

천해 고주파 잔향음 예측모델

Shallow Water High-frequency Reverberation Model

최지웅*, 윤관섭*, 나정열*, 박정수**, 나영남**
(Jee Woong Choi*, Kwan-Seob Yoon*, Jungyul Na*, Joung-Soo Park**, Young Nam Na**)

*한양대학교 지구해양과학과 해양음향연구소, **국방과학연구소

(접수일자: 2002년 3월 27일; 수정일자: 2002년 7월 29일; 채택일자: 2002년 10월 21일)

천해에서 적용 가능한 고주파 단상태 잔향음 모델 (HYREV: HanYang Univ. REVerberation model)을 개발하였다. 천해의 잔향음은 해수면, 해저면의 산란 특성에 의해 영향을 크게 받기 때문에 경계면 산란의 정확한 산출이 가능한 잔향음 모델 개발이 필요하다. 본 모델에서는 고유음선 (eigenray) 계산을 통하여 음원과 산란체까지의 도달시간과 전달손실을 계산하였으며 경계면 산란 예측은 복합 거칠기 (composite roughness) 모델을 이용하였다. 모델의 검증은 위하여 GSM (generic sonar model) 잔향음 모의 신호 및 실측 잔향음 신호와 비교하였으며 비교 결과 GSM보다 HYREV 모델이 천해 잔향음 예측에 적합함을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 잔향음 모델, 고유 음선, 경계면 산란, 다중경로 확장 모델

투고분야: 수중음향 분야 (5.2)

High-frequency monostatic reverberation model (HYREV: HanYang Univ. REVerberation model) suitable for shallow-water environment is presented. It is difficult to predict reverberation signals in shallow water due to scattering from sea surface and seafloor. The arrival times and transmission losses from the source to scatterers are obtained from the eigenrays. The composite roughness theory is used to predict the boundary scattering. The signals generated by the HYREV and the GSM were compared with the observed signals and it is showed that the HYREV model provided a closer fit to the observed signals than those obtained using the GSM.

Keywords: Reverberation model, Eigenray, Boundary scattering, Multipath expansion model

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.2)

I. 서론

능동 소나를 운용시 탐지거리에 제한이 되는 환경은 주변소음 제한 환경 (noise limited condition)과 잔향음 제한 환경 (reverberation limited condition)으로 나눌 수 있다[1]. 이 중 천해에서 고주파를 사용하는 능동 소나 경우 탐지거리가 잔향음에 제한되는 잔향음 제한 환경에 속하게 된다. 잔향음 제한 환경에서 능동 소나를 운용하기 위해서는 해양 환경에 따른 잔향음 예측 모델 개발이 필요하다. 잔향음 모델 개발에 가장 중요한 부분은 경계면에서 음파 산란 특성을 얼마나 정확히 예측하는가에

있다. 천해에서 소나를 운용할 경우 외해와는 달리 해수면과 해저면에 의해서 음향채널 (sound channel)이 이루어지므로 해수면과 해저면에서의 음파 간섭 현상을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 따라서 최근 천해 잔향음 특성을 파악하고 이를 예측하기 위한 고주파 경계면 산란 신호 측정이 활발히 이루어지고 있다[2-9].

잔향음 예측 모델은 크게 구역 산란 모델 (cell-scattering model)과 포인트 산란 모델 (point-scattering model)로 나눌 수 있다[10]. 구역 산란 모델은 산란체들이 해양 내에 균질 (uniform)하게 분포되어 있다고 가정 한 후, 해양을 수많은 산란체들을 포함하고 있는 개개의 구역으로 세분하고 각각의 구역에서 산란된 음압을 시간에 따라 계산한다. 대부분의 잔향음예측 모델들은 구역 산란 모델에 속한다. 포인트 산란 모델은 산란체들이 해

책임저자: 최지웅 (choijw@hanyang.ac.kr)
425-791 경기도 안산시 사1동 1271번지
한양대학교 지구해양과학과 해양음향연구소
(전화: 031-400-4233; 팩스: 031-502-6068)

양 내에 랜덤 (random)하게 분포하고 있다고 가정한 후, 통계적 접근 방법으로 잔향음을 예측한다. 이 모델은 개개의 산란체들로부터 산란된 음압을 합산하는 방식으로 잔향음 준위를 계산한다. 구역 산란 모델의 대표적 예로는 GSM[11]과 REVSIM[12] 등이 있으며 포인트 산란 모델로는 REVGEM[13] 등이 있다.

천해에서 잔향음을 예측하는 모델로 가장 널리 알려진 모델은 구역 산란 모델인 GSM이다[11]. 그러나 GSM에 사용된 해수면과 해저면 산란모델로는 각각 1960년대에 개발된 Chapman-Harris의 실험식[14]과 Lambert's law [15]이며 이 두 모델은 경계면 산란 특성을 예측하는데 한계가 있다[3-5].

본 논문에서는 다중경로 확장 (Multipath expansion) 모델을 사용하여 고유음선 (eigenray)을 계산, 경계면까지의 음파도달시간과 입사각 및 전달손실을 파악한 후 경계면에서의 산란 모델인 복합 거칠기 모델을 이용하여 산란특성을 계산하는 새로운 천해 고주파 잔향음 모델 (HYREV: Hanyang Univ. Reverberation model)을 소개한다. HYREV는 구역 산란 모델이며 거리독립 (range independent) 잔향음 예측 모델로 한국 근해 잔향음 예측에 적합하도록 개발되었으며 주엽 (main lobe)에 의한 영향뿐만 아니라 부엽 (side lobe)에 의한 해수면/해저면 반사 및 산란 영향까지 고려되었다. 실제 사용되는 지향성이 있는 모든 송수신기는 전부 부엽이 존재하므로 모델에서도 부엽에 의한 영향이 포함되어야 한다. 경계면에서의 산란을 계산할 때 입사 면적 (insonified area)은 산란강도를 계산하는 중요한 파라미터이며 지향성 송수신기 주엽의 -3 dB 빔패턴에 의해서 결정된다. 그러나 부엽에 의한 입사 면적 계산에는 주엽의 빔패턴이 고려되는 것이 아니라 부엽의 빔패턴이 고려되어야 한다. 따라서 HYREV 모델에서는 부엽에 의한 입사 면적을 계산시 이러한 가중치를 적용하여 계산함으로써 초기 잔향음 신호에서 GSM보다 정확히 잔향음을 예측할 수 있다.

모델의 정확성을 검증하기 위하여 2001년 5월 강원도 동해시 연안에서 실시된 잔향음 측정 신호와 비교하였으며 또한 GSM의 잔향음 예측모델과 비교분석하였다.

II. HYREV 알고리즘

잔향음 준위를 모의하기 위한 첫번째 단계로 음원과 산란체까지의 고유음선 계산을 통하여 음파도달시간과 입사각, 전달손실을 계산한다. 두번째로는 각각의 산란체 (해수면,

해저면, 체적)로부터의 산란강도를 계산한다. GSM의 잔향음 예측모델에서는 해수면 산란강도는 Chapman과 Harris 실험식을 해저면 산란강도는 Lambert's law를 사용하였다. 그러나 해수면 모델인 Chapman과 Harris의 모델은 저주파 산란 실험에서 유도된 모델로써 고주파에 적용 시 많은 차이를 나타내는 것으로 알려져 있으며 해저면 산란 모델인 Lambert's law는 평면입사각 (grazing angle)에 따른 산란강도만을 고려하므로 저질에 따른, 또한 퇴적층의 불규칙성에 따른 특성은 고려하지 못하는 단점이 있다. 그러므로 HYREV는 해수면 산란강도 예측 모델로 McDaniel과 Gorman[16]에 의해서 개발된 복합 거칠기 모델을, 해저면은 Jackson *et al.* [17,18]에 의해서 개발된 복합 거칠기 모델을 이용하였다. 다음 단계로는 아래의 소나방정식에 각각의 파라미터를 대입하므로써 잔향음 준위를 계산한다.

$$RL_{s,b} = SL - SS_{s,b} + 10 \log A - 2TL + BPT + BPR$$

$$RL_v = SL - SS_v + 10 \log V - 2TL + BPT + BPR \quad (1)$$

여기서 RL_s 와 RL_b , RL_v 는 각각 해수면과 해저면, 체적 잔향음 준위이며 SL 은 음원준위, SS_s 는 단위 면적당 해수면 산란강도, SS_b 는 단위 면적당 해저면 산란강도, SS_v 는 단위 체적당 체적 산란강도이고 TL 은 음원에서 산란체

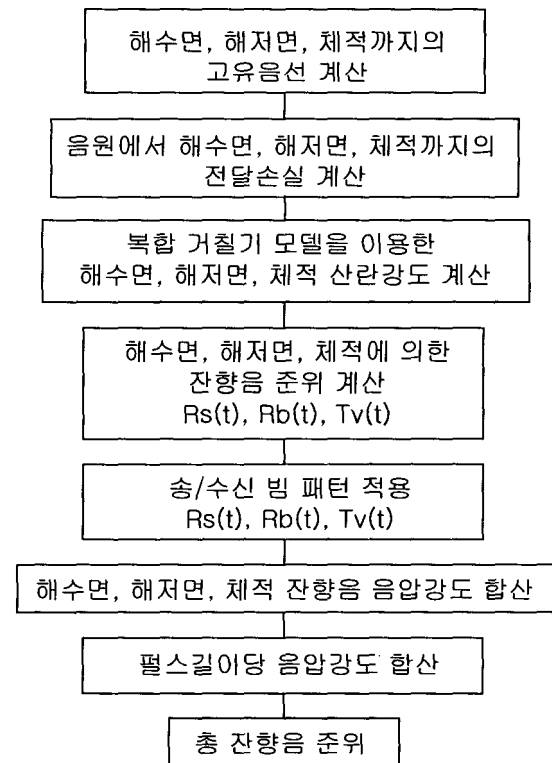


그림 1. HYREV 알고리즘 흐름도
Fig. 1. Processing flow of HYREV algorithm.

κ -지 전달손실, A 와 V 는 각각 경계면 입사 면적과 입사 체적 (ensonified volume)이다. 또한 BPT 와 BPR 은 송/수신 빔패턴이다. 이렇게 계산된 각각의 잔향음 준위를 동일 시간대역에서 음압강도 합산 (intensity sum)함으로써 총 잔향음 준위를 계산한다. 다음 단계에서는 펄스 길이만큼씩의 시간 범위 내의 모든 잔향음 준위들을 음압강도 합산한다 (그림 1).

2.1. 고유음선 모델

HYREV에서 사용된 고유음선을 계산하기 위한 모델로 다중경로 확장 모델을 사용하였다. 다중경로 확장 방법은 음장을 정상모드 (normal mode)와 유사하게 아래와 같이 표현한다[10].

$$\phi = \int_{-\infty}^{\infty} G(z, z_0, \kappa) H_0^{(1)}(\kappa r) \kappa d\kappa \quad (2)$$

이거서 $G(\kappa)$ 는 Green 함수이고 $H_0^{(1)}$ 는 영차 제1종 행켈 함수이다. z_0 는 음원 수심이며 κ 는 파수의 수평 성분이다. 정상모드 방법에 의해서 모드 수가 결정되면 식 (2)는 무한 적분 구간을 갖는 적분식으로 표현 가능하게 되며 적분내의 각각의 성분들은 음파 경로들을 대표한다 [10,19]. 다중경로 확장 방법은 음선모델과 동일한 특성을 나타내지만 음선모델의 제한점인 화선 (caustic)과 암영대 (shadow zone)을 고려할 수 있는 장점이 있다. 또한 이 모델은 거러 독립 환경에서만 사용이 가능하다[10].

2.2. 경계면 산란 모델

잔향음 모델 개발에 있어서 가장 중요한 부분이 경계면 산란 예측이다. HYREV 모델에서는 경계면 산란 모델로 복합 거칠기 모델을 사용하였다. 해수면 복합 거칠기 모델은 McDaniel과 Gorman[16]에 의해서 제시되었다. 이 모델은 해수면 거칠기 중 음파산란에 가장 큰 영향을 미치는 파수인 Bragg's law를 만족하는 파수를 사용하여 섭동 (perturbation) 모델을 이용, 상대적으로 고주파 파랑에 대한 산란을 모의한 후 저주파 파랑에 따른 부분 입사각 (local grazing angle)의 변화 및 암영효과를 보정하였다. 또한 미서 공기방울의 공진운동에 의한 산란 영향을 고려하기 위해서 천해에서 공기방울 개체수를 최 등[4]의 방법으로 예측한 후 Crowther[20]의 공진운동하는 공기방울들에 의한 산란모델을 이용하여 산란강도를 예측하였다. 해수면 후방산란은 경계면에 의한 해수면 후방산란 단면적과 공기방울에 의한 후방산란 단면적을 결합하여 예측한다.

HYREV 모델에 사용된 해저면 산란 모델 또한 복합 거칠기 모델을 사용하였다. 해저면 모델은 해수면 복합 거칠기 모델이 제시된 후 Jackson et al.[17,18]에 의해서 확장되었다. 접근 방법은 해수면 모델과 유사하나 해저면을 고려시 공기방울 영향 대신 하부퇴적층의 불균질성에 의한 체적 산란 영향을 고려해 주어야 한다. 최 등[2-5]은 한국 근해의 해수면 및 해저면 산란강도와 복합 거칠기 모델을 비교하여 한국 근해에서 적용가능함을 보였다.

본 모델에서 체적 산란은 원하는 수심에 따라 테이블로 체적 산란 강도를 입력함으로써 체적 잔향음을 계산하게 프로그래밍되었다.

III. 잔향음 실험

단상태 고주파 잔향음 측정을 위해 2001년 5월 19일, 강원도 동해시 연안에서 잔향음 실험을 실시하였다. 실험 해역의 평균 수심은 20 m, 해저면은 사질 (sand)로 평균 입자 크기는 2.05 ϕ 였다. 실험에 사용된 송신기는 TC 2116으로써 수심 18 m에 삼각지지대를 이용하여 설치하였으며 지향각은 해수면 방향, 5도로 고정, 설치운용하였다. 사용된 송신기의 송신 감도는 165 dB re 1 μ Pa/V at 1 m, 3 dB 빔폭은 15도였으며 빔패턴은 그림 2와 같다. 음원 신호는 70 kHz 정현파 신호로 펄스 길이는 1 ms, 2 ms, 10 ms로 변화시키면서 측정하였고 각각의 펄스길이에 대해 3초 간격으로 30회씩 반복 송신하였다. 이때 수신 신호는 송신기와 같은 위치에 설치되어진 TC 4014 청음기에

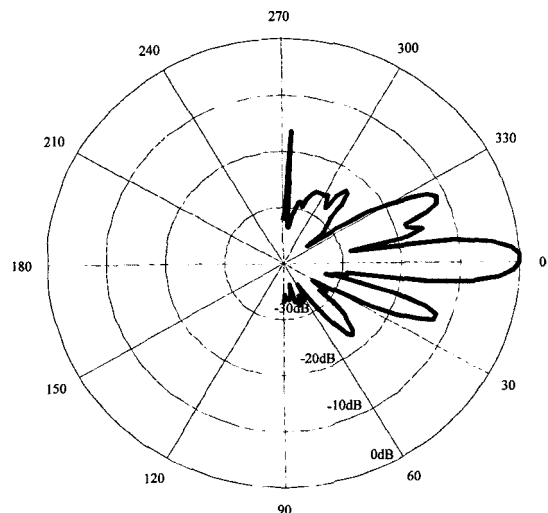


그림 2. 70kHz 트랜스듀서의 빔패턴
Fig. 2. Measured beam pattern of transducer for a frequency of 70 kHz.

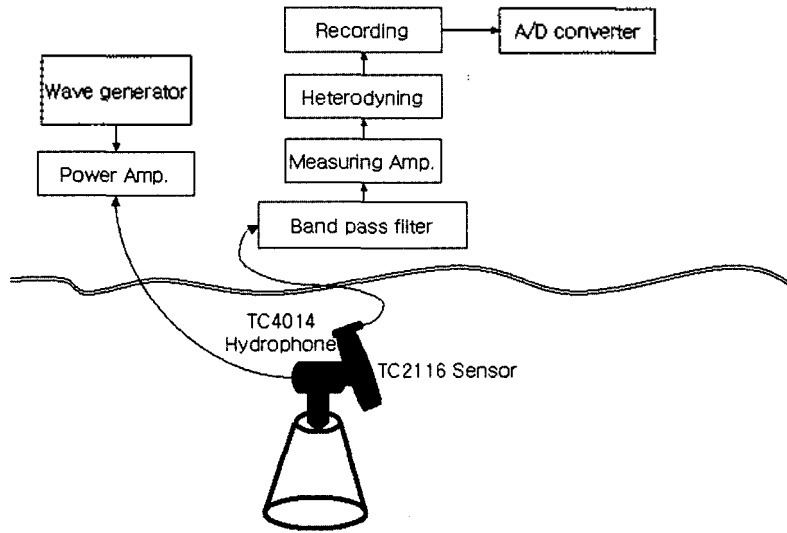


그림 3. 해수면 산란 신호를 측정하기 위한 장비 구성도
 Fig. 3. Experimental layout for measurements of sea surface backscattering signals.

의해 수신되었으며 사용 주파수 대역에서의 수신감도는 $-186 \text{ dB re } 1\text{V}/\mu\text{Pa at } 1 \text{ m}$ 였다. 청음기에 수신된 신호는 KH 3940 필터를 통해 대역 통과 필터링되어진 후 B&K 2610 증폭기를 통해 증폭, 수신되었으며 이 신호는 다시 'Heterodyning' 기법을 이용하여 70 kHz를 1 kHz로 대역 변위 (band-shift)시켜 SONY 레코더의 DAT 테이프에 저장되었다. DAT 테이프에 저장된 신호는 16 bit NI DAQ 보드를 통해 12 ksamples/s로 A/D 변환하였다 (그림 3).

실험시의 해상풍은 남동풍이었으며 풍속은 11~14 knot

로 시간에 따라 증가하는 양상을 보였다. 측정 해역의 수심별 음속 구조를 파악하기 위해 잔향음 측정 시간 동안 4번에 걸쳐 CTD를 이용하여 수심별 수온과 염분을 측정하였다. 이때 수심별 음속 구조를 계산해 본 결과, 음의 기울기를 갖고 있었으며 시간에 따른 변화는 거의 나타나지 않았다. 그림 4는 CTD에 의해서 관측된 음속 구조이다.

모델의 입력 파라미터인 수심에 따른 체적 산란강도는

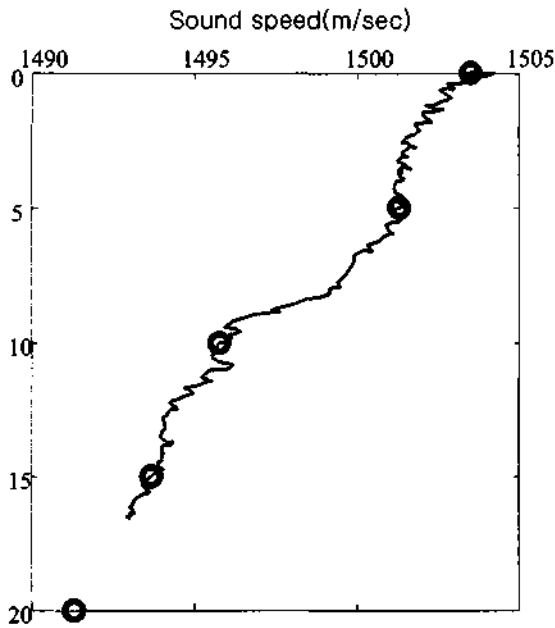


그림 4. 측정 해역의 음속 구조
 Fig. 4. Sound-speed profile of the water column taken at the experiment site.

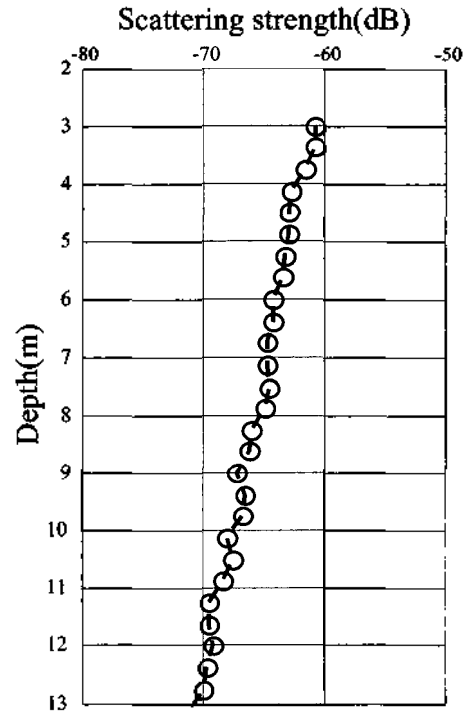


그림 5. 측정 해역의 수심별 체적 산란강도 (from ref. 19)
 Fig. 5. Depth profile of volume backscattering strength at the measurement site.

본 실험과 함께 이루어진 체적 잔향음 자료를 이용하였으며 실험 해역에서는 -70 dB에서 -60 dB의 범위로 해수면에 근접할수록 약간 증가하는 경향을 보이고 있으며 전체적으로 비교적 높은 체적 산란강도를 나타내었다 (그림 5)[21].

IV. 결과

4.1. HYREV 모델의 해수면, 해저면, 체적 잔향음 비교

그림 6은 실험시의 잔향음을 HYREV 모델을 이용하여 예측한 결과이다. 음원의 지향각이 해수면을 향하여 5도로 기울어져 있었으므로 초기 잔향음 신호에는 해수면 잔향음 신호가 우세하게 수신된다. 그러나 0.4초 부근에서부터 해수면 잔향음 신호에 비해 해저면 잔향음 신호가 우세하게 수신되며 이러한 양상은 1초까지 지속된다. 모의된 잔향음 신호의 0.5초 이후에서 상대적으로 높은 잔향음 신호 (그림 6(b)의 원으로 표시된 부분)가 나타나며 이러한 원인은 음선 추적 결과에서 찾을 수 있다 (그림 6(a)). 음원에서 해수면을 향하여 송신되는 음선 중 해수면에 반사되기 전에 해저면쪽으로 굴절되는 음선들은 대부분 0.4 km 부근에서 비교적 큰 평면입사각 (grazing angle)으로 해저면에 수렴되어 도달한다. 따라서 이 곳에서 후방 산란되어 수신기로 되돌아오는 신호들이 0.5초 부근에서 강한 해저면 잔향음을 야기시키게 된다. HYREV 모델에서는 체적

잔향음을 원하는 수심에 따른 체적 잔향음 테이블로 입력시킬 수 있으며 본 모의에서는 수심 7 m와 14 m에 각각 -70 dB와 -65 dB를 사용하여 모의하였다. 모의 결과 0.8초 부근에서 체적 잔향음이 약간 우세한 구간이 있으나 전체적으로 해수면과 해저면 잔향음에 비해서 미약하게 모의되었다.

4.2. GSM 잔향음 모델 및 실측 신호와 비교

모의된 HYREV 모델을 검증하기 위하여 GSM 잔향음 모델 및 실측 신호와 비교하였다. 그림 7(a)는 펄스길이가 1ms 경우의 비교 결과이다. 실측치는 시스템 소음에 의해서 0.2초 이후에는 일정한 값을 나타내었으므로 0.2초 이후에는 모델과의 비교가 불가능하였다. 그러나 0.2초 이전에서 GSM에 의한 모의 잔향음 신호는 실측치에 비해 비교적 낮은 준위를 나타내는 반면 HYREV 모델에 의한 모의 잔향음 신호와는 정확히 일치하고 있다. 특히 0.02초 이내의 신호는 부엽에 의한 해수면 잔향음 신호로써 GSM 결과에서는 예측하지 못하였으나 HYREV 모델 결과에서는 정확히 예측하였다. 부엽에 의한 신호 파악은 고유음선 (eigenray) 모델의 결과인 고유음선 정보를 이용하여 파악하였다. 고유음선 정보에는 송신각 및 경계면 입사각, 도달시간, 전달손실 등의 정보를 포함하고 있으므로 송신각과 도달시간을 비교하여 각각의 도달시간이 해당하는 음선이 주/부엽에 의한 잔향음 신호임을 파악할

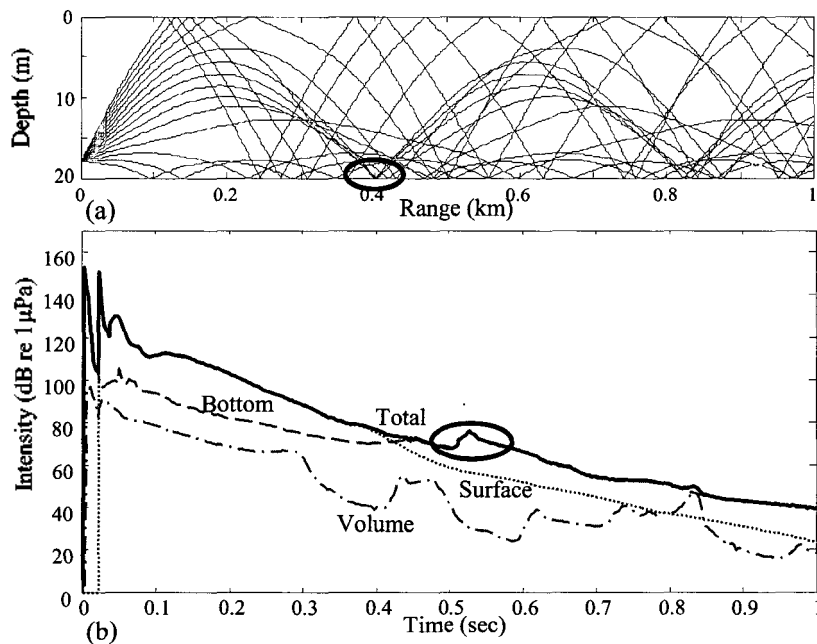


그림 6. 음선추적 및 HYREV 모델에 의해서 예측된 잔향음 신호
Fig. 6. Ray tracing and the reverberation level predicted by HYREV model.

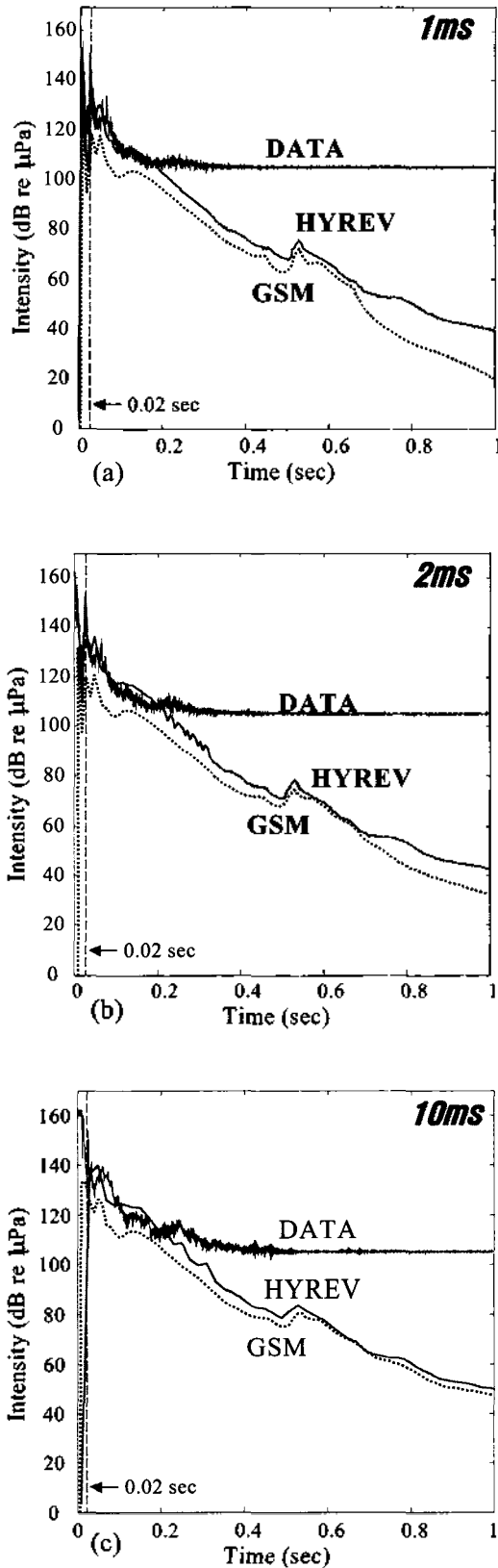


그림 7. HYREV, GSM, 실측신호 비교
 (a) 펄스길이 1 ms (b) 2 ms (c) 10 ms
 Fig. 7. Comparison of HYREV, GSM and measured data.
 (a) pulse length of 1 ms (b) 2 ms (c) 10 ms

수 있다. 0.5초 부근에서 해지면 잔향음에 의한 신호 증가는 두 모델에서 모두 같은 양상을 보이고 있으나 HYREV 모델에 의한 예측치가 좀더 높은 준위를 나타낸다.

펄스 길이가 2ms인 경우에서도 역시 GSM에 의한 예측치 보다는 HYREV 모델에 의한 예측치가 실측치와 잘 일치하고 있다 (그림 7(b)). 펄스 길이가 10ms에서도 위의 두 경우와 마찬가지로의 결과를 나타내고 있으나 초기의 잔향음 신호 (0.01초 이내)는 두 모델 다 예측하지 못하였다 (그림 7(c)).

4.3. 환경 변화에 따른 민감성

그림 8은 동일 해양 환경에서 풍속만을 변화시키면서 HYREV 모델 예측치를 비교한 그림이다. 풍속 변화에 따른 잔향음 신호의 변형은 해수면 잔향음에서만 차이를 나타내므로 모의 신호에서도 해수면 잔향음 신호가 우세한 0.4초 이전 신호에서만 변화가 나타난다. 5m/s까지는 풍속이 증가할수록 잔향음 신호가 증가한다. 풍속이 5m/s에서 10m/s로 증가하였을 경우는 0.1초 이전의 잔향음 신호는 증가하는 양상을 나타내고 있으나 그 이후의 잔향음 신호에서는 오히려 잔향음 준위가 약간 감소하는 경향을 보인다. 이는 공기방울 산란모델에서 해수에 포함된 공기방울 생성량이 포화상태에 이르게 되면 산란강도는 풍속이나 공기방울 밀도와는 무관하게 되고 해수면 입사음파의 $\sin \theta$ (θ : 평면입사각)에 비례하게 되기 때문으로 공기방울 포화상태에서 평면입사각이 아주 작을 경우에는 공기방울 포화상태 직전에 비해 오히려 산란강

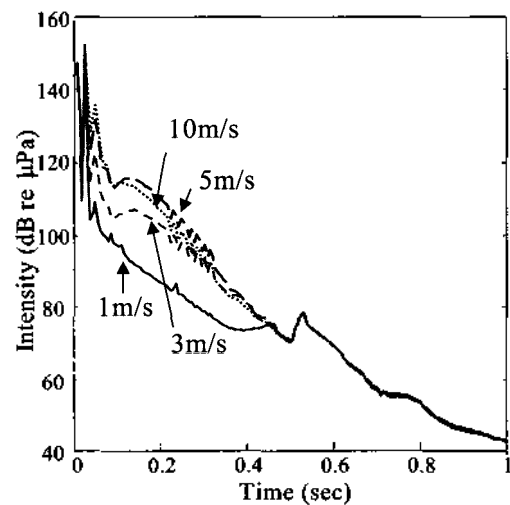


그림 8. 풍속 변화에 따른 HYREV 모델에 의해 예측된 잔향음 준위 변화
 Fig. 8. Comparison of model predictions with the variations of wind speed.

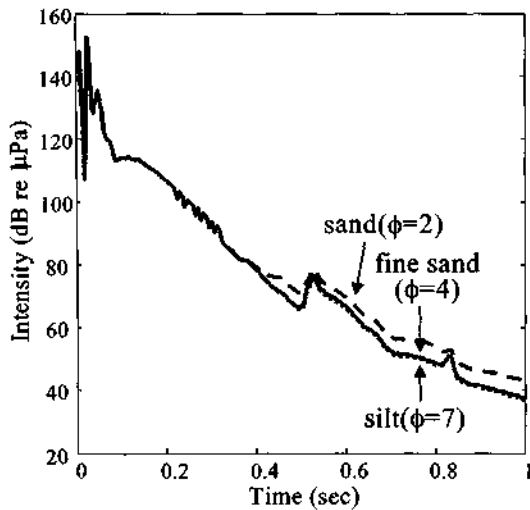


그림 9. 해저면 평균 입도에 따른 HYREV 모델에 의해 예측된 잔향음 준위 변화
 Fig. 9. Comparison of model predictions with the variations of sediment mean grain size.

도가 줄어드는 경향이 있다. 이러한 경향은 실제 여러 측정치에서도 관측되고 있다[22, 23].

그림 9는 동일한 해양환경에서 해저면 구성 성분의 변화에 따른 잔향음 준위 예측 신호이다. 해저면 구성 성분의 평균입도에 따라 실트 ($\phi=7$, $\phi = -\log_2$ (입자직경)), 세립질 사질 ($\phi=4$), 조립질 사질 ($\phi=2$)로 구분하여 모의하였다. 해수면 풍속 변화와는 달리 해저면 구성 성분을 변화시켰을 경우 해저면 산란이 우세한 잔향음 신호의 뒷부분 (0.4초 이후)이 변화한다. 전체적으로 평균 입도가 커질수록 잔향음은 증가하는 경향을 보이고 있으나 평균 입도가 작을 경우 입도 증가에 따른 잔향음 준위 증가폭 보다 평균 입도가 클 경우 입도 증가에 따른 잔향음 준위 증가폭이 훨씬 크게 모의된다.

전체적으로 풍속이 증가할수록 또한 해저면 거칠기가 증가할수록 HYREV 모델에 의해서 모의된 잔향음은 증가하는 경향을 보인다.

V. 결론 및 토의

본 논문에서는 거리독립 잔향음 예측 모델인 천해 고주파 잔향음 모델 (HYREV)를 소개하였다. HYREV는 한국 근해 잔향음 예측에 적합하도록 개발되었으며 주빔에 의한 영향뿐만 아니라 부엽에 의한 해수면/해저면 반사 및 산란 영향까지 고려되었다. HYREV 모델에 의한 모의 잔향음 신호와 GSM 잔향음 모의 신호, 실측 잔향음 신호를

비교한 결과 GSM 잔향음 신호는 실측치에 비해 비교적 낮은 잔향음 준위를 나타내는 반면, HYREV 결과는 실측치와 비교적 잘 일치하였다. 또한 해양 환경을 변화시키면서 잔향음 신호를 모의한 결과, HYREV 모델은 비교적 환경 변화에 잘 적응하였다. 모델의 정확한 검증과 보안을 위해서는 다양한 해양환경에서 측정된 잔향음 신호와의 비교 분석이 필요하며 추후 거리 종속 잔향음 모델 및 양상태 잔향음 모델로 업그레이드되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 수중음향특화연구센터의 연구지원에 의하여 수행되었음.

참고 문헌

1. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, McGraw-Hill, New York, 1983.
2. 최지웅, 나정열, 조운현, "내만에서의 해수면 후방산란신호 특성," 한국음향학회지, 19 (2), 46-53, 2000.
3. 최지웅, 나정열, 나영남, "양상태 해수면 음파산란 측정," 한국음향학회지, 20 (4), 81-86, 2001.
4. 최지웅, 나정열, 박경주, 윤관섭, 박정수, 나영남, "고주파 해수면 후방산란 신호 측정," 한국음향학회지, 21 (4), 421-429, 2002.
5. 최지웅, 나정열, 석동우, 오선택, 박정수, "천해에서의 고주파 해저면 후방산란강도 측정," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 18 (1s), 198-201, 1999.
6. J. W. Choi, J. Na, and W. Seong, "240-kHz bistatic bottom scattering measurements in shallow water," *IEEE J. Ocean Eng.* 26, 54-62, 2001.
7. 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, 1188-1199, 1986.
8. S. Stanic, K. B. Briggs, P. Fleischer, R. I. Ray, and W. B. Sawyer, "Shallow-water high-frequency bottom scattering off Panama City Florida," *J. Acoust. Soc. Am.*, 83, 2134-2144, 1988.
9. S. Stanic, R. R. Goodman, K. B. Briggs, N. P. Chotiros, and E. T. Kennedy, "Shallow-water bottom reverberation measurements," *IEEE J. Ocean Eng.* 23, 203-210, 1998.
10. P. C. Etter, *Underwater Acoustic Modeling: principles, techniques and applications*, 2nd ed, E & FN SPON, London, 1991.
11. H. Weinberg, *Generic Sonar Model*, Naval Underwater Syst. Ctr., Tech. Doc. 5971A, 1980.
12. S. G. Chamberlain and J. C. Galli, "A model for numerical simulation of nonstationary sonar reverberation using linear spectral prediction," *IEEE J. Ocean Eng.* OE-8, 21-36, 1983.
13. D. W. Princehouse, "REVGEM, a real-time reverberation generator," *IEEE Inter. Conf. Acoust. Speech Signal Process.*, 827-835, 1977.

14. R. P. Chapman and J. H. Harris, "Surface backscattering strengths measured with explosive charges," *J. Acoust. Soc. Am.*, **34**, 1592-1597, 1962.
15. K. V. Mackenzie, "Bottom reverberation for 530 and 1030 cps sound in deep water," *J. Acoust. Soc. Am.*, **33**, 1498-1504, 1961.
16. S. T. McDaniel and A. D. Gorman, "Acoustic and radar sea surface backscatter," *J. Geophys. Res.*, **87** (C6), 4127-4136, 1982.
17. D. R. Jackson, D. P. Winebrenner, and A. Ishmaru, "Application of the composite roughness model to high-frequency bottom backscattering," *J. Acoust. Soc. Am.*, **79**, 1410-1422, 1986.
18. P. D. Mourad and D. R. Jackson, "High frequency sonar equation models for bottom backscatter and forward loss," *Proc. OCEAN'89*, 1168-1175, 1989.
19. H. Weinberg, "Application of ray theory to acoustic propagation in horizontally stratified oceans," *J. Acoust. Soc. Am.*, **58**, 97-109, 1975.
20. P. A. Crowther, "Acoustic scattering from near-surface bubble layers," in *Cavitation and Inhomogeneities in Underwater Acoustics*, edited by W. Lauterborn, Springer-Verlag, Berlin, 1980.
21. 나정열, 유경렬, 천해 해저면 설치 능수동 소오나의 음파전달 특성 연구 (2차년도 중간 보고서), 국방과학연구소, 보고서 번호 NSDC-417-020166, 2002.
22. P. H. Dahl, W. J. Plant, B. Nutz, H. Herwig, and E. T. Terray, "Simultaneous acoustic and microwave backscattering from the sea surface," *J. Acoust. Soc. Am.*, **101**, 2583-2595, 1997.
23. B. Nutz, H. Herwig, P. D. Koenigs, and J. M. Monti, "Acoustic backscatter measurements in the North Sea: 3-18 kHz," *J. Acoust. Soc. Am.*, **95**, 2488-2494, 1994.

저자 약력

● **최 지 응 (Jee Woong Choi)**



1989년 3월 ~ 1996년 2월: 한양대학교 이과대학 지구해양학과 (이학사)
 1996년 3월 ~ 1998년 2월: 한양대학교 대학원 지구해양학과 (이학석사)
 1998년 3월 ~ 2002년 8월: 한양대학교 대학원 지구해양학과 (이학박사)
 2002년 11월 ~ 현재: Applied Physics Laboratory, University of Washington, Research Associate Postdoctoral
 ※ 주관심분야: 수중음향

● **윤 관 설 (Kwan-Seob Yoon)**

한국음향학회지 제21권 제5호 참조

● **나 정 열 (Jungyul Na)**

1968년: 서울대학교 기상학과 (이학사)
 1972년: 미국 플로리다 주립대학교 해양학과 (이학석사)
 1976년: 미국 플로리다 주립대학교 해양학과 (이학박사)
 1977년 ~ 1986년: 국방과학연구소 책임연구원, 수중음향실장
 1996년 ~ 1997년: 한국음향학회 회장
 1986년 ~ 현재: 한양대학교 과학기술대학 지구해양학과 교수
 ※ 주관심분야: 수중음향

● **박 정 수 (Joung-Soo Park)**

한국음향학회지 제20권 제6호 참조

● **나 영 남 (Young Nam Na)**

한국음향학회지 제15권 제3E호 참조