동해 중부 연안에서 관측된 흰줄무늬 돌고래 발생음의 음향 특성

김 봉채, 최 복경
한국해양연구소 해양물리연구부

Acoustic characteristics of pacific white-sided dolphin sound observed in the middle coast of Donghae

B. C. Kim, B. K. Choi
Physical Oceanography Division, Korea Ocean Research & Development Institute

요 약

동해 중부 연안(수심: 200 m)에서 해수 중 주위잡음을 측정하는 동안 태평양 흰줄무늬 돌고래(pacific white-sided dolphin, 학명: Lagenorhynchus obliquidens)의 발생음을 수신하였으며 그 음향 특성을 분석하였다. 그 결과 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다. 첫째, 돌고래 발생음의 파형은 임펄스의 형태로서 그것의 전체 길이는 0.25~60.50 ms였고, 처음에 음(−)의 방향으로 작은 진폭을, 이어서 양 (+)의 방향으로 커다란 진폭을 보였으며, 그 후 작은 진폭으로 빠르게 감쇠진동하고 있는 형태를 나타내었다. 둘째, 돌고래 발생음의 주파수 스펙트럼은 약 18~90 kHz의 광범위한 성분을 포함하고 있었다. 셋째, 돌고래 발생음의 스펙트럼 레벨 피크는 주파수 범위 35~55 kHz에서 나타났으며, 이것은 돌고래의 발생음이 없는 경우의 해수 중 주위잡음의 레벨에 비하여 약 30~40 dB 높게 나타났다.

I. 서 론

해수 중에서의 주위잡음 레벨은 풍속, 강우량 등 환경의 파라미터를 모니터링하기 위한 기초자료로서 활용될 수 있을 뿐만 아니라[1,2] 소나와 같은 수중음향 계측기를 설계할 때 신호 대 잡음비를 산출하는 데 필요한[3] 입력인자 중의 하나이다. 원양심해에서의 주위잡음은 1940년대에 측정된 자료를 정리함으로써 개괄적인 사실이 밝혀지게 되었다. 이 결과에 의하면, 20~500 Hz의 주파수 대역에서는 원거리 항행선박이 주된 잡음원이고, 500 Hz~50 kHz 주파수 대역에서는 주로 해표면에서의 바람에 의하여 발생하는 것으로 나타났다[4].

그러나 연안해역에 있어서의 해수 중 주위잡음은 시공간적으로 심하게 변동할 뿐만 아니라 항행선박, 바람 등에 의한 잡음 외에도 수중동물, 해변에서 부서지는 파도 등의 잡음도 참가되므로 매우 복잡하리라 예측된다. 그리고 연안해역에 있어서는 계절 및 시기에 따라 수중동물에 의하여 발생되는 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 등의 해산 포유류에 의하여 발생되는 임펄스 음파는 소나의 신호를 심하게 간섭하는 것으로 알려져 있다. 또한 이와 같은 수중동물에 의하여 발생되는 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 행해졌는 데 주로 돌고래류가 발생하는 음파탐지 신호(echolocation

signal)의 파형 및 그 스펙트럼 특성 등이 조사되었다[5)-9)]. 아울러 돌고래 음파탐지 신호의 방사 및 수신 지향성에 관한 연구도 보고되어 있다[10)-11)]. 그러나 자연상태의 돌고래의 경우 돌고래의 위치 제어가 곤란하기 때문에 이러한 연구는 대부분 수조에서 측정하거나 또는 길들여진 돌고래를 해수 중에 고정하여 측정한 것을 기초로 하고 있다.

동해 중부의 연안해역에서 해수 중 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 해수 중 주위잡음의 녹음자료를 분석하여 사용하였다. 우선 돌고래 음파탐지 신호의 대표적인 파형을 주의 깊게 조사하였다. 그 다음 돌고래 음파탐지 신호의 스펙트럼 레벨을 분석하여 음파탐지 신호가 없을 때의 해수 중 주위잡음 스펙트럼 레벨과 비교함으로써 실제 해상에서 돌고래에 의하여 발생된 수중음의 특성을 밝히고자 하였다.

II. 측정 및 분석 방법

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

먼저, 해상에서의 녹음은 다음과 같은 방법으로 실시하였다. 동해 중부 해역의 속초 연안 (수심: 200 m)에서 조사선을 사용하여 해수 중 주위잡음을 측정하고 있는 동안 육안으로 돌고래가 식별된 경우인 1992년 12월 9일, 1993년 2월 20일 및 4월 10일 중에 돌고래 음파탐지 신호를 조사선상에서 녹음하였다. 이 때에는 그림 1과 같이 수심 30 m에 위치한 수중청음기로 수중음을 수신하였으며, 그림 2의 녹음시스템을 사용하여 녹음하였다. 수중음을 녹음하는 동안 조사선에서 방사되는 잡음을 가능한 한 줄이기 위하여 조사선의 주기관, 보조기관 등 선내 잡음원의 가동을 중지하였다. 그리고 측정지에서 공급된 직류를 인버터에서 교류로 변환시켜 이것을 측정기의 전원으로 사용하였다. 수중청음기에서 포착된 수중음을 측정용 증폭기로 적정한 레벨이 되도록 증폭시킨 다음, 녹음기를 사용하여 녹음하였다.

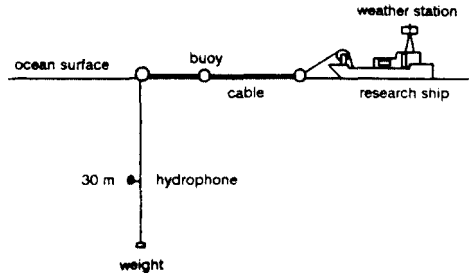


Fig. 1. 수중청음기 계류시스템

여기에 사용된 수중청음기(Bruel & Kjaer사, Model 8101)는 모든 방향에 대하여 수신감도가 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, 녹음기(METRUM사, Model RSR 512)는 주파수 대역 DC~100 kHz에서 평탄한 특성을 갖고 있다.

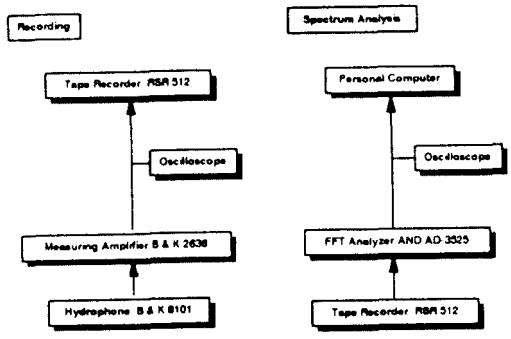


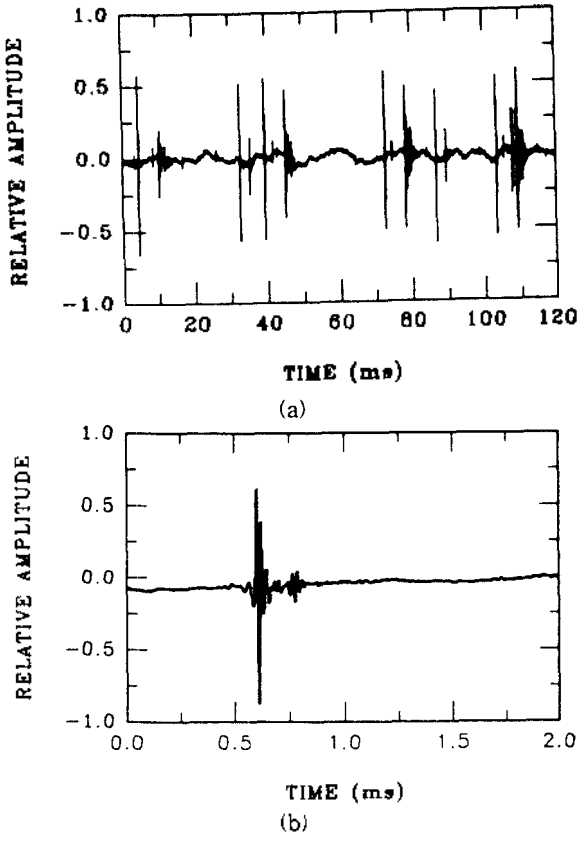
Fig. 2. 녹음 및 주파수 분석 개략도

다음에, 수중음의 파형 및 스펙트럼 분석은 실험실에서 그림 2의 분석시스템을 사용하여 실시하였다. 녹음된 수중음을 녹음기로 재생하여, 이것을 FFT 분

석기(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 수중청음기의 수신감도, 측정용 증폭기의 증폭도 및 스펙트럼 분석의 주파수 밴드폭을 보상하여 각각의 주파수에서의 스펙트럼 레벨을 구하였다. 여기에서는 1 μPa을 0 dB로 하였다.

III. 결과 및 고찰

1993년 2월 20일 중에 수신한 돌고래 음파탐지 신호의 예를 그림 3에 나타내었다. 이 때 해표면에서의 풍속은 3~4 노트였다. 1992년 12월 중에 수신한 돌고래 음파탐지 신호의 경우와 같이, 이 때 수신한 돌고래 발생음의 트레인을 이 그림의 (a)에 나타내었다. 그리고 이러한 돌고래 음파탐지 신호의 대표적인 파형을 확대하여 그림 3의 (b)에 나타내었고, 이 파형의 주파수 스펙트럼을 (c)에 나타내었다. 또한 돌고래 음파탐지 신호가 존재하지 않을 때, 해수 중 주위잡음의 스펙트럼을 (d)에 나타내었다.



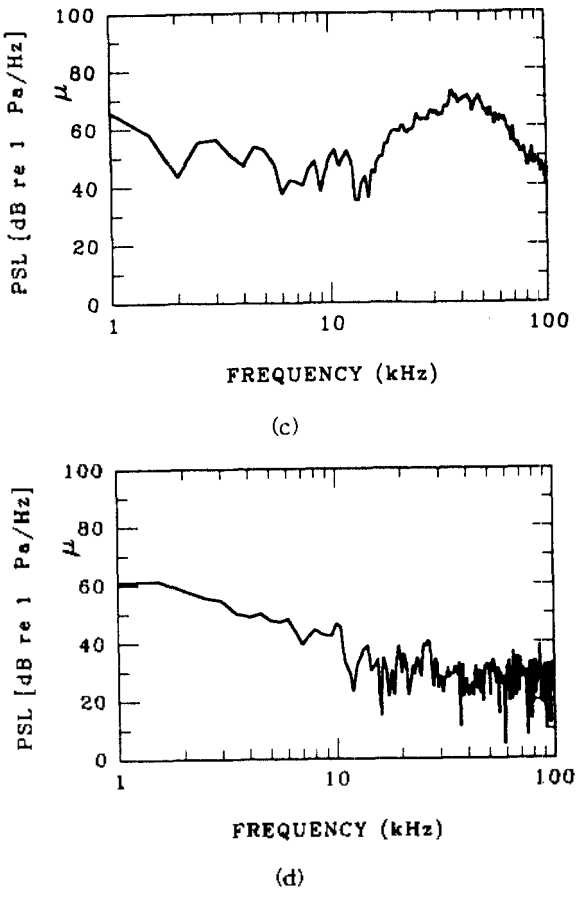


Fig. 3. 1993년 2월 20일에 관측된 돌고래의 음파탐지 신호 (a) 연속 시간신호, (b) 파형, (c) 스펙트럼, (d) 주위잡음 스펙트럼.

먼저, 그림 3의 (a)를 자세히 살펴보면 120 ms 안에 약 14 개 정도의 임펄스가 존재하여 약 8.5 ms의 간격으로 돌고래의 음파탐지 신호가 수신되고 있었다. 그리고 이것의 진폭은 배경잡음의 진폭에 비하여 매우 크게 나타났으며, 약 10~40 배 크게 나타나고 있었다. 다음에, 그림 3의 (b)에 의하면, 돌고래 음파탐지 신호의 대표적인 파형은 임펄스로서 펄스의 길이가 약 0.25 ms였으며, 배경잡음의 진폭에 비하여 매우 큰 진폭을 갖고 있음을 알 수 있었다. 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 3의 (c)로부터 돌고래가 발생한 음파탐지 신

호의 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 음파탐지 신호가 존재하지 않을 경우의 주위잡음 스펙트럼을 나타낸 그림 3의 (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 높게 나타났다. 특히 주파수 범위 35~50 kHz에서는 돌고래의 음파탐지 신호가 있을 경우에는 배경잡음보다 약 40 dB 높게 나타났다. 따라서 공진 주파수가 30~60 kHz인 능동 소나의 경우에는 돌고래의 음파탐지 신호에 의하여 간섭을 크게 받으리라 생각된다.

여기에서는 시간적인 제약 때문에 돌고래 음파탐지 신호에 대한 다양한 분석을 실시하지 못하였지만, 돌고래 발생음의 음원 레벨의 추정 뿐만 아니라 다음과 같은 다양한 조사가 통계적인 처리를 통하여 이루어져야 하리라고 생각된다. 즉, 돌고래 음파탐지 신호의 전체 길이에 관한 분포 조사, 음파탐지 신호 임펄스 사이의 시간 간격에 관한 분포 조사, 음파탐지 신호의 파형에 관한 분포 조사 및 이의 스펙트럼 분포 조사, 그리고 생태학적인 측면에서 각각의 신호에 대한 돌고래의 생태 연구가 동시에 행해져야 할 것이다.

IV. 결 론

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

1. 돌고래 음파탐지 신호의 파형은 임펄스 형태였으며 그것의 전체 길이는 0.25~0.5 ms의 범위였다.

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 음파탐지 신호의 스펙트럼 레벨 피크는 주파수 범위 35~55 kHz에서 나타났으며, 이것은 돌고래의 발생음이 없는 경우의 해수 중 주위잡음의 레벨에 비하여 약 30~40 dB 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).