

천해 저주파 잔향음 예측모델

Shallow Water Low-frequency Reverberation Model

김 남 수*, 오 선 택*, 나 정 열*
(Nam-Soo Kim*, Sun-Taek Oh*, Jungyul Na*)

*한양대학교 지구해양과학과 해양음향연구실

(접수일자: 2002년 5월 31일; 수정일자: 2002년 9월 9일; 채택일자: 2002년 10월 22일)

천해에서의 저주파 단상대 잔향음 모델 (L-HYREV: Low-frequency Hanyang univ. Reverberation model)을 개발하였다. 음선이론 (ray-theory)에 기초한 전파모델은 해저 내로 투과되는 음파에 대한 효과를 적절하게 고려할 수 없으므로, 해저 내 상호작용을 계산할 수 있는 전파모델이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 RAM (Range dependent Acoustic Model)을 이용해서 전달손실을 계산 후, 다중경로 확장모델 (multi-path expansion model)을 이용해서 산출한 전달손실을 보정하였다. 모델의 검증은 위하여 GSM (generic sonar model) 잔향음 모의 신호 및 실측 잔향음 신호와 비교하였으며, 비교 결과 GSM보다 L-HYREV 모델이 저주파 잔향음 예측에 적합함을 확인할 수 있다.

핵심용어: 잔향음 모델, 고유 음선, 전달손실, 다중경로 확장 모델, RAM

투고분야: 수중음향 분야 (5.2)

Low-frequency mono-static reverberation model for shallow-water environment is presented. It is necessary to develop the transmission loss model to calculate the sub-bottom interaction because the ray-based transmission loss model is difficult to compute the pressure accurately which penetrates the bottom medium. In this paper reverberation level is calculated using the RAM (Range dependent Acoustic Model) to augment the multi-path expansion model because it does not estimate transmission loss accurately in shallow water. The signals generated by the L-HYREV and the GSM are compared with the observed signals and it is showed that the L-HYREV model provides a closer fit to the observed signals than those obtained using the GSM.

Keywords: Reverberation model, Eigenray, Transmission loss, Multi-path expansion model, RAM

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.2)

I. 서론

최근 천해에서 저주파 잔향음 특성을 파악하고 이를 예측하기 위한 연구 및 파악된 잔향음을 이용해서 해저 저질 및 후방산란강도 예측 등의 연구가 활발히 이루어지고 있다[1-4]. 정상모드 (normal-mode)를 이용한 저주파 잔향음 예측 모델은 각 모드 별 전달손실과 음파의 도달시간을 얻기 위해 푸리에 합성 (Fourier synthesis)

을 사용하는 대신 군속도 (group velocities)를 이용해서 음파도달시간을 얻고, 음선이론과 비슷한 산란함수를 만들어서 시간에 대한 적분을 통해 산란문제를 해결함으로써 잔향음 준위를 계산하는 모델을 개발하였다[1]. 또한 수십 kHz 이상의 주파수 대역에서 사용가능한 고주파 단상대 잔향음 예측 모델 (HYREV)도 개발되었다. 고주파의 경우 해수면은 경계면 및 미세공기방울에 의한 산란영향이 우세하며, 해저면의 경우는 경계면 및 수십 cm 이하의 퇴적층 비균질성에 의한 산란의 영향이 우세하다. 반면 저주파의 경우 해수면은 미세공기방울에 의한 영향 및 경계면의 영향이 고주파에 비해 현저히 작아질 것이

책임저자: 김남수 (knamsoo@ihanyang.ac.kr)
425-791 경기도 안산시 사1동 1271번지
한양대학교 지구해양과학과 해양음향연구실
(전화: 031-400-4156; 팩스: 031-406-6458)

다. 또한 해저면은 퇴적층 내로 투과된 음파의 퇴적층 내 반사 및 후방산란에 의한 영향이 중요하므로, HYREV를 저주파 잔향음을 예측하는데 사용하는 것은 문제가 있다[2].

그리고 획득된 잔향음을 이용해서 해저 퇴적층의 음향학적 특성을 실시간으로 파악하는 연구가 수행되었으며 [3], 천해에서 잔향음을 예측하는 모델로 가장 널리 알려진 GSM의 헤저손실 모델 (bottom loss model)이 전달손실을 정확하게 계산하지 못하기 때문에 GSM과 입력값으로 해저 내 지음향인자를 사용, 해저 내 상호작용을 계산할 수 있는 FEPE (finite-element parabolic equation)와의 전달손실 차이를 잔향음 준위에 직접 보정, 실측 값과의 차이에 의한 해저면 후방산란강도를 계산한 모델도 있다[4]. 그러나 이는 전달손실의 차이를 잔향음 준위에 직접 보정함으로써 거리와 시간의 사상 (mapping)에 따른 오차가 있다.

따라서 본 논문에서는 거리와 시간의 사상에 따른 오차를 제거하고, 고유음선을 계산시 전달손실에 퇴적층 내 상호작용에 대한 음선이론의 한계를 극복하기 위해서 PE (parabolic equation)를 이용한 전달손실을 보정하는 음선이론과 음파이론을 병합하는 새로운 천해 단상태 저주파 잔향음 모델 (L-HYREV: Low-frequency mono-static HanYang univ. REVerberation model)을 제안하고자 한다.

본 논문은 I장 서론에 이어, II장에서 L-HYREV 알고리즘을 소개하고, III장에서는 GSM과 실측자료 및 L-HYREV를 비교하였으며, 마지막으로 IV장에서 결론을 도출하였다.

II. L-HYREV 알고리즘

잔향음은 음원 신호에 의한 음파 산란 현상이므로 주변 소음과는 구별이 된다. 우선 잔향음 준위는 음원 준위에 비례하며, 거리와 수심에 따른 산란강도가 다르게 나타나므로 시간에 따른 준위가 다르게 나타난다. 산란모델에서 이용하는 기본 개념은 잔향음은 산란된 음의 합이고, 산란체로부터 산란된 음이 도착한 후부터 끝날 때까지의 산란현상이며, 다중산란은 무시되고 산란은 산란체의 분포에 비례한다는 것이다[5]. 이러한 개념에 의해 계산하는 것은 결국 음원과 산란체간의 전파경로를 찾기 위한 고유음선을 계산하고 각 시간별로 체적과 경계면에서 발생하는 산란구역을 계산하는 것이다. L-HYREV에서는 고유음선을 계산하기 위해 다중경로 확장모델 (multi-path expansion model)을 사용하였다[6].

다중경로 확장모델에서 사용한 잔향음 준위를 계산하기 위한 식을 수치적으로 표시하면 다음과 같고 이는 다중경로 확장모델에서 사용한 방법에 근거를 둔 것이다. 식 (1)은 경계면 잔향음을 계산시, 경계면상 임의의 산란체로 이루어진 구역을 $\Delta R^{(i)}$ 라 하고 이 산란구역에 해당하는 전달손실 및 입사각을 $P_1^{(i)}, P_2^{(i)}, \theta_{a,1}^{(i)}, \theta_{a,2}^{(i)}$ 라 할 때의 잔향음 준위이다.

$$|P_{rev}|^2 = \sum |P_0 \eta(\theta_{a,1}^{(i)}) P_1^{(i)} P_2^{(i)} \eta(\theta_{a,2}^{(i)})|^2 \times \mu^{(i)} \Delta R^{(i)} \quad (1)$$

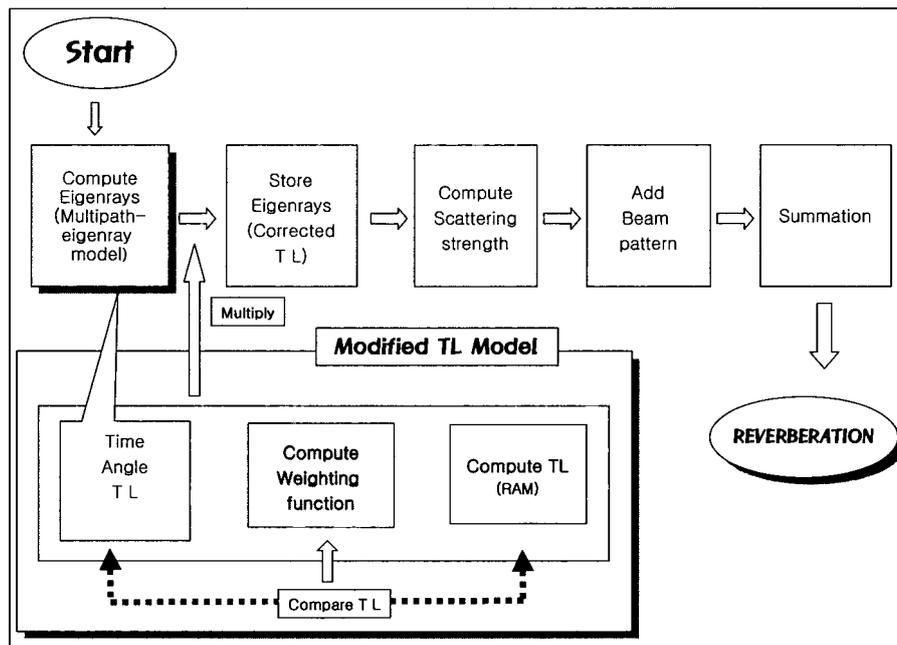


그림 1. L-HYREV 알고리즘 흐름도
Fig. 1. Processing flow of L-HYREV algorithm.

여기에서 첨자 i 는 산란이 일어나는 경계면 (산란구역)의 거리증분 (range step)이다. 그리고 P_{rev} 는 잔향음 음압, P_0 는 음원의 음압, $P_1^{(i)} / P_2^{(i)}$ 는 음원에서 산란체 / 산란체에서 음원까지의 전달손실, $\eta_a(\theta_{a,1}^{(i)}) / \eta_a(\theta_{a,2}^{(i)})$ 는 송/수신지향 특성, $\eta^{(i)}$ 는 후방산란강도를 나타낸다. 즉, 경계면상 고유음선이 있는 임의의 거리에서의 잔향음은 음원과 전달손실, 송/수신지향 특성, 후방산란강도의 합으로서 계산된다.

그런데 여기에서 나타나는 $P_1^{(i)}$ 및 $P_2^{(i)}$ 을 RAM을 이용 계산한 수정된 전달손실로 교체해서 사용한다.

다음 단계에서는 이렇게 계산된 각각의 잔향음 준위를 펄스 길이만큼씩 시간범위 내의 모든 잔향음 준위들을 음압강도 합산 (intensity sum)함으로써 총 잔향음 준위를 계산한다. 잔향음 준위 계산시 사용되는 경계면 잔향음을 위한 산란 모델과 정확한 전달손실을 구하기 위한 전달손실 보정모델은 다음과 같다.

2.1. 경계면 산란 모델

L-HYREV 모델에서 사용한 경계면 산란 예측 모델은 다음과 같다. HYREV 모델에서는 해수면 산란을 위해 복합 거칠기 모델 (composite roughness model)을 사용했는데, 이는 경계면 및 미세공기방울에 의한 산란영향을 계산하기 때문에 저주파를 계산하는 L-HYREV에는 적합하지 않다. 따라서 본 모델에서 해수면 산란을 위해서 저주파 산란 실험에서 유도된 Chapman과 Harris의 실험식을 이용했으며, 이 식은 해수면의 풍속과 사용 주파수 그

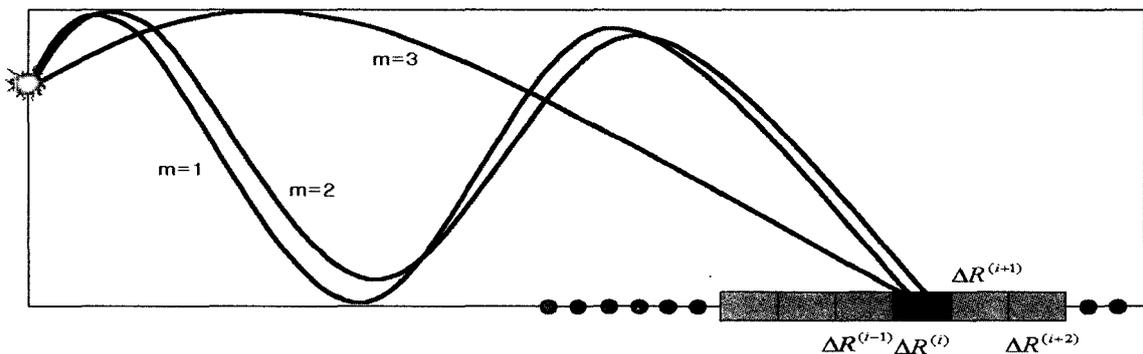
리고 입사각의 함수이다[5]. 또한 해저면은 고주파에서는 경계면 및 수십 cm 이하의 퇴적층 비균질성에 의한 산란의 영향이 강하기 때문에 HYREV가 복합 거칠기 모델을 사용했으나, L-HYREV에서는 해저면의 성질과 입사각의 함수이며, 저주파수와 해저퇴적층이 모래인 경우 정확한 값을 보이는 Lambert's law를 사용하였다[4-6].

또한 본 모델에서 체적산란 계산은 HYREV에서와 같이 수심에 따라 체적산란강도를 입력함으로써 체적잔향음을 계산하게 되어 있다[2].

2.2. 전달손실 보정 모델

다중경로 확장모델에서 계산된 전달손실은 저주파수에서 중요한 해저 퇴적층의 상호작용을 고려하지 못하는 해저손실 모델의 부정확성이라는 단점이 있다. 따라서 L-HYREV에서는 이를 보완하기 위해서 해저 퇴적층 내의 지음향인자 (geo-acoustic parameter)를 사용, 퇴적층 내의 음파전달까지도 계산하는 RAM을 이용해서 전달손실을 계산하였으며[8] 계산된 전달손실은 정확한 잔향음 준위를 계산하기 위해 다중경로 확장모델의 전달손실로 대체하였으며, 그 방법은 다음과 같다. 다중경로 확장 모델에 의해 산출되는 고유음선은 그림 2에서와 같이 하나의 산란구역 ($\Delta R^{(i)}$)에 대해서 각각의 전파경로에 대한 음파도달시간과 입사각 및 전달손실 등을 계산한다.

그러나 RAM에서의 전달손실은 어느 산란구역에서 그때까지 손실된 음압의 총합을 나타내므로, 각각의 고유음선을 나타내는 음압과의 비로 나누어 주어야 한다. 즉 어



$$\sum 10^{\text{모든 path에 의한 TL}} = 10^{\text{RAM TL}} \times \alpha \quad \text{at } \Delta R^{(i)}$$

Where

α : Weighting function

m : eigenray number, i : range step at boundary

그림 2. 가중치 계산 알고리즘

Fig. 2. The algorithm of the calculation of the weighting function.

는 거리에서 고유음선을 표시하는 각각의 전파경로에 따른 손실된 음압의 총합은 RAM에서 계산한 음압과 같아야 한다. 따라서 이 두 전달손실을 보정하기 위해서 각각의 전달손실을 음의 세기 (intensity)로 나타내고, 다중경로 확장모델에 의해 계산된 거리별 음의 세기의 총합을 구한 후 두 음의 세기의 비로써 가중치 (weighting function)를 구한다. 따라서 어느 산란구역 ($\Delta R^{(i)}$)에서 가중치 (α)는 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{\sum_{m=1}^{m_{max}} P_i^{(m)/20}}{10^{TL(RAM)/20}} \quad (2)$$

여기에서 첨자 m 은 고유음선이며, m_{max} 는 최대 고유음선 개수를, 그리고 i 는 경계면상 산란구역의 거리중분 (range step)을 나타내며, $P_i^{(i)}$ 는 음원에서 산란구역까지의 전달손실을 나타낸다.

각각의 산란구역에서 구한 가중치는 각기 다른 값을 가지며, 이 가중치를 각각의 고유음선의 전달손실의 음의 세기에 각각 곱한 후 음압으로 변환하면 지음향인자를 사용한 RAM에서의 전달손실과 같게 된다. 보정된 고유음선은 퇴적층 내에서의 상호작용을 고려함으로써 보다 정확한 전달손실을 계산할 것이며, 따라서 보다 정확한 잔향음 준위를 계산할 수 있다.

III. 모델 적용

단상태 저주파 잔향음 실험을 한다는 것은 현실적으로 상당한 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 모델의 검증 을 위해서 L-HYREV 모델 결과와 GSM 잔향음 모델 결과를 비교 분석하였으며, 또한 LWAD (The Littoral Warfare Advanced Development) Exercise 99-1의 실측 자료와도 비교하였다[3]. 단, LWAD Exercise 99-1의 실측자료를 사용시 입력파라미터는 동일하나, AN-SQS-53C ACTIVE SONAR의 음원준위를 알지 못함으로 그 경향만을 비교하였다.

모의된 L-HYREV 모델, GSM 모델 및 LWAD Exercise 99-1의 입력파라미터는 다음과 같다.

해양은 거리 20 km까지 거리독립 (range-independent)이며, 수심은 64 m이다. RAM을 이용 전달손실을 계산하기 위해 퇴적층의 두께는 실측자료를 얻은 New York, Long Island에서 약 50마일 남쪽인 Area Foxtrot에서 측정한 30m를 적용하였다. 이때 음속은 그림 3과 같고, 음원 및 수신기의 깊이는 20 m이다. 주파수는 3,500 Hz, 펄스길이 (pulse length)는 500 msec 그리고 풍속은 5 kts이다. 또한 음원준위는 일반적인 능동소나의 평균값을 고려하여 215 dB을 가정했다. RAM에서 해저 퇴적층에서의 상호작용을 계산하기 위한 지음향인자는 음속이 1650 m/s이고 밀도는 1.9 kg/m^3 , 그리고 감쇠계수 (attenuation coef

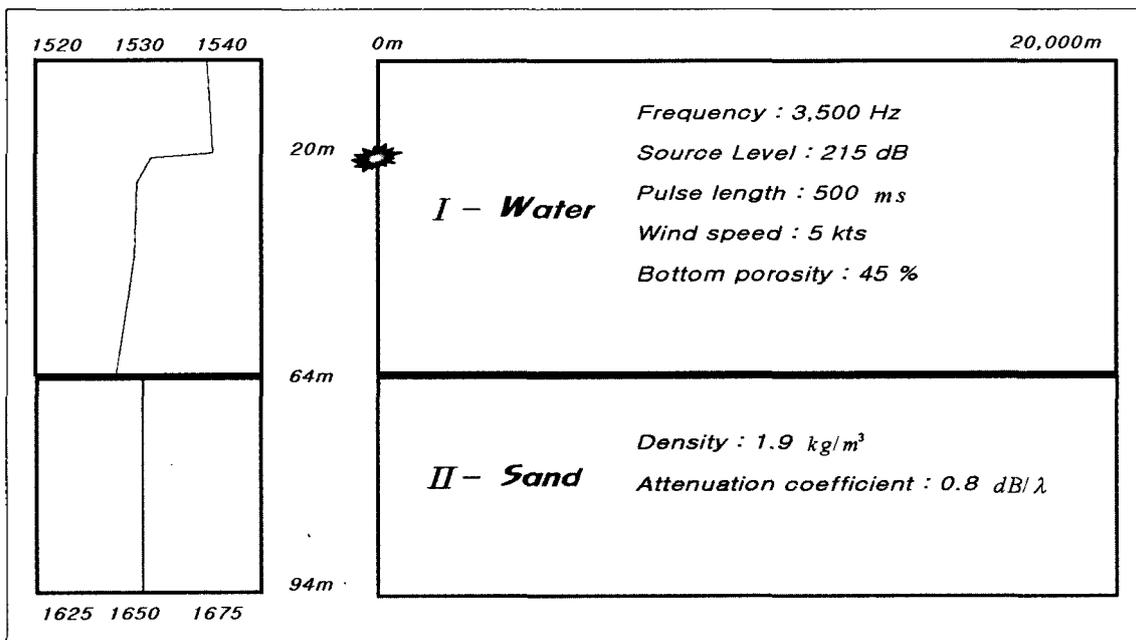


그림 3. 입력 파라미터
Fig. 3. Model input parameter.

ficient)는 $0.8 \text{ dB}/\lambda$ 를 사용했으며, 이 인자들은 모래를 의미한다[8].

먼저 L-HYREV 모델과 GSM 모델의 비교를 위해서 수신기가 해수면과 해저면에 위치시 전달손실을 비교하였다. L-HYREV 모델에서 사용된 전달손실은 RAM을 이용 계산한 결과이며, GSM 모델은 다중경로 확장모델을 이용 계산하였다.

그림 4는 해수면에 수신기가 위치할 때, 그리고 그림 5는 수신기가 해저면에 위치할 때 L-HYREV와 GSM의 전달손실 차이를 나타낸 것인데, 천해 장거리 저주파 잔향음 준위는 해수면보다는 거의 해저면의 영향을 받는다.

따라서 그림 5의 수신기가 해저면에 위치할 때의 전달손실이 잔향음에 중요한 요소가 된다. 수신기가 해저면에 위치할 때의 전달손실은 GSM 모델이 L-HYREV 모델보다 5-20 dB 이상 적으며, 거리가 증가할수록 그 차이가 증가한다는 것을 알 수 있다. 해저면에 입사되는 음파는 반사 또는 투과를 하는데, 이에 영향을 주는 것은 해저저질의 특성과 수평입사각 (grazing angle)이다[5]. 이 수평입사각이 작아야 음파는 장거리 전파를 할 수 있는데, 수평입사각이 작다 하더라도 천해에서는 경계면에 부딪히는 횡수가 증가한다. 그런데 GSM은 퇴적층 내에서의 에너지 손실을 계산하지 못하기 때문에 거리가 증가함에

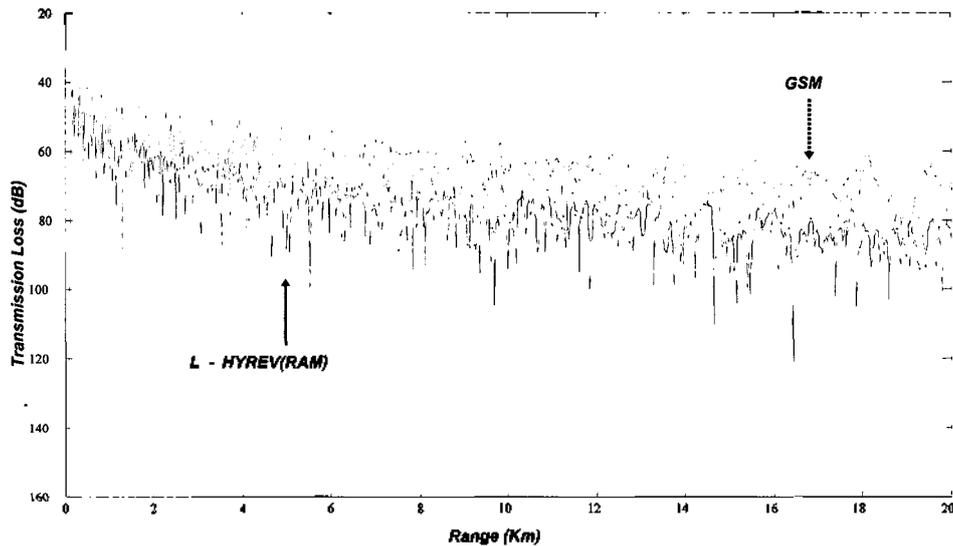


그림 4. GSM과 L-HYREV (RAM)의 전달손실 비교 (수신기: 해수면)
 Fig. 4. Comparison between GSM and L-HYREV (RAM) Transmission Losses (receiver: surface).

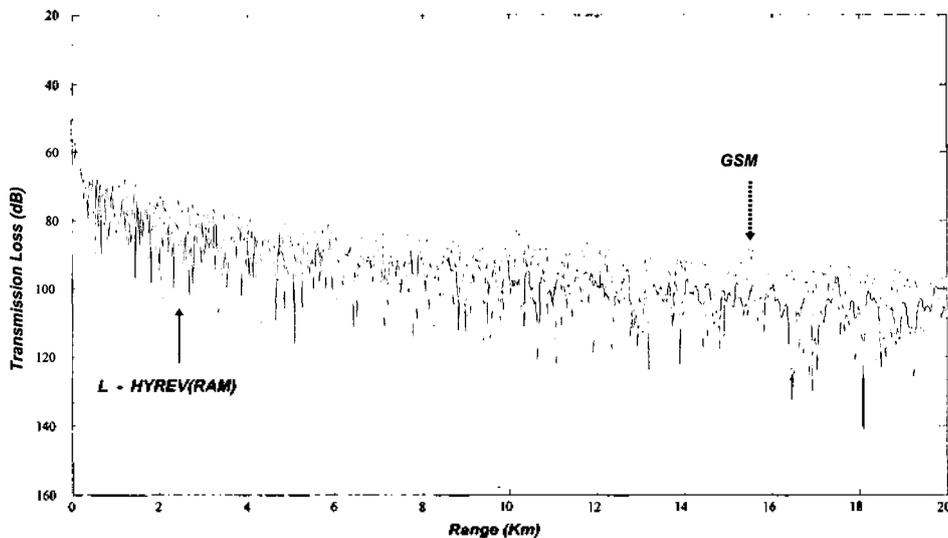


그림 5. GSM과 L-HYREV (RAM)의 전달손실 비교 (수신기: 해저면)
 Fig. 5. Comparison between GSM and L-HYREV (RAM) Transmission Losses (receiver: bottom).

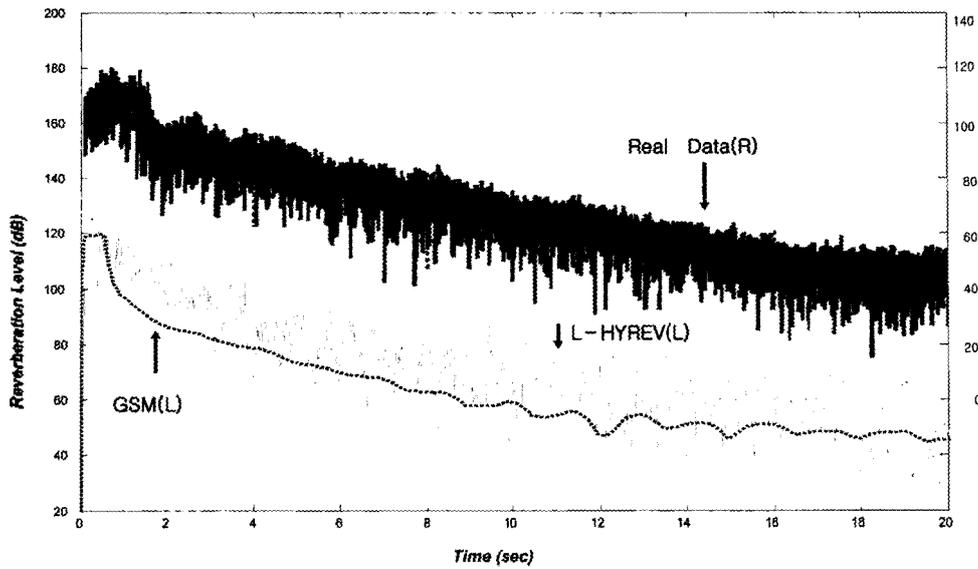


그림 6. GSM, L-HYREV 및 실측자료의 잔향음 준위 비교
 Fig. 6. Comparison LWAD Exercise 99-1 data to GSM/L-HYREV Reverberation levels.

따라 전달손실의 차이가 더 커지게 된다는 것을 알 수 있다. 또한 잔향음 준위를 계산시 GSM 모델이 L-HYREV 모델보다 전달손실 차이 이상으로 클 것으로 예측할 수 있다.

그림 6은 L-HYREV 모델과 GSM 모델, 그리고 LWAD Exercise 99-1 실측자료의 잔향음 준위를 비교한 것이다. 원활한 비교를 위해서 수직축을 달리 했는데, L-HYREV 모델과 GSM 모델의 잔향음준위에 대한 수직축은 왼쪽을 사용하며, 오른쪽 수직축은 실측자료에 대한 축이다. 또한 실측값을 시뮬레이션하기 위해서 모델의 음원준위는 215 dB로 가정하였으며, 이것은 대부분의 선체부착 소나(hull-mounted SONAR)의 음원준위에 해당되는 것이다. GSM과 L-HYREV의 음원준위를 달리한다 하더라도 선체부착 소나의 음원준위의 예측치 차이가 크지 않을 것이기 때문에 그림에서와 같이 잔향음 준위는 비슷한 양상을 나타낸다. 그러나 실측값은 위상을 포함하고 수신기에 들어온 음압을 샘플링만 했기 때문에 잔향음 준위의 요동(fluctuation)이 많다. 이에 비해 GSM의 잔향음 준위는 모델의 특성상 비상관(incoherent) 전달손실을 사용하며, 펄스길이만큼씩의 시간 범위 내의 모든 잔향음 준위들을 음압강도 합산(intensity sum)하기 때문에 요동이 적다. 그러나 L-HYREV 모델은 RAM 모델의 특성상 상관(coherent) 전달손실을 사용하기 때문에 잔향음 준위의 요동이 실측값보다는 작으나 GSM 모델보다는 크다는 것을 알 수 있으며, 그 경향 또한 알 수 있다[6,7].

위에서 예측한 대로 L-HYREV 모델과 GSM 모델 잔향

음 준위의 차이는 전체적으로 5-30 dB까지의 차이를 나타내었다. 이는 단상태 모델의 특성상 어느 거리까지 구한 전달손실의 두 배를 적용해서 잔향음 준위를 계산했기 때문이다[5].

여기에서 모델 값과 실측 값을 비교시 LWAD Exercise 99-1의 잔향음 준위에 대해 시간이 경과할수록 GSM 보다는 L-HYREV가 비교적 경향이 일치하며, 이는 전달손실의 차이와 같이 천해이기 때문에 경계면과의 상호작용이 증가하기 때문이다. 따라서 시간이 경과할수록 GSM과 LWAD Exercise 99-1 및 L-HYREV와의 차이가 커진다는 것을 알 수 있다.

IV. 결론 및 토의

본 논문에서는 거리독립 저주파 잔향음 예측 모델인 L-HYREV를 개발하였다. 해양환경을 고정시킨 후 잔향음 준위를 비교한 결과, RAM을 이용하여 해저 내 상호작용을 고려한 잔향음 준위가 GSM의 모의신호보다는 LWAD Exercise 99-1의 실측자료와 시간이 지날수록 비교적 경향이 일치함을 알 수 있다.

그러나 실측자료와 비교시 음원준위를 정확하게 고려하지 못한 한계를 가지고 있다. 따라서 본 모델의 정확한 실험적 검증을 위해서 한국연안에서 소나를 이용한 다양한 해양환경하에서 측정된 잔향음 신호와의 비교 분석이 필요하며, 추후 거리 종속 양상태 저주파 잔향음 모델을

개발하기 위해서는 그림 1에서와 같이 고유음선을 계산 시, 음원에서 수신기 그리고 수신기에서 음원간의 고유 음선을 각각 계산한 다음 공통적인 고유음선을 찾고, 산란함수도 단상태가 아닌 양상태 산란함수를 적용한다면 양상태 거리종속 잔향음 모델도 구현 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 수중음향특화연구센터의 연구지원에 의하여 수행되었음.

참고 문헌

1. D. D. Ellis, "A shallow-water normal-mode reverberation model," *J. Acoust. Soc. Am.*, **97**, 2804-2814, 1995.
2. 최지웅, 윤관섭, 나정열, 박정수, 나영남, "천해 고주파 잔향음 예측모델 (HYREV 모델)," 2002년도 한국음향학회 하계학술발표대회논문집, 451-454, 2002.
3. G. A. Scanlon, R. H. Bourke, and J. H. Wilson, "Estimation of bottom scattering strength from measured and modeled mid-frequency sonar reverberation levels," *IEEE J. Oceanic Eng.*, **21**, 440-451, 1996.
4. D. A. Schalm, *Inversion of shallow water bottom sediment properties using AN/SQS-53C reverberation level data from EXERCISE LWAD 99-1*, Master's thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 1999.

5. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, McGraw-Hill, New York, 237-290, 1983.
6. H. Weinberg, *Generic Sonar Model*, Naval Underwater Syst. Ctr., Tech. Doc. 5971A, 1980.
7. M. D. Collins, *User's Guide for RAM Versions 1.0 and 1.0p*, <http://oalib.saic.com/>.
8. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Proter, and H. Schmidt, *computational ocean acoustics*, Aip press, New York, 40-42, 1993.

저자 약력

● 김 남 수 (Nam-Soo Kim)



1991년 3월: 해군사관학교 조선공학과 (공학사)
 1999년 2월: 한양대학교 지구해양학과 (이학석사)
 2001년 3월~현재: 한양대학교 지구해양학과 박사
 과정 재학 중
 * 주관심분야: 수중음향 모델링

● 오 선 택 (Sun-Taek Oh)

한국음향학회지 제20권 제4호 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