

천해 해역에서 측정된 고주파 해저면 복반사음 특성

박정수, 정문섭, 최재영
(국방과학연구소)

High Frequency Reverberation Characteristics
in Shallow Water

JoungSoo Park, MoonSub Jung, JaeYoung Choi
(Agency for Defense Development)

요 약

복반사음은 능동소나의 운용이나 수중음향 원격탐사를 위한 기초 자료로 이용된다. 여름철(9월) 천해 해역에서 실시한 고주파 음향실험 자료를 바탕으로 몇가지 복반사음 변화 특성들을 살펴보고 그 원인을 규명하고자 하였다. 실험기간중 복반사음은 거의 해저면에 의한 복반사음으로 분석되었으며, 이로부터 해저면 후방산란강도를 계산하였다.

I. 서 론

음원으로부터 발사된 고주파 음파는 다양한 전달경로를 거치게 되며, 이중 해양의 각 경계면으로부터 산란에 의하여 음원으로 되돌아오는 음파 에너지를 복반사음이라 하며 복반사음을 일으키는 산란현상을 후방산란이라 한다. 복반사음은 원인에 따라 체적, 해수면, 해저면 복반사음으로 분리할 수 있으며 관측 해역의 환경에 따라 각각의 기여도가 달라지게 된다 [1].

복반사음 특성은 각 경계면들의 음향특성에 따라 다르게 변화하며, 따라서 이를 분석하면 각 경계면의 물성 및 상태를 추정할 수 있어 수중 음향 원격탐사에 이용될 수 있다 [2]. 또한 목표물 탐지가 목적인 능동 소나의 운용시, 원하는 신호만을 분리해 내기 위해서는 복반사음의 특성 파악이 선행되어야 한다. 이를 위해 고주파 대역의 wide beam 센서와 narrow beam 센서를 사용하여 여름철에 포항근해에서 복반사음 측정실험을 하였다. 측정된 복반사음은, 여름철 음속구조의 영향으로 거의 해저면에서 후방산란된 해저면 복반사음이며 분석결과로 부터 복반사음의 방위각, 주파수 펄스길이에따른 변화 등을 살펴보고 해저면 후방산란 강도를 계산하여 해저면 특성을 이해하고자 하였다.

본 논문에서는 해저면 복반사음 및 해저면 후방산란강도를 중심으로 설명하였다.

1.1. 복반사음 측정

실험지역은 수심 약 70 M 인 천해 해역으로 퇴적물 구성성분은 Silty Clay (6 - 8 ϕ) 이고, 반경 1 Km 내 해저면 경사각은 1° 이하이다. 음향센서는 수평 빔폭이 22° 인 wide beam 과 8° 인 narrow beam 센서가 이용되었으며, wide beam 센서는 송신 및 수신에 사용되었고 narrow beam 센서는 수신에 사용되었다. 실험주파수는 28-32 KHz, 이며 펄스길이는 0.001-0.5 초로서 주파수와 펄스 종류(CW, FM)에 따라 가변시켰다.

복반사음 측정 전에 XBT를 내려 확보한 수온으로부터 음속구조를 계산하여 음파전달 환경을 예측하였고, 이를 근거로 음원 수심을 30 m, 음파 발사각을 +4°, 0°, -4°로 결정 하였다. 측정센서는 높이 약 2 m 의 알미늄 구조물에 설치되었으며, 구조물의 수평상태와 이동을 파악할

수 있는 센서가 같이 부착되었다. 음원파형은 컴퓨터에서 만들어졌고, 증폭과정을 거친후 wide beam 센서를 통해 펄스로 발사되었으며, wide beam과 narrow beam 센서로 수신된 음파는 down sampling 되어 녹음기에 기록하였다 (그림 1).

각 센서에 수신된 1초간의 ping을 보면, 음파 발사후 약 0.2에서 0.5 초 사이에 강한 복반사음이 보이고 이후부터 약한 복반사음들이 간헐적으로 출현한다 (그림 2, 3). 10개 ping을 주파수 분석후 ensemble 평균하여, 각 센서별로 복반사음을 구하였다 (그림 4). Narrow beam 에서 보다는 wide beam에서의 복반사음이 다소 높은 것은, 수평 빔폭이 넓은 wide beam에 보다 넓은 해저면으로부터의 후방산란파가 수신되기 때문이다. 현장 관측된 수온으로 부터 계산된 수직음속 구조하에서 그란 ray tracing과 비교해보면, 해저면 산란의 영향이 큰 것을 알 수 있다(그림 5). 0.8초 부근에서 체적 및 해저면 복반사음이 크게 증가 되는 이유는 450 m 부근에서 발생하는 caustic에 의한 영향으로 판단이 되며, 이는 천해에서의 caustic이 해저면 복반사음을 약 10 dB 이상 증가시킨다는 일부 연구결과와 일치한다 [3].

III. 복반사음 특성

1) 복반사음의 방위각 종속성

0.09 초의 CW 펄스를 사용하여 자북을 기준으로 8 방위에 대한 복반사음을 측정하였다. 거리 해상도는 67m 이므로, 작은 주기의 해저면 굴곡에는 영향을 크게 받지 않는다. 10개의 ping을 ensemble 평균한 방위별 복반사음(그림 6)을 보면, NES 면의 양상은 비슷하나 NWS 면에서는 심한 변화를 보이고 있다. 이것은 큰 주기의 해저면 굴곡에 의한 입사각 변화 또는, 해저면 퇴적물 종류의 변화 때문으로 보인다. 또한

NES 면에서도 시간이 증가할수록 방향별로 조금씩 차이를 보이는데, 이것은 입사각이 작아질수록 해저면 굴곡의 영향이 커지기 때문이다.

2) 복반사음의 주파수 종속성

주파수 종속성은 산란과정을 이해하는 기초가 된다. 특히 해저면에서의 음파는 주파수에 선형적으로 비례하여 감쇄한다 [4]. 일반적으로 약 10 KHz 이하 주파수의 해저 경계면 감쇠량은 음파투과로 인해 무시할 수 있을 정도이고, 따라서 후방 산란도 퇴적층 내의 불균질성에 영향을 받는다. 반면, 약 300 KHz 이상의 고주파에서는 음파가 대부분 해저 경계면을 투과하지 못하고 반사되기 때문에 후방 산란은 경계면의 불균질성이 원인이 된다 [5]. 실험 주파수인 30 KHz 대에서의 해저면 복반사음은 두 과정의 영향을 모두 받는 것으로 알려져 있다. Jackson과 Boehme et al. 은 medium sand와 snady 지역에서 약 2-4.5 dB/oct 의 주파수 종속성을 보고한 바 있다 [5, 6].

본 실험에서는 28-32 KHz 에서 주파수 종속성을 살펴보았다. 펄스 길이가 0.06초 인 FM 펄스를 사용하였고, 분석시 10개 ping을 ensemble 평균하였다 (그림 7). 실험위치에 따라 주파수에 비례하여 복반사음이 약간 증가하기는 하나 미약하고, 거의 모든 경우에서 종속성을 볼 수 없었다.

3) 복반사음의 펄스 길이 종속성

복반사음 준위는 음원준위와 펄스길이에 가장 크게 영향을 받는다. 그중 펄스길이는 음파 에너지 및 입사되는 경계면 면적과 체적에 직결되기 때문에 거의 선형적인 비례관계를 보인다고 할 수 있다. 본 실험에서는 0.001-0.5초의 CW 펄스를 이용하여, 음원준위를 고정시킨 상태에서 펄스 길이 종속성을 측정하였다. 측정결과 복반사음이 지배적인 시간

(0.3-1초) 내에서 14.3 log (펄스길이, ms) 의 관계를 볼 수 있었다 (그림 8).

4) 센서 종류에 따른 복반사음

센서의 빔폭에 따라 wide beam 센서는 작은 주기의 해저면 굴곡을 무시할 수 있고, narrow beam 센서는 입사각의 정밀한 분리가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 복반사음 측정시에는 narrow beam이 음파 입사체적 (insonified volume) 의 정확한 계산에 유리하다. 본 실험에서는 수평 빔폭이 22°인 실린더형의 wide beam 센서와 8°인 막대형의 narrow beam 센서를 사용하였다. 펄스길이 0.05 초인 30 KHz CW를 사용하였을 경우, 복반사음의 주파수 spreading이 wide beam에서 심하게 나타난다. 즉, 해저면 거칠기가 일정할 경우 빔폭이 넓어질수록 spreading이 커짐을 알 수 있다 (그림 9, 10).

IV. 해저면 후방 산란강도

해저면 후방 산란강도는 측정된 해저면 복반사음 중에서 직접 후방 산란경로를 거친 구간만을 선택하여 계산하였다. 이를 위하여는 먼저 모델에 의한 복반사음 예측치와 ray tracing으로 부터 직접 후방 산란 구간을 선정한다 (그림 11). 그리고 사용센서의 MRA (Maximum Response Axis)로부터 -3 dB 감소되는 수직각의 ray가 해저면에 닿는 위치를 확인하여, 최종 분석분간을 0.2-0.6초 사이로 선정한다. BSS (Bottom Back-scattering Strength)로 표현하는 해저면 후방 산란 강도는 수신된 신호 (RL)로부터 다음과 같이 계산한다.

$$BSS = RL + 2TL - 10 \log [AD_p^2 D_r^2]$$

여기서 RL : Reverberation Level, in dB//uPa

TL : Propagation Loss, in dB

A : Effective Insonified Area, in m²

D_p² : Vertical Directivity Function of the Projector

D_r² : Vertical Directivity Function of the Receiver

센서별로 각각 계산된 해저면 후방 산란 강도의 입사각은 12.5°와 13.5° 사이이다 (그림 12).

일반적으로 해저면 후방 산란강도는 입사각의 함수로서, Sinⁿ θ에 비례하고 n이 2의 값을 만족하는 경우를 Lambert's Law 라 한다. 즉,

$$BSS = 10 \log u + 10 \log (\sin^2 \theta)$$

이며 u는 일종의 비례상수로 퇴적물의 종류와 굴곡상태에 따라 달라지고, 결국은 주파수에 따라 log u 값이 변화할 보이게 된다. 본 실험결과에서는 입사각 폭이 좁아 Lambert's Law의 만족여부는 논하기 어려우나 굴이 적용한다면, 10log u 는 약 -12dB + 10log (f, KHz) 이고 주파수 종속성을 제거하면 -27dB 로서 외국해역의 sandy bottom 해역의 값 [7, 8]들 보다 높다.

V. 결 론

한국근해와 같은 천해 해역의 여름철 수직 음속은 강한 음 (-)의 기울기를 가지고 있어 대부분의 음파가 해저면 방향으로 강하게 굴절되므로, 수신된 복반사음은 해저면 후방 산란으로부터 발생하는 해저면 복반사 음으로 볼 수 있다. 해저면 복반사음은 wide beam 센서에 다소

높게 출현하며, 해저면 굴곡의 영향 또한 크게 미치는 것으로 보인다. 방위각에 따른 복반사음 변화는 해저면의 정확한 퇴적물 종류 및 굴곡 상태를 측정하지 못하여 자세한 비교는 할 수 없었으나, 조개류의 껍질 조각 분포가 많은 지역임을 상기하면 변화가 큰 방향의 해저면 복반사음은 퇴적물의 성분변화 영향을 크게 받았을 것으로 추측된다. 주파수 종속성은 측정 주파수 폭이 좁아 거의 볼 수 없었고, 펄스 길이는 종속성은 $14.3 \log(\text{펄스길이, ms})$ 였다.

고주파 해저면 복반사 모델링 또는 해저면의 음향 원격 탐사에서 중요한 파라미터인 해저면 후방산란강도는 주파수와 입사각의 영향이 가장 큰 것으로 알려져 왔으나, 최근의 연구[2]에 의하면 단지 주파수와 입사각에 따른 강도 변화만으로 퇴적물 특성을 예측하는것은 위험한 것임을 알 수 있다. 본 논문에서는 30 KHz 의 해저면 복반사음으로부터 입사각이 $12.5^\circ - 13.5^\circ$ 사이의 해저면 후방 산란강도를 예측 하였으나, 후방산란강도를 입사각과 주파수 함수로 설명한 Lambert's Law 의 후방산란계수가 $-12 \text{ dB} - 10 \log(\text{주파수, KHz})$ 로 퇴적물이 silty clay 인 것을 감안하면 알려진 외국 해역들과 비교할 때 높게 나타나고 있다.

입사각이 작아질 수록 wide beam 에서 측정된 후방산란강도가 narrow beam 에서 측정한 값보다 작게 나타나는데, 이는 해저면의 굴곡 영향이 크기 때문으로 보인다. 즉, 굴곡이 심한 해저면으로부터의 후방산란은 빔폭이 넓을 경우 효과가 상쇄되기 때문에 산란강도가 작게 나타나는 것으로 판단된다.

본 실험에서는 충분한 환경자료 수집이 이루어지지 않아 정량적인 해석은 어려웠으나 전체의 해저면 복반사음 특성을 일부나마 이해할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. R.J. Urick, Principles of Underwater Sound, 3rd ed. McGraw-Hill, 1983.
2. J.Y. Na, J.S. Park, S.M. Kim, H.S. Yoo, and S.R. Kim, "Characteristics of the Bottom Backscattering Strength in the Asan Bay," Ocean Research, vol. 12-1, 1990.
3. W.I. Roderick and R.K. Dullea, High Resolution Bottom Backscattering Measurements, NUSC, 1984.
4. E.L. Hamilton, "Geoacoustic Modeling of the Sea Floor," J. Acoust. Soc. Am. 68, 1980.
5. H. Boehme and N.P. Chotiros, "Acoustic Backscattering at Low Grazing Angles from the Ocean Bottom," J. Acoust. Soc. Am. 84, 1988.
6. D.R. Jackson, A.M. Baird, J.J. Crisp, and P.A.G. Thomson, "High-Frequency Bottom Backscatter Measurements in Shallow Water," J. Acoust. Soc. Am. 80, 1986.
7. H.K. Wong and W.D. Chesterman, "Bottom Backscattering Near Grazing Incidence in Shallow Water," J. Acoust. Soc. Am. 44, 1968.
8. C.M. McKinney and C.D. Anderson, "Measurement of Backscattering of Sound from the Ocean Bottom" J. Acoust. Soc. Am. 36, 1964.

HIGH FREQUENCY REVERBERATION MEASUREMENT SYSTEM

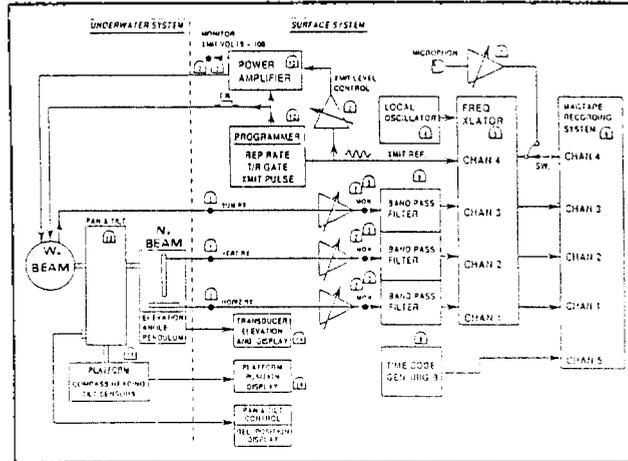


그림 1. 고주파 복반사음 측정 시스템 구성도

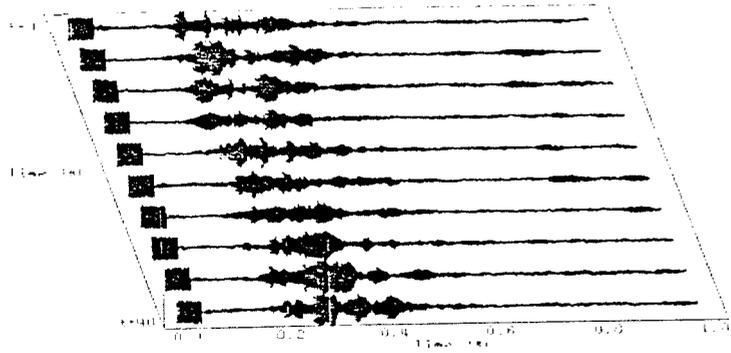


그림 2. Wide beam 센서에 수신된 time sequence

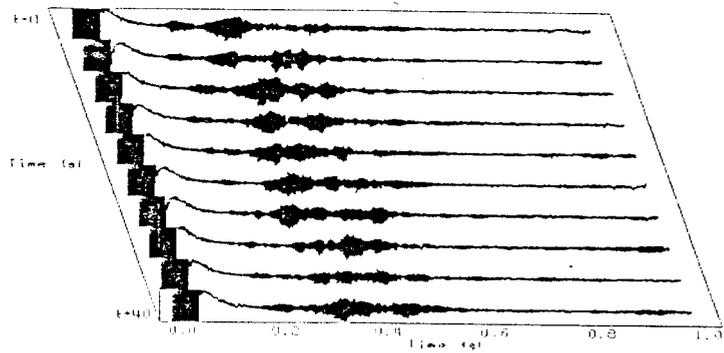


그림 3. Narrow beam 센서에 수신된 time sequence

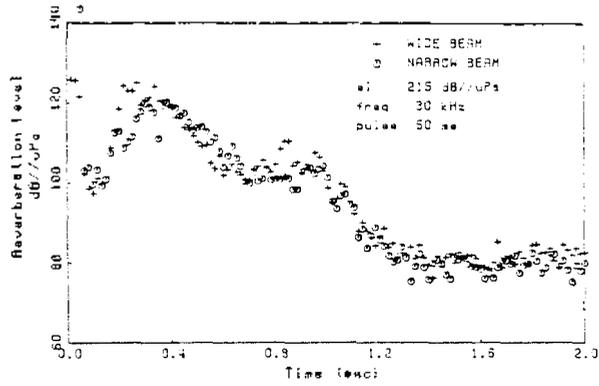


그림 4. 시간에 따른 복반사음
방위각 : 50 N

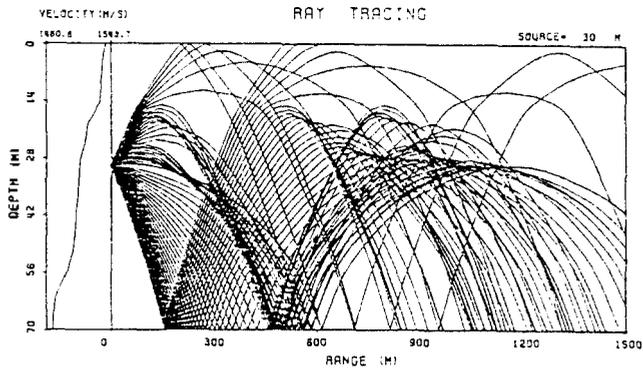


그림 5. Ray tracing

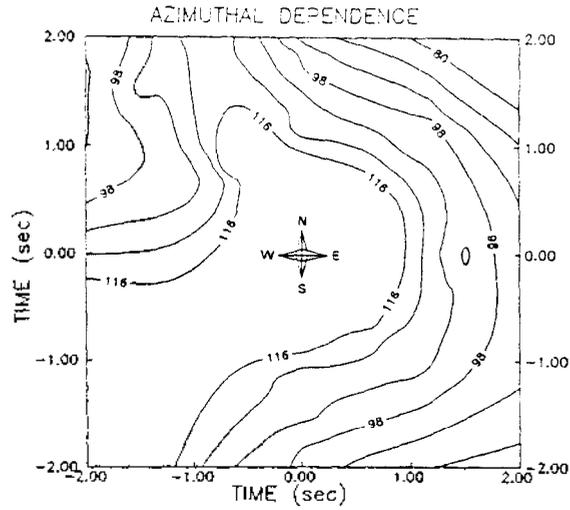


그림 6. 복반사음의 방위각에 따른 변화
펄스길이 : 90ms 주파수 : 30KHz

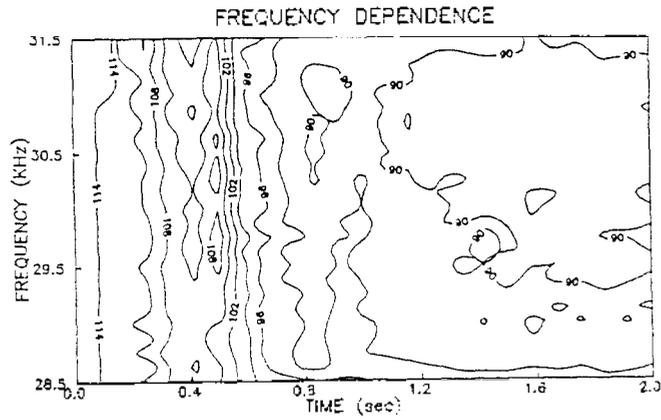


그림 7. 복반사음의 주파수에 따른 변화
펄스길이 : 60ms 방위각 : 90 N

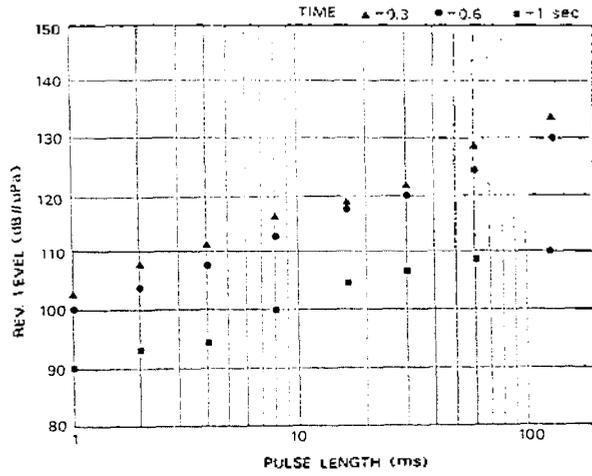


그림 8. 펄스 길이에 따른 복반사음 변화
주파수 : 30KHz

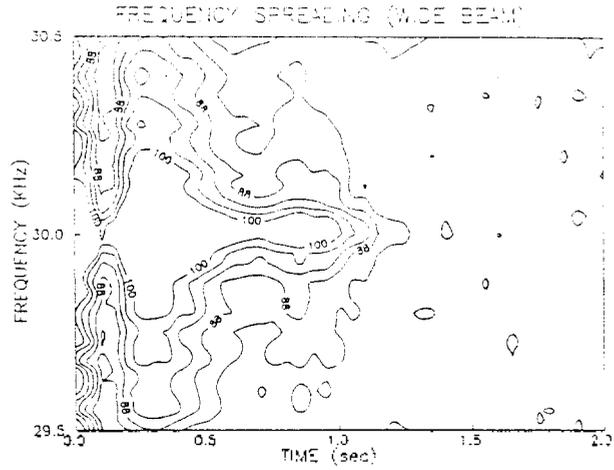


그림 9. Wide beam 센서에 수신된 복반사음의 주파수 spreading 펄스길이 : 60ms

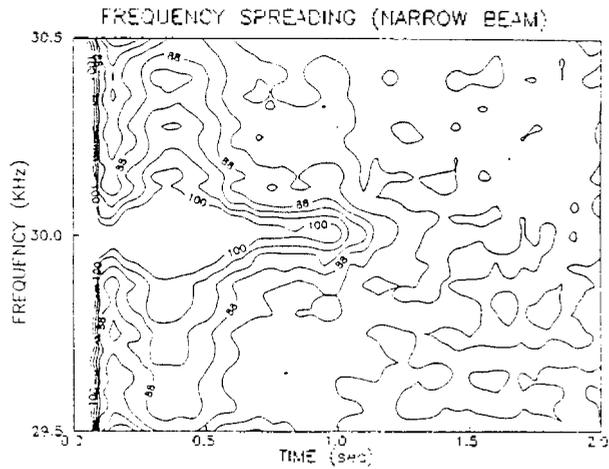


그림 10. Narrow beam 센서에 수신된 복반사음의 주파수 spreading 펄스길이 : 60ms

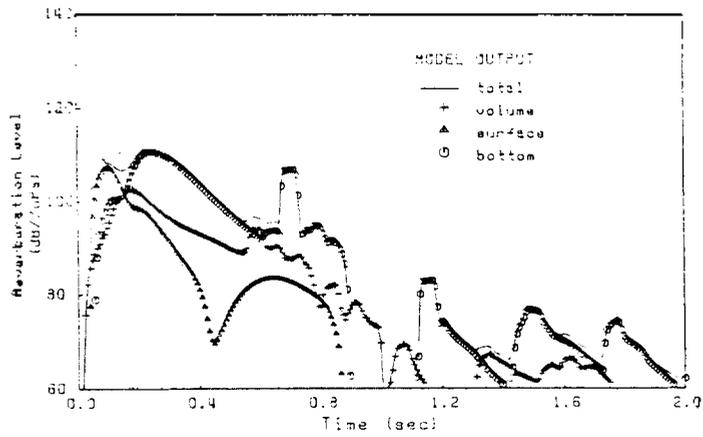


그림 11. 모델에 의해 예측된 시간에 따른 복반사음

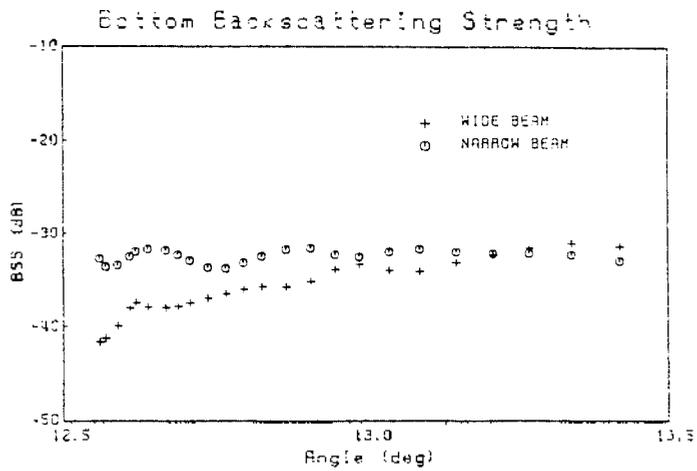


그림 12. 각 센서에 수신된 해저면 복반사음으로부터 계산된 해저면 후방 산란 강도