

BSPE 00445-772-1

연안해역에서 관측된 수중 생물잡음의 음향특성

Acoustic characteristics of underwater biological noise observed
in the coast ocean

1995. 2.

한국해양연구소

제 출 문

한국해양연구소장 귀하

본 보고서를 “연안해역에서 관측된 수중 생물잡음의 음향 특성” 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

1995년 2월

한국해양연구소

연구책임자 : 김봉채 (해양물리연구부)

연구 원 : 최복경, 김대원

요 약 문

I. 제 목

연안해역에서 관측된 수중 생물잡음의 음향특성

II. 연구개발의 목적

연안해역에서 관측된 수중동물 발생음의 파형을 조사함과 동시에 스펙트럼 레벨을 분석함으로써 수중동물, 특히 돌고래에 의하여 발생된 음파의 특성을 이해하고자 함

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 수중동물에 의하여 발생된 음의 파형 조사
2. 수중동물에 의하여 발생된 음의 스펙트럼 분석
3. 해수중 주위잡음 레벨과 수중동물 발생음 레벨과의 비교 검토

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

연안해역의 실제 해수중에 있어서 수중동물 발생음의 기초자료로 사용함과 동시에 해수중 주위잡음에 관한 수치모델을 개발하기 위한 기초자료로 활용

SUMMARY

I. Title

Acoustic characteristics of underwater biological noise observed in the coast ocean

II. Objectives of the study

The goal of this study is to understand the characteristics of the underwater biological noise, especially the echolocation signal produced by dolphin in the coast ocean through the waveform investigation and the spectrum analysis of the biological sound.

III. Contents

1. Waveform investigation of sound produced by underwater animals
2. Spectral analysis of sound produced by underwater animals
3. Comparison between biological sound level and ambient noise level

IV. Suggestions

The results of this study provide the basic data on sound produced by underwater animals in the sea and also are available to develop the numerical model on ambient noise in the coastal ocean.

목 차

요약문	3
영문 요약문	4
그림목차	7
제 1 장 서론	8
제 2 장 측정 및 분석 방법	10
제 3 장 결과 및 고찰	13
제 4 장 결론	23
참고문헌	24

CONTENTS

Summary	4
List of Figures	7
Chapter 1. Introduction	8
Chapter 2. Methods of measurement and analysis	10
Chapter 3. Results and discussion	13
Chapter 4. Conclusions	23
References	24

List of Figures

Fig. 1. Hydrophone floating system	12
Fig. 2. Blockdiagrams of recording and spectrum analysis system	12
Fig. 3. Example of echolocation signal by dolphins measured on the date of December 9, 1992	17
Fig. 4. Example of echolocation signal by dolphins measured on the date of February 20, 1993	19
Fig. 5. Example of echolocation signal by dolphins measured on the date of April 10, 1993	21

제 1 장 서론

해수중에서의 주위잡음 레벨 (ambient noise level)은 풍속, 강우량 등 환경의 파라미터 (parameter)를 모니터링 (monitoring)하기 위한 기초자료로서 활용될 수 있을 뿐만 아니라¹⁾⁻²⁾ 소나 (sonar)와 같은 수중음향 계측기를 설계할 때 신호 대 잡음비 (signal to noise ratio)를 산출하는 데 필요³⁾ 입력인자 중의 하나이다. 원양심해에서의 주위잡음은 1940년대에 측정된 자료를 정리함으로써 개괄적인 사실이 밝혀지게 되었다. 이 결과에 의하면, 20~500 Hz의 주파수 대역에서는 원거리 항행선박 (distant ship traffic)이 주된 잡음원이고, 500 Hz~50 kHz 주파수 대역에서는 주로 해표면에서의 바람 (wind)에 의하여 발생하는 것으로 나타났다⁴⁾.

그러나 연안해역에 있어서의 해수중 주위잡음은 시공간적으로 심하게 변동할 뿐만 아니라 항행선박, 바람 등에 의한 잡음 외에도 수중동물, 해변에서 부서지는 파도 등의 잡음도 첨가되므로 매우 복잡하리라 예측된다. 그리고 연안해역에 있어서는 계절 및 시기에 따라 수중동물에 의하여 발생하는 잡음이 매우 우세한 것으로 알려져 있다. 따라서 한반도 주변의 연안해역에서 수중잡음을 측정하여 그 특성을 밝히는 것은 소나와 같은 수중음향 기기를 사용할 때 매우 유용하리라 생각된다. 특히 돌고래 (dolphin) 등의 해산 포유류에 의하여 발생하는 임펄스 음파 (impulse sound)는 소나의 신호를 심하게 간섭하는 것으로 알려져 있다. 또한 이와 같은 수중동물에 의하여 발생하는 음에 관한 연구는 수중동물의 생태 연구를 위하여도 필요할 것이다.

육상에서의 박쥐와 마찬가지로 해수중에서 돌고래 등의 수중동물은 음파를 발생하고 수신함으로써 거리 및 방향을 측정할 뿐만 아니라 수중 목표물에 관한 정보를 얻고 있는 것으로 알려져 있다. 이에 관하여는 오래

전부터 다양한 연구가 행해졌는데 주로 돌고래류가 발생하는 향측음 신호(響測音信號, echolocation signal)의 파형(waveform) 및 그 스펙트럼 특성 등이 조사되었다⁵⁾⁻⁹⁾. 아울러 돌고래 향측음의 방사(放射) 및 수파 지향성(受波指向性)에 관한 연구도 보고되어 있다¹⁰⁾⁻¹¹⁾. 그러나 자연상태의 돌고래의 경우 돌고래의 위치 제어가 곤란하기 때문에 이러한 연구는 대부분 수조에서 측정하거나 또는 길들여진 돌고래를 해수중에 고정하여 측정된 것을 기초로 하고 있다.

동해중부의 연안해역에서 해수중 주위잡음을 측정하는 동안 조사선에서 육안으로 흰줄무늬 돌고래(Pacific white-sided dolphin, *Lagenorhynchus obliquidens*)를 식별할 수 있는 기회가 있었다. 즉, 1992년 12월 9일, 1993년 2월 20일 및 4월 10일 중이었다. 여기에서는 돌고래가 출현하였을 때의 해수중 주위잡음의 녹음자료를 분석하여 사용하였다. 우선 돌고래 향측음의 대표적인 파형을 주의 깊게 조사하였다. 그 다음 돌고래 향측음의 스펙트럼 레벨(spectrum level)을 분석하여 향측음이 없을 때의 해수중 주위잡음 스펙트럼 레벨과 비교함으로써 실제 해상에서 돌고래에 의하여 발생된 수중음의 특성을 밝히고자 하였다.

제 2 장 측정 및 분석 방법

이 연구에 사용된 돌고래에 의하여 발생된 향측음의 측정 및 분석 방법에 대하여 크게 두 과정으로 나누어 생각할 수 있다. 하나는 해상에서 돌고래에 의하여 발생된 향측음을 녹음하는 과정이고, 다른 하나는 녹음된 음의 파형 및 스펙트럼을 분석하는 과정이다.

먼저, 해상에서의 녹음은 다음과 같은 방법으로 실시하였다. 동해 중부해역의 속초 연안 (수심 : 200 m)에서 조사선을 사용하여 해수중 주위잡음을 측정하고 있는 동안 육안으로 돌고래가 식별된 경우인 1992년 12월 9일, 1993년 2월 20일 및 4월 10일 중에 돌고래 향측음을 조사선상에서 녹음하였다. 이 때에는 그림 1과 같이 수심 30 m에 위치한 수중 마이크로폰 (hydrophone)으로 수중음을 수파하였으며, 그림 2의 녹음시스템을 사용하여 녹음하였다. 수중음을 녹음하는 동안 조사선에서 방사되는 잡음을 가능한 줄이기 위하여 조사선의 주기관, 보조기관 등 선내 잡음원의 가동을 중지하였다. 그리고 축전지에서 공급된 직류를 인버터 (inverter)에서 교류로 변환시켜 이것을 측정기의 전원으로 사용하였다. 수중 마이크로폰에서 포착된 수중음을 측정용 증폭기 (measuring amplifier)로 적절한 레벨이 되도록 증폭시킨 다음, 테이프 레코더 (tape recorder)를 사용하여 녹음하였다.

여기에 사용된 수중 마이크로폰 (Bruel & Kjaer사, Model 8101)은 모든 방향에 대하여 수파감도 (receiving sensitivity)가 거의 일정한 무지향성으로서 주파수 1 Hz~120 kHz의 대역에서 평탄한 주파수 특성 (± 3 dB 이내)을 갖고 있다. 그리고 측정용 증폭기 (Bruel & Kjaer사, Model 2636)는 주파수 2 Hz~200 kHz의 대역에서 그 특성 (± 0.5 dB 이내)이 평탄하고, 테이프 레코더 (METRUM사, Model RSR 512)는 주파수 대역 DC~100 kHz에서 평탄한 특성을 갖고 있다.

다음에, 수중음의 파형 및 스펙트럼 분석은 실험실에서 그림 2의 분석 시스템을 사용하여 실시하였다. 녹음된 수중음을 테이프 레코더로 재생하여, 이것을 FFT 분석기 (FFT analyzer, AND사, Model AD-3525)에 의하여 파형을 얻도록 함과 동시에 이에 해당하는 부분의 스펙트럼을 주파수 범위 1~100 kHz에서 250 Hz의 간격으로 구하였다. 얻어진 분석치에 수중 마이크론의 수파감도, 측정용 증폭기의 증폭도 (gain) 및 스펙트럼 분석의 밴드폭 (band width)을 보상하여 각각의 주파수에서의 스펙트럼 레벨을 구하였다. 여기에서는 1 μ Pa을 0 dB로 하였다.

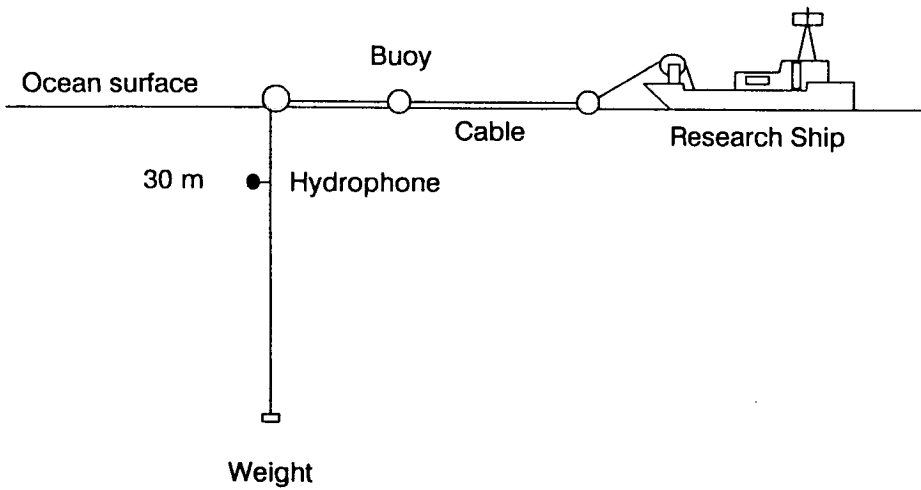


Fig. 1. Hydrophone floating system.

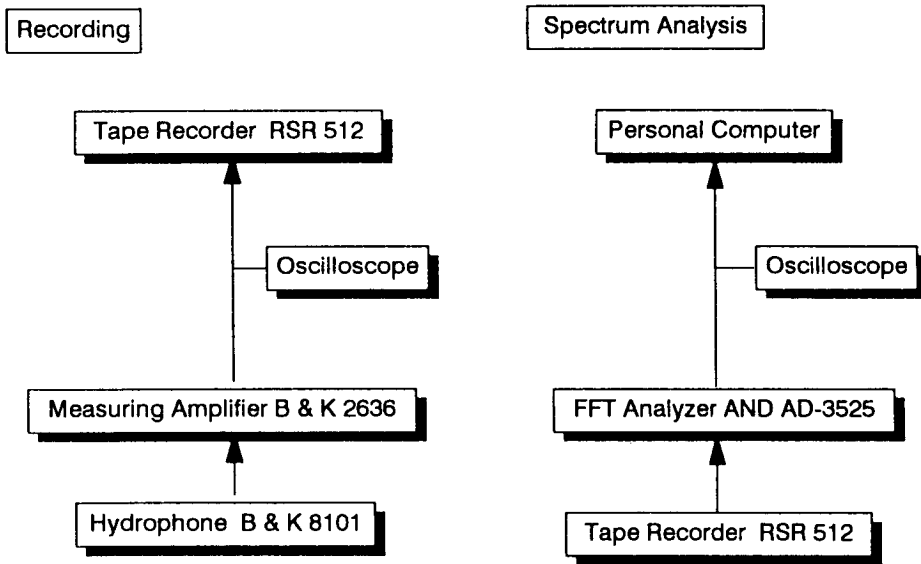


Fig. 2. Blockdiagrams of recording and spectrum analysis system.

제 3 장 결과 및 고찰

수심 30 m에 위치한 수중 마이크로폰으로 1992년 12월 9일 중에 수신한 돌고래 향측음 신호의 예를 그림 3에 나타내었다. 이 때 해표면에서의 풍속은 11~12 노트(knots)였다. 먼저, 돌고래 향측음 신호의 트레인(train)을 이 그림의 (a)에 나타내었다. 이것을 자세히 살펴보면 120 ms 안에 약 60 개 정도의 임펄스가 존재하여 약 2 ms의 간격으로 돌고래의 향측음이 수파되고 있었다. 그리고 이것의 진폭은 배경잡음의 진폭에 비하여 약 4~10 배 정도 크게 나타나고 있었다. 다음에, 이러한 돌고래 향측음의 대표적인 파형을 확대하여 이 그림의 (b)에 나타내었으며, 이 파형의 주파수 스펙트럼을 이 그림의 (c)에 나타내었다. 그리고 참고로 돌고래 향측음이 존재하지 않을 때, 해수중 주위잡음의 스펙트럼 레벨을 이 그림의 (d)에 나타내었다. 그림 3의 (b)에 의하면, 돌고래 향측음의 대표적인 파형은 임펄스의 형태로서 펄스의 전체 길이가 약 0.5 ms였으며, 주위잡음의 진폭에 비하여 매우 큰 진폭을 갖고 있었다. 그리고 이러한 파형은 처음에는 음 (-)의 방향으로 작은 진폭을 갖고 있었으나, 이어서 양 (+)의 방향으로 커다란 진폭을 보였다. 그 다음, 음 (-)의 방향으로 가장 큰 진폭을 보이고 나서 다시 양 (+)의 방향으로 커다란 진폭을 보인 후 작은 진폭으로 진동하고 있는 형태였다.

그림 3의 (c)로부터 돌고래 향측음의 스펙트럼을 자세히 살펴보면, 돌고래가 발생한 음파는 주파수 18~90 kHz의 스펙트럼을 갖고 있었다. 그리고 돌고래 발생음의 레벨 피크(level peak)는 주파수 약 25~55 kHz에서 나타나고 있었다. 돌고래 향측음의 스펙트럼 레벨을 돌고래 향측음이 존재하지 않을 경우의 주위잡음 스펙트럼 레벨을 나타낸 그림 3의 (d)와 비교하여 보면, 주파수 범위 1~18 kHz에서는 레벨이 서로 거의 같음을 알 수 있다. 그러나 주파수 범위 18~90 kHz에서는 돌고래 발생음이 존재하

는 경우가 존재하지 않을 때보다 약 5~30 dB 정도 높게 나타났다. 특히 주파수 범위 30~50 kHz에서는 돌고래의 향측음이 존재하는 경우에는 배경잡음보다 약 30 dB 정도 높게 나타났다. 그러나 주파수 범위 90 kHz 이상에서는 돌고래의 향측음이 존재하는 경우에도 그 레벨이 해수중 주위 잡음의 레벨과 거의 같게 나타났다.

1993년 2월 20일 중에 수신한 돌고래 향측음 신호의 예를 그림 4에 나타내었다. 이 때 해표면에서의 풍속은 3~4 노트였다. 1992년 12월 중에 수신한 돌고래 향측음 신호의 경우와 같이, 이 때 수파한 돌고래 발생음의 트레인을 이 그림의 (a)에 나타내었다. 그리고 이러한 돌고래 향측음의 대표적인 파형을 확대하여 이 그림의 (b)에 나타내었고, 이 파형의 주파수 스펙트럼을 이 그림의 (c)에 나타내었다. 또한 돌고래 향측음이 존재하지 않을 때, 해수중 주위잡음의 스펙트럼을 이 그림의 (d)에 나타내었다. 먼저, 이 그림의 (a)를 자세히 살펴보면 120 ms 안에 약 14 개 정도의 임펄스가 존재하여 약 8.5 ms의 간격으로 돌고래의 향측음이 수파되고 있었다. 그리고 이것의 진폭은 배경잡음의 진폭에 비하여 매우 크게 나타났으며, 약 10~40 배 정도 크게 나타나고 있었다. 다음에, 그림 4의 (b)에 의하면, 돌고래 향측음의 대표적인 파형은 임펄스로서 펄스의 길이가 약 0.25 ms였으며, 배경잡음의 진폭에 비하여 매우 큰 진폭을 갖고 있음을 알 수 있었다. 그리고 이러한 파형은 1992년 12월 중에 수신한 경우와 거의 같았다. 처음에는 작은 진폭을 가진 한 사이클 (cycle)의 진동을 보인 다음, 양 (+)의 방향으로 가장 큰 진폭을 갖고 있었다. 그 후, 음 (-)의 방향으로 가장 큰 진폭을 보이고 나서 작은 진폭으로 진동하고 있는 형태였다.

그림 4의 (c)로부터 돌고래가 발생한 향측음의 주파수 스펙트럼을 살펴보면, 돌고래 발생음은 매우 광범위한 주파수 성분을 포함하고 있어 주파수 범위 15~100 kHz에서 스펙트럼을 갖고 있었다. 그리고 돌고래 발생음의 레벨 피크는 주파수 범위 35~50 kHz에서 나타나고 있었다. 이러한 돌고래 발생음의 스펙트럼을 돌고래 향측음이 존재하지 않을 경우의 주위

잡음 스펙트럼을 나타낸 그림 4의 (d)와 비교하여 보면, 주파수 범위 1~15 kHz에서는 레벨이 서로 거의 같았다. 그러나, 주파수 범위 15~100 kHz에서는 돌고래 발생음이 존재하는 경우가 존재하지 않을 때보다 약 5~40 dB 정도 높게 나타났다. 특히 주파수 범위 35~50 kHz에서는 돌고래의 향측음이 있을 경우에는 배경잡음보다 약 40 dB 정도 높게 나타났다.

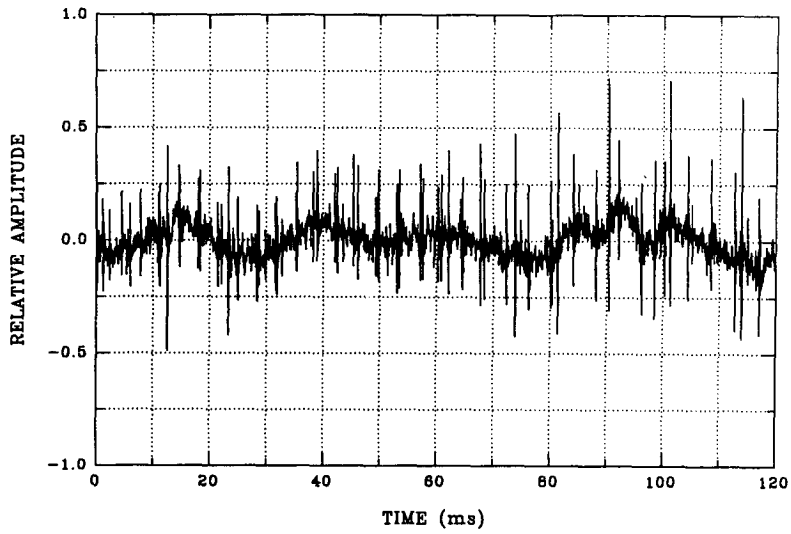
1993년 4월 10일 중에 수신한 돌고래 향측음 신호의 예를 그림 5에 나타내었다. 이 때 해표면에서의 풍속은 4~5 노트였다. 1992년 12월 중에 수신한 돌고래 향측음 신호의 경우와 같이, 이 때 수파한 돌고래 발생음의 트레이스를 이 그림의 (a)에 나타내었다. 그리고 이러한 돌고래 향측음의 대표적인 파형을 확대하여 이 그림의 (b)에 나타내었고, 이 파형의 주파수 스펙트럼을 이 그림의 (c)에 나타내었다. 또한 돌고래 향측음이 존재하지 않을 때, 해수중 주위잡음의 스펙트럼을 이 그림의 (d)에 나타내었다. 먼저, 이 그림의 (a)를 자세히 살펴보면 120 ms 안에 약 11 개 정도의 커다란 임펄스가 존재하여 약 11 ms의 간격으로 돌고래의 향측음이 수파되고 있었으며, 그 외에도 다수의 작은 임펄스가 수신되고 있었다. 그리고 커다란 임펄스의 진폭은 배경잡음의 진폭에 비하여 매우 크게 나타났으며, 약 15~30 배 정도 크게 나타나고 있었다. 다음에, 그림 5의 (b)에 의하면, 돌고래 향측음의 대표적인 파형은 임펄스로서 펄스의 길이가 약 0.3 ms였으며, 배경잡음의 진폭에 비하여 매우 큰 진폭을 갖고 있음을 알 수 있었다. 그리고 이러한 파형은 1992년 12월 중에 수신한 경우와 같았다.

그림 5의 (c)로부터 돌고래가 발생한 향측음의 주파수 스펙트럼을 살펴보면, 돌고래 발생음은 매우 광범위한 주파수 성분을 포함하고 있어 주파수 범위 8~100 kHz에서 스펙트럼을 갖고 있었으며, 특히 주파수 범위 20~100 kHz에서 두드러졌다. 그리고 돌고래 발생음의 레벨 피크는 주파수 범위 30~60 kHz에서 나타나고 있었다. 이러한 돌고래 발생음의 스펙트럼을 돌고래 향측음이 존재하지 않을 경우의 주위잡음 스펙트럼을 나타낸 그림 5의 (d)와 비교하여 보면, 주파수 범위 1~8 kHz에서는 레벨이 서

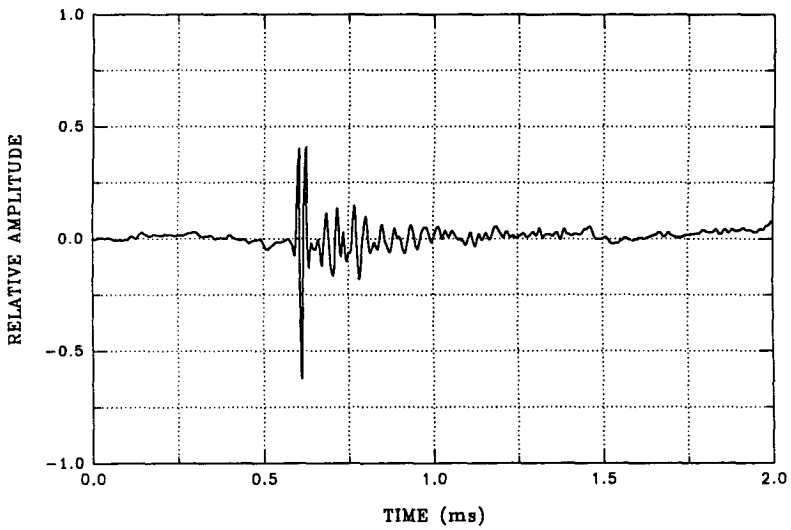
로 거의 같았다. 그러나, 주파수 범위 8~20 kHz에서는 돌고래 발생음이 존재하는 경우가 존재하지 않을 때보다 약 5~10 dB 정도 높게 나타났으며, 주파수 범위 20~100 kHz에서는 돌고래 발생음이 존재하는 경우가 존재하지 않을 때보다 약 15~35 dB 정도 높게 나타났다. 특히 주파수 범위 30~60 kHz에서는 돌고래의 향측음이 있을 경우에는 배경잡음보다 약 30~35 dB 정도 높게 나타났다.

동해중부의 연안해역에서 수신한 돌고래 향측음을 분석한 결과, 그 파형은 임펄스 형태였으며 그것의 전체 길이는 0.25~0.5 ms 정도 였다. 그리고 그것의 전형적인 파형은 처음에는 음 (-)의 방향으로 작은 진폭을 갖고 있었으나, 이어서 양 (+)의 방향으로 커다란 진폭을 보였으며, 그 다음 다시 음 (-)의 방향으로 가장 큰 진폭을 보이고 나서 양 (+)의 방향으로 커다란 진폭을 보인 후 작은 진폭으로 진동하고 있는 형태였다. 돌고래 발생음의 주파수 스펙트럼은 약 18~90 kHz의 광범위한 성분을 포함하고 있었다. 그리고 돌고래 향측음의 레벨 피크는 주파수 범위 35~55 kHz에서 나타났으며, 이것은 돌고래의 발생음이 없는 경우의 해수중 주위잡음의 레벨에 비하여 약 30~40 dB 정도 높게 나타났다. 따라서 공진 주파수가 30~60 kHz인 능동 소나 (active sonar)의 경우에는 돌고래의 향측음에 의하여 간섭을 크게 받으리라 생각된다.

여기에서는 시간적인 제약 때문에 돌고래 향측음 신호에 대한 다양한 분석을 실시하지 못하였지만, 돌고래 발생음의 음원 레벨 (source level)의 추정뿐만 아니라 다음과 같은 다양한 조사가 통계적인 처리를 통하여 이루어져야 하리라고 생각된다. 즉, 돌고래 향측음 신호의 전체 길이에 관한 분포 조사, 향측음 임펄스 사이의 시간 간격에 관한 분포 조사, 향측음의 파형에 관한 분포 조사 및 이의 스펙트럼 분포 조사, 그리고 생태학적인 측면에서 각각의 신호에 대한 돌고래의 생태 연구가 동시에 행해져야 할 것이다.

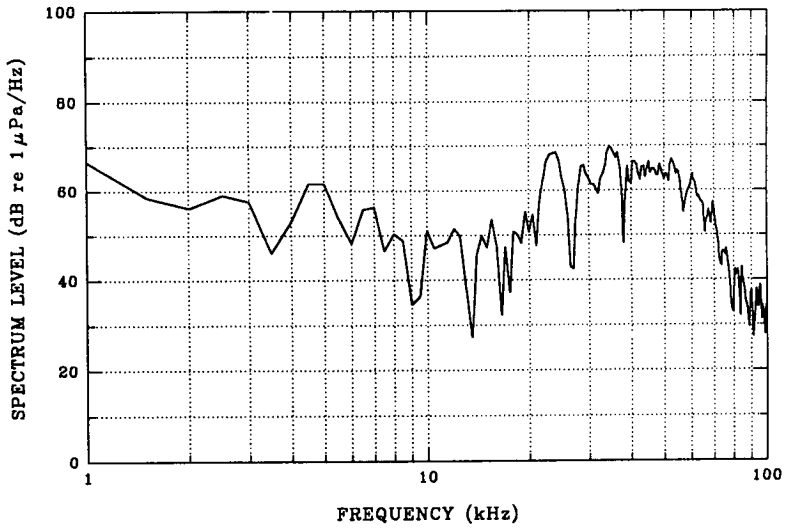


(a)

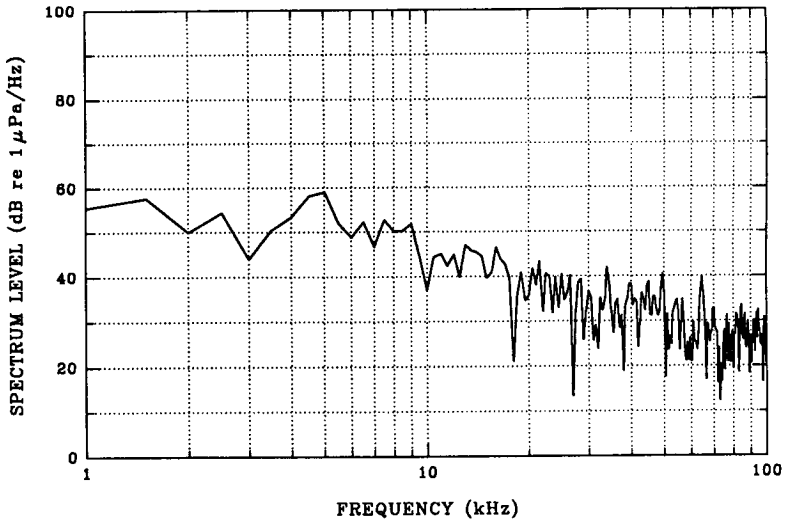


(b)

Fig. 3. Example of echolocation signal by dolphins measured on the date of December 9, 1992. (a) long train, (b) waveform, (c) spectrum, and (d) ambient noise spectrum.

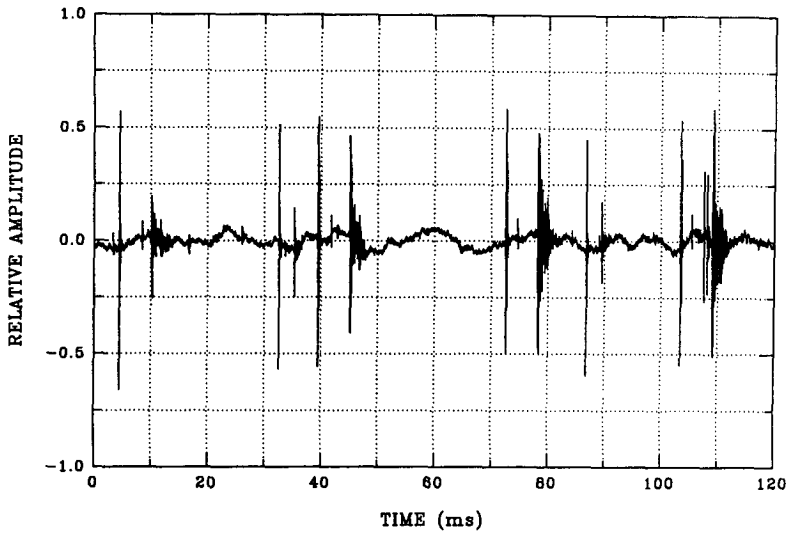


(c)

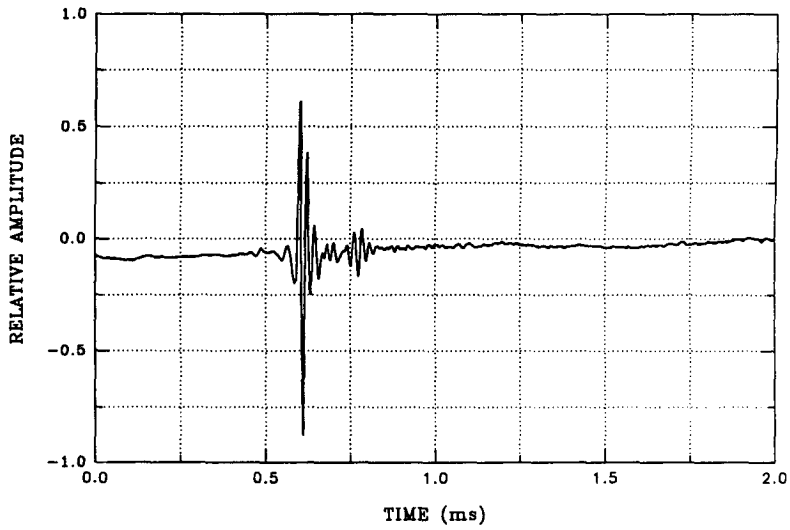


(d)

Fig. 3. (Continued).

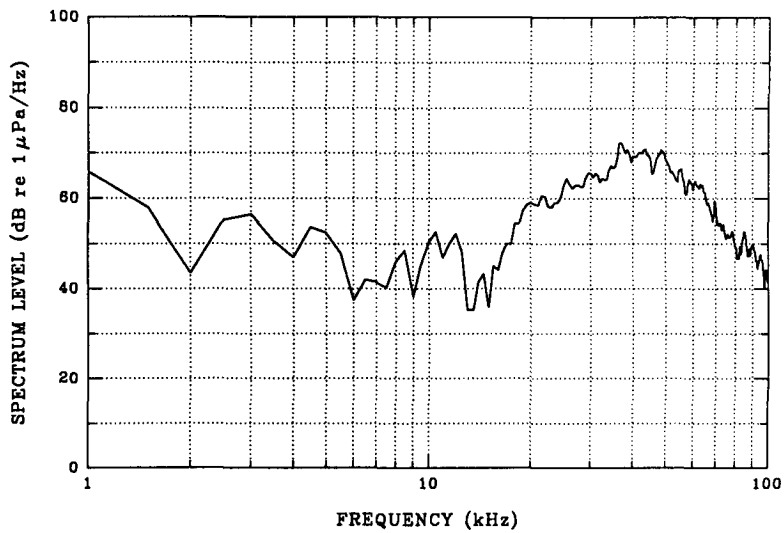


(a)

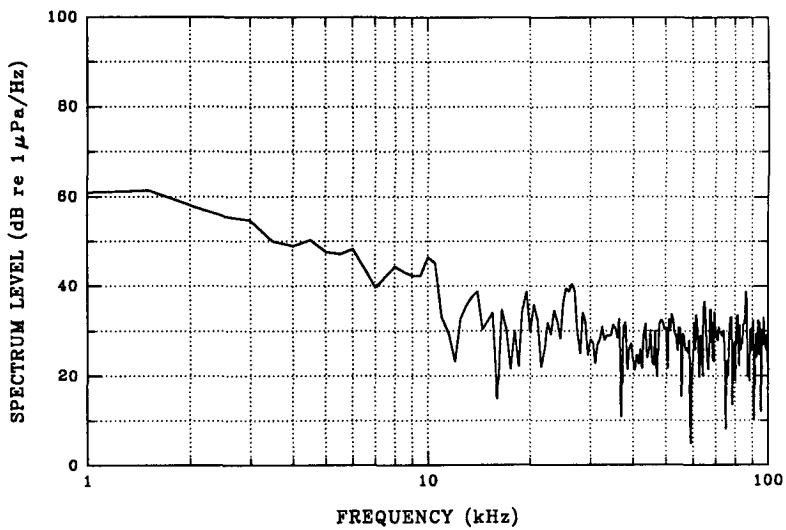


(b)

Fig. 4. Example of echolocation signal by dolphins measured on the date of February 20, 1993. (a) long train, (b) waveform, (c) spectrum, and (d) ambient noise spectrum.

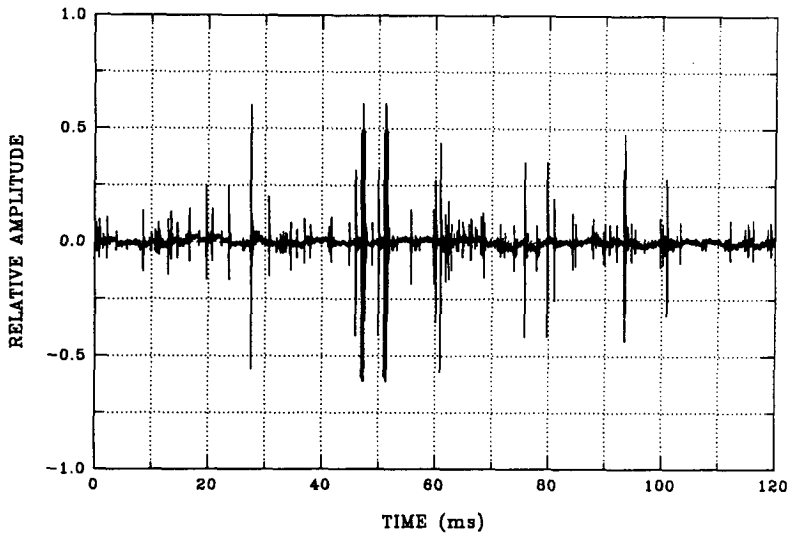


(c)

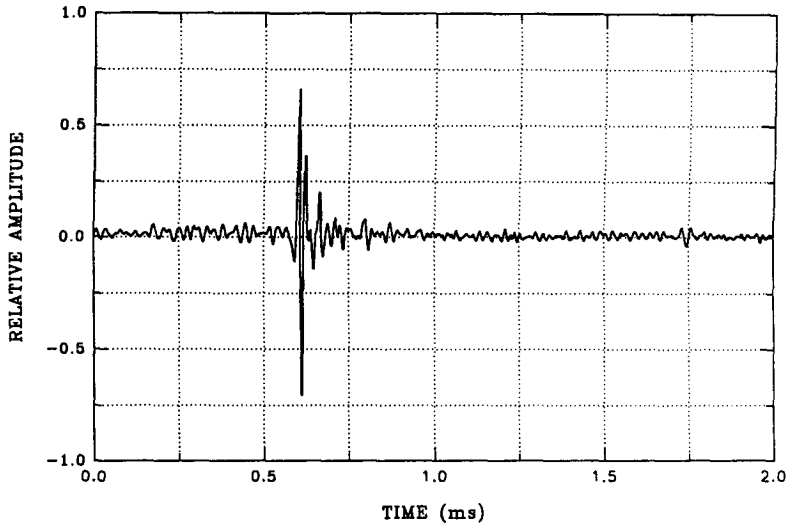


(d)

Fig. 4. (Continued).



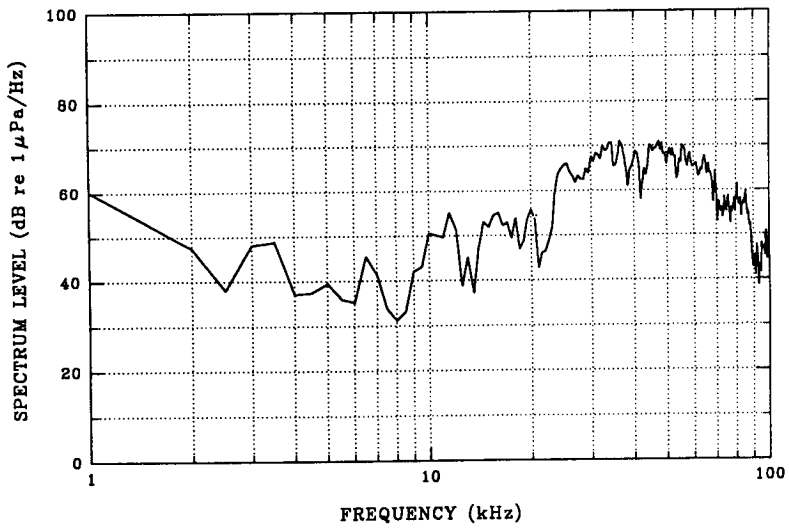
(a)



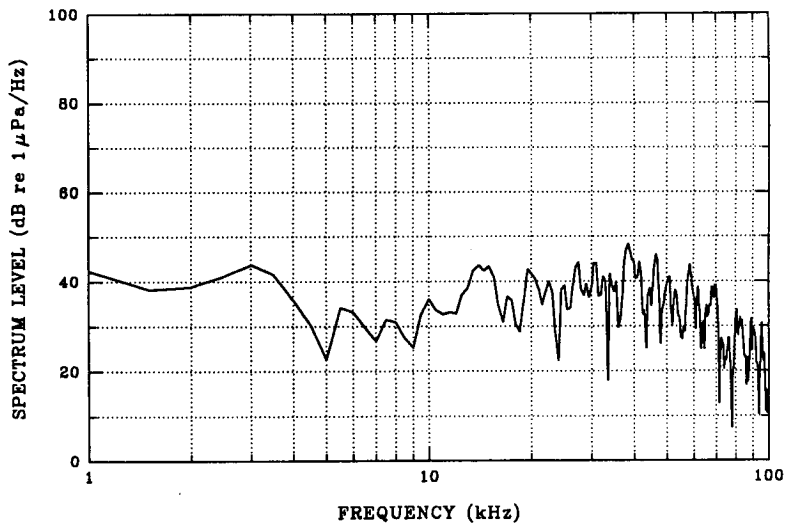
(b)

Fig. 5. Example of echolocation signal by dolphins measured on the date of April 10, 1993. (a) long train, (b) waveform, (c) spectrum, and (d) ambient noise spectrum.





(c)



(d)

Fig. 5. (Continued).

제 4 장 결론

동해중부 연안해역 (수심 : 200 m)에서 해수중 주위잡음을 측정하는 동안 돌고래의 발생음을 수신하여 그 특성에 관하여 조사하였다. 먼저 돌고래 발생음의 파형을 주의 깊게 관찰하였다. 그리고 이러한 돌고래 향측음의 주파수 스펙트럼을 구하여 돌고래가 없을 때의 수중 주위잡음의 스펙트럼과 비교하였다. 그 결과 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 돌고래 향측음 신호의 파형은 임펄스 형태였으며 그것의 전체 길이는 0.25~0.5 ms 정도 였다.
2. 돌고래 발생음의 파형은 처음에는 음 (-)의 방향으로 작은 진폭을 갖고 있었으나, 이어서 양 (+)의 방향으로 커다란 진폭을 보였으며, 그 다음 다시 음 (-)의 방향으로 가장 큰 진폭을 보이고 나서 양 (+)의 방향으로 커다란 진폭을 보인 후 작은 진폭으로 진동하고 있는 형태였다.
3. 돌고래 발생음의 주파수 스펙트럼은 약 18~90 kHz의 광범위한 성분을 포함하고 있었다.
4. 돌고래 향측음의 스펙트럼 레벨 피크는 주파수 범위 35~55 kHz에서 나타났으며, 이것은 돌고래의 발생음이 없는 경우의 해수중 주위잡음의 레벨에 비하여 약 30~40 dB 정도 높게 나타났다.

참고문헌

- 1) D. D. Lemon, D. M. Farmer, and D. R. Watts, "Acoustic measurements of wind speed and precipitation over a continental shelf," J. Geophys. Res. 89, 3462-3472 (1984).
- 2) J. A. Nystuen, "Rainfall measurements using underwater ambient noise," J. Acoust. Soc. Am. 79, 972-982 (1986).
- 3) R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound* (McGraw-Hill, New York, 1983).
- 4) G. M. Wenz, "Acoustic ambient noise in the ocean : Spectra and sources," J. Acoust. Soc. Am. 34, 1936-1956 (1962).
- 5) K. J. Diercks, R. T. Trochta, C. F. Greenlaw, and W. E. Evans, "Recording and analysis of dolphin echolocation signals," J. Acoust. Soc. Am. 49, 1729-1732 (1971).
- 6) W. W. L. Au, R. W. Floyd, R. H. Penner, and A. E. Murchison, "Measurement of echolocation signals of the Atlantic bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus* Montagu, in open waters," J. Acoust. Soc. Am. 56, 1280-1290 (1974).
- 7) L. B. Poche, L. D. Luker, and P. H. Rogers, "Some observations of echolocation clicks from free-swimming dolphins in a tank," J. Acoust. Soc. Am. 71, 1036-1038 (1982).

- 8) C. W. Thorpe and S. M. Dawson, "Automatic measurements of descriptive features of Hector's dolphin vocalizations," J. Acoust. Soc. Am. 89, 435-443 (1991).
- 9) C. W. Thorpe and S. M. Dawson, "Automatic measurements of descriptive features of Hector's dolphin vocalizations," J. Acoust. Soc. Am. 89, 435-443 (1991).
- 10) W. W. L. Au, P. W. B. Moore, and D. Pawloski, "Echolocation transmitting beam of the Atlantic bottlenose dolphin," J. Acoust. Soc. Am. 80, 688-691 (1986).
- 11) W. W. L. Au and P. W. B. Moore, "Receiving beam patterns and directivity indices of the Atlantic bottlenose dolphin *Tursiops truncatus*," J. Acoust. Soc. Am. 75, 255-262 (1984).