



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](#)

석사학위논문

제주 서부 연해 수중 주변소음과 딱총새우 소리 특성

제주대학교 대학원

지구해양융합학부 해양시스템공학전공

정 인 용

2022년 8월



제주 서부 연해 수중 주변소음과 딱총새우 소리 특성

지도교수 팽동국


정인용

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2022년 8월

정인용의 공학석사 학위논문을 인준함

심사위원장 조일형 

위 원 팽동국 

위 원 장수진 

제주대학교 대학원

2022년 8월



Ocean ambient noise and snapping shrimp sound characteristics in the west coastal sea of Jeju Island

Inyong Jeong

(Supervised by Professor Dong-Guk Paeng)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Engineering

2022. 8

Department of Ocean System Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

ACKNOWLEDGEMENTS	iii
LIST OF FIGURES	v
LIST OF TABLES.....	viii
요약문	ix
ABSTRACT.....	xi
제 1 장 서론.....	1
1.1 연구배경	1
1.2 제주 연해에서 수중 주변소음에 영향을 주는 해양환경 요인.....	4
1.3 딱총새우 소리의 특징	6
제 2 장 제주 연해에서 해양 환경에 따른 수중주변소음 변화.....	9
2.1 개요	9
2.2 실험 및 방법.....	10
2.2.1 연구해역 및 측정 방법.....	10
2.2.2 주파수 대역별 수중 주변소음 분석	12
2.3 결과	13
2.3.1 조석에 의한 주변소음 변화.....	15
2.3.2 파랑에 의한 주변소음 변화.....	18

2.3.3 바람에 의한 주변소음 변화.....	21
2.3.4 강우에 의한 주변소음 변화.....	24
2.4 토의	26
제 3 장 제주 연해에서 딱총새우 소리 일주기 특성과 조석주기 특성 분석	28
3.1 개요	28
3.2 실험 및 방법.....	29
3.2.1 스넵 탐지와 분석	29
3.2.2 웨이블릿 변환 (Wavelet Transform) 분석	31
3.3 결과	32
3.3.1 딱총새우 소리의 일주기 특성.....	33
3.3.2 딱총새우 소리 조석주기 특성.....	35
3.4 토의	38
제 4 장 결론	40
참고문헌	

ACKNOWLEDGEMENTS

*“지혜 있는 자는 강하고 지식 있는 자는 힘을 더하리니, 이는 지혜를 얻는
것이 은을 얻는 것보다 낫고 그 이익이 정금보다 나음이니라”*

(잠언 3:14, 24:5)

그저 막연한 호기심으로 시작한 학업의 길은 결코 만만하고 쉬운 길은 아니었습니다. 대학원 입학 후 2년 6개월이란 시간이 흘러 이 한 권의 논문으로 석사과정의 마침표를 찍으려니 시원섭섭한 마음 가득합니다. 연구실 생활을 하며 자연에 대한 탐구와 문제를 해결하는 다양한 사고방식들에 대해서 생각하며 경험할 수 있었고 편협한 사고를 확장하여 폭을 넓힐 수 있는 좋은 기회였습니다.

연구활동을 하며 문제를 해결하는 자세와 연구의 성취감을 일깨워 주셨으며, 일과 가정 그리고 학생들을 대하는 모습을 보며 본받고 싶은 저의 지도교수 팽동국 교수님, 선배 연구자로서 아낌없는 격려와 학문적 호기심을 자극해 주신 조일형 교수님 그리고 필드에서 같이 연구활동을 하며 학문에 대한 열정과 책임감이 무엇인지 몸소 일깨워 주신 장수진 박사님께 진심으로 감사드립니다. 저에게 대학원 시절은 학문의 즐거움과 배우고 성장하는 기쁨으로 더없이 소중한 시간이었습니다.

그리고 부족한 아들을 믿고 물심양면으로 밀어주신 어머니의 무한한 사랑에 진심으로 감사드립니다.

대학원 석사과정을 되돌아볼 때 부족한 자신으로 인해 아쉬움이 남지만, 이 뜻깊은 시간을 통해 지식뿐만 아니라 삶을 대하는 자세를 배웠습니다. 항상 최선을 다해 부단히 노력하며 사회에 공헌할 수 있는 사람이 될 수 있도록 계속해서 성장하고 발전하도록 하겠습니다.

감사합니다.

LIST OF FIGURES

Figure 1 Wenz curve [1].....	1
Figure 2 The wind turbine is being repaired at an offshore wind farm in Jeju.	4
Figure 3 Morphology of alpheids and their snapping claw in comparison to selected fossil specimens. (A) Dorsal view of <i>Alpheus rugimanus</i> , in life. (B) Dorsal view of the assymetrical chelipeds of <i>Alpheus websteri</i> , in life[2]. (C) Hydrophone signal of a snap by an <i>A. heterochaelis</i> female measured at a distancer = 4 [3]. (D) A sequence of high-speed images in top view showing the closure of the snapper claw taken at 25- μ s intervals [4].	6
Figure 4 The location of the hydrophone installation.(A) Hankyung-myeon area in the western region of Jeju Island (Red mark: 33°19'48.9"N 126°08'59.7"E) and Moseulpo Tidal station (Yellow mark: 33°12'50.8"N 126°15'04.5"E); (B) Schematic diagram of the installation of a hydrophone (SM3M, Wildlife Acoustics) at the depth of 10 m from the seabed.; (C) Picture of Hydrophon installation nearby wave generator.....	10
Figure 5 Mean PSD during the whole measurement period. (red dot line & blue line: standard deviation of PSD).....	13
Figure 6 Ambient noise level due to tide in area W. (A) Mean PS by hour and day. (x symbols: low tide time, * symbols: high tide time), (B) mean PS by hour with peak envelope smoothed by 6 hours. (○: Full moon, ●: New moon).....	15
Figure 7 Comparison of ambient noise levels at low tide and high tide. (A) ambient noise level changes over time; (B) The quartile of the ambient noise level at low tide and high tide.....	16
Figure 8 FFT of daily mean PS(25 ~ 100 Hz) & tide level.....	16
Figure 9 Mean PS (25 ~ 100 Hz) & tide level	17
Figure 10 Ambient noise level over 25 Hz ~ 1 kHz frequency band due to wave height during	

11.1 ~ 12.15 in 2019. (White line: Mean PSD, Black line: standard deviation of PSD).....	18
Figure 11 Mean PS (25 Hz ~ 1 kHz) & wave hight	19
Figure 12 Ambient noise level over 100 Hz ~ 10 kHz frequency band due to wind speed in 9.11 ~ 10.25. (White line: Mean PSD, Black line: standard deviation of PSD). .	21
Figure 13 Mean PS (100 Hz ~ 10 kHz) & wind speed.	22
Figure 14 Ambient noise level over 10 ~ 48 kHz frequency band due to rainfall in 9.11 ~ 10.25. (White line: Mean PSD, Black line: standard deviation of PSD).	24
Figure 15 Spectrogram of clear days(A) and rainy days(B)	25
Figure 16 The snapping srimph sound signal (black color) & example of score calculated snapping shrimp sound.....	29
Figure 17 Score calculation and snapping shrimp sound detection method.	30
Figure 18 Long-term trends of snap rate (black color), water temperature (red color), and tide level (blue color). White and dark circles are the full moon and new moon, respectively.....	32
Figure 19 Circadian pattern of the snap rate of snapping shrimp	33
Figure 20 Circadian pattern of the snap rate of snapping shrimp. (A) Mean and standard deviation of the snap rates in a day, (B) The percentage excess snap rate in a day.	34
Figure 21 The tidal pattern of the snap rate of snapping shrimp.....	35
Figure 22 (b) Mean snap rates and standard deviations at high and low tides show significant differences at the 1st and 2nd half periods, (c) Fast Fourier Transform (FFT) of snap rate and tidal level.....	36
Figure 23 Wavelet transform analysis of snap & tide level. (○: Full moon, ●: New moon)..	37
Figure 24 Ambient noise curve in the coastal sea of Jeju. (gray dot line) Limits of prevailing	

noise at the coastal sea of Jeju, (red dash line) Limits of prevailing noise at Wenz
curve..... 40

LIST OF TABLES

Table 1 Noise according to over frequency range..... 12

요약문

본 연구는 풍력, 파력발전기가 설치되는 서부 연해 수심 20 m 정점에서 4 개월(2019 년 9 월 11 일 ~ 2019 년 12 월 15 일)동안 수중 청음기를 중층(10 m)에 계류하여 주변소음을 측정하였다. 수중소음레벨에 영향을 미치는 기상인자는 측정 해역 근처 기상대와 관측소에서 자료를 수집하였다. 저주파대역(~ 100 Hz)은 조석 영향으로 간조와 만조, 조금과 사리일 때 약 5 dB ~ 20 dB 가량 변화를 보였다. 파랑과 바람 영향은 중주파대역(~ 1 kHz)에서 25 dB 이내로 큰 변화를 보였으며 파랑은 바람에 비해 상대적으로 낮은 주파수대역(~ 300 Hz)에 영향을 주었고 바람은 1 kHz 이상 고주파 대역까지도 영향을 주었다. 고주파대역(10 kHz ~)에 영향을 주는 요인으로 강우와 생물 소음이 있고 웬즈 곡선(Wenz curve) 최대값에 비해 약 10 dB 높게 측정되었다.

그리고 천해에서 고주파대역 주요 소음원인 딱총새우 소리를 일주기와 조석주기 패턴을 분석하였다. 딱총새우 소리를 식별하기 위해 커널 신호와 임계값을 활용하여 분당 스냅율(snap rate)로 정량적 분석을 했다. 그 결과 전체 측정 기간(2019 년 9 월 11 일 ~ 2019 년 12 월 15 일) 동안 제주 서부 연해에서 스냅율 평균 및 표준 편차는 분당 2132 ± 432 인 것으로 나타났다. 표층 수온과 조위는 90 일 동안 각각 25°C 에서 7°C, 190cm 에서 50cm 감소 추세를 보였다. 9 월부터 11 월까지 시간이 지남에 따라 수온이 1°C 가 감소할 때마다 스냅율은 분당 71 회 감소했는데 이는 수온과 조위변화에 따른 현상으로 추정되고, 일출과 일몰 때 낮 평균 대비 17~24% 증가하는 일주기 특성을 보였다. 만조 때 스냅율은 간조 때 스냅율보다 평균 13% 높았다.

본 연구는 딱총새우 소리가 수중 주변 소음에 일주기 특성과 및 조석주기 특성에 따라 변화가 있음을 보였고 해양 환경에 따른 수중주변소음 변화를 분석하여

제주형 웬즈곡선을 제시하였다. 이를 통해 제주 연해에서 수중주변소음 선행 연구로서 딱총새우의 생태학적 행동을 위한 주요 자료와 해안개발 환경영향평가 등 평가 기준자료로 사용할 수 있을 것이다.

ABSTRACT

This study measured ambient noise by mooring a hydrophone in the middle depth (10 m) for 4 months (2019.9.11 ~ 2019.12.15) at a depth of 20 m in the west coast of Jeju where wind and wave power generators are installed. Meteorological factors affecting underwater ambient noise were collected from meteorological stations and observation stations near the measurement area. The low frequency band (~100 Hz) showed a change of about 5 dB to 20 dB in low and high tides due to the tidal effect. The wave and wind effects showed a large change to ~ 25 dB in the medium frequency band (~1 kHz). The wave affected a relatively lower frequency band (~300 Hz) compared to the wind, and the wind affected even a high frequency band of 1 kHz or more. Factors affecting the high frequency band (10 kHz ~) were rainfall and bio noise, and measured to be about 10 dB higher than the maximum value of the Wenz curve.

In addition, the circadian and tidal cycle patterns were analyzed for the sound of snapping shrimp, the main noise source of the high frequency band in shallow water. We used kernel signals and thresholds to identify the sound of snapping shrimp to calculate the snap rate per minute for quantitative analysis. As a result, it was found that the average and standard deviation of the snap rate in the western sea of Jeju during the entire measurement period (2019.9.11 ~ 2019.12.15) was 2132 ± 432 per minute. The surface water temperature and tide level decreased from 25°C to 7°C and from 190cm to 50cm for 90 days, respectively. From September to November, the snap rate decreased at a rate of 71 times per minute every 1°C decrease, and the snap rate increased by 17-24% during sunrise and sunset compared to the one at the daytime average. The snap rate at high tide was 13% higher on average than the one at low tide.

This study showed that the snapping shrimp snap rate changed according to the circadian and tidal characteristics, and the Jeju-type Wenz curve was presented by analyzing

the changes in underwater noise according to the marine environment. This study can be used as a basis for underwater noise in the coast of Jeju and the data for ecological behavior of snapping shrimp and an evaluation criteria of environmental impact assessment for coastal development.

제 1 장

서 론

1.1 연구배경

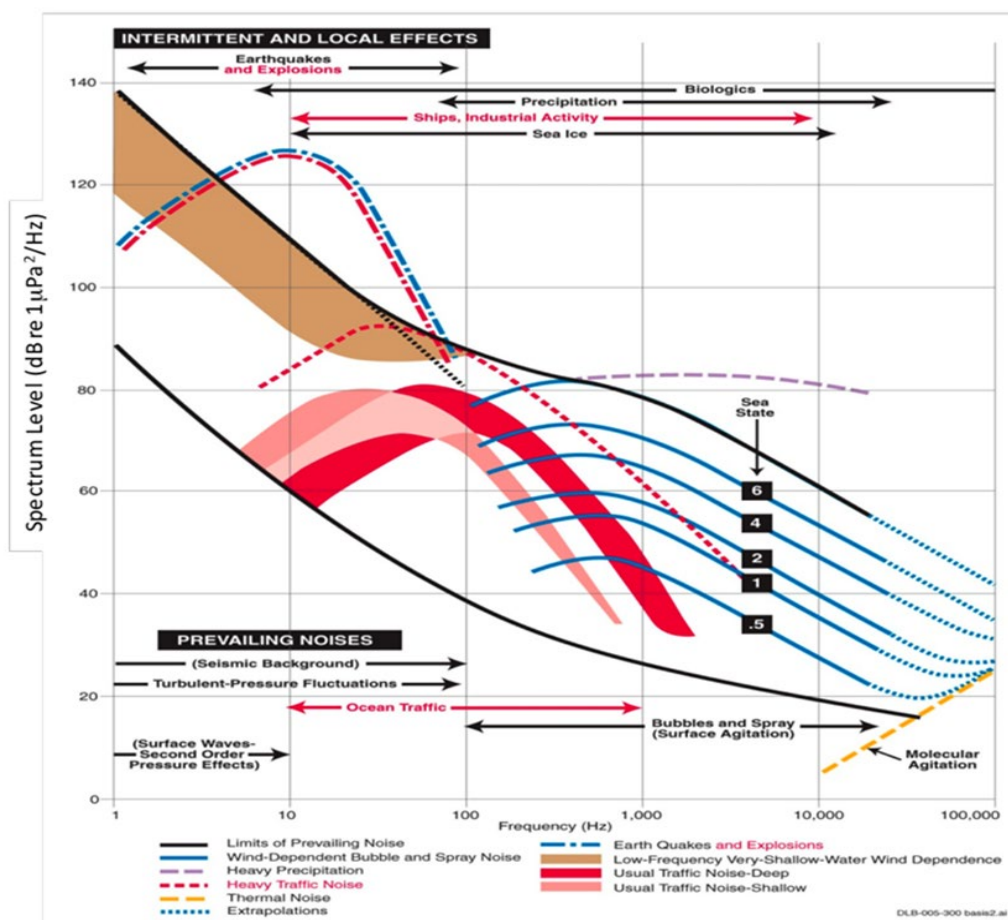


Figure 1 Wenz curve [1]

해양에서 주변소음은 소나와 같은 수중 음향장비를 개발할 때 신호대 잡음비(SNR; Signals to Noise Ratio)를 산출하는데 필요한 파라미터로서 쓰인다 [5, 6]. 그 뿐 아니라 풍속 및 강수량 등 기상환경 파라미터를 모니터링 하기 위한 기초 자료로

활용되기도 한다. Knudsen 과 Wenz 가 제 2 차 세계대전 이후 해양 주변소음에 관한 연구를 시작한 이후로 여러 연구자들에 의해 활발히 연구되어 왔다 [1, 7].

대양에서 주변소음은 발생 주파수 대역에 따라 6 가지 주파수 대역(극초저주파대역(< 1 Hz), 초저주파($1 \sim 20$ Hz), 저주파($20 \sim 200$ Hz), 중주파(200 Hz ~ 2 kHz), 고주파($2 \sim 20$ kHz), 초고주파(> 20 kHz))으로 세분화 될 수 있다. Fig 1 처럼 초저주파 대역에서는 지질 활동에 의한 화산과 지진이 영향을 미치고 저주파와 중주파 대역에서는 각각 선박소음과 바람이나 파도 등 해상상태가 이 주파수 대역에 영향을 준다. 그리고 고주파 대역일 경우 딱총새우와 돌고래 등 수중 생물과 열잡음 등이 영향을 준다 [1, 8]. 이전 연구는 대부분 심해에서 이루어져 왔으나 천해일 때 인간 활동이 크게 영향을 미치고 해역별 특성에 따라 주변소음이 다르다. 국내 이전 연구에서 동해를 제외하면 대부분 천해에서 연구가 이루어졌으나, 선박을 이용하여 자료를 수집하여 측정기간이나 선박소음이 포함된 한계가 있다. 그리고 해역별 특성이 다르기 때문에 제주 연해에서 환경 요인에 따른 주파수 특성과 소음준위가 다르게 나타날 것으로 예상된다.

파도, 열 및 수중생물 소음에 의해 발생하는 자연소음은 1 kHz 이상 고주파 대역에 영향을 미친다 [9-12]. 딱총새우 서식지에 대한 음향 환경 연구는 산호초 지대에서 딱총새우 소리가 고주파 대역 주요 소음원이라는 것을 밝혀냈다 [13-15]. 한국 서해와 남해 딱총새우 서식지에서 수중 주변 소음을 연구한 결과, 딱총새우 소리는 풍속보다는 수온에 더 지배적이라는 결과가 있다 [16]. 강 하구 등 다양한 해역에서 측정된 음향 환경 특징은 낮과 밤에 따른 일주기 특성을 보였다 [13, 17, 18]. 그러나 이전 다른 조사와 달리, 조석 및 달 위상변화(대조기와 소조기)에 따른 딱총새우 소리 변화가

없었다 [13, 19, 20]. 국내에서는 장기 계류를 통한 딱총새우 소리연구가 거의 없었으나 본 연구를 통해 시간 변화에 따른 딱총새우 소리의 주기특성이 나타날 것으로 예상된다.

본 연구는 웬즈 곡선(Wenz curve)을 토대로 제주 서부 연해에서 수중 주변소음 특성을 분석하고자 한다. 2 장에서는 해양 환경을 조석, 파고, 풍속, 강우 네 가지로 구분하여 각 소음원이 주파수대역에서 수중주변소음에 미치는 영향을 분석하였고, 3 장에서는 고주파 대역에서 대양과 달리 소음레벨이 10 dB 높았는데 이 원인이 딱총새우 소리임을 밝히고 딱총새우 소리의 일주기, 조석주기에 따른 변화를 정량적으로 분석하였다.

1.2 제주 연해에서 수중 주변소음에 영향을 주는 해양환경 요인



Figure 2 The wind turbine is being repaired at an offshore wind farm in Jeju.

제주 해역은 날씨 변화가 크고 바람이 많다. 이런 특징을 활용하여 최근에는 친환경 에너지 개발을 위해 파력발전시험장 및 해상풍력단지가 설치되었고 향후 더 많은 해상풍력단지를 건설하려고 계획하고 있다. 또한 천연가스, 항만 확장 및 정비 등 다양한 이유로 해안 개발이 활발하다(Fig 2). 또한 제주 2 공항 설치가 논의되고 있다. 해안 구조물이 설치되고 운용되는 과정에서 소음이 발생하는데 이를 파악할 필요가 있다. 수중소음 분석 평가를 위해서는 설치되는 해역에서 주변소음 측정이 선행적으로 이루어져야 한다. 또한 장기적인 측정을 통해 제주 해역에서 다양한 소음원을 확인하고 소음 변화를 분석할 필요가 있다.

해양에서 수중 주변소음은 다양한 소음원에 의해 발생한다 [21]. 심해와 천해에서 발생하는 소음은 해양 특성에 따라 소음원과 소음레벨이 다르다[11]. 특히 천해에서는 하루에 두 번씩 바뀌는 조석과, 바람에 의한 파랑, 강우, 수중생물 그리고

선박을 비롯한 자연적인 소음원과 인간 활동에 의한 여러 요인에 의해 소음레벨 변화가 크다[22, 23].

수중 주변소음을 측정하고 분석한 초기 연구에서는 100 Hz ~ 25 kHz 주파수 대역에서 주변소음을 분석하였다 [7]. 그러나 당시에는 모든 주파수 대역에서 데이터 수집이 매우 어려워 100 Hz 이하 저주파수 대역에 영향을 주는 조석 영향과, 20 kHz 이상 고주파수 영역에서 강우에 의한 주변소음 분석을 못하였다. Wenz 는 초저주파부터 초고주파까지 해양에서 모든 주파수 대역을 분석하고 웬즈곡선을 제시하였다 [1]. 그러나 이러한 결과는 수심이 깊고 육지에서 멀리 떨어진 대양이라는 해역 특성을 고려할 때 천해인 제주해역의 수중소음과는 다르다. 국내 연구에서 한반도 주변 해역에서 9년 동안 200 m 이내 천해에서 표층, 중층, 저층으로 나누어 1~2년에 걸쳐 매 회 측정(24 H)할 때 시간당 10 분씩 측정하여 평균 주변소음레벨을 확인하였다 [16]. 그러나 매회 측정시간이 짧은 까닭에 소음레벨 변화의 장주기 특성을 확인하기 어렵고 선박을 이용하여 측정하였기 때문에 선박소음 영향이 있을 수 있다.

수중소음에 관한 연구는 세계 여러 해역에서 이루어졌으나, 연근 해역 특성으로 주변 소음 차이가 큰 제주 해역에서 체계적으로 장기간에 걸쳐 측정과 분석을 한 결과가 논문으로 보고된 바가 없다. 그래서 본 논문은 제주 서부 연해에서 장기간 계류 측정하여 수중주변소음이 조석, 파고, 풍속, 강수량에 의해 각 주파수 구간에서 소음레벨 변화를 확인하는 것이다. 3 개월동안 수중에 계류하여 측정하였기 때문에 일주기 특성과 보름주기 특성 등 이전 연구와 다르게 장주기 분석이 가능하며 측정선박에 의한 선박소음 영향이 적어 해양 환경에 따른 소음레벨 크기를 확인할 수 있다.

1.3 딱총새우 소리의 특징

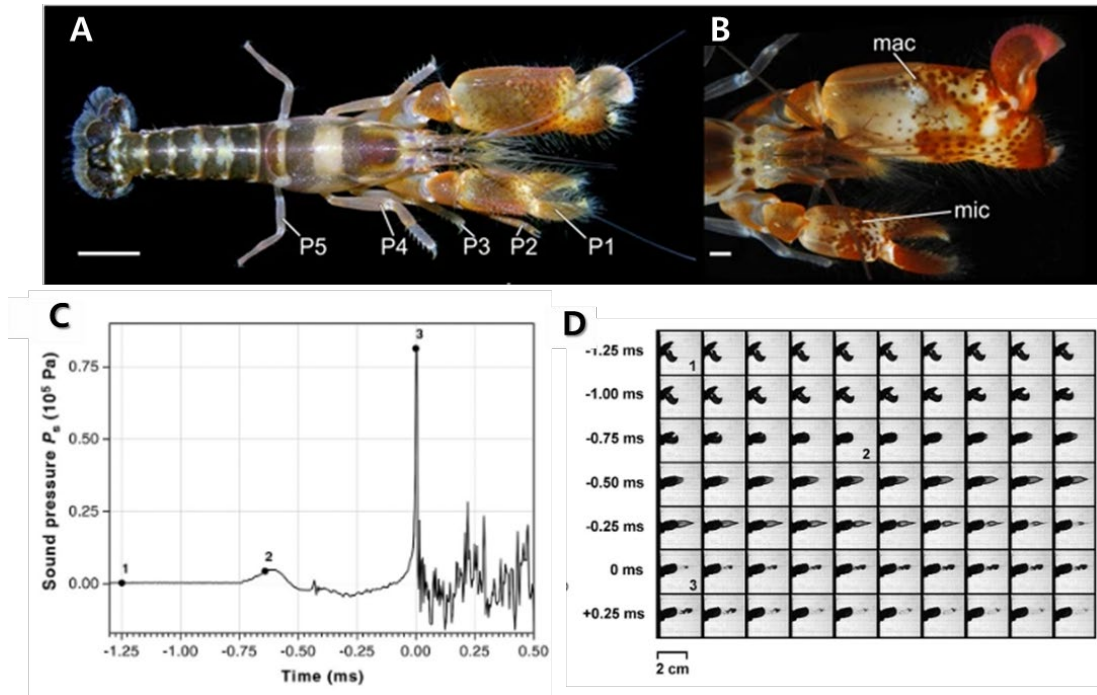


Figure 3 Morphology of alpheids and their snapping claw. (A) Dorsal view of *Alpheus rugimanus*, in life. (B) Dorsal view of the asymmetrical chelipeds of *Alpheus websteri*, in life [2]. (C) Hydrophone signal of a snap by an *A. heterochaelis* female measured at a distance = 4cm [3]. (D) A sequence of high-speed images in top view showing the closure of the snapper claw taken at 25- μ s intervals [4].

해양 생물 중 소리를 내는 생물은 많지 않고 일반적으로 고래류와 돌고래류 등 해양 포유류가 주로 소리를 내는 생물종으로 알려져 있으며 민어나 아구 등 부레에 의해 소리를 내는 어류종도 있다 [8, 24]. 그러나 전 세계 아열대 해역에 분포하며 소리를 내는 생물이 있는데, 바로 딱총새우이다. 이 딱총새우는 전세계 100 m 이하 수심 연해에 서식하는 것으로 알려져 있다 [3, 25].

딱총새우는 주로 모래, 펄, 산호초 그리고 돌 틈에 분포하며 저서생활을 하며 제주에 서식하는 딱총새우 크기는 3 ~ 10 cm 이다 [26]. 집게발 구조로 충격파를 이용해 사냥하는 것으로 알려져 있는데, 이 충격파가 천해에서 고주파 대역 주요 소음원으로

알려져 있다. 충격파는 집게발이 빠르게 닫히면서 공기방울이 만들어지고 이 공기방울이 터지며 발생하는 공동현상(Cavitation)에 의해 생성되며 임펄스 신호 형태를 띤다 [3, 27]. 성체 딱총새우에 의해 생성된 신호는 1 m 에서 190 dB(re 1 μ Pa)를 초과하고 수백 Hz 에서 200 kHz 까지 광범위한 주파수 대역에서 신호가 감지된다고 보고되었다 [27]. 딱총새우는 해안 지역에서 생물학적 소음 주요 원인으로 지속적이고 독특한 소리를 생성할 수 있다[28]. 이것은 종종 수 킬로헤르츠 이상 고주파수 대역에서 지배적이고 연안 측량 및 보안에 사용되는 일부 음향 시스템 사용을 방해할 수 있다[29, 30].

최근에는 무선 수중청음기가 개발되면서 계류측정을 하여 딱총새우 소리 연구가 진행되고 있다. 미국 강 하구, 산호초 지역 등 연안 여러 곳에서 딱총새우에 관한 연구가 진행되고 있다[13]. 해당지역에서 딱총새우가 고주파수 대역에서 지배적인 소음원인으로 밝혀지고 딱총새우 소리 음향 패턴도 포착되었다[18]. 주로 낮과 밤에 따른 일주기 변화 특성이 강했고, 수온과 조석에 따른 변화도 보였다. 일주조 특성과 반일주조 특성이 나타나는 등 조석 영향을 받는 것으로 보였으나, 달 위상변화(대조기와 소조기)에 따른 소리 패턴은 관측하지 못하였다[18].

국내에서는 계류측정을 통한 연구는 거의 없었고, 그동안 선박을 이용하여 딱총새우 소리연구가 진행되었다. 서해안과 남해안에서 선박을 이용하여 딱총새우 서식지에서 수중주변소음 일별 변화를 관찰하였는데 풍속에 의한 영향보다 수온 변화에 의한 영향이 더 컸다[31]. 그리고 최근 이어도 과학기지에서 진행된 딱총새우에 관한 연구는 수심 100 m 해역에서 계류를 통해 연구가 진행되었다. 이 연구에서는 간조, 만조에 의한 딱총새우 소리패턴을 보였으나 측정 기간이 짧아 달 위상변화에 따른 변화패턴을 보기에 역시 부족하였다[32].

웬즈곡선을 참고하여 대양과 비교했을 때 고주파대역 소음레벨이 높음을 확인하였고 원인 분석 결과 딱총새우가 원인임을 밝혔다. 연구 목적은 고주파대역 주요 소음원인 딱총새우 소리 특성을 파악하는 것이다. 일주기 특성과, 조석 주기 특성이 나타나고 3 개월간 관측하면서 수온변화에 따른 변화도 관찰되었다. 변화량을 정량적으로 나타내기 위해 커널함수를 이용하여 스냅율(snap rate)로 나타냈다.

제 2 장

제주 연해에서 해양 환경에 따른 수중주변소음 변화

2.1 개요

본 연구에서는 풍력, 파력발전기가 설치되는 제주 서부 연해 수심 20 m 정점에서 90 일동안 수중 청음기를 중층(10 m)에 계류하여 주변소음을 측정하였다. 소음레벨에 영향을 미치는 기상정보는 측정 해역 근처 기상대와 관측소를 이용하여 자료를 수집하였다. 100 Hz 이하 주파수 대역에서 조석 영향으로 간조와 만조, 조금과 사리일 때 약 5 dB ~ 20 dB 가량 변화를 보였다. 파랑과 바람에 의한 영향은 1 kHz 이하 주파수 대역에서 25 dB 이내로 큰 변화를 보였으며 파랑은 저주파 대역에 영향을 주었고 바람은 1 kHz 이상 고주파 대역까지도 영향을 주었다. 10 kHz 이상 고주파 대역에 영향을 주는 요인으로 강우와 생물 소음이 있고 웬즈 곡선 최대값에 비해 약 10 dB 높게 측정되었다. 해양에서 네 가지 기상요인에 따라 수중주변소음이 얼마나 변화가 있는지 분석하고 제주형 웬즈곡선을 제시한다.

2.2 실험 및 방법

2.2.1 연구해역 및 측정 방법

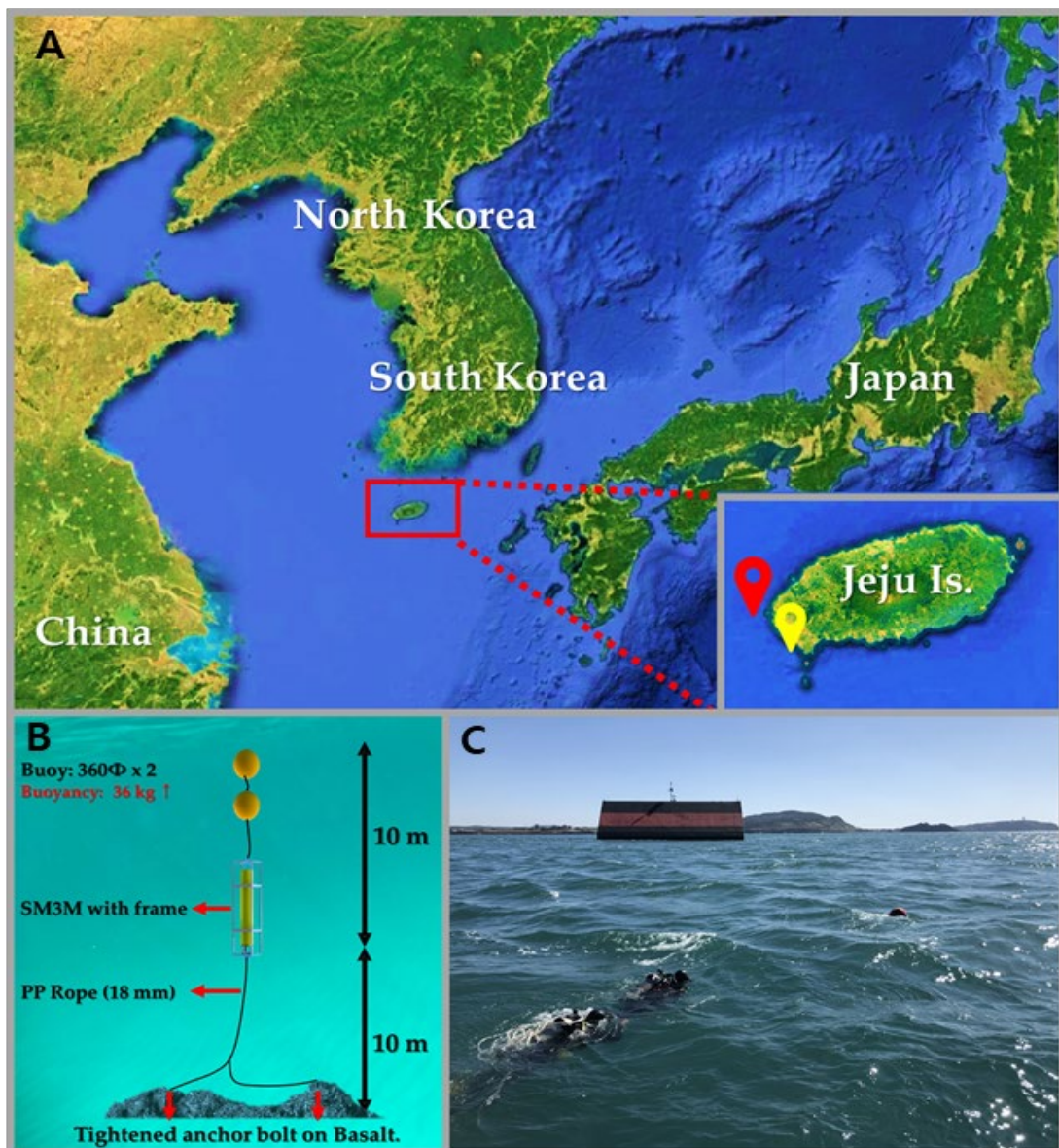


Figure 4 The location of the hydrophone installation. (A) Hankyung-myeon area in the western region of Jeju Island (Red mark: $33^{\circ}19'48.9''\text{N}$ $126^{\circ}08'59.7''\text{E}$) and Moseulpo Tidal station (Yellow mark: $33^{\circ}12'50.8''\text{N}$ $126^{\circ}15'04.5''\text{E}$); (B) Schematic diagram of the installation of a hydrophone (SM3M, Wildlife Acoustics) at the depth of 10 m from the seabed.; (C) Photo of hydrophone installation by divers nearby a wave generator station.

수중 주변소음을 측정하기 위해 제주 서부지역 한경면 해역(수심 20 m)에서 2019년 9월 11일 ~ 2019년 12월 15일까지 총 90일동안 데이터를 수집하였다. 측정 주기는 24시간 내내 시간당 10분씩 90일간 측정하였고, 배터리 및 SD카드 교체를 위해 중간 6일(10월 26일~10월 31일)은 측정하지 못했다. 이 때 사용된 수중청음기(SM3M, Wildlife Acoustics, Maynard, MA, USA)는 무지향성으로 2 Hz ~ 80 kHz 까지 측정가능하다. Fig. 4 처럼 수심 20 m 해역에서 수중청음기를 현무암질 바닥에 고정하여 해저면으로부터 10 m 떨어진 중층에 계류하여 측정하였다.

그 외 기상자료는 모슬포 조위관측소(조위; 33°12'50.8"N 126°15'04.5"E), 선박해양플랜트 연구소 파고 부이 (파고; 33°19'48.9"N 126°08'59.7"E), 고산기상대(풍속, 강수량; 33°17'37.8"N 126°09'46.2"E)에서 수집하였다. 측정기간동안 17 호 태풍 ‘타파’(2019. 09. 22, 중심기압 985 hPa, 최대풍속 25 m/s), 18 호 태풍 ‘미탁’(2019. 10. 02, 중심기압 970 hPa, 최대풍속 27 m/s)이 측정해역 태풍영향권에 들어왔다.

2.2.2 주파수 대역별 수중 주변소음 분석

Table 1 Noise sources according to frequency range

Frequency range	Main sound source
1 Hz ~ 100 Hz	Earthquakes, Tide, Current, Wave
100 Hz ~ 1 kHz	Ships, Wave, Wind
1 kHz ~ 10 kHz	Wind, Rain
10 kHz ~ 48 kHz	Rain, Bio and thermal noise

해양환경은 지역과 시간, 날씨 등 많은 요인에 의해 영향을 받는다. 많은 요인들은 수중 주변소음에도 영향을 미친다. 이러한 소음원들은 주파수대역이 다르기 때문에 기존 연구에서 제시한 웬즈곡선과 Choi의 근사식을 참고하여 Table 1 과 같이 주요 소음원을 분류하였다[1, 33]. 선박 소음은 수 십 Hz 부터 1 kHz 이하 주파수 대역에서 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 측정해역에서는 항만사업보다 어업활동이 활발한 지역으로 대부분 중소형 어선이 많다. 중소형 어선은 250 Hz ~ 1 kHz 이기에 Table 1 에서 선박소음을 100 Hz 이상에서 고려하여 분석하였다.

2.3 결과

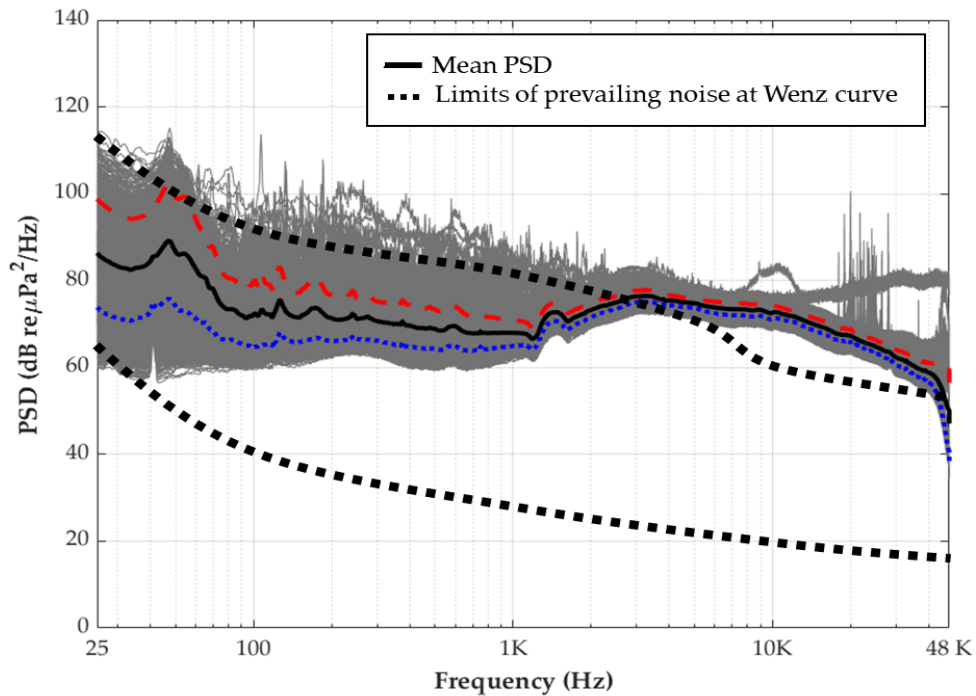


Figure 5 Mean PSD (power spectrum density) during the whole measurement period. (red dot line & blue line: standard deviation of PSD)

2 장에서는 실험지역에서 측정 기간동안 수중주변소음 스펙트럼을 분석하고 조석, 파고, 바람 그리고 강우가 수중주변소음에 얼마나 영향을 미치는지 알아보았다. 조석과 파도는 저주파 대역에, 바람은 중주파 대역 그리고 강우는 고주파 대역에서 분석하였다.

Fig. 5 는 전체 측정기간동안 관측된 수중소음 스펙트럼으로 평균값과 표준편차 구간을 나타냈고, 이전 연구자료와 비교할 수 있게 웬즈곡선 최대, 최소값을 함께 그렸다. 100 Hz 이하 저주파 대역은 최대 50 dB, 표준편차 17 dB 로 변화폭이 컸지만, 고주파 대역으로 갈수록 변화폭은 3 dB 이내로 줄어들었다. 2 ~ 20 kHz 구간이 웬즈곡선에 비해 높은데 이는 딱총새우 소음으로 인해 대양에 비해서 최대 20 dB 가량

높게 나왔다. 이때 선박소음과 생물소음(딱총새우, 돌고래 등) 등 소음원을 제거하지 않고 분석하였다.

2.3.1 조석에 의한 주변소음 변화

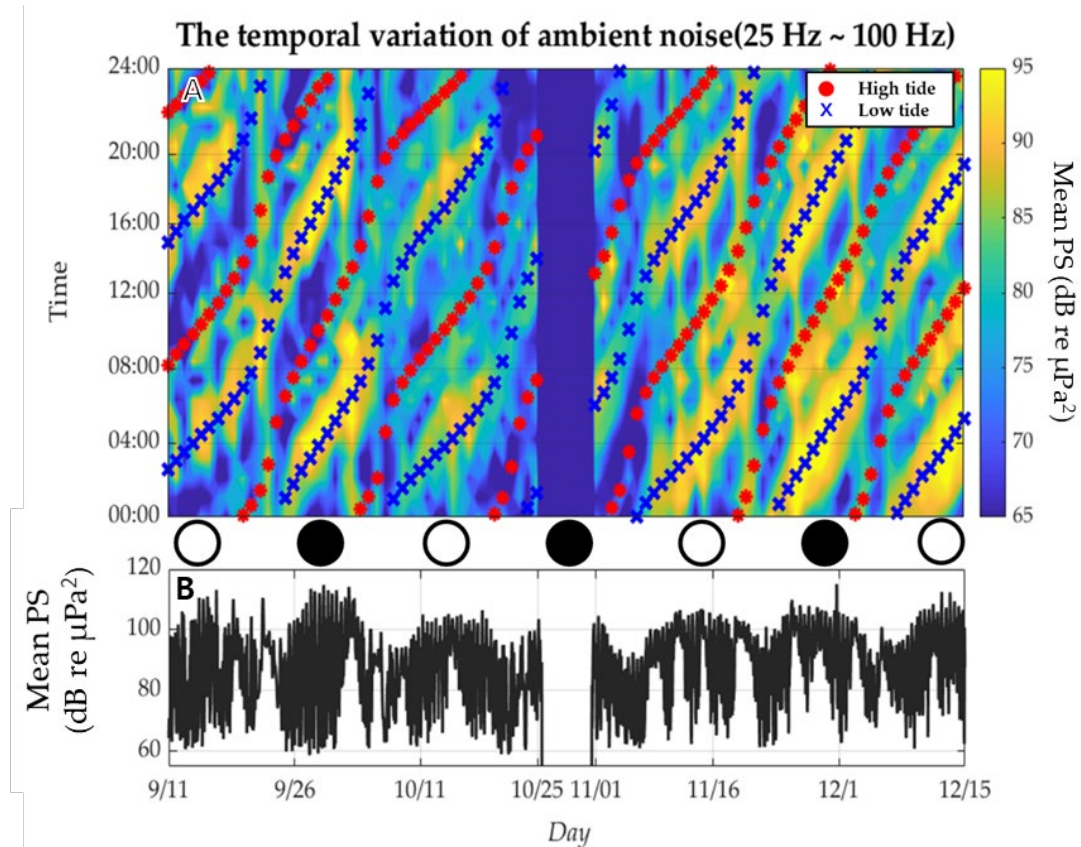


Figure 6 Ambient noise level due to tide in west coastal sea of Jeju. (A) Mean PS(power spectrum) over 25 ~ 100 Hz by hour and day. (x symbols: low tide time, * symbols: high tide time), (B) mean PS by hour with peak envelope smoothed by 6 hours. (○: Full moon, ●: New moon)

Fig 6 (A)은 전체 측정 기간 동안 일별 시간에 따라 변화를 나타낸다. 조석은 수중주변소음에 70 ~ 90 dB 까지 영향을 주었고 밀물과 썰물에 의해 저주파 대역에서 변화패턴을 보였다. 측정 기간 동안 총 7 번 대조기가 있었는데 Fig 6 (B)는 달 위상 변화에 따른 대조기와 소조기 때 변화를 관찰할 수 있다. 달 위상이 삭과 망인 대조기 때 소조기에 비해 10 dB 이상 차이가 있다. Fig 7 (A)에서는 Fig 6 (A) 간조와 만조 시각 때 주변소음레벨을 각각 분류하여 분석결과 측정기간 동안 간조때 수중소음레벨이 만조

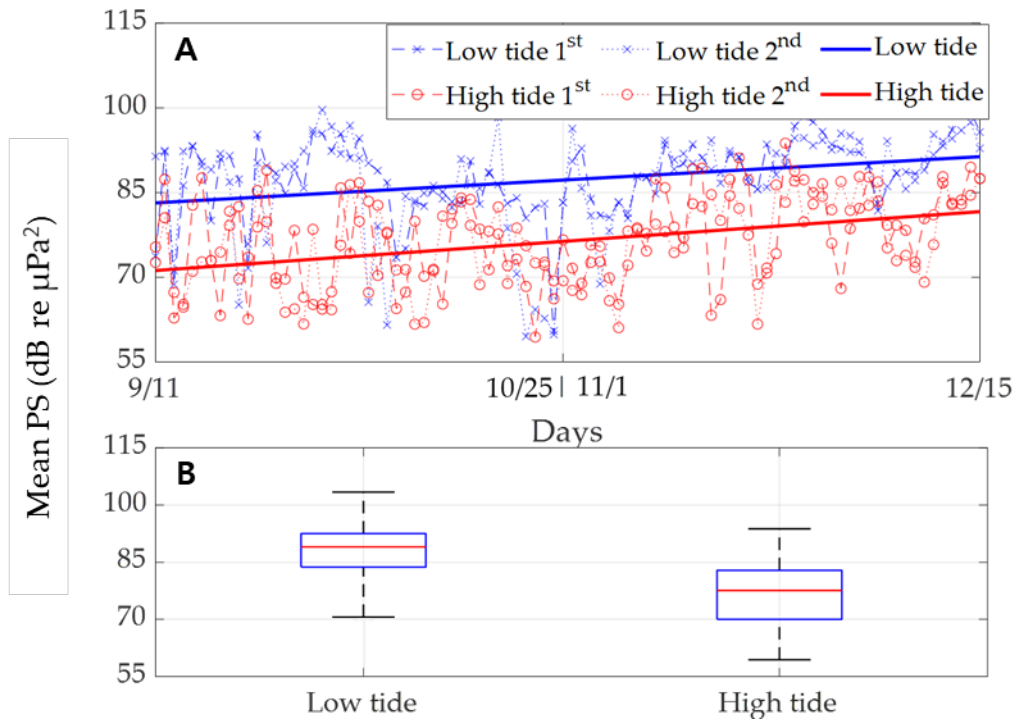


Figure 8 Comparison of ambient noise levels at low tide and high tide. (A) ambient noise level changes over time; (B) the quartile of the ambient noise level at low tide and high tide

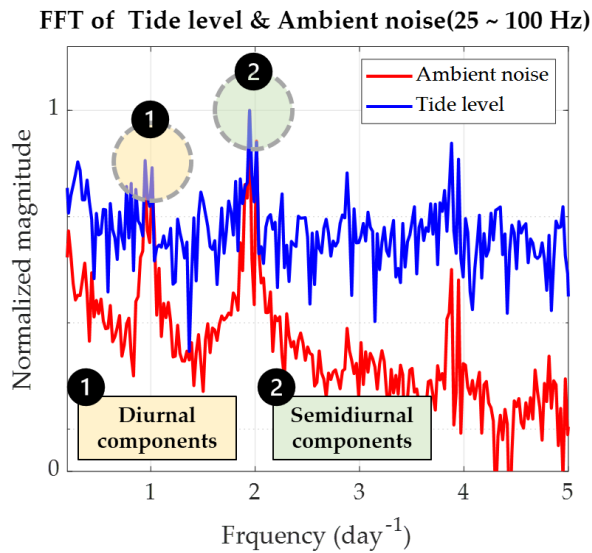


Figure 7 FFT (Fast Fourier Transform) of daily mean PS (25 ~ 100 Hz) & tide level

때보다 더 높았으며($p < 0.001$) 간조 평균 86 dB, 만조 평균 77 dB 로 나타났다(Fig 7 (B)).

고속푸리에변환(FFT: Fast Fourier Transform)을 통해 주파수 분석 결과 Fig 8 처럼

저주파대역 주변소음과 조위레벨 모두 일주조성분과 반일주조성분이 우세함을 보이고 주파수 성분이 일치하였다.

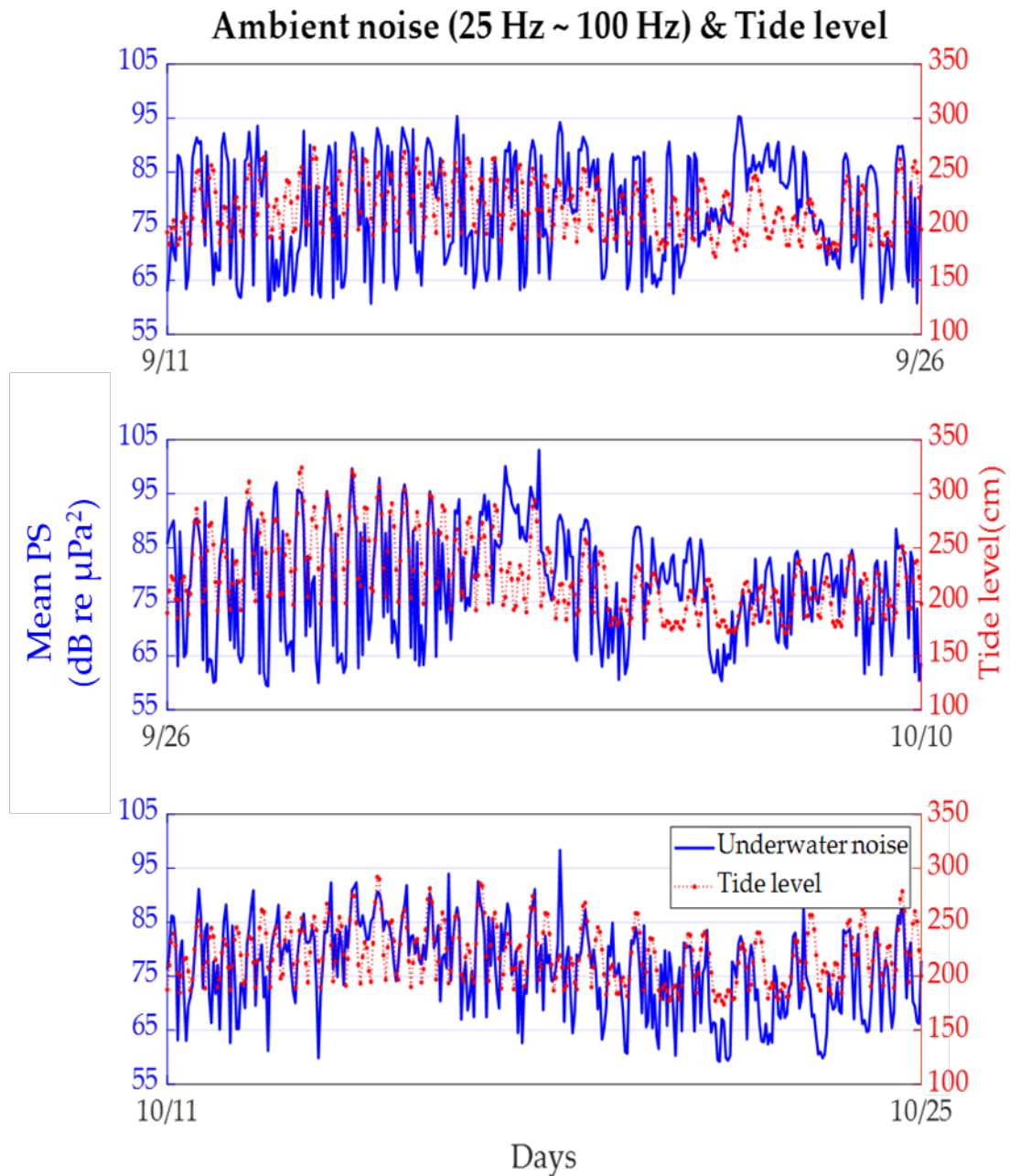


Figure 9 Mean PS (25 ~ 100 Hz) & tide level

2.3.2 파랑에 의한 주변소음 변화

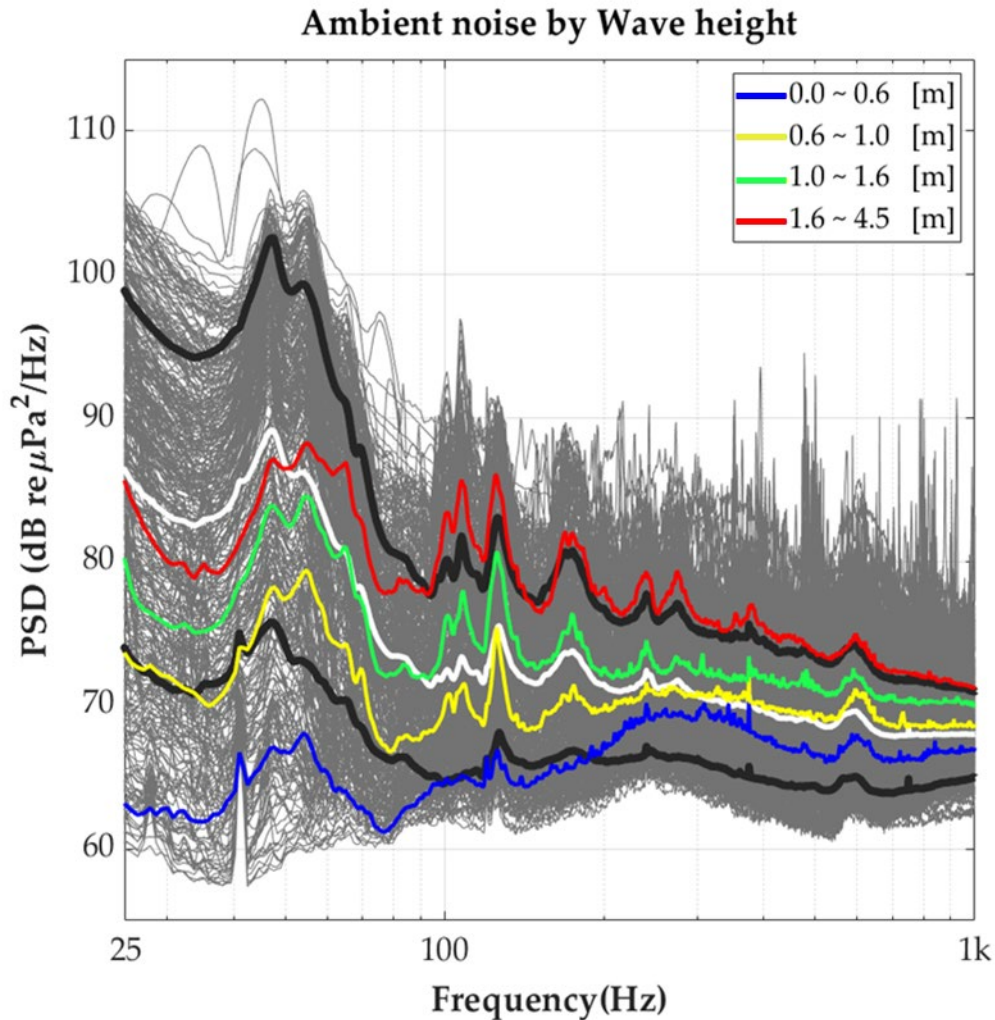


Figure 10 Ambient noise level over 25 Hz ~ 1 kHz frequency band due to wave height during 11.1 ~ 12.15 in 2019. (White line: Mean PSD, Black line: standard deviation of PSD).

Fig. 10 는 11 월 1 일 ~ 12 월 15 일까지 45 일 동안 수중 주변소음 전력스펙트럼밀도 (PSD; Power spectrum density) 평균과 표준편차 그리고 파고 구간별 수중 주변소음레벨이다. 수중청음기와 파고 센서가 200 m 이내에 있어 파고에 따른 수중 주변소음 레벨 변화를 뚜렷하게 볼 수 있다. Fig. 10 에서 파고별 주변소음 레벨은 풍속 구간별로 선박소음이 없는 5 개 스펙트럼을 평균하였고 파고에 의한 영향은 고주파보다 저주파에서 영향이 컸다. 파고 구간별로 200 Hz 이하에서는 5 dB 이상, 200

Hz ~ 1 kHz 에서는 약 3 dB, 1 kHz 이상에서는 2 dB 이내 정도로 주변소음레벨 차이를 보였다. 해상상태가 잔잔해 파고가 낮을 때와 파고가 높을 때 최대 20 dB 이상 차이가 있다. Fig. 11 을 보면 파고가 높고 낮음에 따라 주변소음 변화 또한 비슷한 경향을

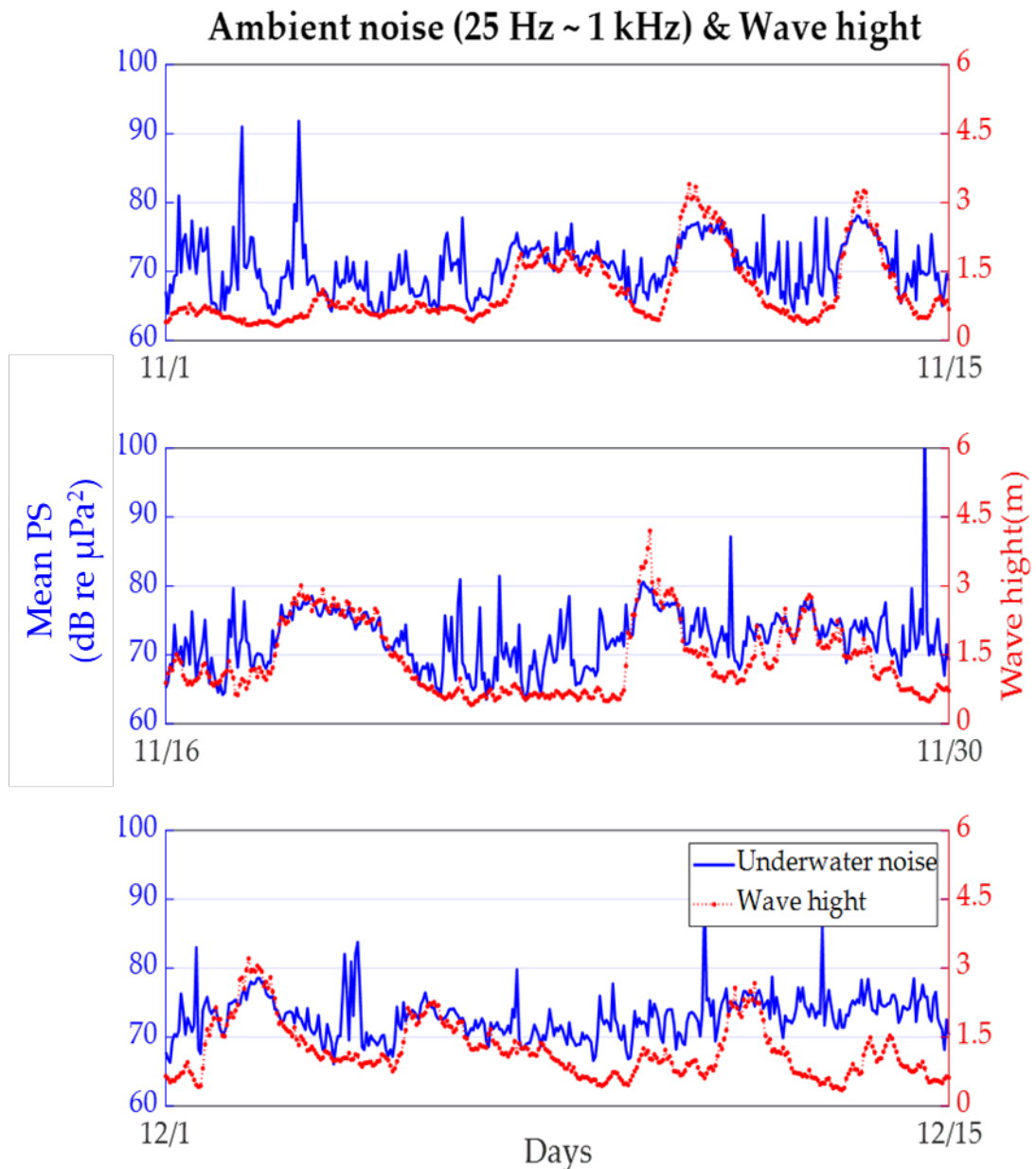


Figure 11 Mean PS (25 Hz ~ 1 kHz) & wave height

보이고 특히 파고가 1 m 이상일 때 주변소음 레벨과 밀접한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 그러나 파고가 1 m 이내로 낮음에도 불구하고 주변소음이 급격히 높은 날이 있는데, 그것은 파도가 잔잔한 날에 활발한 어업활동으로 인한 선박소음으로 인한 결과이다.

2.3.3 바람에 의한 주변소음 변화

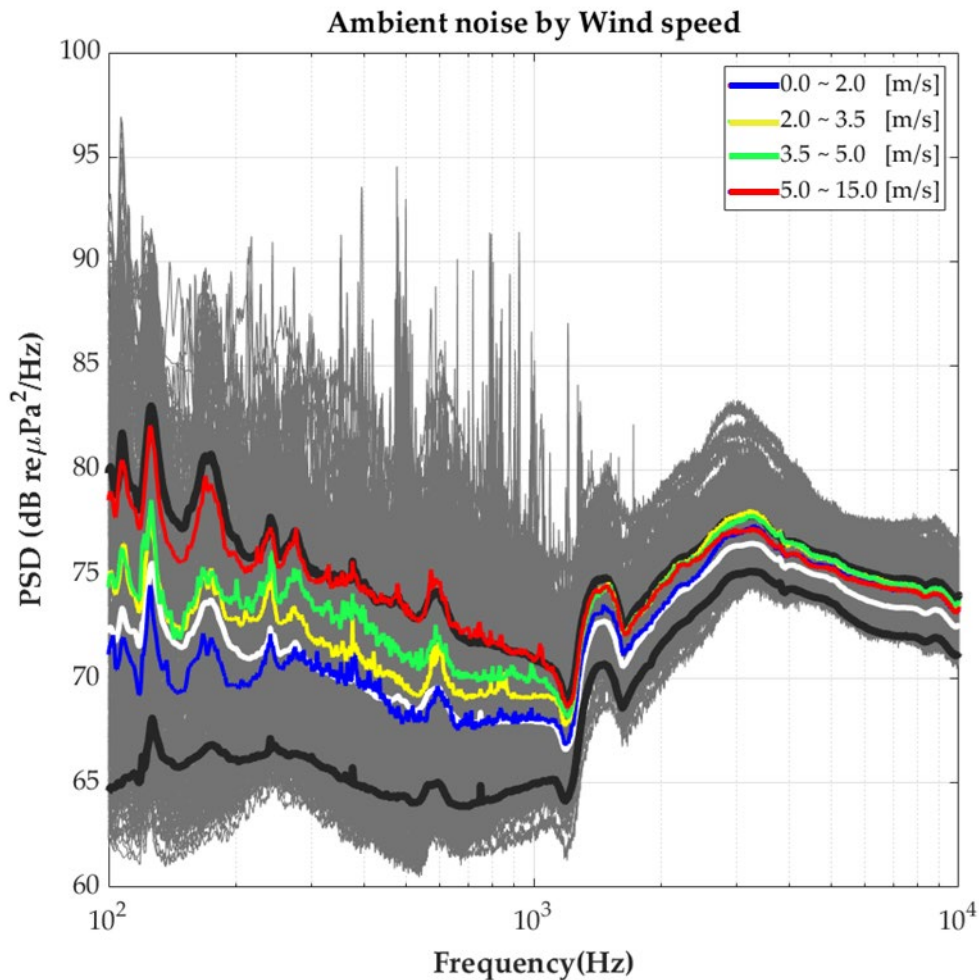


Figure 12 Ambient noise level over 100 Hz ~ 10 kHz frequency band due to wind speed in 9.11 ~ 10.25. (White line: Mean PSD, Black line: standard deviation of PSD).

Fig. 12는 수중소음레벨과 풍속 데이터를 나타냈다. Fig. 13을 보면 서부에서 바람이 가장 강하게 불었던 10월 2일은 풍속 21.5 m/s로 관측되었고 수중소음레벨은 84 dB로 측정되었다. 풍속이 1 m/s 이하로 약한 날에는 64 dB까지 낮아지는 것을 확인하였다.

Fig. 12은 풍속 구간별 주변소음 차이를 알아보기 위해 풍속 별 빈도수를 4개의 구간으로 나누어 구분하였다. 각 풍속구간의 데이터 개수는 270 ± 30 개이고 전체

데이터 개수는 1080 개이다. 풍속에 따른 주변소음은 300 Hz ~ 1 kHz 구간에서 Choi et al.의 값 변화량과 유사했다. 100 Hz ~ 1 kHz 구간에서 변화가 최대 20 dB, 1 kHz ~

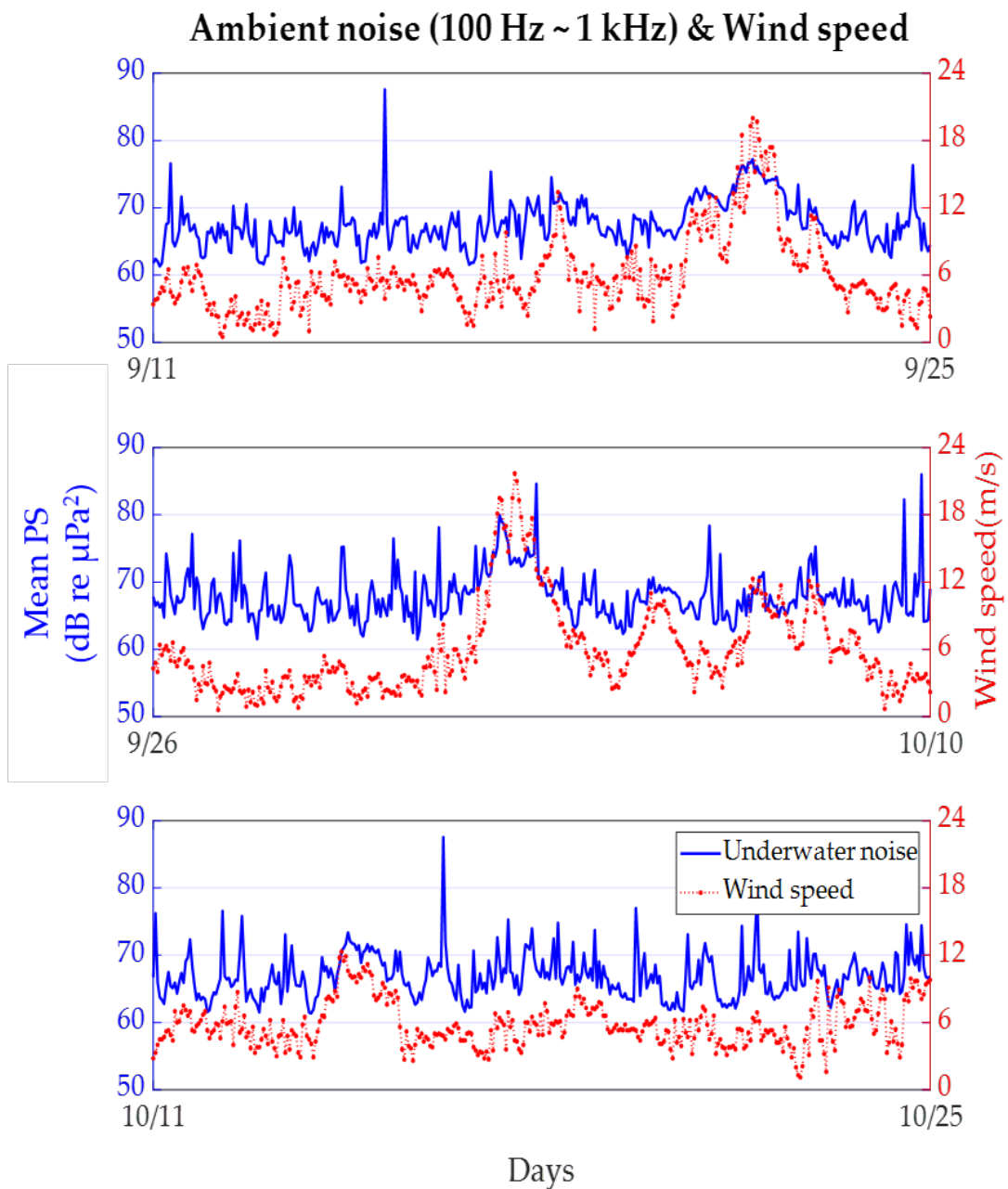


Figure 13 Mean PS (100 Hz ~ 10 kHz) & wind speed.

10kHz 에서 최대 5dB 로 변화폭이 작았다. 이것은 저주파대역보다 고주파대역에서 변화폭이 큰 Choi et al.의 결과와는 대조적인 결과를 보였다[16].

웬즈 곡선에서 바람은 100 Hz ~ 10 kHz 사이에서 풍속에 따라 1 kHz 기준 45 dB ~ 80 dB 변화를 보임으로 상대적으로 변화폭이 크지 않았다. 하지만 본 연구에서는 1 kHz 기준 55 dB ~ 70 dB 의 변화를 보였다. 이런 결과는 측정해역마다 기후, 수심 등 환경 차이가 원인으로 보인다.

2.3.4 강우에 의한 주변소음 변화

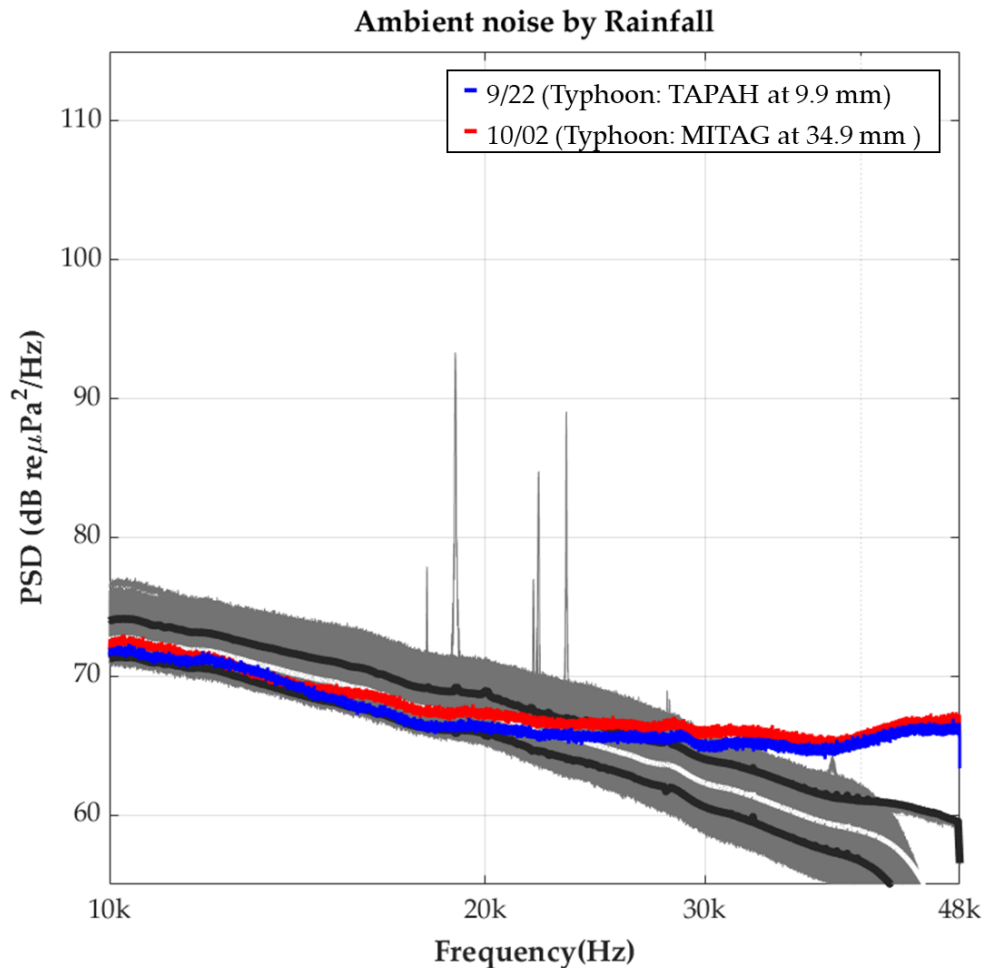


Figure 14 Ambient noise level over 10 ~ 48 kHz frequency band due to rainfall in 9.11 ~ 10.25. (White line: Mean PSD, Black line: standard deviation of PSD).

강수량에 의한 수중 주변소음 변화를 관찰하기에 비가 내린 날이 적었으나 두 번 태풍이 지나갈 때 내린 강수량과 주변소음 영향을 분석하였다. 강수량이 5 mm 이상인 날은 총 5 일이고 10 월 2 일 태풍 ‘미탁’이 지나갈 때 순간 강수량 34.9 mm 로 가장 많이 왔다. Fig. 14 는 두 번 태풍이 지나가며 비가 내릴 때 스펙트럼과 측정기간동안 평균 PSD 를 비교했다. 20 kHz 이하 주파수 대역에서 강수에 의한 변화는 보이지 않았지만 그 이상 고주파 대역에서 변화를 보였으며, 주파수대역이 높을수록

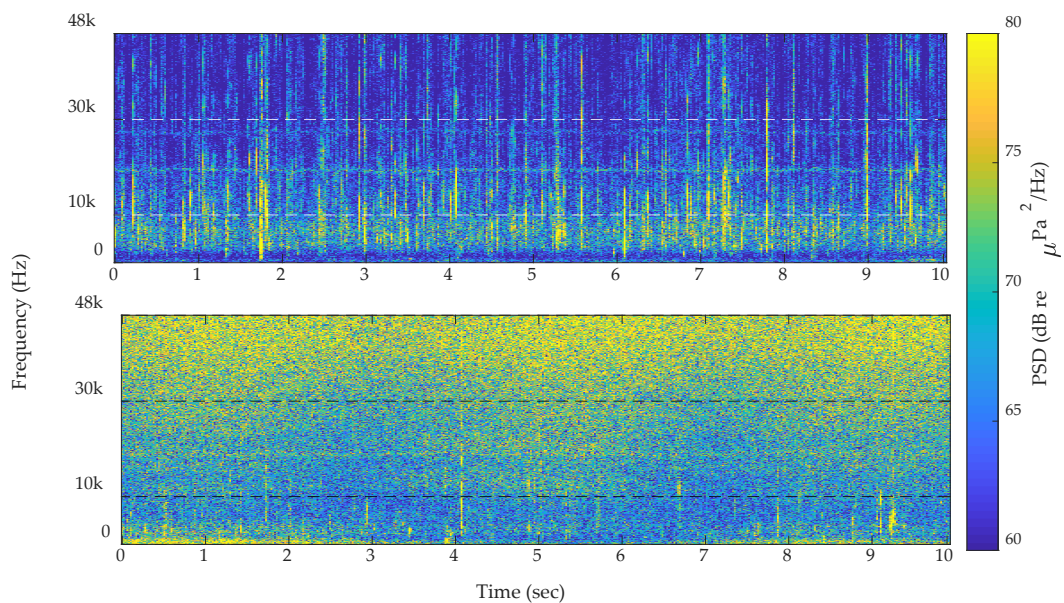


Figure 15 Spectrogram of clear days(A) and rainy days(B)

강수에 의한 변화가 컸고 40 kHz 대역에서 7 dB 까지 차이를 보였다. 그러나 두 태풍에서 강수량이 다름에도 불구하고 이 둘 스펙트럼 차이는 2 dB 이내로 유의미하지 않았다. 두 스펙트럼 자료는 조석에 의한 딱총새우 영향을 줄이기 위해 동시간대 자료를 비교하였다. Fig 15 는 비가 오지 않는 맑은 날과 비가오는 날의 스펙트로그램이다. 이 자료 또한 고주파 대역에서 강수에 의한 변화가 컸고 비가 수 초 ~ 수 십초 사이로 강수변화를 보였다.

2.4 토의

천체 인력작용과 달 공전으로 하루에 두 번 주기로 밀물과 썰물이 반복하면서 시간에 따라 수심과 유속이 변한다. 하루에 두 번 주기로 반복하지만 첫 번째 썰물과 두 번째 썰물 때 조위가 다른데, 이를 일조부등이라 하고 반일주조와 일주조의 합성에 의해 나타나는 현상이다[34]. 조석과 수중소음의 해외 연구 사례로 미국 시애틀 조력발전소 인근 해역에서 조석 영향으로 밀물과 썰물에 따라 100 ~ 140 dB(SPL) 정도 소음이 측정되었고 제주해역에서는 60 ~ 115 dB(PSD)이다[35].

바람과 밀접한 관련이 있는 파랑은 일반적으로 바람이 강할수록 파고가 높고 바람이 약하면 파고가 낮다. 그러나 바람이 약하다고 항상 파고가 낮은 것은 아니다. 먼 바다에서 오는 너울성 파도는 충분한 취송거리가 있어 측정해역에는 바람이 없어도 높은 파고가 전달될 수 있다. 그래서 웬즈곡선에는 해상상태(sea state)로 구분하였는데, 해상상태는 파고와 해수면 풍속을 같이 고려하여 나타낸 것이다. 그러나 본 연구는 파고와 풍속을 따로 구분하여 분석했다. 그 결과 파랑은 100 Hz 근처에서 변화폭이 크고 풍속은 100 Hz ~ 1 kHz에 걸쳐 넓은 주파수 대역에서 영향을 미쳤다. 해외 연구 사례에서 미국 마이애미 인근 대서양 해역에서 풍속에 따른 주변소음영향을 분석하고 모델링하였다. 모델링 결과 20 Hz ~ 1kHz 주파수대역에서 최대 30 dB 변화를 보이고 실측결과 1 kHz 대역에서 최소주변소음 대비 18 dB 더 높았다[36]. 본 연구에서는 1 kHz 대역에서 주변소음대비 12 dB 높았다.

바람에 의한 수중 주변 소음 변화를 분석하기 위해 풍속구간을 4 구간(4 분위 값; 25, 50, 75 %)으로 나누어 확인하였다. 1 kHz 이상 고주파 대역에서 5 m/s 이하 바람에서는 소음변화가 2 dB 이내로 작았다. 이번 측정에서는 바람에 의한 주변소음 변화가 1 kHz 이하 중주파 대역에서 변화가 컸으나 이 결과는 Choi et al. 에서 보듯이

200 Hz 이상 주파수대역에서 바람에 의한 영향이 큰 결과와 달랐다. 2 kHz 이상 고주파에서는 생물소음이 우세하여 바람에 따른 변화를 뚜렷하게 볼 수 없었으며 300 Hz 이하에서는 파랑 영향으로 추측된다.

마지막으로 강수에 의한 영향으로 이전 연구에 의하면 빗방울이 수면에 충돌할 때 1 차적으로 소음이 발생하고 이로 인해 물속에 갇힌 기포가 진동하여 2 차적으로 소음이 발생한다고 알려졌다. 비가 내리는 날 호수에서 수중소음레벨을 측정한 결과 비에 의한 수중소음레벨 최대 주파수가 15 kHz 근처 주파수 대역에 영향을 미쳤다[37]. 시간당 7.0 mm 이하 적은 강수량일 때 측정한 결과와 실험실 수조에서 자유낙하 하는 물방울에 의한 수중소음 파형을 연구한 빗방울에 의한 주파수 대역은 13 kHz ~ 15 kHz 구간이었다[38, 39]. 이런 여러 해외 연구는 한국 동해에서 측정한 Choi et al. 연구에서 최대 주파수가 일치하였다[33]. 그러나 본 연구에서 강수에 의한 주파수 구간은 20 kHz 이상 고주파 대역이며 최대 주파수 대역은 40 kHz 이상 더 높은 수파수대역으로 예상된다. 폭우일 때 1 kHz ~ 50 kHz 모든 주파수 대역에서 비가 내리지 않을 경우보다 20 dB ~ 30 dB 높게 나타나는 연구결과가 있다[40].

제 3 장

제주 연해에서 딱총새우 소리 일주기 특성과 조석주기 특성 분석

3.1 개요

국내에서 이전 연구는 대부분 선박을 이용하여 음향 자료를 수집했기에 장기 관측 연구결과가 거의 없었으나 본 연구에서는 무선 수중청음기를 이용하여 장기 계류 측정을 통해 2019년 9월 중순부터 90일간 제주 서부 연해 10m 지점(깊이 20m)에서 수중 음향신호를 수집하여 딱총새우 소리 변화를 분석하였다. 딱총새우 소리를 식별하기 위해 커널 신호와 임계값을 활용했으며 스냅을 계산하여 정량적으로 분석했다. 그 결과 전체 측정 기간 동안 딱총새우 소리는 분당 2132 ± 432 (평균 \pm 표준편차)회로 확인되었다. 해수 표층 온도와 조위는 각각 25°C 에서 18°C, 190cm 에서 140cm 로 90 일 동안 표층수온이 7°C, 조위가 50cm 감소했다. 스냅율이 감소한 것은 수온이 낮아진 것이 주 원인이며 1°C가 감소할 때마다 분당 71 회씩 낮아졌다. 일출과 일몰 때 낮 평균 대비 17~24% 증가하는 일주기 변화를 보였다. 만조 때 스냅율은 간조 때 보다 평균 13% 높았다. 장기간 계류 측정을 통해 딱총새우 소리 일주기 변화와 조석주기 변화는 수중 주변 소음 및 생태학적 행동을 위한 주요 데이터로 사용될 수 있다.

3.2 실험 및 방법

3.2.1 스냅 탐지와 분석

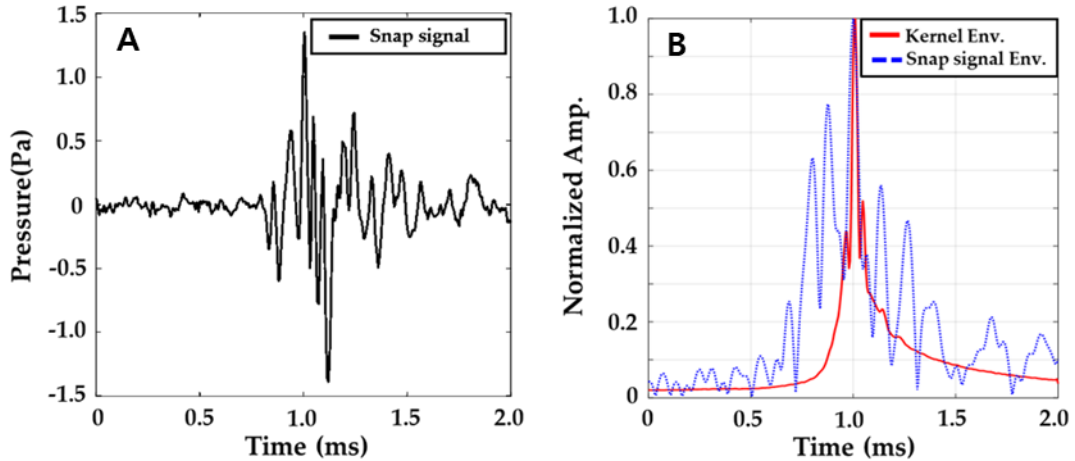


Figure 16 The snapping strimp sound signal (black color) & example of score calculated snapping shrimp sound.

딱충새우 소리(Fig 16 (A))는 임펄스 신호 형태로 광대역 주파수 특성을 나타낸다[41, 42]. 이런 딱충새우 신호특성을 파악하여 Fig 17 와 같은 방법으로 딱충새우 신호를 검출하였다. 총 10 분 데이터에서 선박 소음을 최소화하기 위해 100~1500Hz 사이 최소 평균 전력 스펙트럼(평균 PS)이 최소값을 가지는 1분 자료를 추출하였다. 그 후 새우 소리 주요 주파수 대역으로 대역통과필터(1.5~20 kHz) 를 사용하여 처리했다.

$$S(t) = \frac{\sum \epsilon(t)\kappa(t)}{\sqrt{\sum \epsilon(t)^2\kappa(t)^2}} \quad (\text{Eq.1})$$

처리된 신호는 Fig 16(B)와 같이 단위시간(2 ms) 내에 1 Pa 이상 신호를 정규화하고 포락선(envelope)을 취한 후 모든 측정기간에 대한 중간신호를 커널

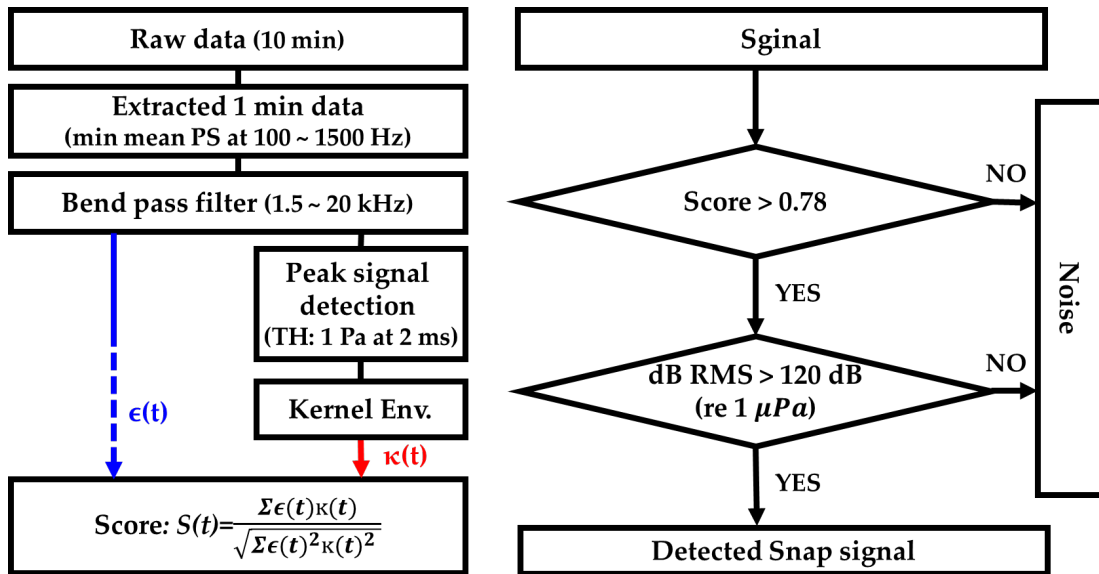


Figure 17 Score calculation and snapping shrimp sound detection method.

함수(κ)로 정의하였다. 단위시간 길이(2 ms)동안 신호를 정규화하고 포락선을 통해 얻어지는 커널 함수(κ)와 신호(ϵ)의 정규화된 상관계수를 Eq(1)와 같이 Score($S(t)$)로 계산하였다. 딱총새우 신호는 Score 가 0.78 이상이고 수신강도(RMS) 120dB 이상일 때 딱총새우 신호로 판별되고 계수되었다. 이때 Score 임계값 0.78 은 이 기간 전체 score 분포 중 상위 1%에 해당한다.

$$\text{Percent excess snap rate}(\%) = \frac{N_s - N_d}{N_d} \times 100 \quad (\text{Eq.2})$$

Eq (2)의 초과스냅율(The percent excess snap rate)은 낮 시간대 딱총새우 소리 최소 빈도수를 기준으로 시간대별 딱총새우 소리 변화량을 상대적인 수치로 나타냈다. N_s 는 신호 스냅 속도 수이며, N_d 는 일출과 일몰 사이 주간 최저 스냅 속도 수(N_d : 2167 in 1st, 1819 in 2 [min-1])이다.

3.2.2 웨이블릿 변환 (Wavelet Transform) 분석

조석은 방향성과 크기가 있는 벡터이기에 스냅샷과 비교하기 위해 조위변화(수위) 최대 진폭에 걸쳐 정규화하여 분석하였다. 연속 웨이블릿 변환은 정규화된 조위와 스냅샷을 분석하기 위해 수행되었다. 조위자료는 96 일 동안 지속적으로 수집된 반면 음향자료는 배터리와 메모리카드 교체를 위해 2019년 10월 26일부터 31일까지 6일 동안 누락되었다. 이 때 누락된 자료를 인위적으로 만들어 삽입해서 웨이블릿 분석을 통해 장주기 해석이 가능하다. 6일간 데이터를 인위적으로 만든 방법은 다음과 같다. 일주기 변화는 측정 전후 평균 15일(삭, 망 주기: 보름)을 통해 생성하였고 장주기 변화는 측정한 모든 기간(6번의 대조기와 소조기)동안 이동 평균값으로 만들었다. 사용 코드로는 MATLAB app 인 wavelet analysis 를 이용하였고 이때 웨이블릿 유형은 'Morlet'을 사용하였다[17, 43].

3.3 결과

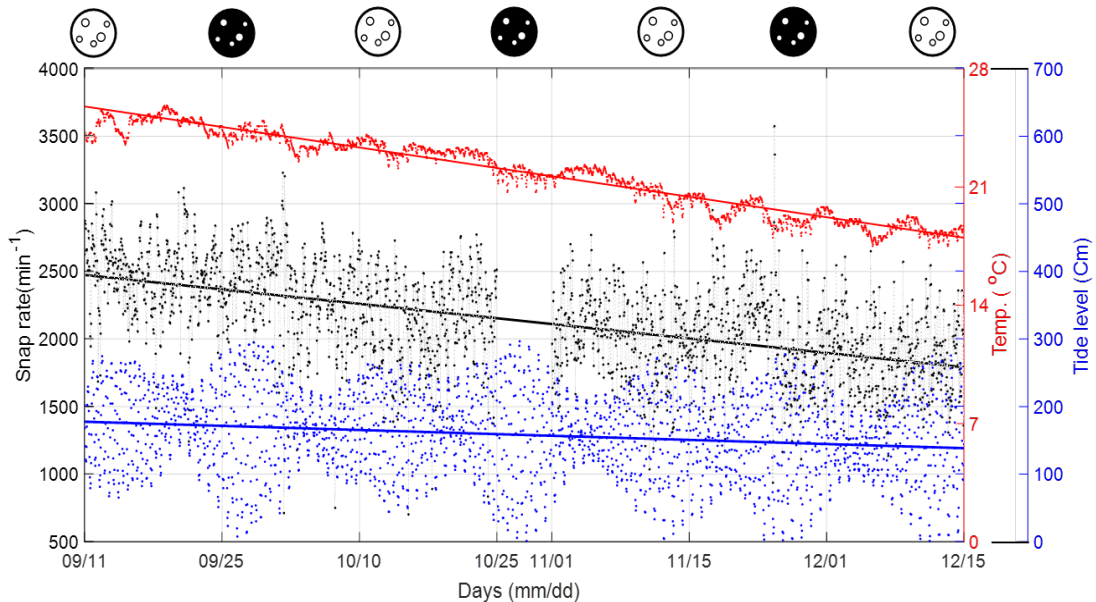


Figure 18 Long-term trends of snap rate (black color), water temperature (red color), and tide level (blue color). White and dark circles are the full moon and new moon, respectively.

계류된 수중청음기로 측정된 음향 데이터를 사용하여 딱총새우 스냅율의 일주기 및 조석 패턴 변화를 분석했다. Fig 18은 측정기간동안 표층수온, 조위 그리고 스냅율을 그래프로 나타냈다. 측정 기간 동안 평균 스냅율은 분당 평균 2500회에서 2000 회로 감소하였고, 수온은 25° C에서 18° C로 감소하는 것을 확인하였다. 평균 스냅율은 9월 중순부터 90일 동안 평균 수온이 1° C 감소할 때 마다 스냅율은 분당 71 회 비율로 감소하여 스냅율이 수온에 정비례한다는 것을 알 수 있다. 평균적으로 조위는 190cm에서 140cm로 감소하였다(snap rate change per tidal level: 10 times/min/cm). 스냅율은 평균 조수 수준과 그 높은 조수 및 낮은 조수 변동과 관련이 있는 것으로 추정된다.

3.3.1 딱총새우 소리의 일주기 특성

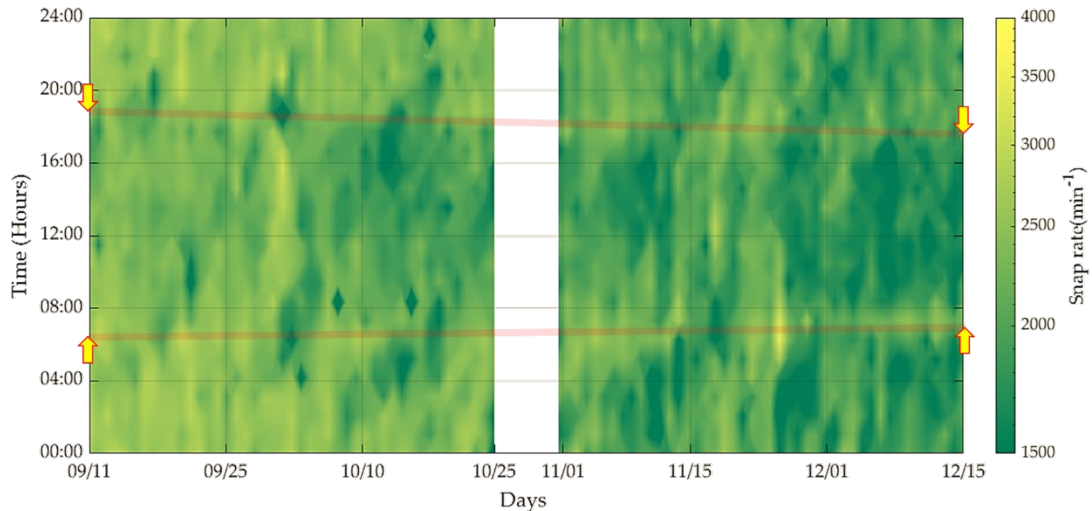


Figure 19 Circadian pattern of the snap rate of snapping shrimp

Fig 19 에서 빨간 실선은 일출, 일몰시간을 표시한다. 일출, 일몰 시간에 스냅율이 증가하고 낮이 밤보다 더 낮은 것을 확인하였다. Fig 20 (A)에 나타낸 것과 같이 측정 기간 동안 딱총새우 소리의 일별 패턴이 뚜렷하게 나타났다. 9월 11일부터 12월 15일까지 첫번째와 두번째 측정에서 스냅율의 평균 및 표준편차는 각각 분당 2304 ± 442 , 1961 ± 435 로 스냅율이 감소하는 경향을 보인다. 이때, 스냅율이 가을에서 겨울로 시간이 지날수록 감소했는데, 주요 원인으로 떨어지는 수온으로 예상된다. 야간 스냅율 평균은 1 분당 평균 2435 와 1973 회, 주간 평균은 1 분당 2168 과 1902 회 관측되었다. 상반기에는 일출과 일몰 때 스냅율이 급격히 증가하지는 않았지만 주간보다 오히려 야간에 스냅율이 더 많이 관측됐다. 초과스냅율은 Fig 20 (B)에 표시되며, 상반기에 스냅율은 낮에 비해 야간에 21%, 일출과 일몰에 17%까지 증가했다. 그러나, 하반기에는 일출 때에 24%, 일몰 때는 17% 급격히 증가함을 보였다. 일몰 직후에는 스냅율이 10%로 떨어졌다가 자정에 15%로 높아졌다. 그 후 일출 직전

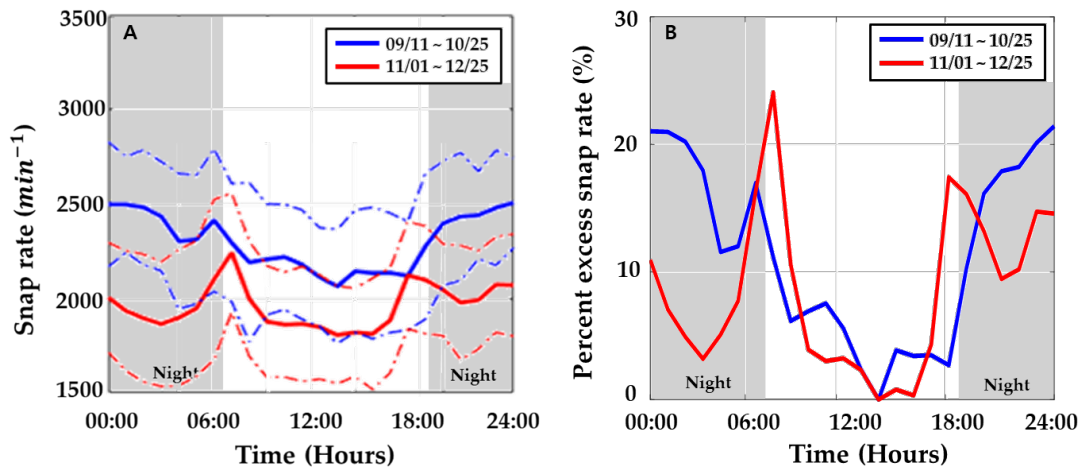


Figure 20 Circadian pattern of the snap rate of snapping shrimp. (A) Mean and standard deviation of the snap rates in a day, (B) The percentage excess snap rate in a day.

스냅율이 3%로 낮아졌다. 상반기 하반기 모두 일출, 일몰 전 후로 스냅율이 급격한 변화를 보였고, 야간이 주간에 비해 더 많은 스냅율이 관측되었다.

3.3.2 딱총새우 소리 조석주기 특성

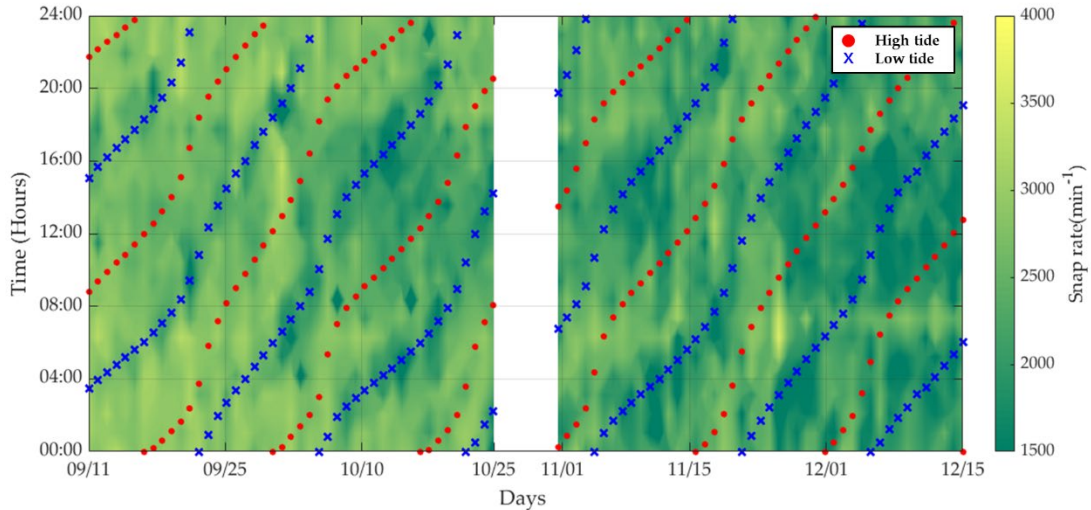


Figure 21 The tidal pattern of the snap rate of snapping shrimp.

Fig 21 과 같이 딱총새우 소리 변화는 조석 주기를 따르며, 스냅율은 만조 때 더 높고, 간조 때에는 더 낮게 나타났다. Fig 21 에서 간조, 만조 시간대 스냅율을 Fig 22(A)에 나타냈다. 이때 전반적으로 스냅율은 상·하반기 2155 ± 320 , 1907 ± 372 (평균 \pm 표준편차)회로 만조 때가 간조 때 보다 더 높았다(Fig 22(B)). 평균 스냅율은 썰물 때보다 밀물 때($p < 0.001$) 13% 높았다. 고속푸리에변환(FFT: Fast Fourier Transform)를 이용한 주파수 분석 결과, 일주조와 반일주조 성분이 지배적이었다. 조석 신호는 하루에 4 번과 6 번 주기와 같은 다른 성분들과 함께 강한 일주조 성분과 반일주조 성분을 보여준다. 이를 바탕으로, 스냅율은 조석 사이클 구성 요소들 중 일주조 성분과 반일주조 성분이 우세함을 설명한다(Fig 22(C)).

주변 소음에 대한 장기 계류 측정은 1°C 당 71 회 비율로 스냅율과 표층수온 사이에 정비례 관계를 입증했다. 스냅율 변동폭은 9 월 중순부터 90 일간 제주 서부 해안바다에서 여름 밤과 일출, 일몰 때 가장 높았고 낮에는 가장 낮았다. 스냅율은 약

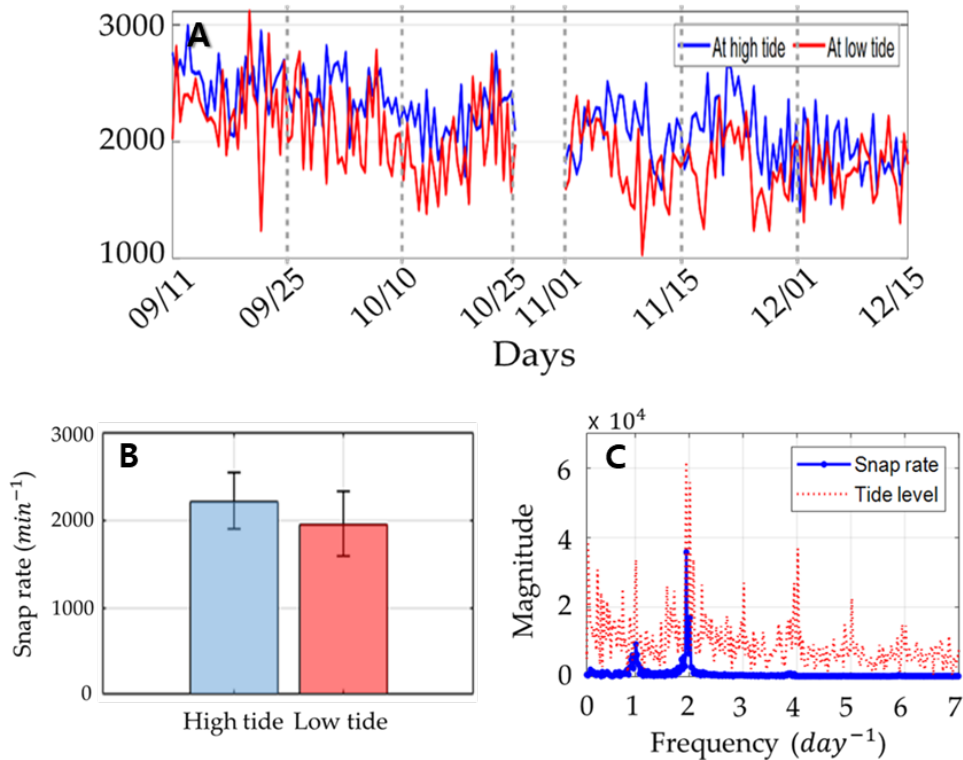


Figure 22 (b) Mean snap rates and standard deviations at high and low tides show significant differences at the 1st and 2nd half periods, (c) Fast Fourier Transform (FFT) of snap rate and tidal level

15 일과 30 일(음력 주기) 동안 조석 수준과 일관성이 약했지만, 45 일 연속 측정으로는 구체적인 결론을 내리기에는 역부족이었다. 딱총새우 소리가 수온과 조위 변화와 연관이 있으며 스냅율은 반일주기와 일주기로 반복하여 변화하는 것을 볼 수 있었다.

Fig 23 는 딱총새우 스냅율과 조위 사이의 상관성을 보여주는 웨이블릿 변환 분석을 보여준다. 이 결과는 FFT 를 통한 결과와 동일하게 조위와 스냅율의 반일주조 성분(0.5 일, $K_2 = 0.50$)과 일주조 성분(1 일, $K_1 = 1.00$)이 우세함을 의미한다. 그러나 달의 위상변화에 따른 대조기, 소조기 특성(예: $M_f = 13.65$, $M_m = 27.5$)이 상대적으로 상관성이 약한 결과를 보여준다. 이는 달의 위상주기와 스냅율의 상호상관관계가 약하다는 의미 보다는 측정기간이 짧아 장주기 특성이 상대적으로

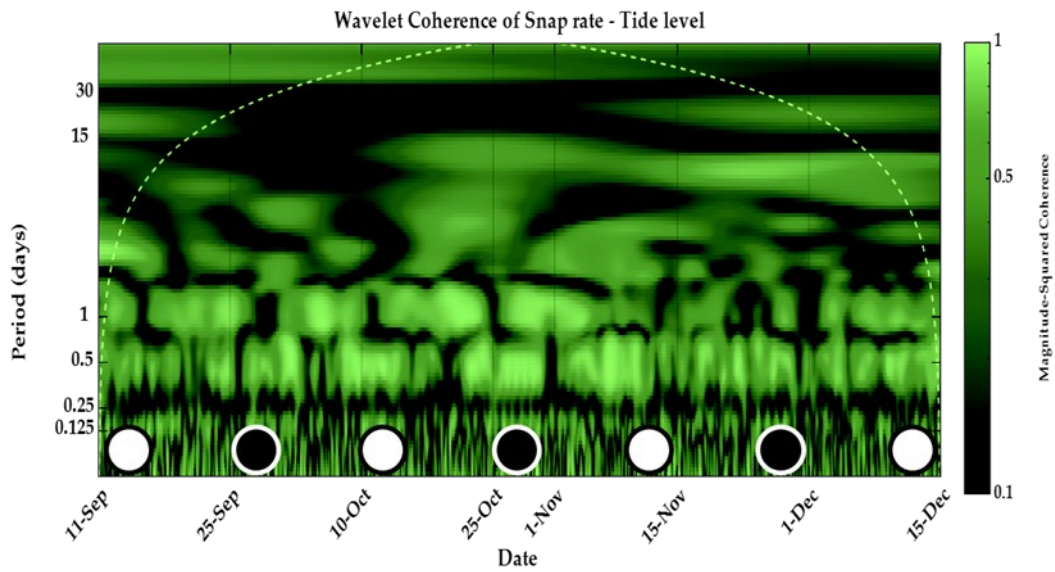


Figure 23 Wavelet transform analysis of snap & tide level. (○: Full moon, ●: New moon)

일주기 특성에 비해 빈도수가 낮은 것으로 해석된다. Fig 23의 0.5, 1 일 주기 성분이 달의 위상에 따라 상관관계 세기가 변하는 것은 보름주기 특성이 유의미하다는 또 하나의 근거이다.

3.4 토의

45 일 동안 주변 소음을 2 회 측정했음에도 불구하고 두 측정기간 사이에 6 일 공백이 있어 조석에 의한 딱총새우 소리 관계를 정확하게 분석하기 어려웠다. 이동평균을 이용해 6 일 동안 측정되지 않은 데이터를 처리하는 과정에서 고주파 성분이 사라졌지만, 일주기 및 조석 주기 성분에 큰 영향은 없었다. 이러한 측정 공백을 메울 수 있는 분석 방법이 향후 연구로 더욱 보완된다면 보다 정확한 장기 분석이 가능할 것으로 기대된다.

딱총새우 소리를 정량적으로 측정하여 분석한 연구는 현장에서 이루어진 경우가 많지 않고 한국 남해 비교적 깊은 수심에서 측정한 딱총새우 소리에 관한 연구는 최근에 이루어졌다. 본 연구와 달리 가시광선이 거의 들어오지 않는 깊이 해역에서 단기간 측정한 데이터를 분석해 스냅을 정량적으로 표현했다[32]. 5 월 측정기간에는 계절적 차이가 있으나, 이 기간에는 200~1200 회 스냅이 발생하였고, 해수면에 따라 스냅이 변화하였다[32].

딱총새우 스냅 일주기 변화는 전 세계 몇몇 해역에서 관찰되었다. 예를 들어, 미국 카리브 해에서 진행된 연구는 일출과 일몰에 새우 스냅이 급격히 증가했지만, 밤보다 낮에 더 높았다[13]. 반면, 미국 노스캐롤라이나(North Carolina)에서는 낮과 밤 스냅이 측정 시간에 따라 변화하였다[17]. 반면, 한국 이어도에서는 새우의 스냅이 풍속에 따라 변화를 보였지만 일주기 패턴을 보이지는 않았다[16].

같은 해역에서 진행된 주변 소음 측정 결과에서는 100 Hz 미만 저주파 대역에서 간조 때 주변소음이 높았으나 딱총새우는 만조 때 스냅이 높았다[44]. 미국 노스캐롤라이나 강하구에서 다양한 어종에 대한 음향특성에 따르면, 조류에 따라 눈에

띄는 변화가 있었지만, 딱총새우 소리는 조석에 의한 영향이 미미했다[18]. 그러나, 이 연구는 새우 스냅을이 조석 변화와 반일조 및 일주조 변화를 보여준다는 것을 확인했다.

제 4 장

결론

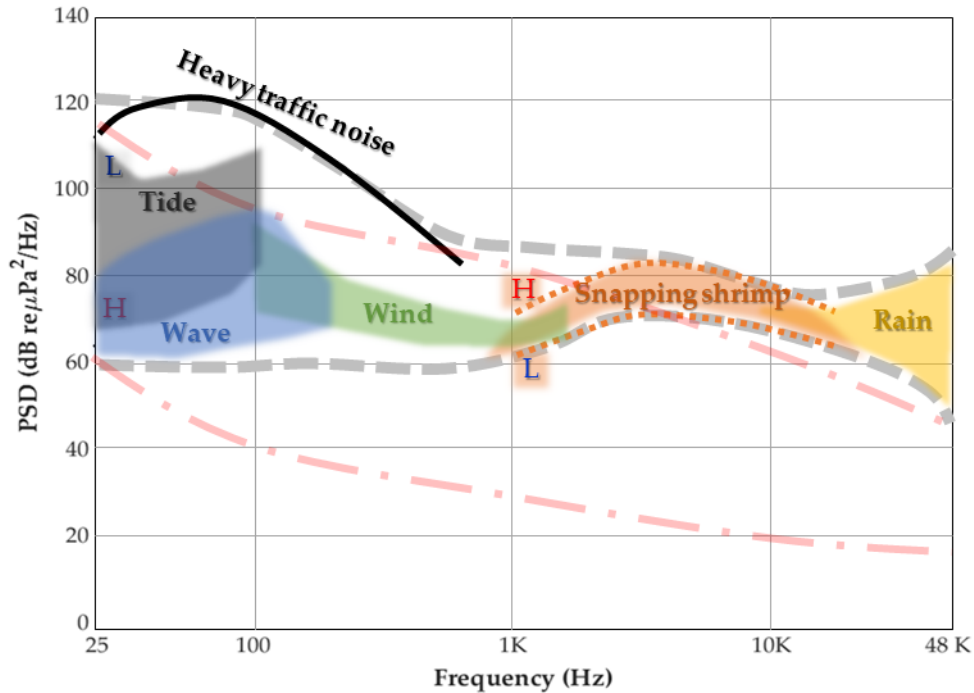


Figure 24 Ambient noise curve in the coastal sea of Jeju. (gray dot line) limits of prevailing noise at the coastal sea of Jeju, (red dash line) limits of prevailing noise at Wenz curve.

해양 환경변화에 따른 수중 음향환경 특성을 알아내기 위하여 수심이 20 m 인 제주 서부 연해에 수중 청음기를 중층에 계류하여 총 4 개월간 90 일에 걸쳐 수중주변소음을 측정하였다. 수중 음향환경에 영향을 미치는 환경변화 인자는 크게 조석, 파랑, 바람 그리고 강우 총 네 가지로 구분하였다. 각 주파수 구간에 따라 환경변화 인자의 영향을 분석하였고 그 결과 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다. 조석에 따른 수중소음레벨 변화는 25 Hz ~ 100 Hz 의 주파수 대역에서 간조와 만조, 달의 삭, 망 주기와 일치하였다. 파랑은 25 Hz~1000 Hz 의 저주파대역에서 중주파대역까지 변화를

보였으나 300 Hz 이상 주파수 대역에서는 5 dB 이내로 영향이 작았다. 바람에 의한 변화는 파랑에 의해 영향을 받는 주파수 대역과 대부분 겹쳤지만 더 높은 주파수 대역인 100 Hz ~ 1000 Hz 구간에서 영향이 있었다. 강우에 의한 변화는 10 kHz 이상 고주파대역에서 변화를 보였다. 4 kHz 이상 고주파 대역에서 대양에서 연구한 웬즈곡선과 비교했을 때 10 dB 정도 더 소음준위가 높았다. 이는 천해에서 주로 서식하는 딱총새우의 영향으로 본 연구해역의 특징이라고 할 수 있다.

4 kHz 이상에서는 딱총새우 소리에 의해서 10 dB 이내의 변화를 보였고 일주기 특성으로 낮과 밤 그리고 일출, 일몰에 따른 스냅율의 변화가 뚜렷했다. 측정해역의 딱총새우는 주간을 기준으로 야간에 최대 20%, 일출, 일몰시에는 짧은 시간동안 25%가량 급격히 증가했다. 조석주기 특성으로 간조에 비해 만조 때 스냅율이 약 11% 높았다. 조위변화와 스냅류의 변화를 주파수분석 결과 일주조 특성과 반일주조 특성이 뚜렷했지만 달의 위상주기에 따른 대조기와 소조기의 영향은 주파수 분석에서 뚜렷한 결과는 보이지 않았다.

본 연구는 제주 연해에서 해양 환경에 따른 수중소음과 딱총새우 소리의 패턴분석을 한 첫 연구이며, 이를 통해 향후 풍력 및 파력발전기 등 해양 구조물이 설치, 운용 될 때 환경영향평가의 척도로서 유용하게 사용될 수 있다. 향후 연구에서는 측정기간 사이의 공백을 최소화하고 측정 샘플 간격을 줄여 장기간 관측을 한다면 좀 더 정확한 해양환경에 따른 수중 음향환경 분석이 가능하며 딱총새우의 대조기, 소조기에 따른 스냅율 변화도 보일 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] G. M. Wenz, "Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 34, no. 12, pp. 1936-1956, 1962.
- [2] M. Hyžný *et al.*, "Comprehensive analysis and reinterpretation of Cenozoic mesofossils reveals ancient origin of the snapping claw of alpheid shrimps," *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-02603-5.
- [3] M. Versluis, B. Schmitz, A. Von der Heydt, and D. Lohse, "How snapping shrimp snap: through cavitating bubbles," *Science*, vol. 289, no. 5487, pp. 2114-2117, 2000.
- [4] W. Brooks and F. Herrick, "MEM NATL ACAD SCI WASH," *Mem. Natl. Acad. Sci. Wash.*, vol. 5, p. 319, 1891.
- [5] K. T. Wong and M. D. Zoltowski, "Closed-form underwater acoustic direction-finding with arbitrarily spaced vector hydrophones at unknown locations," *IEEE journal of oceanic engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 649-658, 1997.
- [6] R. P. Hodges, *Underwater acoustics: Analysis, design and performance of sonar*. John Wiley & Sons, 2011.
- [7] V. O. Knudsen, R. Alford, and J. Emling, "Underwater ambient noise," *J. Mar. Res.*, vol. 7, no. 3, pp. 410-429, 1948.
- [8] W. J. Richardson, C. R. Greene Jr, C. I. Malme, and D. H. Thomson, *Marine mammals and noise*. Academic press, 2013.
- [9] J. A. Hildebrand, "Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean," *Marine Ecology Progress Series*, vol. 395, pp. 5-20, 2009.
- [10] L. Hermannsen, K. Beedholm, J. Tougaard, and P. T. Madsen, "High frequency components of ship noise in shallow water with a discussion of implications for harbor porpoises (*Phocoena phocoena*)," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 136, no. 4, pp. 1640-1653, 2014.

-
- [11] P. H. Dahl, J. H. Miller, D. H. Cato, and R. K. Andrew, "Underwater ambient noise," *Acoustics Today*, vol. 3, no. 1, pp. 23-33, 2007.
- [12] P. H. Rogers and M. Cox, "Underwater sound as a biological stimulus," in *Sensory biology of aquatic animals*: Springer, 1988, pp. 131-149.
- [13] A. Lillis, D. B. Eggleston, and D. R. Bohnenstiehl, "Estuarine soundscapes: distinct acoustic characteristics of oyster reefs compared to soft-bottom habitats," *Marine Ecology Progress Series*, vol. 505, pp. 1-17, 2014.
- [14] J. Butler, J. A. Stanley, and M. J. Butler IV, "Underwater soundscapes in near-shore tropical habitats and the effects of environmental degradation and habitat restoration," *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 479, pp. 89-96, 2016.
- [15] D. H. Cato and M. J. Bell, "Ultrasonic ambient noise in Australian shallow waters at frequencies up to 200 kHz," MATERIALS RESEARCH LABS ASCOT VALE (AUSTRALIA), 1992.
- [16] S.-K. Jung *et al.*, "Seawater temperature and wind speed dependences and diurnal variation of ambient noise at the snapping shrimp colony in shallow water of southern sea of Korea," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 51, no. 7S, p. 07GG09, 2012.
- [17] D. R. Bohnenstiehl, A. Lillis, and D. B. Eggleston, "The curious acoustic behavior of estuarine snapping shrimp: temporal patterns of snapping shrimp sound in sub-tidal oyster reef habitat," *PloS One*, vol. 11, no. 1, p. e0143691, 2016.
- [18] S. W. Ricci, D. B. Eggleston, D. R. Bohnenstiehl, and A. Lillis, "Temporal soundscape patterns and processes in an estuarine reserve," *Marine Ecology Progress Series*, vol. 550, pp. 25-38, 2016.
- [19] C. A. Radford, A. G. Jeffs, C. T. Tindle, and J. C. Montgomery, "Temporal patterns in ambient noise of biological origin from a shallow water temperate reef," *Oecologia*, vol. 156, no. 4, pp. 921-929, 2008.
- [20] E. Staaterman, C. B. Paris, H. A. DeFerrari, D. A. Mann, A. N. Rice, and E. K. D'Alessandro, "Celestial patterns in marine soundscapes," *Marine Ecology Progress Series*, vol. 508, pp. 17-32, 2014.

-
- [21] R. J. Urick, "Principles of underwater sound-2," 1975.
- [22] S. Kim, "A study on the sources of ambient sea noise in the coastal water of Pusan," *Bull Korean Fish Tech Soc*, vol. 26, pp. 180-183, 1990.
- [23] X. Lurton, *An introduction to underwater acoustics: principles and applications*. Springer, 2002.
- [24] P. L. Tyack, "Implications for marine mammals of large-scale changes in the marine acoustic environment," *Journal of Mammalogy*, vol. 89, no. 3, pp. 549-558, 2008.
- [25] D. H. Cato, "Marine biological choruses observed in tropical waters near Australia," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 64, no. 3, pp. 736-743, 1978.
- [26] L. Fishelson, "Ecology and distribution of the benthic fauna in the shallow waters of the Red Sea," *Marine Biology*, vol. 10, no. 2, pp. 113-133, 1971.
- [27] D. Lohse, B. Schmitz, and M. Versluis, "Snapping shrimp make flashing bubbles," *Nature*, vol. 413, no. 6855, pp. 477-478, 2001.
- [28] I. S. SEO, Y. EUN, and K. H. OH, "Benthic invertebrates from Sorae coast," *Korean Journal of Nature Conservation*, vol. 2, no. 3_4, pp. 89-101, 2004.
- [29] 김봉채, "연안해역에서 관측된 수중 생물잡음의 음향특성," 1995.
- [30] D. P. Loye and D. A. Proudfoot, "Underwater noise due to marine life," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 18, no. 2, pp. 446-449, 1946.
- [31] B.-C. Kim, B.-N. Kim, C.-W. Shin, C.-S. Kim, and B.-K. Choi, "Characteristics of Snapping Shrimp Sound Observed in the Korean Coast of the Yellow Sea," *The Sea: JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY OF OCEANOGRAPHY*, vol. 12, no. 3, pp. 142-146, 2007.
- [32] D. H. Lee, J. W. Choi, S. Shin, and H. Song, "Temporal Variability in Acoustic Behavior of Snapping Shrimp in the East China Sea and Its Correlation With Ocean Environments," *Innovation and Discoveries in Marine Soundscape Research*, 2022.
- [33] S.-K. Jung *et al.* (2012) Seawater Temperature and Wind Speed Dependences and Diurnal Variation of Ambient Noise at the Snapping Shrimp Colony in Shallow Water of

Southern Sea of Korea. *JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*. Available: <https://sciwatch.kiost.ac.kr/handle/2020.kiost/3574>

[34] H.-S. Choo and D.-S. Kim, "Tide and Tidal Currents Around the Archipelago on the Southwestern Waters of the South Sea, Korea," *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, vol. 19, no. 6, pp. 582-596, 2013.

[35] J. Haxel *et al.*, "Underwater Noise Measurements around a Tidal Turbine in a Busy Port Setting," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, no. 5, p. 632, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/5/632>.

[36] D. B. Reeder, E. S. Sheffield, and S. M. Mach, "Wind-generated ambient noise in a topographically isolated basin: A pre-industrial era proxy," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 129, no. 1, pp. 64-73, 2011, doi: 10.1121/1.3514379.

[37] J. A. Nystuen, "Rainfall measurements using underwater ambient noise," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 79, no. 4, pp. 972-982, 1986.

[38] J. A. Scrimger, D. J. Evans, and W. Yee, "Underwater noise due to rain—Open ocean measurements," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 85, no. 2, pp. 726-731, 1989.

[39] a. A. Prosperetti and H. N. Oguz, "The Impact of Drops on Liquid Surfaces and the Underwater Noise of Rain," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 25, no. 1, pp. 577-602, 1993, doi: 10.1146/annurev.fl.25.010193.003045.

[40] A. Muthuraj, G. Latha, and R. Ramachandran, "Analysis of shallow water ambient noise due to rain and derivation of rain parameters," *Applied Acoustics*, vol. 88, pp. 114-122, 02/01 2015, doi: 10.1016/j.apacoust.2014.08.010.

[41] M. A. Chitre, J. R. Potter, and S.-H. Ong, "Optimal and near-optimal signal detection in snapping shrimp dominated ambient noise," *IEEE Journal of oceanic engineering*, vol. 31, no. 2, pp. 497-503, 2006.

[42] J. R. Potter, L. T. Wei, and M. Chitre, "Acoustic imaging & the natural soundscape in Singapore waters," in *Proceedings of Mindef-NUS joint seminar, 1997*: Citeseer, pp. 141-147.

[43] A. Grinsted, J. C. Moore, and S. Jevrejeva, "Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series," *Nonlinear processes in geophysics*, vol. 11, no. 5/6, pp. 561-566, 2004.

[44] I. Jeong, S. Min, and D.-G. Paeng, "Moored measurement of the ambient noise and analysis with environmental factors in the coastal sea of Jeju Island," *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, vol. 39, no. 5, pp. 390-399, 2020.