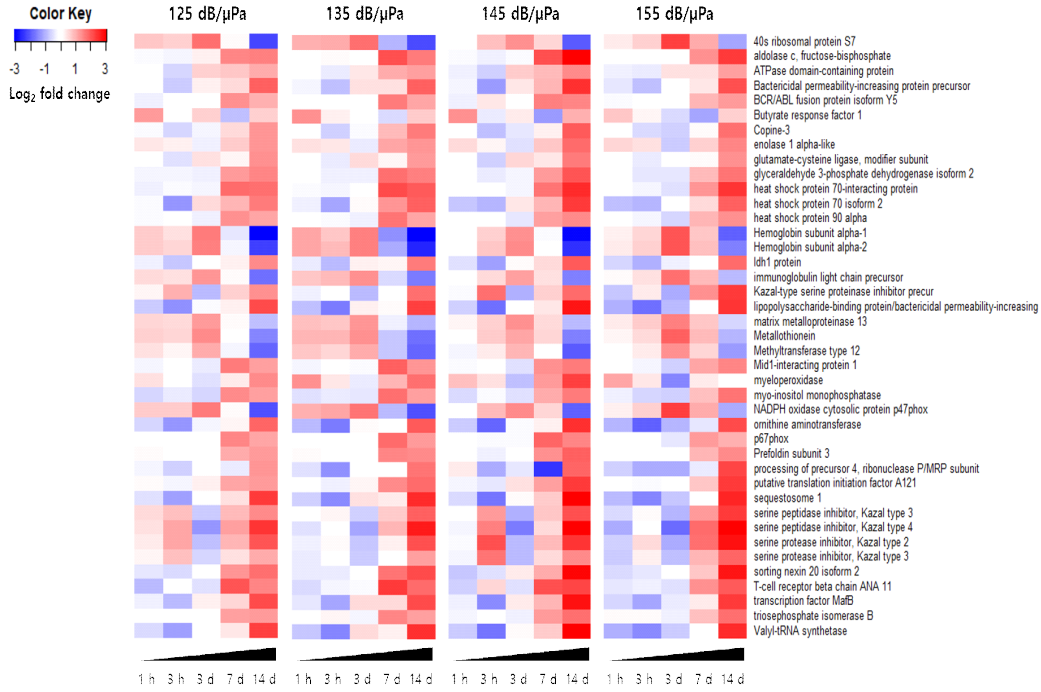
1. 소음 스트레스에 의한 유전자 발현 변화

소음 음압 레벨별 자극시간 경과에 따른 유전자발현 변화를 분석한 결과 380개의 분석대상 유전자 중 각각 53개(125 dB/μPa), 80개(135 dB/μPa), 49개(145 dB/μPa), 56개(155 dB/μPa)의 유전자에서 유의적인 발현변화가 확인되었고, 이

중 공통적으로 확인된 41개 유전자의 발현변화는 heat map으로 나타내었다([Fig. 1]). 결과적으로 스트레스 반응 및 면역관련 유전자들은 대부분 자극 시간이 경과될수록 발현이 증가하여 14일째 가장 높은 수준으로 발현했고, 특히 내이발달 및 유모세포와 연결된 청각신경의 형성을 유도하는 MAF BZIP transcription factor B와 유모세포의 손상을 보호하는 heat shock protein 70 유전자의 발현 또한 14일째 가장 많이 발현되었다(Cordes and Barsh, 1994; Konings et al., 2008; Yu et al., 2013).

2. 소음 스트레스에 의한 혈청성분의 변화

소음은 어류에서 내분비계 스트레스 반응을 유발시키며, 항상성유지를 위해 다양한 생리적인 적응기전이나 보상작용이 발생하지만 스트레스가 심각하거나 오래 지속될 경우 성장, 면역기능, 생식, 행동의 변화가 초래될 수 있고, 반면 약한 스트레스에 지속적으로 노출되면 신경내분비 및 대사반응을 약화시킬 수도 있다(Sverdrup et al., 1994; Reid et al., 1998; Santulli et al., 1999). 우리는 소음 스트레스에 대한 어류 내 내분비계 변화를 확인하기 위해 6가지의 관련 항목(ALB, GLU, GOT, GPT, TCHO, cortisol)을 측정하였다(<Table 1>). 먼저 조피볼락 혈청 내 ALB의 수치는 135 dB/μPa의 소음노출 3시간과 7일 경과 후 대조구에 비해 유의적인 증가를 보였지만, 3일째에는 유의적인 감소가 나타났다. 포유류에서 혈청 내 ALB의 수치는 염증, 쇼크, 영양부족 등의 지표로 알려져 있으며, 어류에서도 소음 스트레스 관련 지표로 입증되었다. Shim and Han(2008)의 연구에서 조피볼락은 212 dB/μPa의 강력한 소음으로



[Fig. 1] Heat map showing the expression levels of 41 genes with patterns according to sound pressure after noise stimulation. The calculated log2 fold change compared to the control sample; red indicates up-regulated expression, and blue indicates down-regulated expression.

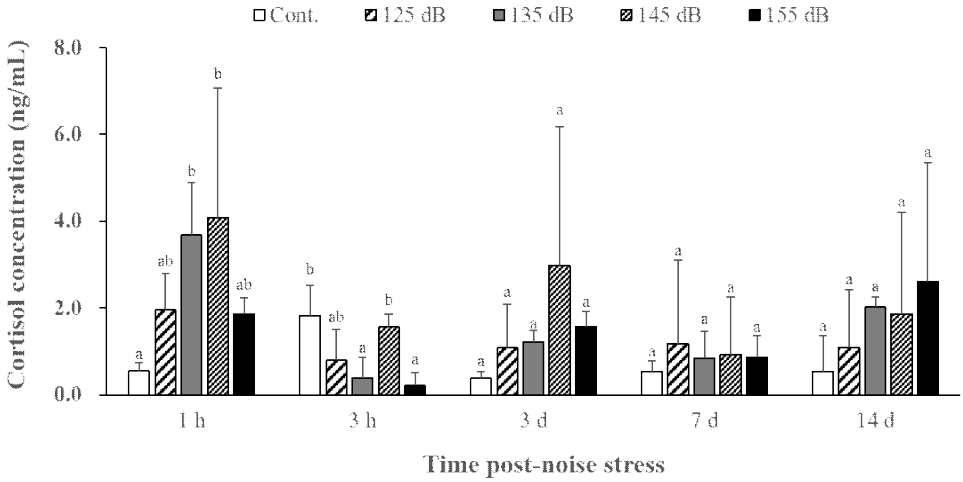
<Table 1> Clinical biochemistry tests including ALB, GLU, GOT, GPT and TCHO in Korean rockfish.

Time course	Serum assay						Total length (cm)	Body weight (g)
	Decibel levels	ALB (g/dL)	GLU (mg/dL)	GOT (U/L)	GPT (U/L)	TCHO (mg/dL)		
1 h	Control	1.4±0.1^{a}	5.7±4.6^{a}	11.3±2.3^{a}	10.3±4.7^{a}	291.0±55.7^{a}	15.5±0.9^{ab}	62.5±17.0^{ab}
	125 dB	1.1±0.4^{a}	30.0±31.2^{a}	18.0±8.9^{a}	6.0±5.0^{a}	202.7±38.9^{a}	14.8±1.6^{ab}	47.4±17.5^{ab}
	135 dB	1.5±0.4^{a}	4.7±1.5^{a}	33.0±21.0^{a}	4.3±0.6^{a}	291.0±82.2^{a}	16.9±1.9^{b}	80.5±28.6^{b}
	145 dB	1.5±0.0^{a}	18.3±13.1^{a}	21.7±9.5^{a}	8.0±3.0^{a}	281.3±28.4^{a}	14.0±1.4^{a}	46.2±14.3^{ab}
	155 dB	1.4±0.2^{a}	22.0±17.1^{a}	46.7±37.9^{a}	8.7±8.0^{a}	264.3±80.4^{a}	13.4±1.0^{a}	40.6±7.7^{a}
3 h	Control	1.2±0.2^{ab}	1.7±0.6^{a}	10.0±2.6^{a}	6.1±1.0^{a}	298.0±84.1^{a}	15.2±1.0^{a}	68.5±14.5^{a}
	125 dB	1.4±0.1^{bc}	6.7±8.1^{a}	14.7±0.6^{ab}	11.0±9.5^{a}	302.7±34.5^{a}	15.5±1.0^{a}	55.3±7.8^{a}
	135 dB	1.5±0.1^{c}	2.7±0.6^{a}	18.0±4.6^{b}	3.0±0.0^{a}	409.0±8.5^{a}	15.3±2.0^{a}	68.7±25.2^{a}
	145 dB	1.2±0.1^{ab}	3.0±0.0^{a}	16.0±5.6^{ab}	3.0±0.0^{a}	340.7±93.6^{a}	16.1±0.8^{a}	69.1±8.4^{a}
	155 dB	1.1±0.1^{a}	2.3±0.6^{a}	14.0±3.5^{ab}	5.0±2.6^{a}	371.0±75.0^{a}	16.1±0.9^{a}	78.9±8.4^{a}
3 d	Control	1.0±0.1^{a}	4.3±1.2^{a}	16.7±0.6^{a}	7.7±0.6^{a}	316.0±33.0^{a}	15.4±2.0^{a}	66.5±24.3^{a}
	125 dB	1.0±0.1^{a}	2.7±0.6^{a}	22.0±3.5^{a}	9.7±3.2^{a}	360.0±61.9^{a}	15.3±0.9^{a}	57.7±12.6^{a}
	135 dB	0.3±0.0^{b}	6.7±5.5^{a}	27.7±13.6^{a}	6.3±2.3^{a}	329.5±102.5^{a}	15.5±2.0^{a}	66.3±30.8^{a}
	145 dB	1.1±0.2^{a}	10.7±9.0^{a}	19.0±8.9^{a}	9.3±7.6^{a}	309.3±70.3^{a}	15.0±0.7^{a}	52.1±13.2^{a}
	155 dB	0.9±0.1^{a}	8.3±11.8^{a}	22.0±20.0^{a}	9.0±8.7^{a}	286.7±65.3^{a}	15.2±1.1^{a}	56.5±11.8^{a}
7 d	Control	1.1±0.1^{ab}	2.0±0.0^{a}	15.7±4.7^{a}	5.3±1.5^{a}	427.3±16.0^{b}	16.5±0.7^{ab}	86.5±8.9^{bc}
	125 dB	1.0±0.2^{a}	2.0±0.0^{a}	15.7±4.9^{a}	9.3±1.5^{a}	270.0±141.0^{ab}	15.7±2.1^{ab}	66.9±29.5^{abc}
	135 dB	1.3±0.0^{c}	2.3±0.6^{a}	12.3±1.2^{a}	7.3±2.5^{a}	344.7±84.3^{ab}	17.8±2.3^{b}	92.6±32.9^{c}
	145 dB	1.1±0.2^{ab}	3.3±1.5^{a}	13.0±3.6^{a}	8.0±1.0^{a}	228.7±98.4^{a}	14.5±1.5^{a}	50.5±16.7^{ab}
	155 dB	1.1±0.2^{ab}	16.3±24.0^{a}	25.3±13.6^{a}	5.7±3.1^{a}	249.3±61.2^{a}	13.6±0.2^{a}	40.4±1.0^{a}
14 d	Control	1.2±0.1^{a}	15.7±19.5^{a}	5.7±0.6^{a}	5.7±0.6^{a}	311.0±66.5^{a}	16.5±1.2^{a}	80.4±13.8^{a}
	125 dB	0.9±0.8^{a}	3.0±2.0^{a}	8.0±2.6^{a}	8.0±2.6^{a}	211.0±121.2^{a}	17.5±1.9^{a}	85.7±25.8^{a}
	135 dB	1.0±0.4^{a}	3.3±1.5^{a}	9.0±2.6^{a}	9.0±2.6^{a}	242.0±126.6^{a}	17.4±3.7^{a}	89.8±53.5^{a}
	145 dB	1.0±0.0^{a}	2.7±1.2^{a}	8.3±3.1^{a}	8.3±3.1^{a}	266.7±127.3^{a}	16.3±1.0^{a}	73.0±12.4^{a}
	155 dB	1.0±0.6^{a}	2.3±0.6^{a}	7.3±2.5^{a}	7.3±2.5^{a}	211.0±148.1^{a}	19.8±3.3^{a}	119.93±54.4^{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 ± S.D. for three fish. Significant differences were noted at $*P < 0.05$ when compared to the control group.

12시간 동안 노출된 결과 ALB 농도는 유의적인 변화가 관찰되지 않은 반면 장어는 212 dB/μPa의 소음에 의해 1시간 내 유의적으로 감소되었다 (Shim and Han, 2008; Park et al., 2011). 또 다른 대표적인 스트레스 지표인 GLU의 농도는 대조구에 비해 높게 측정되었지만 개체별 차이로 인해 유의적인 차이는 확인되지 않았다. 이전의 연구에서 장어의 GLU는 30분 만에 유의적으로 발현이 증가하였고, 조피볼락에서도 소음 스트레스를 가한 직후부터 유의적인 증가가 나타났다(Shim and Han, 2008; Park et al., 2011). GPT와 GOT효소는 간 건강의 대표적인 지표로써 이들의 혈액 내 증가는 간의 괴사, 조직변성, 단백질 대사변화 등을 예측할 수 있다(Bruslé and Anadon, 1996). 이번 연구에서 GPT 수치는 유의적인 변화가 관찰되지 않았지만 GOT는 135 dB/μPa의 소음에 노출 후 3시간째 유의적으로 증가한 이후 대조구 수준으로 회복되었다. TCHO 수치는 노출 7일째 145 dB/μPa와 155 dB/μPa 그룹에서 일시적으로 유의적인 감소를 보였지만 7일 후 측정결과에서는 다시 회복되었고, 실험어의 전장 및 체중 변화 또한 실험이 종료된 14일차에 유의적인 변화



[Fig. 2] Changes in serum cortisol levels of Korean rockfish according to exposure time to noise stress. Data are presented as means ± S.D. for three fish. Significant differences were noted at $*P < 0.05$ when compared to the control group.

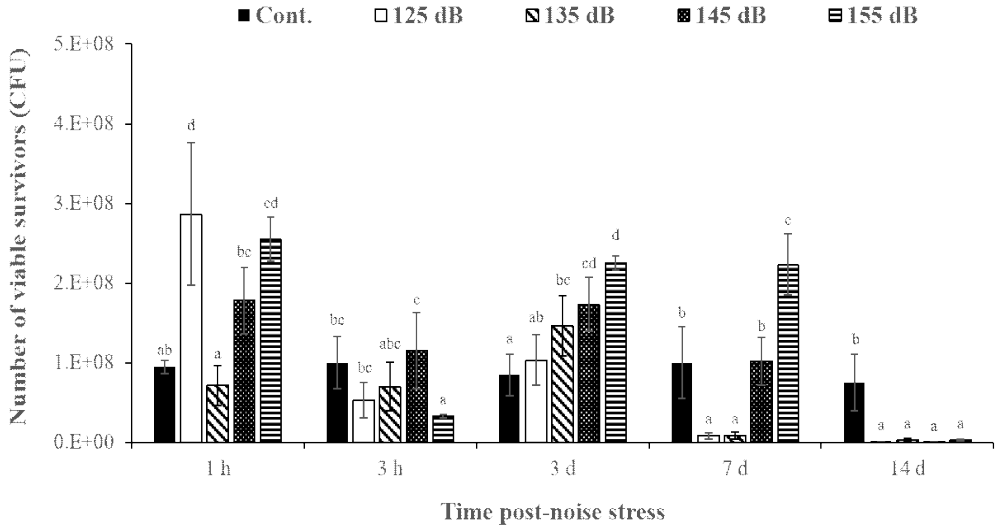
가 나타나지 않았기 때문에 결과적으로 소음 스트레스가 조피볼락의 사료 섭이, 영양상태, 성장에는 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다.

어류의 3단계 스트레스 반응 중 첫 번째 반응은 시상하부-뇌하수체-신장 축의 활성에 따라 cortisol 호르몬의 분비량이 증가되는 것이며, 스트레스로 과다 분비된 cortisol은 성장 및 번식의 억제, 배아발달 방해 등 어류에 부정적인 영향을 유발할 수 있다(Sturmhofel and Bartke, 1998; Schreck et al., 2001; Nesan and Vijayan, 2012). 또한 면역체계는 신경내분비계와 밀접하게 연결되어있어 경골어류의 면역 반응을 조절하는데, 증가된 cortisol은 사이토카인의 생성을 억제시켜 세포성 면역반응의 저하를 유도할 수도 있다(Holland et al., 2003; Saeij et al., 2003; Castillo et al., 2009). 일반적으로 안정적인 상태의 어류 체내 cortisol 농도는 5 ng/mL 이하로 측정된다고 보고되어 있으며, 우리의 연구에서도 대조구의 cortisol 농도는 위와 유사한 수준으로 측정되었다(Pickering and Pottinger, 1989). 그러나 소음 자극 후 1시간째 모든 실험구에서는 혈청 내 corisol 농도가 상승했고, 특히 135 dB/μPa와 145 dB/μPa의 실험구에서 유의적인 증가가 나타났다. 이후 3시간째 측정에서는 corisol 농도가 감소했으며, 특히 135 dB/μPa와 155 dB/μPa의 소음 구간에서 유의적인 감소가 나타났다([Fig. 2]).

이전의 연구에서 212 dB/μPa의 강한 소음에 의해 장어와 조피볼락 내 corisol 농도는 GLU와 함께 자극 직후부터 유의적인 발현 증가가 나타났고(Shim and Han, 2008; Park et al., 2011), 우리의 연구에서도 GLU 수치는 자극 1시간째 비교적 가장 높게 상승했다. 결과적으로 혈청학적 분석결과에서는 개체간의 차이로 인해 일부 측정 결과에서 통계적인 유의성이 나타나지 않았지만 스트레스 관련 지표인 GLU와 cortisol의 발현이 초기에 상승했고, 이후에는 지속적인 소음 스트레스에 대한 적응으로 인해 대조구 수준으로 수치들이 안정화된 것으로 생각된다.

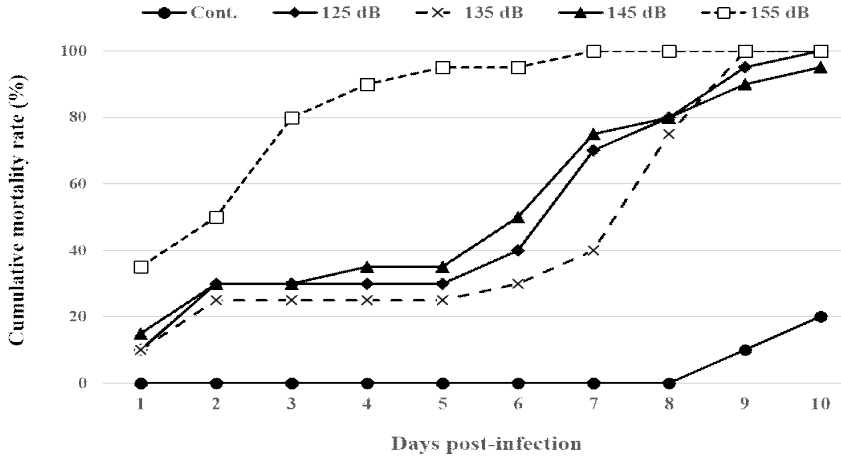
3. 소음 스트레스에 의한 면역 활성 변화

혈청의 살균활성 평가결과에서는 소음자극에 의해 1시간째 125 dB/μPa와 155 dB/μPa 그룹에서 살균능이 유의적으로 감소하였으며, 3시간째에는



[Fig. 3] Serum antibacterial activity against *Streptococcus iniae* after noise exposure. Data are presented as means ± S.D. for three fish. The difference in the survival rate between the control group and the treatment group was statistically significant at $*P < 0.05$.

155 dB/μPa 그룹에서 유의적인 증가가 나타난 뒤 3일째에는 125 dB/μPa을 제외한 모든 그룹에서 유의적으로 감소했다([Fig. 3]). 이후 7일째에는 125 dB/μPa와 135 dB/μPa 그룹에서 유의적인 증가와 155 dB/μPa 그룹에 감소가 나타났으며, 14일째에는 모든 실험구의 살균능이 유의적으로 증가하였다. 결과적으로 소음 스트레스에 의해 모든 실험구에서 혈청 항균능이 일시적으로 감소했으며, 특히 고음압 실험구인 145 dB/μPa와 155 dB/μPa에서 더욱 저하된 항균능을 확인할 수 있었다. 그러나 자극 14일째 모든 실험구에서 높은 항균활성이 나타났으며, 이러한 결과는 [Fig. 1]에



[Fig. 4] The cumulative mortality rate for 10 days in Korean rockfish artificially infected with *Streptococcus iniae* after 14 days of noise exposure.

서 확인된 스트레스 관련유전자 및 단백질 가수분해효소 관련 유전자의 발현 증가가 혈청 내 항균활성 인자로써 작용했거나 일시적으로 발생한 보상메커니즘으로 판단된다(Basu et al., 2002; Johnson and Pellecchi, 2006; Kim et al., 2009; Zhang et al., 2020).

소음 스트레스에 의한 직접적인 면역학적 영향을 확인하기 위해 수행한 인위감염 실험에서는 *S. iniae* 감염에 의해 고음압 실험구인 155 dB/μPa에서 감염 1일째부터 가장 급격한 폐사가 일어났고, 나머지 실험구에서도 10일째 90%이상의 폐사율이 나타났다([Fig. 4]).

반면 대조구에서는 감염 8일째까지 폐사가 나타나지 않았고, 마지막 10일째 총 20%의 폐사율을 기록했다. 이전 연구결과 소음 스트레스는 지속시간과 강도에 따라 다른 면역반응을 유도했고, 경골어류에서도 장시간의 소음 노출은 숙주의 면역력 감소와 질병 발생에 대한 감수성 증가로 나타났다(McCarthy et al., 1992; Pascuan et al., 2014; Madakkannu and Ravichandran, 2017; Masud et al., 2020). 이러한 결과들은 풍력발전소 건설 시 발생하는 소음이 조피볼락의 면역체계에 부정적인 영향을 미칠 수 있음을 의미하며, 소음관리 기준인 140 dB/μPa 이하의 음압에도 지속적인 노출에 의해 면역체계가 손상되어 질병유행 시 치명적인 대량폐사가 발생할 수 있음을 시사한다.

Ⅳ. 결 론

소음 스트레스에 의한 조피볼락의 혈청성분을 분석결과에서 확인된 ALB, GOT, TCHO, cortisol의 유의적인 변화는 소음의 강도 및 노출시간과의 명확한 상관관계가 확인되지 않았고, 실험이 종료된 14일차에는 모든 혈청학적 검사항목에서 대조구와 실험구간의 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 그러나 추가적인 인위감염 실험을 통해 확인된 세균성 질병에 대한 증가된 감수성과 폐사율은 소음 스트레스가 조피볼락의 면역력 저하에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되며, 이러한 결과는 조피볼락 사육 시 주변 소음에 대한 적극적인 관리가 필요할 것으로 사료된다.

References

Amoser S and Ladich F(2003). Diversity in noise-induced temporary hearing loss in otophysine fishes. J Acoust Soc Am 113, 2170~2179. https://doi.org/10.1121/1.1557212

Awbrey FT and Stewart BS(1983). Behavioral responses of wild beluga whales (*Delphinapterus leucas*) to noise from oil drilling. J Acoust Soc Am 74(S1), S54. https://doi.org/10.1121/1.2021025

Basu N, Todgham AE, Ackerman PA, Bibeau MR, Nakano K, Schulte PM and Iwama GK(2002). Heat shock proteins genes and their functional significance in fish. Gene 295, 173~183. https://doi.org/10.1016/s0378-1119(02)00687-x

Bruslé J and Anadon GGI(1996). The Structure and Function of Fish Liver. Fish morphology 76, 545~551.

Castillo J, Teles M, Mackenzie S and Tort L(2009). Stress-related hormones modulate cytokine expression in the head kidney of gilthead seabream (*Sparus aurata*). Fish Shellfish Immunol 27(3), 493~499. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2009.06.021

Cordes SP and Barsh GS(1994). The mouse segmentation gene kr encodes a novel basic domain-leucine zipper transcription factor. Cell 79(6), 1025~1034. https://doi.org/10.1016/0092-8674(94)90033-7

Hastings MC and Popper AN(2005). Effects of Sound on Fish. California Department of Transportation Contract 43A0139, Task Order 1.

Holland JW, Goulds CRW, Jones CS, Noble LR and Secombes CJ(2003). The expression of immune-regulatory genes in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, during a natural outbreak of proliferative kidney disease (PKD). Parasitology 126, S95~S102. https://doi.org/10.1017/S0031182003003767

Hur JW, Lee JY, Kim YH, Park IS and Chang

YJ(2006). Effects of Salinity on Hematological Changes and Survival of Cultured Olive Flounder, *Paralichthys olivaceus*. Korean J Environ Biol 24(4), 380~386.

Johnson SL and Pellecchia M(2006). Structure- and fragment-based approaches to protease inhibition. Curr Top Med Chem 6, 317~329. https://doi.org/10.2174/156802606776287072

Kim JY, Park SC, Hwang I, Cheong H, Nah JW, Hahm KS and Park Y(2009). Protease Inhibitors from Plants with Antimicrobial Activity. Int J Mol Sci 10(6), 2860~2872. https://doi.org/10.3390/ijms10062860

Konings A, Van Laer L, Michel S, Pawelczyk M, Carlsson PI, Bondeson ML, Rajkowska E, Dudarewicz A, Vandevelde A, Fransen E, Huyghe J, Borg E, Sliwinska-Kowalska M and Van Camp G(2008). Variations in HSP70 genes associated with noise-induced hearing loss in two independent populations. Eur J Hum Genet 17(3), 329~335. https://doi.org/10.1038/ejhg.2008.172

Madakkannu B and Ravichandran R(2017). In vivo immunoprotective role of *Indigofera tinctoria and Scoparia dulcis* aqueous extracts against chronic noise stress induced immune abnormalities in Wistar albino rats. Toxicol Rep 4, 484~493. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.09.001

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(9), 200172. https://doi.org/10.1098/rsos.200172

McCarthy DO, Ouimet ME and Daun JM(1992). The effects of noise stress on leukocyte function in rats. Res Nurs Health 15(2), 131~137. https://doi.org/10.1002/nur.4770150207

Musgrove PJ(1987). Wind energy conversion: recent progress and future prospects. Sol Wind Technol 4(1), 37~49. https://doi.org/10.1016/0741-983X(87)90006-3

Myrberg Jr AA(1990). The effects of man-made noise on the behavior of marine animals. Environ Int 16(4-6), 575~586. https://doi.org/10.1016/0160-4120(90)90028-5

Park YC, Kang YJ, Jeon HJ, Han KN, Baek JM, Lee WO and Kim JH(2011). Noise-induced Stress Response on Cortisol, Glucose, albumin and Glucocorticoid Receptor Expression in the Japanese eel, *Anguilla japonica*. Kor J Env Eco 25(6), 853~860.

Pascuan CG, Uran SL, Gonzalez-Murano MR, Wald MR, Guelman LR and Genaro AM(2014). Immune alterations induced by chronic noise exposure: comparison with restraint stress in BALB/c and C57Bl/6 mice. J Immunotoxicol 11(1), 78~83. https://doi.org/10.3109/1547691X.2013.800171

Pickering AD and Pottinger TG(1989). Stress responses and disease resistance in salmonid fish: Effects of chronic elevation of plasma cortisol. Fish Physiol Biochem 7, 253~258. https://doi.org/10.1007/BF00004714

Popper AN, Fay RR, Platt C and Sand O(2003). Sound detection mechanisms and capabilities of teleost fishes. Sensory Processing in Aquatic Environments 3~38. https://doi.org/10.1007/978-0-387-22628-6_1

Reid SG, Bernier NJ and Perry SF(1998). The adrenergic stress response in fish: Control of catecholamine storage and release. Comp Biochem Physiol 120(1), 1~27. https://doi.org/10.1016/S0742-8413(98)00037-1

Saeij JP, Verburg-van Kemenade LB, van Muiswinkel WB and Wiegertjes GF(2003). Daily handling stress reduces resistance of carp to *Trypanoplasma borreli*: in vitro modulatory effects of cortisol on leukocyte function and apoptosis. Dev Comp Immunol 27, 233~245. https://doi.org/10.1016/s0145-305x(02)00093-9

Santulli A, Modica A, Messina C, Ceffa L, Curatolo A, Rivas G, Fabis G and Damelio V(1999). Biochemical responses of European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) to the stress induced by of shore experimental seismic prospecting. Mar Pollut Bull 38, 1105~1114. https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00136-8

Scholik AR and Yan HY(2001). Effects of underwater noise on auditory sensitivity of a cyprinid fish. Hear Res 152(1-2), 17~24. https://doi.org/10.1016/s0378-5955(00)00213-6

Shim MK and Han KN(2008). Effects of Noise Stress on Cortisol and Glucocorticoid Receptor

Expression of Korean Rockfish, *Sebastes schlegeli*. Korean Journal of Ichthyology 20(3), 149~155.

Sverdrup A, Kjellsby E, Kruger PG, Floysand R, Knudsen FR, Enger PS, Serck-Hanssen G and Helle KB(1994). Effects of experimental seismic shock on vasoactivity of arteries, integrity of the vascular endothelium and on primary stress hormones of the Atlantic salmon. J Fish Biol 45, 973~995. http://dx.doi.org/10.1111/j.1095-8649.1994.tb01067.x

Wenzhou L, Changqing C and Zhuo Z(2011). Design of a Large Scale Wind Turbine Generator Set Yaw System. IEEE Inter Conf on Computer Science and Education Singapore August 2011. https://doi.org/10.1109/ICCSE.2011.6028785

Yoon JR, Lee SW, Ahn SY, Park JH, Bae JW and Ahn MS(2006). Effects of Underwater Noise on Fishes. Trans Korean Soc Noise Vib 16, 739~746.

Yu WM, Appler JM, Kim YH, Nishitani AM, Holt JR and Goodrich LV(2013). A Gata3–Mafb transcriptional network directs post-synaptic differentiation in synapses specialized for hearing. eLife 2, e01341. https://doi.org/10.7554/eLife.01341

Zhang A, Zou T, Guo D, Wang Q, Shen Y, Hu H, Ye B and Xiang M(2020). The Immune System Can Hear Noise. Front Immunol 11, 619189. https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.619189

• Received : 16 September, 2021
• Revised : 18 October, 2021
• Accepted : 22 October, 2021