

천해에서의 저주파 잔향음 특성

Characteristics of low-frequency reverberation in shallow water

박길선, 나정열, 최지웅, 오선택
Kilsun Park, Jungyul Na, Jee Woong Choi, Suntaek Oh

한양대학교 지구해양과학과

박정수
Joung-Soo Park

국방과학연구소

※ 본 연구는 수중음향특화연구센터(UARC)의 지원으로 수행되었습니다.(UA-13)

1. 요약문

수중 폭발성 음원(SUS)을 이용한 천해 저주파 잔향음 실험을 97년 제주 해역에서 실시하였다. 측정된 신호를 고유음선 정보를 이용하여 시간영역에서 잡음, 반사, 산란 영역으로 구분하고 각 영역에 대해서 주파수별 스펙트럼 분석을 실시하였으며 각 영역이 갖는 확률적 특성을 분석하였다. 실험해역은 안정된 해저 형태를 갖는 천해였으므로 산란 신호는 일정한 크기를 갖고 지속적으로 수신되었다. 스펙트럼 분석 결과, 시간에 따른 안정성을 갖는 주파수 대역을 확인할 수 있었으며 구분된 영역별 위상은 반사영역과 산란영역의 위상 특성을 잘 반영하고 있었다. 구분된 각 영역에 대해 1/3 옥타브 밴드로 필터링 하여 확률 특성을 분석한 결과 주파수영역의 실수부와 허수부는 각각 정규 분포를 보였으며 그것의 진폭(envelope)은 레일리 분포를 나타냈다. 또한 산란신호의 위상은 저주파 대역에서 유니폼 분포 특성을 나타내어 잔향음의 기본적인 확률 특성을 잘 반영하고 있었다.

2. 서론

천해에서의 저주파 소오나는 일반적으로 해저면 잔향음에 의해 제약을 받으며 주파수 대역의 특성과 환경적인 영향, 다중반사 등에 의해 문제가 매우 복잡하다[1]. 따라서 저주파 잔향음 특성에 관한 연구는 고주파에 비해 저조한 것이 현실이며, 대부분의 연구가 주파수별 산란강도 측정위주로 천해 저주파 잔향음에 대한 기본적인 특성에 대한 접근이 부족하였다.

기존의 연구들은 양상태 저주파 잔향음 분석시 반사파와 산란파의 구분이 모호했으며, 신호의 전대역에 대해 산란 영역으로 간주하고 고유음선과 산란파를 동일시하였다[2]. 따라서 순수한 산란파에 대한 특성 분석이 필요하며, 이것은 천해 저주파 잔향음 예측과 소오나 운용에 보다 본질적인 도움이 될 수 있다.

3. 실험 개요

1997년 10월 제주 해역에서 폭발성 음원(SUS MK64)과 수직선배열(VLA)을 이용하여 천해 저주파 양상태 실험

을 실시 하였다(그림 1).

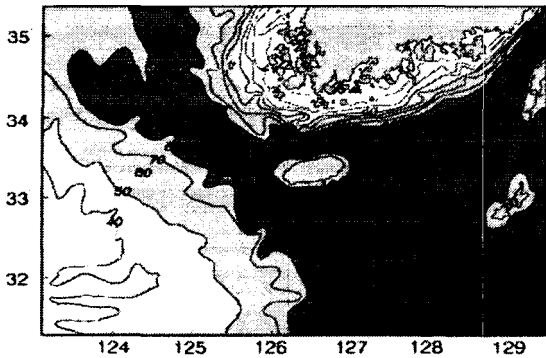


그림 1 : 실험 해역의 해저지형 및 위치

실험 해역은 수심 약 90m의 해역으로 지형적인 큰 변화가 없고 표층 퇴적물은 사니질(muddy sand)이 광범위하게 분포되어 있는 해역이다. 실험은 총 8개의 SUS를 사용하였으며, 음원과 수신기가 분리된 양상대 실험이다. 음원은 천해모드로 설정되어 60ft(50-70ft)에서 폭발되었으며, 수신기는 총 9개의 수직선배열을 사용 하였으며 수심 33m부터 각 5m간격으로 배치하였다. 실험 해역의 수온 자료는 XBT를 사용하여 측정하였으며, 이를 바탕으로 한 음속구조는 음의 경사를 갖는 음속 구조이다. 이러한 음속구조에서는 음선이 해저면을 향해 굴절되어 강한 해저면 잔향음을 유발하며, 해수면 잔향음 효과는 상대적으로 줄어들게 된다[2].

4. 고유음선 분석

거리중속 모델을 통해 고유음선 정보를 구하였다. 고유음선은 약 2.6초 동안 수신되며, 2-75회의 경계면 반사가 일어난다. 이 고유음선 수신시간 내에서 음원의 특성에 의한 충격파와 기포파는 아주 짧은 시간내에 존재하므로 구분한다는 것은 의미가 없으며, 오히려 정확한 의미의 반사 영역과 산란 영역을 구분하는 것이 중요하다. 따라서 모델을 통해 구한 각각의 고유음선에 대해서 음원준위와 전달손실, 해저면 손실을 고려하여 고유음선의 준위가 같음 준위까지 되는 음선을 유효음선으로 간주하였다. 따라서 수신 신호는 처음의 잠음영역(N)과 반사영역(R), 산란영역(S)으로 구분 가능하며 각 영역별로 분석하였다(그림 2).

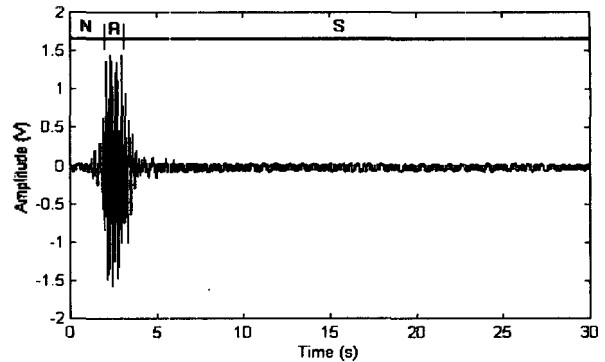


그림 2 : 수신신호의 영역 구분

5. 스펙트럼 분석

사용된 음원은 광범위한 주파수 대역(10Hz~20kHz)의 신호를 짧은 시간에 무지향성으로 방출하며 각 주파수 별로 다른 음원 준위를 갖기 때문에 주파수 대역별 특성을 살펴볼 필요가 있다. 따라서 전 영역에 대해서 스펙트로그램(spectrogram)을 구하였다(그림 3).

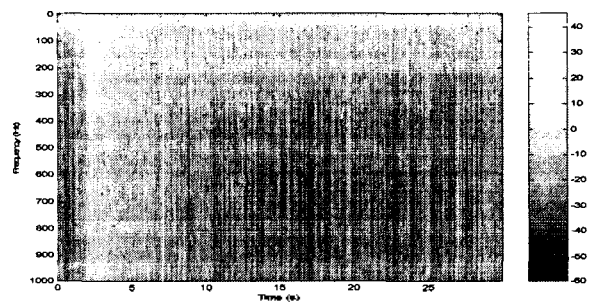


그림 3 : 스펙트로그램

스펙트로그램은 시간에 따른 주파수 성분 분포를 보여 준다. 반사영역에서는 광범위한 주파수 대역이 분포함을 알 수 있는데 이것은 산란과 보다 짧은 경로, 고주파 성분의 적은 손실, 적은 음원신호의 변형이 원인이며, 시간 경과에 따라 고주파 성분의 크기가 급격히 감소하는 특징이 있다. 반면 산란영역은 약 300Hz이하의 주파수 성분이 지속적으로 분포하고 있음을 알 수 있으며, 40Hz이하의 주변소음 주파수대역이 전 시간대에서 우세하게 작용하고 있다. 음원의 폭발 수심을 근거로 최고 음압을 나타내는 주파수는 12Hz로서 소음 대역에 포함되므로 이 대역을 제외한 필터링이 필요하다. 결국 소오나 운용시 탐지거리에 제한이 되는 주변소음 제한

환경과 잔향음 제한 환경에서 우세하게 작용하는 주파수 대역을 결정할 수 있다.

그림 4는 반사 및 산란 영역의 PSD(power spectral density)를 보여주고 있다. 표시된 주파수 대역은 스펙트로그램에서 확인한 바와 같이 약 300Hz이하의 주파수 대역으로, 반사영역과 산란영역의 PSD가 비슷한 경향으로 감소하고 있다. 따라서 이 주파수 대역은 산란에 의한 영향이 적은 안정된 주파수 대역으로 볼 수 있다.

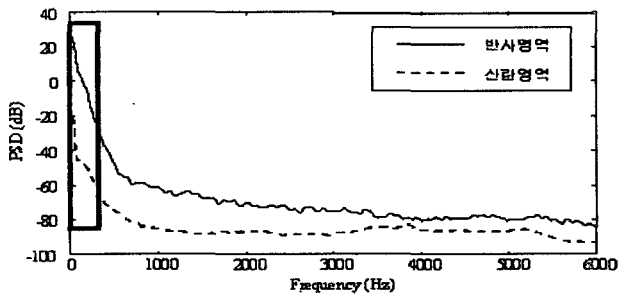


그림 4 : 영역별 Power spectral density

일반적으로 음파가 경계면에 입사되면 고른 경계면에서는 반사파가 우세하게 발생하게 되고 거친 경계면에서는 산란파가 우세하게 발생하게 된다[4].

반사 영역은 in phase의 특성을 나타내며 반대로 산란 영역은 random phase를 갖게 되는데, 앞에서 정의한 각 영역의 위상을 비교함으로써 실제로 각 영역이 특성에 맞는 위상 분포를 갖는지 확인하였다(그림5).

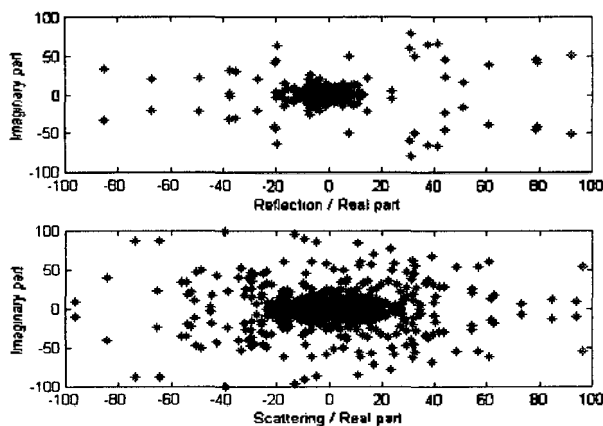


그림 5 : 반사영역과 산란영역의 위상비교

그림 5는 반사영역과 산란영역의 위상을 비교하고 있다. 산란영역은 반사영역에 비해 확산되어있는데 이것은 산란 영역의 특성을 잘 보여주고 있는 것이다. 또한 각

영역의 구분이 타당함을 확인할 수 있다.

6. 통계적 특성 분석

잔향음의 통계적 특성을 구하는 것은 기본적인 특성을 유추하는 한 방법이며, 소오나 시스템 모델을 구성하는데 중요한 자료가 된다. 일반적으로 잔향음은 “중점제한정리(central limit theorem)”에 의해 랜덤변수의 분포는 정규분포를 따른다. 또한 산란신호 진폭의 확률 분포는 레일리(Rayleigh) 분포를 따르며 위상은 유니폼(uniform) 분포를 따른다고 알려져 있다[3].

천해 환경에서 음파는 많은 다중경로 효과가 발생하게 되고 이것은 많은 랜덤 작용이 조합된 잔향음을 유발하게 되는데, 이러한 경우 잔향음은 가우시안(Gaussian) 분포를 따를 수도 있고 혹은 다른 특성을 갖을 수도 있다[2].

수신된 잔향음의 통계적 특성을 구하기 위해 산란영역을 1/3 옥타브밴드로 필터링한 후 FFT(fast Fourier transforms)를 하고 실수부와 허수부의 확률밀도 함수를 구하였다(그림 6).

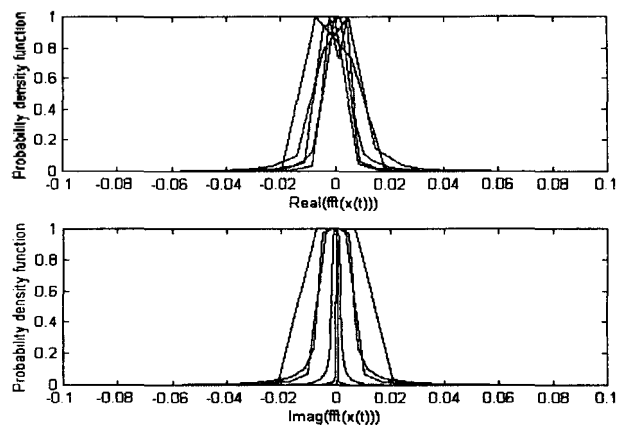


그림 6 : 주파수 밴드별 잔향음의 실수부/허수부 PDF

각 주파수 밴드별 잔향음의 실수부와 허수부 모두 가우시안(Gaussian) 분포를 보이고 있다. 또한 진폭에 대한 확률밀도 함수를 구한 결과 레일리(Rayleigh) 분포를 잘 따르고 있는 것을 확인할 수 있다(그림 7).

그림 8은 1/3 옥타브 밴드별(63Hz-900Hz) 산란영역 위상의 확률 밀도를 보여주고 있다. 저주파 부분은 전형적인 유니폼 분포를 갖고 있으나 주파수가 증가

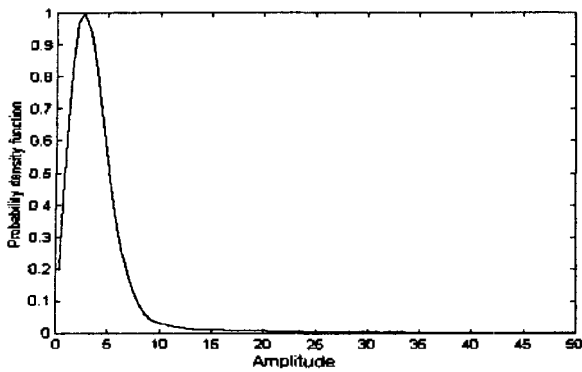


그림 7 : 산란영역 진폭의 PDF

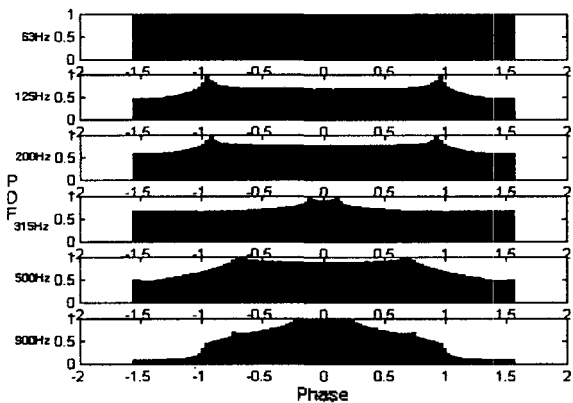


그림 8 : 산란영역 위상의 PDF

할수록 위상이 유니폼 분포를 벗어나는 특징을 갖는다. 이러한 현상은 잔향음이 항상 기존의 확률적 특성을 따르는 것은 아니며 다양한 영향요소(지형, 거칠기 등)에 의해 다른 결과가 나올 수 있다[6]는 것을 말해주고 있다.

7. 결론

천해에서의 저주파 잔향음 특성을 알아보기 위해 수중 폭발성 음원을 이용한 실험 자료를 분석하였다. 반사파와 산란파를 명확히 구분하기 위해 수신 신호를 잡음, 반사, 산란영역으로 구분하여 분석을 실시하였으며 이것은 각 영역의 위상비교를 통해 타당성을 확인할 수 있었다. 각 영역의 스펙트럼 분석 결과, 전 시간대에서 안정적으로 영향을 미치는 주파수 대역은 약 300Hz이하의 대역이며 잡음 대역은 40Hz이하에서 존재하고 있다. 잔향음의 통계적 특성을 분석한 결과 진폭은 레일리 분포를, 위상은 유니폼 분포를 따르고 있어 기존의 잔향음 특성을 잘 따르고 있음을 확인할 수 있었다. 천해 저주

파 신호는 해저면의 영향이 매우 크게 작용하게 되는데 본 논문은 해저면의 영향에 대한 분석은 깊이 다루지 않았다. 따라서 보다 정확한 분석을 위해서는 해저면의 영향에 대한 분석도 함께 이루어 져야 하겠다.

8. 참고문헌

1. R.J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1983.
2. Charles E. Muggleworth, *Shallow water reverberation measurement and prediction*, 1994
3. A. Ishimaru, *Wave propagation and scattering in random media*, IEEE Press, New York, 1997
4. J. A. Ogilvy, *Theory of wave scattering from random rough surfaces*, IOP Publishing Ltd, 1991
5. V. V. OI' shevskii, *Characteristics of Sea Reverberation*, CONSULTANTS BUREAU, New York, 1967
6. Yevgeniy Y. Dorfman and Ira Dyer, "Monostatic and bistatic reverberation statistics west of the Mid-Atlantic Ridge," , *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 104(4), 1755-1764, 1999
7. Herman Medwin and Clarence S. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, ACADEMIC PRESS, 1998
8. Chapman. N. R., "Source levels of shallow explosive charges," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 84, 697-702, 1988