

# 천해 저주파 잔향음 예측모델

김남수 · 오선택 · 나정열

한양대학교 과학기술대학 지구해양과학과

## Shallow water Low-Frequency Reverberation Model

Namsu Kim, Suntaek Oh, Jungul Na

Department of Earth and Marine Sciences, Hanyang University

Email : [knamsu@ihanyang.ac.kr](mailto:knamsu@ihanyang.ac.kr)

### 요 약

천해에서의 저주파 단상태 잔향음 모델(L-HYREV)을 개발하였다. 음선이론에 기초한 전파모델은 해저 내로 투과되는 음파에 대한 효과를 적절하게 고려 할 수 없으므로, 해저 내 상호작용을 계산할 수 있는 전파모델이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 RAM을 이용해서 전달손실을 계산 후, 다중경로 확장모델을 이용해서 산출한 전달손실을 보정하였다. 모델의 검증용 위하여 GSM(generic sonar model) 잔향음 모의 신호 및 실측 잔향음 신호와 비교하였으며, 비교 결과 GSM 보다 L-HYREV 모델이 저주파 잔향음 예측에 적합함을 확인할 수 있다.

### 1. 서 론

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 군속도(group velocities)를 이용해서 음파도달시간을 얻고, 음선이론과 비슷한 산란항수를 만들어서 시간에 대한 적분을 통해 산란문제

를 해결함으로써 잔향음 준위를 계산하는 모델을 개발하였다[1]. 또한 수십 kHz 이상의 주파수 대역에서 사용 가능한 고주파 단상태 잔향음 예측 모델(HYREV)도 개발되었다[2]. 그리고 획득된 잔향음을 이용해서 해저 퇴적층의 음향학적 특성을 실시간으로 찾아내는 연구가 있으며[3], GSM의 해저손실 모델(bottom loss model)이 전달손실을 정확하게 계산하지 못하기 때문에 GSM과 FEPE(finite-element parabolic equation)와의 전달손실 차이를 잔향음 준위에 직접 보정, 실측 값과의 차이에 의한 해저면 후방산란강도를 계산한 모델도 있다[4~5]. 그러나 이는 전달손실의 차이를 잔향음 준위에 직접 보정함으로써 거리와 시간의 사상(mapping)에 따른 오차가 있다. 따라서 본 논문에서는 거리와 시간의 사상에 따른 오차를 없애고, 고유음선을 계산 시 나오는 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.

### 2. L-HYREV 알고리즘

잔향음은 음원과 산란체간의 전파경로를 찾기 위한 고유음선을 계산하고 각 시간 별로 제척과 경계면에서 발생하는 산란구역을 계산하는 것이다. L-HYREV에서는 고유음선을 계산하기 위해 다중경로 확장모델(multi-path expansion model)을 사용하였으며[7], 잔향음 준위 계산 시 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 유도되었기에 저주파에 적합한 Chamman과 Harris의 실험식을 이공했으며, 이것은 해수면의 풍속과 사용 주파수 그리고 입사각의 함수이다[6]. 또한 해저면은 고주파에서는 경계면 및 수십 cm 이하의 퇴적층 비균질성에 의한 산란의 영향이 강하기 때문에 HYREV가 복합 거칠기 모델을 사용했으나, L-HYREV에서는 저주파수와 해저퇴적층이 모래인 경우 정확하고, 해저면의 성질과 입사각의 함수인 Lambert's law를 사용하였다[4,6,7]. 또한 본 모델에서 체적산란 계산은 HYREV에서와 같이 수심에 따라 체적산란강도를 입력함으로써 체적잔향음을 계산하게 되어있다[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 FAM을 이용 전달손실을 계산하였으며[8], 계산된 전달손실은 정확한 잔향음 준위를 계산하기 위해 다중경로 확장모델의 전

달손실과 교체하였으며, 그 방법은 다음과 같다.

다중경로 확장모델에 의해 산출되는 고유음선은 하나의 거리에 대해서 각각의 전파경로에 대한 음파도달시간과 입사각 및 전달손실 등을 계산한다. 그러나 RAM에서의 전달손실은 어느 거리에서 그때까지 손실된 음압의 총합을 나타내므로, 각각의 고유음선을 나타내는 음압으로 나누어 주어야 한다. 바꾸어 말하면, 어느 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 거리 별 음의 세기의 총합을 구한 후에 두 음의 세기의 비로써 가중치(weighting function)를 구한다. 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.

## 3. 모델 적용

단상태 저주파 잔향음 실험을 한다는 것은 현실적으로 상당한 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 모델의 검증용 위해서 GSM 잔향음 모델과 비교하였으며, 또한 LWAD(The Littoral Warfare Advanced Development) Exercise 99-1의 실측자료와도 비교하였다[3]. 단, LWAD Exercise 99-1의 실측자료를 사용시 입력파라미터는 동일하나, AN-SQS-53C Active Sonar의 음원 준위를 알지 못함으로 그 경향만을 비교하였다. 모의된 L-HYREV 모델 / GSM 모델 및 LWAD Exercise 99-1의 입력파라미터는 다음과 같다. 해양은 거리 20km까지 거리 독립이며, 수심은 64m이다. RAM을 이용 전달손실을 계산하기 위해 퇴적층의 두께는 실측자료를 얻은 New York, Long Island에서 약 50마일 남쪽인 Area Foxtrot에서 측정된 30m를 계산한다. 이때 음속은 그림 1과 같고, 음원 및 수신기의 깊이는 20m이다. 주파수는 3,500Hz, 펄스간격(pulse length)은 500msec를

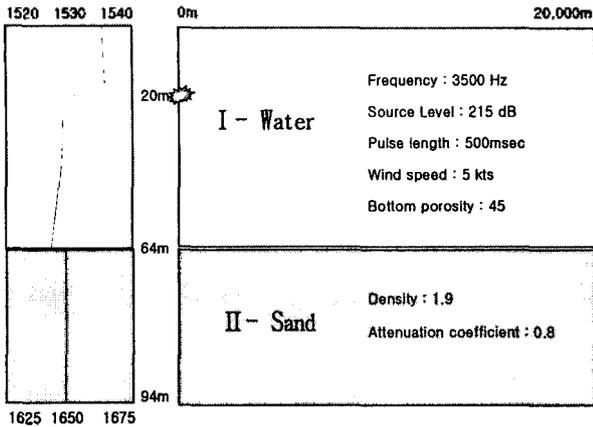


그림 1. 입력 파라미터.

사용했으며, 풍속은 5kts를 사용했다. 또한 음원준위는 215dB를 가정했다. RAM에서 해저 퇴적층에서의 상호 작용을 계산하기 위한 지음향인자는 음속이 1650m/s 이고 밀도는  $1.9 \text{ kg/m}^3$ , 그리고 감쇠계수(attenuation coefficient)는  $0.8 \text{ dB}/\lambda$  을 사용했으며, 이 인자들은 모래를 의미한다[9].

먼저 L-HYREV 모델과 GSM 모델의 비교를 위해서 전달손실을 비교하였다. L-HYREV 모델에서 사용된 전달손실은 RAM을 이용 계산한 전달손실이며, GSM 모델에서의 전달손실은 다중경로 확장모델에 의해 계산한 전달손실이다. 그림 2 및 그림 3은 L-HYREV(RAM)와 GSM의 해수면과 해저면에서의 전달손실의 차이를 나타낸 것인데, 천해에서의 저주파 잔향음 준위는 해수면보다는 거의 해저면의 영향을 받는다. 따라서 그림 3의 해저면에 의한 전달손실이 중요한 요소가 된다. 해저면 전달손실은 GSM 모델이 RAM 모델에서보다 5-20dB

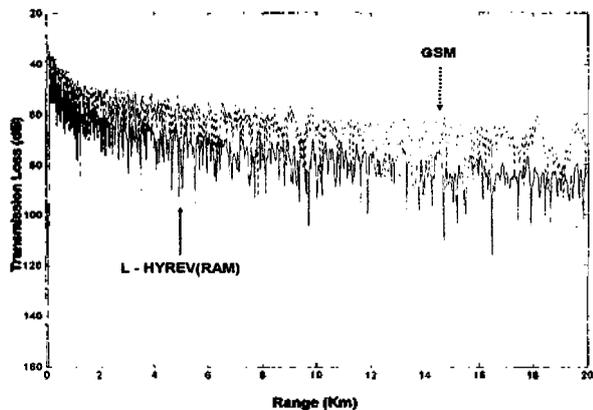


그림 2. GSM과 L-HYREV(RAM)의 해수면 전달손실 비교.

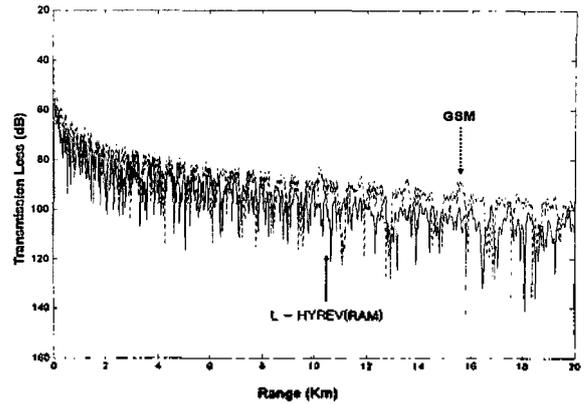


그림 3. GSM과 L-HYREV(RAM)의 해저면 전달손실 비교.

이상 크며, 거리가 증가할수록 그 차이가 앞산한다는 것을 알 수 있다. 해저면에 입사되는 음파는 반사 또는 투과를 하는데, 이에 영향을 주는 것은 해저지질의 특성과 입사각이다[10]. 이 입사각이 작아야 음파는 장거리 전파를 할 수 있는데, 입사각이 작다 하더라도 천해에서는 경계면에 부딪히는 횟수가 증가한다. 그런데 GSM은 퇴적층내에서의 에너지 손실을 계산하지 못하기 때문에 거리가 증가함에 따라 전달손실의 차이가 더 커지게 된다는 것을 알 수 있다. 또한 잔향음 준위를 계산 시 GSM 모델이 L-HYREV 모델보다 전달손실 차이 이상으로 작을 것 이라는 것을 예측할 수 있다.

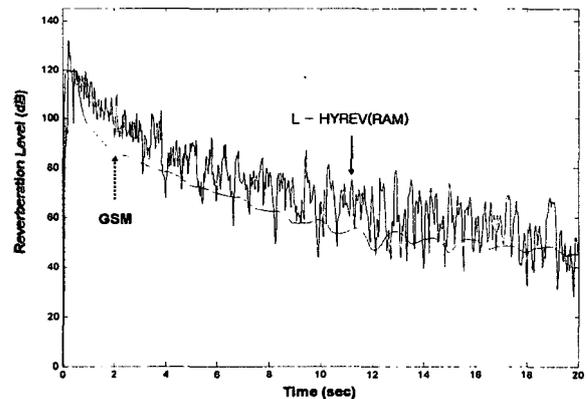


그림 4. GSM과 L-HYREV의 잔향음 준위 비교.

그림 4는 L-HYREV 모델과 GSM 모델의 잔향음 준위를 비교한 것이다. 위에서 예측한 대로 잔향음 준위는 시간이 증가함에 따라 5-30dB까지의 차이를 보이는데 이는 단상태 모델의 특성상 어느 거리까지 구한 전달손실의 두 배를 적용해서 잔향음 준위를 계산 했기 때문

이다[6]. 그림 5는 LWAD Exercise 99-1의 잔향음 준위 실측자료이다. 여기에서 모델 값과 실측 값을 비교 시 LWAD Exercise 99-1의 잔향음 준위가 시간이 경과 할수록 GSM 보다는 L-HYREV와 비교적 일치하는 경향을 알 수 있는데, 이것 또한 전달손실의 차이와 같이 천해이기 때문에 경계면에 부딪히는 횟수가 증가하며, 따라서 시간이 경과 할수록 GSM과 LWAD Exercise 99-1 및 L-HYREV와의 차이가 커진다는 것을 알 수 있다.

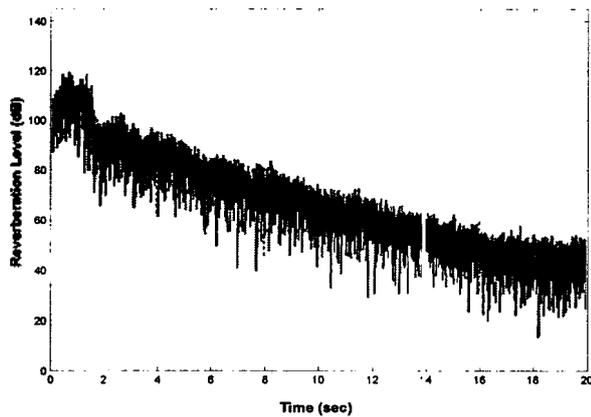


그림 5. (나). 잔향음 실측자료.

#### 4. 결론 및 토의

본 논문에서는 거리독립 저주파 잔향음 예측 모델인 L-HYREV를 개발하였다. 해양환경을 고정시간 후 잔향음 준위를 비교한 결과, 해저퇴적층 내 상호작용을 포함하는 RAM의 전달손실을 이용한 잔향음 준위가 LWAD Exercise 99-1의 실측자료와 GSM 보다는 시간이 지날수록 비교적 경향이 일치함을 알 수 있었다. 그러나 실측자료와 비교 시 음원준위(source level)를 정확하게 고려하지 못한 한계를 가지고 있다. 따라서 본 모델의 정확한 검증과 보안을 위해서는 다양한 해양환경하에서 측정된 잔향음 신호와의 비교 분석이 필요하며, 추후 거리 종속 양상태 저주파 잔향음 모델을 개발하기 위해서는 고유음선을 계산 시, 음원에서 수신기 그리고 수신기에서 음원간의 고유음선을 각각 계산한 다음 공통적인 고유음선을 찾고, 산란항수도 단상태가 아닌 양상태 산란항수를 적용한다면 양상태 거리종속

잔향음 모델도 구현 가능 할 것이다.

#### 참고 문헌

1. D. D. Ellis, "A shallow-water normal-mode reverberation model," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 97, pp.2804-2814, 1995.
2. 최지용, 윤관섭, 나정열, 박정수, 나영남, "천해 고주파 잔향음 예측모델," 한국 음향학회지 투고 중, 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. Vol. 21, pp.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. M. D. Collins, *FEPE User's Guide*, NORDA Technical Note 365, 1988.
6. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, McGraw-Hill, New York, 1983, pp.237-290.
7. H. Weinberg, *Generic Sonar Model*, Naval Underwater Syst. Ctr., Tech. Doc. 5971A, 1980.
8. M. D. Collins, *User's Guide for RAM Versions 1.0 and 1.0p*, NORDA.
9. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Proter, and H. Schmidt, *Computational ocean acoustics*, Aip press, New York, 1993, pp.40-42.
10. *Electronic Interactive Technical Manual (EITM)*, Naval Air Technical Services Facility.