

음선 기반 중주파수 대역 잔향음 모델 개발 및 실측 데이터 비교

Mid Frequency Band Reverberation Model Development Using Ray Theory and Comparison with Experimental Data

추 영 민*, 성 우 제*, 양 인 식**, 오 원 천**

(Young-min Chu*, Woo-jae Seong*, In-sik Yang**, Won-Tchon Oh**)

*서울대학교 조선해양공학과, **국방과학연구소

(접수일자: 2009년 8월 3일; 수정일자: 2009년 9월 29일; 채택일자: 2009년 10월 21일)

실제 해양에서 음파는 해수면/해저면의 거친 경계면이나 기포층/어군과 같이 불규칙적으로 분포된 체적에 의해 산란되며, 잔향음 신호는 이러한 산란 신호의 합으로 형성된다. 실측된 잔향음 신호를 정확하게 모의하기 위해서는 각 산란 메커니즘에 적합한 산란 모델을 음파 전달 손실 모델과 결합시켜야 한다. 본 논문에서는 기존의 산란 모델과 결합이 용이한 음선 이론을 기반으로 잔향음 모델을 개발하였다. 개발된 잔향음 모델은 (1) 해수면에 대한 산란 신호로 실험 기반의 Chapman-Harris 식과 이론 기반의 APL-UW/SSA 모델, (2) 해저면에 대해서는 실험 기반의 Lambert 법칙과 이론 기반의 APL-UW/SSA 모델을 선택적으로 사용하도록 한다. 개발된 잔향음 모델의 타당성을 검증하기 위해서 정상 모드법 기반으로 개발된 Ellis 모델 결과와 2006 잔향음 공동워크샵에서 발표된 여러 잔향음 모델 결과와 비교하였다. 모델간의 비교를 통해 검증된 잔향음 모델을 이용하여 한국 근해의 중주파수 대역 잔향음 신호를 모의하고, 이를 실측 데이터와 시간 영역에서 직접 비교하였다. 이러한 비교를 통해 각 해역의 해양 환경의 특성에 따라 상호 다른 잔향음 신호 경향을 고찰할 수 있으며, 나아가 각 해역 특성을 반영하는 산란 강도 함수를 본 잔향음 모델에 통해 선정할 수 있다.

핵심용어: 음선 이론, 산란 모델, 잔향음 모델, 한국 근해 실측 데이터

투고분야: 수중음향분야 (5.2)

Sound in the ocean is scattered by inhomogeneities of many different kinds, such as the sea surface, the sea bottom, or the randomly distributed bubble layer and school of fish. The total sum of the scattered signals from these scatterers is called reverberation. In order to simulate the reverberation signal precisely, combination of a propagation model with proper scattering models, corresponding to each scattering mechanism, is required. In this article, we develop a reverberation model based on the ray theory easily combined with the existing scattering models. Developed reverberation model uses (1) Chapman-Harris empirical formula and APL-UW model/SSA model for the sea surface scattering. For the sea bottom scattering, it uses (2) Lambert's law and APL-UW model/SSA model. To verify our developed reverberation model, we compare our results with those in Ellis' article and 2006 reverberation workshop. This verified reverberation model SNURM is used to simulate reverberation signal for the neighboring seas of South Korea at mid frequency and the results from model are compared with experimental data in time domain. Through comparison between experiment data and model results, the features of reverberation signal dependent on environment of each sea is investigated and this analysis leads us to select an appropriate scattering function for each area of interest.

Keywords: Ray Theory, Scattering Model, Reverberation Model, Experimental Data from the Seas of South Korea

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.2)

I. 서론

실제 해양은 해수면의 거친 경계면과 기포층, 해저면의 거친 경계면과 재질의 상이함, 어군과 같은 불균질성이 존재하며, 음파는 이러한 불균질한 특성에 의해 산란된다. 잔향음은 이러한 산란체를 통해 산란된 신호의 합으로 형성되는데, 각 산란 메커니즘의 불확실성 등에 의해 그 크기와 경향을 예측하기 어렵다. 따라서 보다 정확하게 잔향음을 예측하기 위해서는 산란 모델에 대한 이해가 선행되어야 한다.

산란 모델은 산란 메커니즘을 규명하는 방법에 따라 경계면 산란과 체적 산란으로 나눌 수 있다. 특히, 해수면과 해저면의 경계면에 의한 산란을 예측하는 방법은 수없이 많은 연구가 이루어졌으며 최신의 경계면 예측 모델로는 섭동 이론과 Kirchhoff 근사법을 내삽하여 산란 크기를 구하는 AP-UW (Applied Physics Lab. - Univ. of Washington) 모델과 작은 기울기 근사법 기반으로 유도되는 SSA (Small Slope Approximation) 모델이 있다 [1]. 이론 기반의 모델을 이용하여 산란 강도를 예측하기 위해서는 해양 환경을 구성하는 매질을 미리 알고 있어야 한다. 하지만 이론 기반으로 예측된 산란 강도는 결과에 대한 물리적 해석이나 결과의 적용 가능 범위에 대한 규명이 실험 기반의 산란 모델에 비해 용이하다. 해수면의 경우, 거친 경계면에 의한 산란뿐 아니라 해수면 저면부에 있는 기포층에 의한 산란이 존재한다. 기포층에 의한 산란은 Dahl [2]이 제안한 방법 등으로 예측할 수 있는데, 이러한 체적 산란 모델과 거친기 산란 모델을 선형적으로 결합하여 전체 해수면 산란 강도를 구한다. 해저면의 경우, 체적 비균질성에 의한 산란이 존재하는데 이러한 산란 크기는 섭동 이론 [3]을 적용하여 예측할 수 있다. 해수면과 마찬가지로 저철기에 의한 산란과 체적 산란을 결합하여 해저면에 의한 산란을 계산한다.

한편, 실험 기반으로 산란을 예측하는 방법으로 Chapman-Harris 식 [4]과 Lambert 법칙 [5]이 있다. Chapman-Harris 식은 해수면 산란 강도 예측에 사용되며, Lambert 법칙은 주로 해저면 산란 강도 예측에 적용된다. 실험 기반의 산란 모델은 이론 기반의 산란 모델에 비해 입력 변수와 계산 과정이 간단하다. 하지만 도출된 결론에 대한 물리적 해석이 모호하다.

잔향음 신호는 앞서 언급한 각종 산란 모델과 정상모드법 또는 음선이론 등의 전달 손실 모델을 결합하여 모의할 수 있다. 따라서 잔향음 모델은 사용한 산란 모델이나

전달 손실 모델의 특징에 따라 그 적용 범위가 제한된다. Ellis [6]는 정상 모드법과 Lambert 법칙을 결합하여 수심이 일정한 천해에 적용 가능한 잔향음 모델을 만들었으며, 이를 기존의 잔향음 모델 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 이후 Desharnai 등 [7]은 이러한 잔향음 모델을 적용하여 실측데이터와 비교하고 그 경향을 분석하였다. 한편, Kecnan [8]은 음선 모델의 일종인 GRAB 모델 [9]을 기반으로 개발된 CASS 잔향음 모델의 알고리즘을 소개하고, Weinberg [10]는 CASS 잔향음 모델 결과를 실측 데이터와 비교하여 그 효용성을 검증하였다. 국내에서는 오택환 등 [11]이 거리 독립 해양환경에서 중주파수 음선 이론을 이용하여 양상대 잔향음신호를 모의하였고 이 결과를 실측데이터와 비교하여 검증하였다. 또한, 하용훈 [12]은 거친 해수면을 가지는 환경에서의 산란 신호를 PSTD (Pseudo-Spectral Time Domain) 법을 이용하여 모의하고 이러한 음파를 이용하여 거친 해수면 특성에 따른 산란 강도 함수를 역으로 추정하였다. 위와 같은 수치 해법 기반의 모델을 이용하여 잔향음 신호를 모의할 경우 계산 부담 (computation burden)이 많다는 단점이 있다. Harrison [13]은 이러한 부분을 해결하기 위해 수층의 음속이 등속 구조를 가지는 해양 환경에서 mode-stripping을 적용하여 잔향음에 대한 해석식을 유도하였다.

본 논문에서는 음선이론을 적용하여 수치 해법 기반의 거리 종속 잔향음 모델을 개발하였다. 본 모델에 사용된 산란 모델은 크게 해수면/해저면에 대한 실험 기반의 산란 모델과 이론 기반으로 나눌 수 있다 (각 산란 모델의 적용 범위나 특징은 2장에서 언급한다). 특히, 이론 기반의 산란 모델을 사용하면 경계면 거칠기에 의한 산란 신호만을 계산하는데, Dahl [2]이 제안했던 모델과 섭동 이론 기반으로 유도된 식을 각각 해수면, 해저면에 적용하여 체적 산란에 대한 영향을 고려하였다. 또한, 본 모델은 박철수 등 [14]이 개발한 음선 모델을 이용하여 이산화된 시간 영역 잔향음 신호를 모의하였다. 시간 영역 잔향음 모델은 주파수 영역 잔향음 모델에 비해 잔향음 신호 특성을 관측하기 쉽고, 실측 데이터와의 직접 비교가 용이하다. 본 논문에서 이러한 방법으로 모의된 시간 영역 잔향음 신호를 기존의 잔향음 모델과 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

2장에서는 본 모델을 구성하는 전달 손실 모델과 산란 모델의 특징을 설명하고, 비간섭 잔향음 신호를 모의하기 위해 산란 면적을 선택하는 방법에 대해 언급하였다. 3장에서는 본 모델을 활용하여 나온 결과를 기존의 잔향

음 모델 결과와 비교하였다. 4장에서는 앞서 검증된 잔향 음 모델을 이용하여 한국 근해의 잔향음 신호를 모의하고 이를 각 해역의 실측데이터와 시간 영역에서 직접 비교하였다. 이러한 비교를 통해 각 해역의 잔향음 특성을 고찰하고 나아가 각 해역에 지배적인 산란 메커니즘을 분석하였다. 결론에서 본 논문에서 개발된 잔향음 모델의 특징과 실측 데이터 비교 과정 및 결과에 대해 요약하였다. 또한, 한국 근해에 보다 적합한 잔향음 신호를 모의하기 위해 개선해야 할 부분에 대해 언급하였다.

II. 음선 기반 잔향음 모델

본 논문에서는 기존의 이론/실험 기반의 산란 모델을 음선이론과 결합하여 시간 영역 잔향음 신호 모의 모델을 개발하였다. 본 모델의 목적은 잠수함 능동 소나 운영 주파수 대역인 중주파수 대역 잔향음 특성을 분석하고, 이를 통해 수신 신호에서 표적 신호를 구별하는 것이다. 이를 위해서 중고주파 대역에서 다른 이론 기반의 모델에 비해 효율적인 음선 이론을 본 잔향음 모델에 적용하였다. 본 잔향음 모델의 적용 주파수 대역은 전달 손실 모델인 음선이론 보다 음선이론과 결합되는 산란 모델에 의존적이다. 본 모델은 실험기반의 Chapman-Harris식과 Lambert 법칙, 이론기반의 APL-UW모델과 SSA모델을 사용함으로써 중주파수 대역 특히, 잠수함 능동소나 운영 주파수 대역에서 유효한 잔향음 신호를 모의하였다.

한편, 불규칙적인 경계면으로부터 산란되어 수신되는 잔향음 신호를 음선이론 기반으로 모의하기 위해서는 각 산란 면적에 대한 고유 음선을 찾아야 한다. 그리고 이 고유 음선을 산란 강도 함수와 결합하면 각 산란 면적에 의해 산란된 신호를 모의할 수 있다. 각 산란 면적에 대한 산란 신호를 경계면에 따라 적분을 수행하면 불규칙 경계면에 의한 잔향음 신호를 모의할 수 있다. 아래는 시간 영역 비간섭 잔향음 신호 $RL(t)$ 를 모의하는 식이다.

$$RL(t) = \int \sum_m \sum_n |p_m|^2 |p_n|^2 S(\theta_m, \theta_n, \phi_{mn}) dA \quad (1)$$

여기서 p_m 과 p_n 은 특정 산란 면적에 대한 고유 음선의 음압을 나타내며 $S(\theta_m, \theta_n, \phi_{mn})$ 는 산란 강도 함수로써 산란 면적에 m 경로로 입사하여 n 경로로 산란된 경우에 대한 산란 크기를 나타낸다. θ_m 과 θ_n 은 각각 산란 면적에 입사각과 산란각으로서 경계면에 대한 접지각으로 나타

낸다. 또한 ϕ_{mn} 은 입사 음선과 산란 음선 사이의 방위각이다. 특히, 본 논문에서는 음원과 수신기의 위치가 동일한 단방향 잔향음 신호를 모의하기 때문에 ϕ_{mn} 은 π 로 정의된다. 그림 1은 특정 산란 면적에 대한 고유 음선을 추적하고, 구해진 고유 음선의 정보를 산란 함수와 결합하여 그 산란 면적에 의한 산란 신호를 계산하는 과정이다. 이러한 과정을 경계면에 따라 반복적으로 수행하여 각 산란 면적에 대한 산란 신호를 구하고 이를 경계면에 대해 적분하면, 불규칙 경계면에 의한 잔향음을 계산할 수 있다.

대부분의 시간 영역 잔향음 모델이 식 (1)을 이용하여 잔향음 신호를 모의하지만, 계산 방법에 있어 각 모델에 따라 차이가 있다. 특히, 음선 이론 기반의 CASS [8] 경우 특정 시간에 영향을 주는 산란 신호를 탐색하고 이에 대한 산란면적을 계산하여 최종 잔향음을 계산한다. 반면에 본 모델에서는 특정 산란 면적에서 음파가 산란되어 여러 시간에 걸쳐 산란 신호를 형성하며 전 산란 면적에 의한 산란 신호의 합으로 최종 잔향음을 모의하였다. 이 과정에서 각 산란 면적에 대한 고유 음선을 추적하는데, 이러한 방법으로 형성된 고유 음선 구조 분석을 통해 해양 환경에 따른 잔향음 경향이나 특정 산란 면적에 대한 산란 신호 분석을 용이하게 할 수 있다. 또한 산란 면적에 따른 잔향음 신호 수렴도 고찰에도 용이하다.

본 논문에서 사용된 음선 모델은 박철수 등 [14]에 의해 개발된 모델로써 시간 영역 광대역 신호 모델링에 효율적이다. 이러한 음선 모델에 해수면/해저면에 대한 산란 모

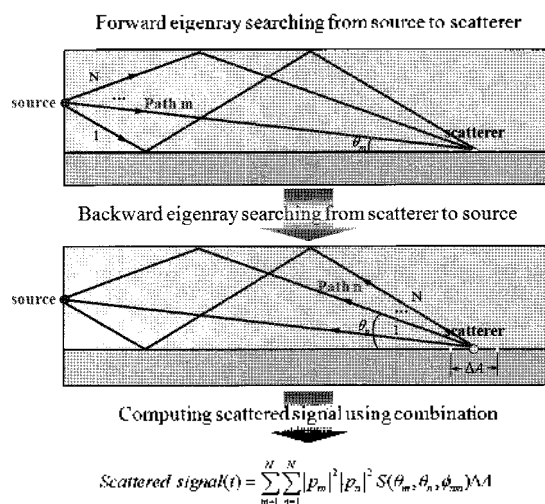


그림 1. 하나의 산란 면적에 의한 산란 신호 모의 과정 도식도
Fig. 1. Schematic diagram for the processing of scattered signal modeling by a single scattering elemental area.

벨을 결합하여 최종적인 잔향음 신호를 모의하는데 보다 정확한 잔향음 신호를 구하기 위해서는 각 산란 강도 함수의 특징을 이해하고 그 적용 영역을 잘 인지하고 있어야 한다. 아래의 2.1 절과 2.2절에서 본 논문에서 사용된 음선 모델과 산란 모델에 대한 특징을 보다 자세히 설명한다. 식 (1)에서 보는 것과 같이 잔향음 신호를 모의하기 위해서는 경계면에 따라 수치적 적분이 수행되어야 하는데 본 논문에서 잔향음 신호가 수렴하는 값을 기준으로 산란 면적을 결정하였으며 이에 대한 내용은 2.3절에서 언급한다.

2.1. 음선 이론 기반 전달 손실 모델

본 잔향음 모델에 이용된 전달 모델은 박천수 등 [14]에 의해 개발된 음선 모델을 일반적인 거리 종속 해저 지형에 적용 가능하도록 확장된 모델이며, 이 모델의 특징은 다음과 같다. 일반적인 해양 음속 구조를 선형 음속 구간으로 분리하여 각 음속 구조에 대한 음선 경로를 해석적인 식을 적용하였다. 이 식을 반복적으로 수행하여 음원에서로부터 전파되는 음선을 추적하며, 이와 같은 음선 추적 과정을 해를 찾는 수치 기반과 결합하여 수신기에 입사하는 고유 음선을 찾는다. 이는 고전 음선 이론(classical ray theory)에서 사용하는 고유 음선 탐색 알고리즘과 유사하다. 이 같은 방법으로 구해진 각 고유 음선의 음압 크기는 경계면에 의한 반사 손실의 누적과 기하학적인 확산에 의한 손실(spherical spreading loss)을 고려하여 근사하였다. 식 (2)는 각 고유 음선에 대한 음압 크기를 모의하는 식이다.

$$A_{rig} = \frac{1}{L_{tot}} \prod_{i=1}^N R_{ref}^i \tag{2}$$

여기서 A_{rig} 는 고유 음선의 음압 크기이다. L_{tot} 는 음원에서 수신기까지 음선이 진행한 거리이며, R_{ref}^i 과 N 은 각각 음선이 진행하는 동안 부딪히는 경계면에 대한 반사 계수와 부딪히는 횟수를 나타낸다. 특히, 해수면의 해상 상태가 거칠 때, R_{ref}^i 는 Kirchhoff approximation으로 유도된 간접 반사 계수를 이용하여 계산한다.

일반적으로 기하학적인 확산에 의한 손실은 음속 구조가 등속일 때 정확한 해를 주지만, 해양 환경 자체의 불확실성이 더욱 크기 때문에 일반적인 음속 구조에서도 식 (2)를 이용하여 음압 크기를 계산한다. 박천수 등 [14]은 여러 주파수 대역에서 기존 전달 손실 모델과의 비교를 통해 이 전달 손실 모델의 유효성을 검증하였다. 또한,

김경섭 등 [15]은 이 전달 손실을 역산에 활용하여 해저면의 물성치를 구하고 이를 실측 자료와 비교하여 그 값이 타당함을 확인하였는데, 이는 식 (2)를 기반으로 계산된 전달 손실이 실험 환경에서 유효함을 간접적으로 보여 준다.

잔향음 신호를 모의하기 위해서는 음원에서 각 산란 면적까지의 고유 음선을 구해야 하므로 수신기의 위치가 경계면에 위치한다고 가정한다. 본 잔향음 모델에서는 고유 음선을 산란 면적으로부터 음원까지 역으로 추적하여 고유 음선 탐색 범위를 줄일 수 있었으며 결과적으로 계산의 효율성을 높였다. 그림 2는 임의의 하향 구배 음속 구조와 거리 종속 해저면을 가지는 해양 환경에서 경계면에서 음원으로 고유 음선을 추적한 결과이다.

2.2. 산란 강도 함수

앞서 언급한 바와 같이 보다 정확한 잔향음 신호를 모의 하기 위해서는 모델에 결합된 산란 모델의 특징을 잘 이해해야 하며 음원의 주파수 영역이나 실험 환경에 맞게 산란 모델을 적용하여야 한다. 본 논문에서 개발된 잔향음 모델은 실험 기반의 해수면/해저면 산란 모델과 이론 기반의 해수면/해저면 산란 모델을 사용하였다.

실험 기반의 해수면/해저면 산란 모델은 각각 Chapman-Harris 식 [4]과 Lambert 법칙 [5]이 있다. 실험 기반의 산란 강도 함수를 이용할 경우, 산란 강도 함수 입력 변수를 결정하거나 잔향음 계산 시간을 단축시킬 수 있는 이점이 있으나 산란 혹은 잔향음 계산 결과에 대한 불리적 의미 해석의 어려움이 있으며 이론 근간의 산란 모델에 비해 정확성이 떨어지고 적용 가능한 환경에 대한 모호성이 있다. 또한 Chapman-Harris 식과 Lambert 법칙으로 후방 산란 강도(backscattering strength)를 예측하는 경우 그 크기가 고 접지각에서 실측 실험에 비해 낮은 것으로 알려져 있으며, facet term을 고려하여 이를 보완한다 [16, 17]. Ellis [6]는 실측데이터

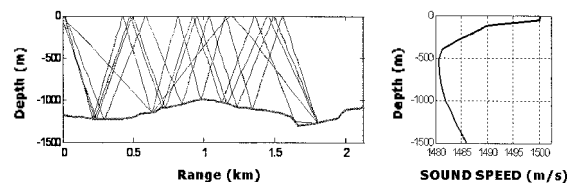


그림 2. 임의의 하향구배 거리 종속 환경에서 경계면으로부터 음원까지의 역음선 추적 결과
Fig. 2. Ray tracing result from the interface to the source for an arbitrary range-dependent environment with downward refracting sound speed profile.

와 비교하는 과정에서 이러한 facet term을 고려하여 산향음을 모의하였는데, 본 모델에서도 이 항을 추가하여 Ellis의 모의 산향음 결과와 비교하였다. 자세한 사항은 3장 산향음 결과 검증 과정에서 추가 언급한다.

이론 기반의 해수면/해저면 산란 모델은 섭동 이론, Kirchhoff 근사법, APL-UW 모델이나 SSA 모델 등이 있다. 본 모델에서 해수면/해저면 산란 강도 예측에 사용된 APL-UW 모델은 섭동 이론과 Kirchhoff 근사법을 내삽(interpolation)하여 전 각도에 대해 타당한 산란 강도를 예측한다 [1]. 한편, Voronovich [18]에 의해 처음 제안된 SSA 모델은 작은 기울기 근사법 기반으로 유도되었으며 일률적인 접근 방법으로 전 각도에 대해 유효한 것으로 알려져 있다. 이론 기반의 산란 모델을 적용하기 위해서는 해양환경의 물성치 특히, 각 매질의 음속, 밀도, 감쇠 계수와 경계면의 파워 스펙트럼 특성을 미리 알고 있어야 한다. 하지만 일반적으로 해양 환경을 구성하는 매질의 물리적 물성치를 알기 어렵다. 따라서 이론 기반의 산란 모델의 적절한 입력 변수를 결정하는데 있어 어려움이 있다. 하지만 이론 기반 산란 모델로 도출된 산란 강도 및 산향음 결과는 불리치 의미 고찰이 용이하며, 실험 기반에 비해 그 값이 정확하고 각 모델의 가정에 의해 적용 가능한 환경을 규정하는 것이 명확하다. Table 1은 각 산란 모델의 특징 및 적용 가능한 환경을 정리한 것이며, 그림3은 해수면/해저면에 대한 각 모델의 산란 강도를 나타내었다.

해상 상태가 거칠거나 체적의 불균질성에 의해 기포/체적 산란이 지배적인 경우, 이러한 산란 효과를 고려하기 위해 해수면에 대해서는 Dahl [2]이 제한하였던 식을 적용하고, 해저면에 대해서는 섭동 이론 기반으로 유도된 식 [3]을 사용하였다.

표 1을 통해 APL-UW의 적용 주파수 범위가 10~100 kHz인 고주파수 대역임을 확인할 수 있다. 그림에도 불구하고 이 모델을 중주파수 대역에 활용한 이유는 아래와 같다. 우선 APL-UW 모델이 실제적으로 적용 가능한 주

파수 범위 규정이 모호하다. 또한 최근에 중주파수 대역에서 수행된 산란 실험 결과는 APL-UW 모델이 중주파수 대역에서 유효함을 보여준다 [19]. 이는 APL-UW 모델 저주파수 대역과 고주파수 대역에서 각각 유효한 섭동 이론과 Kirchhoff 근사법을 내삽하여 산란 강도 함수를 계산하기 때문이다. 이 때 음원의 주파수는 7 kHz이며 해수면과 해저면의 매질의 물성치는 각각 공기와 진흙을 참고로 하였다.

2.3. 산란 면적

방위각 (azimuthal angle)에 대한 등방성 산향음을 모의할 때 산란 면적 dA 는 $2\pi r \Delta r$ 로 표현한다. 여기서 r 은 음원에서 산란 면적까지 수평 거리이며 Δr 는 산란 면적의 거리 증분을 나타낸다 [6]. Urick [20]은 해양 환경의 음속 구조가 등속이며 음원 편스의 첫단과 끝단의 신호가 산란체에 의해 산란되어 수신기에 동시에 입사된

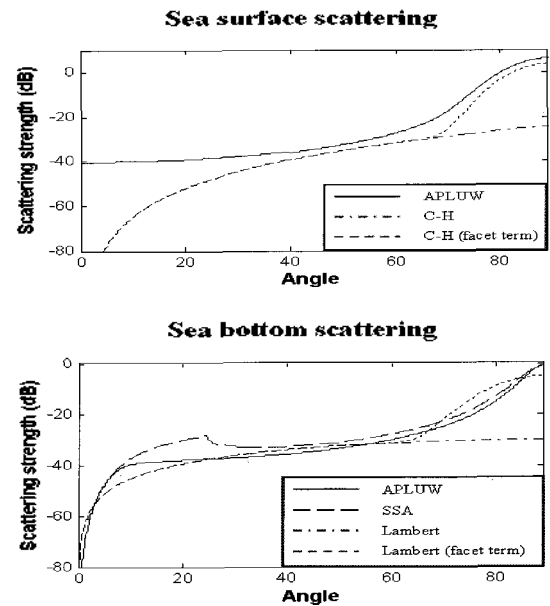


그림 3. 산란 강도 : 해수면 산란 강도(위)와 해저면 산란 강도(아래)
Fig. 3. Scattering strength: sea surface scattering strength (above) and sea bottom scattering strength (below).

표 1. 실험 및 이론 기반의 산란 모델

Table 1. Scattering models based on experimental and theoretical analysis.

	산란 모델	특징	적용 주파수	산란 메커니즘
해수면 산란 모델	Chapman-Harris 식	실험 기반	0.4 ~ 6.4 kHz	Roughness + bubble effect
	APL-UW 모델	이론 기반	10 ~ 100 kHz	Roughness
해저면 산란 모델	Lambert 법칙	실험 기반	-	Roughness + Volume inhomogeneity
	APL-UW 모델	이론 기반	10 ~ 100 kHz	Roughness
	SSA 모델	이론 기반	Dependent on power spectrum of surface	Roughness

다는 과정으로 거리 증분 Δr 이 $\frac{cT}{2}$ 에 비례하는 값으로 설정하였다 (여기서 c 는 음속이며, T 는 음원의 펄스 길이이다). 즉, 특정 시간에 관측되는 잔향음 신호를 형성한 산란 면적이 $\frac{cT}{2}$ 에 비례함을 의미한다. Chapman과 Harris는 이와 같은 백락으로 경계면으로 입사하는 음선의 접지 각이 θ 일 때 거리 증분을 $\frac{cT}{2\cos\theta}$ 로 설정하였으며, 이를 이용하여 산란 강도를 추정하였다 [4]. 하지만 음속의 구조가 등속이 아닌 실제 해양에서는 이와 같은 과정이 성립하기 어렵다. 또한, 펄스 길이가 길어질수록 위와 같이 산란 면적을 설정하고 이 산란 면적을 적분하여 잔향음을 구하는 것은, 실제 잔향음의 물리적 현상과 더 큰 차이를 가지고 올 것이라 판단된다. 따라서 본 논문에서 개발된 모델의 산란 면적은 도출된 비간섭 잔향음 신호가 수렴되는 값으로 설정되었으며, 이 때 거리 증분 Δr 은 $\frac{cT}{64}$ 이다. 그림 4는 거리 증분에 따른 산란 면적의 변화에 따라 모의된 잔향음 신호를 나타내었다.

그림 4에서 보는 바와 같이 산란 면적이 작아질수록 잔향음 신호의 변동성이 줄어들며 각 시간마다 특정 값으로 수렴되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 시간이 지날수록 잔향음 신호가 초기 시간에 비해 빨리 수렴함을 알 수 있다. 따라서 검증에 위해 잔향음 신호를 모의할 때 산란 면적을 일정 비율로 늘려 계산하였으며, 이를 통해 계산 시간을 단축시켰다.

한편, 산란 면적은 비간섭 잔향음 신호 모의뿐만 아

니라 간섭 신호 모의에 더 큰 영향을 줄 수 있는 요인이며 정확한 간섭 잔향음 신호를 모의하기 위해서는 수학적 혹은 물리적으로 타당한 산란 면적을 결정해야 한다.

III. 잔향음 모델 검증

3.1. 잔향음 검증

본 논문에서 개발된 잔향음 모의 모델 SNURM (Seoul National Univ. Reverberation Model)의 결과들을 Ellis [6]와 2006 잔향음 공동워크샵 [21]의 결과와 비교함으로써 본 모델의 타당성을 검증하였다. 중주파수 대역의 잔향음 특성을 분석하는 것이 목적인 본 모델을 저주파수 대역에서 활용되는 Ellis 논문과 비교한 이유는 다음과 같다. 앞서 언급한 바와 같이 본 모델의 적용 주파수는 사용되는 산란 강도 함수에 의존적이며 사용되는 산란 강도 함수에 따라 저주파수 대역으로 확장될 수 있다. 따라서 다른 논문에 비해 수치 실험 환경이 명확히 규정되어 있는 저주파수 대역 Ellis 모델과 비교함으로써 각 결과간의 차이점에 대한 분석을 정확히 할 수 있고 이를 통해 본 모델의 유효성에 대해 논의하였다. 나아가 2006 잔향음 공동워크샵에 실린 여러 모델 결과의 상계 (upper bound)와 하계 (lower bound) 사이에 본 모델의 결과가 위치하는지를 확인하여 다양한 주파수에서 SNURM의 활용 여부를 확인하고자 한다.

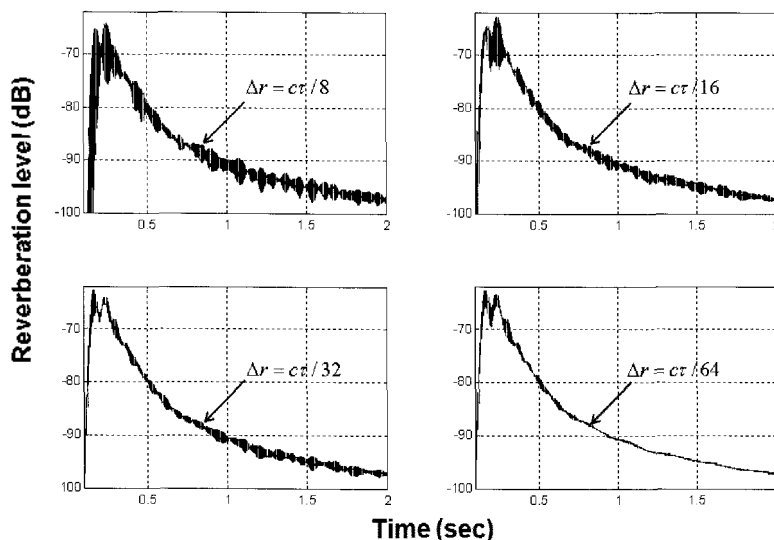


그림 4. 산란 면적의 변화에 따른 잔향음 신호 시계열 모의 결과
Fig. 4. Reverberation signal time series simulation result according to varying scattering area.

3.2. 잔향음 결과 비교 - Ellis

Ellis [6]는 정상 모드법 기반의 전파 모델과 Lambert 법칙 산란 모델을 결합하여 거리 독립적인 천해에 적용 가능한 잔향음 모델을 개발하였으며, 이를 기존의 GSM 모델과 실험 데이터와 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다. 본 절에서도 이와 같은 방법으로 본 모델의 결과를 Ellis의 결과와 비교하여 그 타당성을 검증한다. 그림 5는 모델을 실행한 수치적 실험 환경과 그 환경에서 모의한 각 모델의 잔향음 신호이다. 이 때 음원은 펄스 길이가 100ms 인 100 Hz CW 신호를 사용하였으며, 그 크기가 10dB re 1μPa이다.

등음속의 Pekeris 해양 환경에서 Ellis [6]의 결과 (N. Mode)와 100초 간의 잔향음 시계열을 비교하였을 때 차이가 최대 0.3 dB 이내임을 확인 할 수 있다. 한편, 본 모델과 GSM (Generic Sonar Model) 의 결과와의 차이는 N. Mode와 차이에 비해 크게 나타났다. 이는 본 모델과 GSM 모델이 해저면 반사를 처리하는 방법의 차이에서 기인한다 (본 모델은 해저면에 입사하는 음선의 반사 계수를 직접 계산하고 GSM 모델은 1도 간격으로 입력 받은 반사 계수를 보간하여 해저면 반사 손실을 추정한다). 음선이 진행함에 따라 이러한 손실 차이가 누적되어 100 초에서 최대 2 dB 차이가 발생한다.

다음은 해양의 음속 구조가 하향굴절일 때 Ellis [6]가 예측한 잔향음 모의 신호와 비교하였다. 그림 6은 일반적

인 음속 구조를 가진 환경에서 본 모델과 Ellis 모델이 계산한 해수면/해저면 잔향음 결과이다. 음원은 펄스 길이가 500 ms인 630 Hz CW 신호를 사용하였으며 크기는 200dB re 1μPa이다. Ellis 는 Lambert 법칙에 facet term이 결합된 형태의 산란 모델을 사용하여 해수면/해저면 잔향음 신호를 모의하였는데, 본 모델에서도 이와 동일한 형태의 해수면/해저면 산란 강도 함수를 사용하여 잔향음을 계산하였다.

해수면에 의한 잔향음 모의 결과는 일치하나 해저면에 의한 잔향음 결과는 최대 3dB의 차이가 발생한다. 이러한 차이의 발생 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다. 첫째, 본 모델과 Ellis 잔향음 모델은 전달 손실을 계산하기 위해 각각 음선 이론과 정상모드법을 사용하였으며 이로 인한 매질내의 전달 손실에서 약간의 차이가 발생한다. 제일 큰 전달손실의 차이는 경계면에 의한 반사 손실을 계산하는 방법이 본 모델은 평면파의 이론 반사계수를 사용한 반면 Ellis의 방법은 정상모드법을 사용함으로써 모델간의 전달 손실 차이가 발생하며, 결과적으로 잔향음 예측 결과에도 영향을 미친다. 둘째, 경계면을 따라 적분하여 전체 시간에 대한 잔향음을 구함에 있어 Ellis 는 모드에 따라 일정하지 않은 미소 산란 면적을 사용한다. 이는 정상모드법 기반의 잔향음에서 이동시간 (travel time)과 산란면적을 바로 구하기 어렵기 때문이다. 반면에 본 모델은 일정한 미소 산란 면적을 사용하는

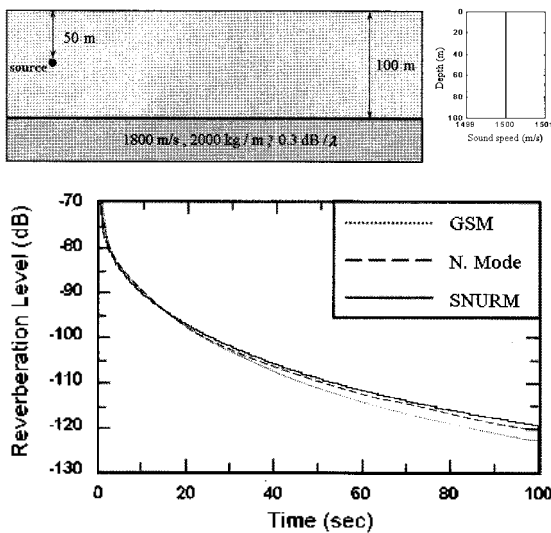


그림 5. Pekeris 실험 환경에서의 잔향음 신호 : 모의 실험 환경 (위)과 잔향음 신호 비교(아래)
 Fig. 5. Reverberation signal in a Pekeris waveguide: Numerical experimental environment (above) and comparison results for the reverberation signal (below).

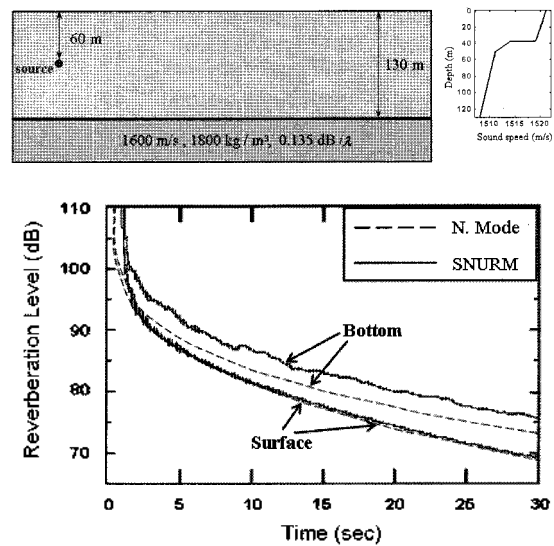


그림 6. 하향구배 환경에서의 잔향음 신호 모의 : 모의 실험 환경 (위)과 잔향음 신호 성분 비교(아래)
 Fig. 6. Reverberation signal simulation for downward refracting environment: Numerical experimental environment (above) and comparison of reverberation signal components (below).

데, 이러한 차이가 두 잔향음 모델의 결과 차이에 큰 영향을 주는 요인이 된다. 마지막으로 본 모델은 기하학적인 확산에 의한 손실을 기반으로 전달 손실 계산하였는데 이러한 방법은 음속이 등속이 아닌 경우 정확한 전달 손실과 오차가 발생한다. 이 같은 요인이 복합적으로 작용하여 Ellis의 결과와 차이를 가져오나 실 해양 환경의 불확실성에 의한 오차를 고려하였을 때 본 모델을 이용하여 잔향음을 예측하고 분석하는 것이 의미 있다고 생각한다.

3.2. 잔향음 결과 비교 - 2006 Workshop

잔향음 모델링에 대한 관심이 증가함에 따라 잔향음 공동워크샵 [21]이 2006년도에 개최되었다. 워크샵에서 기존에 개발된 잔향음 알고리즘 개념을 정리하였고 잔향음 모델의 한계점을 구명하였으며 이를 보완하기 위한 사항에 대해 논의하였다. 각 잔향음 모델의 적용 가능성이나 타당성을 검증하기 위해서 각기 다른 특징의 20가지 환경에 대한 잔향음 모의를 제안하였다. 본 논문에서는 이 중 거리 독립 환경에서 잔향음 신호를 모의하는 문제 12, 13에 대한 결과를 제시하고 이를 기존 잔향음 모델과 비교하였다. 그림 7은 모의 실험 환경을 나타내었으며 사용된 음원은 3 dB 밴드폭이 주파수/20 인 가우시안 음원으로 250, 1000, 3500 Hz의 세 개의 주파수를 사용하였다. 그림 8, 9, 10 은 각 주파수에 따른 잔향음 모의 결과 비교다.

그림 8, 9, 10 에서와 보는 바와 같이 본 논문에서 개발된 잔향음 모델의 결과값이 기존의 모델 사이에 존재함을 확인할 수 있다. 또한 위 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이, 모든 잔향음 모델이 여름철 음속 구조를 가지는 환경에서 시간에 따라 잔향음이 빨리 감소한다. 이는 여름

3D monostatic reverberation

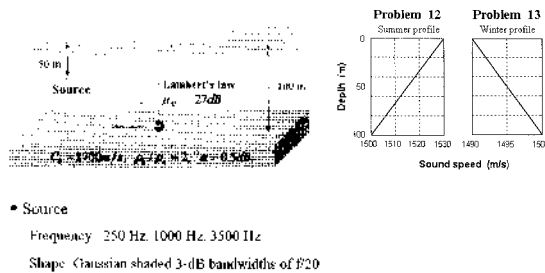


그림 7. 2006년 잔향음 워크샵 모의환경 : 여름 음속 구조(문제 12)와 겨울 음속 구조(문제 13)

Fig. 7. Numerical experimental environment [2006 reverberation workshop]: summer sound speed profile (Problem 12) and winter sound speed profile (Problem 13).

철에는 해수면에서 음속이 높아서 음선이 하향굴절하며 진행하게 되며, 이로 인해 해저면 손실이 겨울철보다 많이 일어나기 때문이다. 한편, 본 논문에서 모의한 잔향음 신호는 초기 시간에서 Harrison [13]이 모의한 신호와 달리 굴곡을 가진다. 이는 Harrison은 mode-stripping 법 기반의 해석해를 이용하는 반면 본 모델에서는 여러 경로로 들어오는 산란 신호를 시간 영역에서 직접 계산하기 때문이다.

앞서 언급한 바와 같이, 본 절에서 모의된 잔향음 크기나 시간에 따른 잔향음 감소 경향을 기존 결과와 비교하면, 본 논문에서 개발된 잔향음 모델이 임의의 해양 환경에 적용 가능함을 알 수 있다.

IV. 한국 근해 실측 데이터와 잔향음 모의 결과 비교

본 장에서는 앞서 검증된 잔향음 모델을 이용하여 남해, 동해 해양 환경에 대한 잔향음을 모의하고 이를 실측

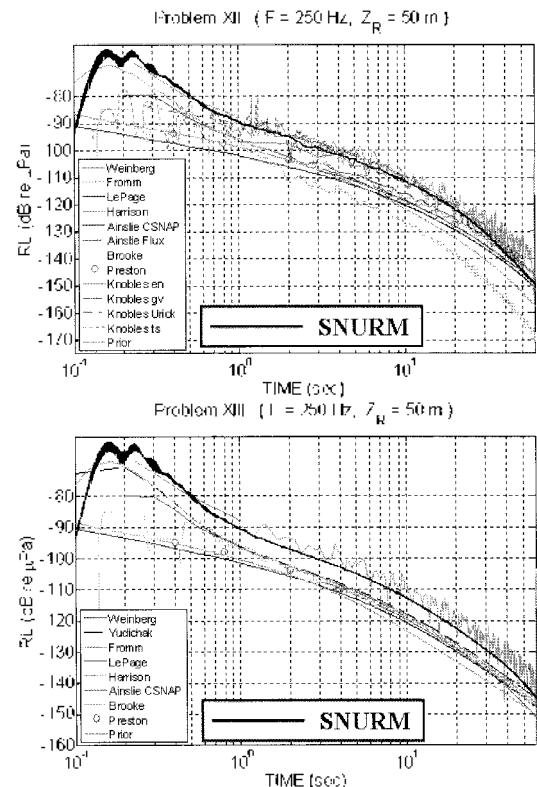


그림 8. 잔향음 모의 신호 비교 (250 Hz) : 여름 음속 구조(위)와 겨울 음속 구조(아래)

Fig. 8. Comparison between simulated reverberation signals (250 Hz): summer sound speed profile (above) and winter sound speed profile (below).

데이터와 비교하여 각 해역의 잔향음 신호 경향을 분석한다. 비간섭 잔향음 모의 결과와의 시간 영역에서 직접 비교를 위해 동일 관측 지점에 반복적으로 수신된 음압을 에너지 평균 개념을 이용하여 처리하였다.

한편, 남해와 동해에서 관측되는 잔향음 신호는 각 해역의 수심이나 산란 강도 함수의 특성에 따라 상호 다른 경향을 가진다. 남해, 동해에 대해 잔향음 신호를 모의하고 실측 데이터와 비교, 분석하는 과정과 각 해역의 잔향음 특징은 4.2절과 4.3절에서 각각 언급한다.

4.1. 시간 영역 실측 비간섭 잔향음 신호

남해/동해에서 측정된 잔향음 신호는 기포 혹은 경계면의 거칠기에 의해 산란되어 수신기에 음압 단위로 기록된다. 각 산란 신호의 불규칙한 위상에 의해 잔향음 신호는 시공간적인 변동성을 보인다. 본 절에서는 불규칙한 잔향음 신호의 에너지 평균을 이용하여 잔향음 신호에 존재하는 산란 신호 상호간의 간섭 효과를 제거한 후 각 해역의 비간섭 잔향음을 구한다. 그리고 실측 비간섭 잔향음 순위와 모델로부터 도출된 비간섭 잔향음 순위를 시간

영역에서 비교하여 각 해역의 잔향음 특성을 분석한다.

앞서 언급한 바와 같이, 거친 경계면이나 산란체에 의해 불규칙한 위상을 가지고 수신된 신호는 $P_{total} = \langle P_{total} \rangle + P_{scat}$ 와 같이 표현될 수 있다 (여기서 P_{total} , $\langle P_{total} \rangle$ 는 전체 수신 음압과 평균 음압이며, P_{scat} 는 산란 음압을 의미한다). 특히, 비간섭 잔향음에 연관되는 영역은 $\langle |P_{scat}|^2 \rangle = \langle |P_{total}|^2 \rangle - \langle |P_{total}| \rangle^2$ 로 표현할 수 있는데, 음원과 수신기 위치가 동일한 단상 잔향음인 경우 평균 음압은 0에 가까우므로 $\langle |P_{scat}|^2 \rangle \approx \langle |P_{total}|^2 \rangle$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 비간섭 잔향음 순위는 다음과 같은 과정으로 구하였다. 비슷한 시간대 15 번 반복 측정된 실측 신호에서 음원 주파수 대역을 제외한 소음을 필터 (filter)를 이용하여 제거한 후, 이를 자승을 취한 후 0.02초간 이동 평균하였다. 이러한 방법을 통해 각 ping에 대한 실측 데이터의 중요한 패턴을 구할 수 있는데, 이를 평균하여 비간섭 잔향음을 구하고 모델로부터 계산된 잔향음과 비교하였다.

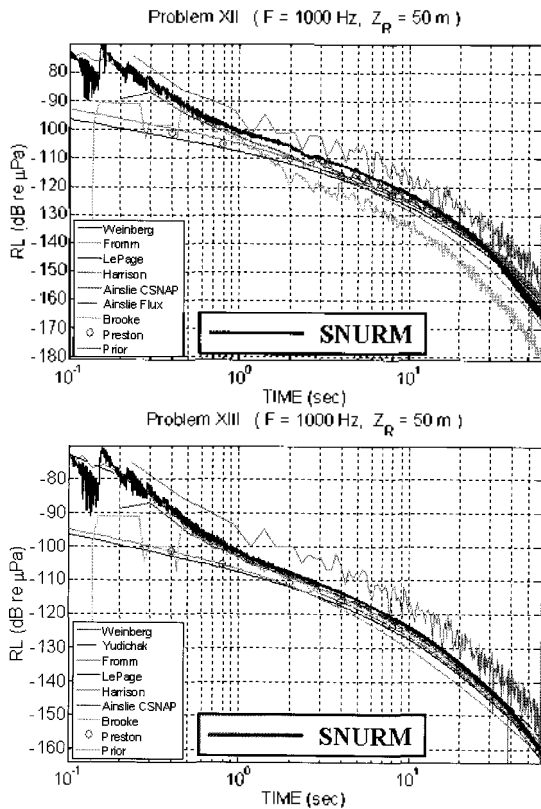


그림 9. 잔향음 모의 신호 비교 (1000 Hz) : 여름 음속 구조(위)와 겨울 음속 구조(아래)
 Fig. 9. Comparison between simulated reverberation signals (1000 Hz): summer sound speed profile (above) and winter sound speed profile (below).

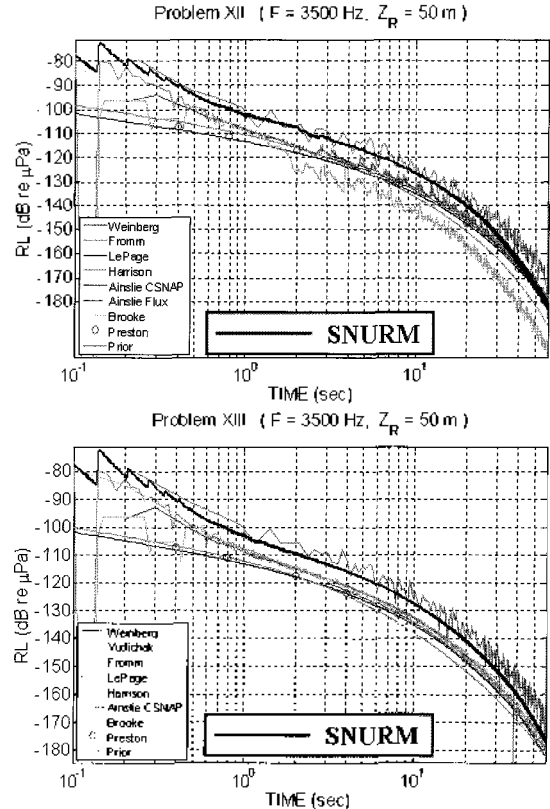


그림 10. 잔향음 모의 신호 비교 (3500 Hz) : 여름 음속 구조(위)와 겨울 음속 구조(아래)
 Fig. 10. Comparison between simulated reverberation signals (3500 Hz): summer sound speed profile (above) and winter sound speed profile (below).

4.2. 비간섭 잔향음 실측 데이터와 잔향음 모의 신호 비교 남해

4.2.1. 실험환경

남해 잔향음 신호는 2007년 8월에 국방과학연구소가 수행한 '장애물 탐지 기법 개발에 관련된 실험'에서 측정되었다. 이 실험의 목적은 해상에 표적이 있을 때 다양한 음원에 대한 표적 신호가 주위 소음 등과 구분되는지를 판단하고, 이를 통해 표적 신호 구분이 용이한 음원을 찾는 것이다. 특히, 표적 신호 특성이 나타나지 않을 때의 수신 신호를 잔향음 신호로 간주하고 이를 분석한 후 모델 결과와 비교하였다. 이 때 해양 환경의 수층 유속 구조는 어업에 빈번히 나타나는 하향 난질형 구조며, 측정 지역의 수심은 약 20 m로 거리에 대해 그 값이 거의 일정하다. 앞서 언급한 바와 같이 음원에 따른 표적 신호 구분이 목적이기 때문에, 해지면 잔향음 신호를 모의에 있어 중요한 음속, 밀도 등과 같은 해지면의 물성치나 해지면의 거친기를 나타내는 파워스펙트럼을 관측되지 않았다. 따라서 남해 잔향음을 모의하기 위해 실험 지역의 해지면 물성치를 기존 자료 [22]을 통해 찾고 이를 기준으로 실험 지역의 해지면 매질 특성인 잔향의 물성치를 갖는 범위에서 음속, 밀도 등 변동하며 해지면 잔향음 신호를 모의하였고, 그 결과를 실측 데이터와 비교하였다. 표 2는 해지면 모의 잔향음을 계산하기 위해 참고한 한국 해역의 해지면 물성치이다. 해지면 잔향음 신호를 모의하기 위해서는 해지면의 거친기 또한 중요한 요인인데 이는 APL-UW handbook [23]를 참고하여 결정하였다.

실험 당시 평균 풍속이 2.2 m/s 이며, 이에 따른 평균 파고는 0.4 m이다. 이러한 환경에서 잔향음 측정 실험이 수행되었으며, 부지향성 음원 (omni-directional source)

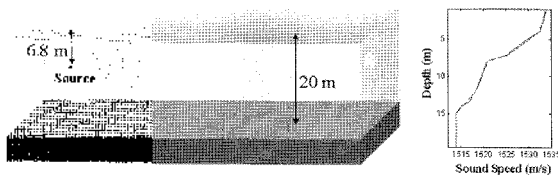


그림 11. 모의 실험 환경 (남해)
Fig. 11. Numerical experimental environment (South Sea).

표 2. 한국 근해 해지면 물성치 : 서해, 남해, 동해[22]

Table 2. Seabed physical characteristics of Korea coastal waters: Yellow Sea, South Sea, and East Sea [22].

Regions	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Mean size (ϕ)	Wet bulk density(g/cm ³)	Velocity (m/s)
Yellow Sea	11.1	61.6	27.3	6.28	1.67	1592
South Sea	0.2	53.9	45.8	7.91	1.50	1542
East Sea	11.9	43.3	44.8	7.20	1.47	1585

이 사용되었다. 이 때 음원의 깊이는 약 6.8m 이며 음원은 그 준위가 205dB re 1 μ Pa 인 CW (continuous wave) 신호와 LFM (linear frequency modulated) 신호이다.

수신된 잔향음 신호는 10개의 채널을 갖는 수직선배열 (VLA)에서 기록되는데, 본 전에서는 음원과 위치가 근접한 채널에 수신된 잔향음을 이용 함으로서 음원과 수신기 과 동일한 단방향 잔향음 신호라 간주하고 이를 잔향음 신호 모의 모델 결과와 비교하였다. 이 때 수신기의 RVS 는 123dB re 1V/ μ Pa이다. 그림 11은 이 해역의 특성을 반영한 모의 실험 환경이다.

4.2.2. 실측 잔향음과 모의 비간섭 잔향음 신호 비교 - 남해

본 전에서는 앞서 검증된 잔향음 모델을 이용하여 각각 50ms 펄스 길이를 갖는 6 kHz 대역 CW와 LFM 음원에 대한 남해 해수면/해저면 잔향음을 모의하였다. 해수면 잔향음 신호는 Chapman-Harris 식을 이용하여 모의하였고, 해저면 잔향음 신호는 Lambert 법칙과 같은 실험 식 기반 산란 모델과 APL-UW 모델과 같은 이론 기반 산란 모델을 이용하여 각각 모의하였다. 그림 12와 13은 음원이 각각 CW 신호, LFM 신호 일 때 모의한 해수면/해

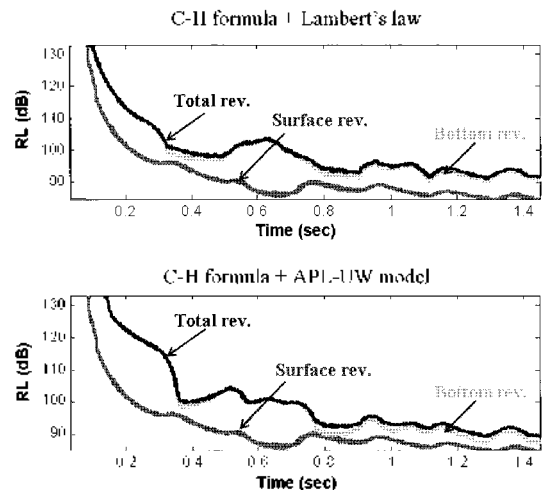


그림 12. 모의 비간섭 잔향음 준위(CW 음원): Lambert 법칙(위)과 APL-UW 모델(아래)

Fig. 12. Modeled incoherent reverberation level (CW source): Lambert's law (above) and APL-UW model (below).

저면 잔향음 신호이다.

남해에서 실측된 잔향음 신호는 천해 환경에서 실측되었기 때문에 해수면과 해저면에 의한 산란 신호 영향을 동시에 받지만, 잔잔한 해상 상태와 하향 굴절형 음속 구조로 인해 해저면에 의한 산란 신호가 지배적임을 예상할 수 있다. 그림 12와 13의 모의된 잔향음 신호를 통해 이와 같은 사실을 확인할 수 있다.

실험/이론 기반의 해수면, 해저면 산란 강도 함수로 모의된 잔향음을 실측 비간섭 잔향음 신호와 시간 영역에서 직접 비교, 분석하였다. 그림 14과 15는 음원이 각각 CW 신호와 LFM 신호 일 때 모의된 잔향음 신호를 실측 데이터와 비교한 결과이다.

우선, 두 음원에 대해 모의된 잔향음 신호를 상호 비교하면 각 잔향음의 수렴 정도에서 차이가 있으나 그 준위와 경향에 있어서 상호 유사함을 확인할 수 있다. 이는 음원의 특성에 의존하는 산란 신호간의 간섭 효과를 배제하여 계산한 비간섭 잔향음 준위이기 때문이다. 한편, 두 음원에 대한 실측 잔향음을 비교하면 모의 잔향음 결과에서와 같이 각 잔향음 준위가 유사함을 확인. 그림 14와 15를 통해 확인할 수 있다. 하지만 각 음원에 대한 0.5초 이전의 초기 잔향음 경향은 LFM 음원에 대한 잔향음이 CW 음원에 대한 잔향음에 비해 완만하게 감소한다. 이는 LFM 신호와 같이 서로 다른 파장을 갖는 신호의 상쇄 간섭 효과가 단일 주파수를 가지는 CW 신호에 비해 더 작기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 모의된 신호와 실측 신호를 비교해 보면 초기

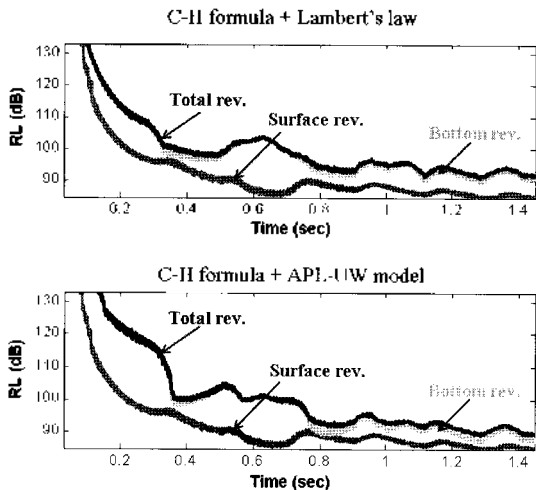


그림 13. 모의 비간섭 잔향음 준위(LFM 음원): Lambert 법칙(위)과 APL-UW 모델(아래)
 Fig. 13. Modeled incoherent reverberation level (LFM source): Lambert's law (above) and APL-UW model (below).

0.4 초 동안의 잔향음 신호를 제외하고 두 해저면 산란 모델 모두 그 경향과 크기가 비슷함을 그림 14과 15를 통해 알 수 있다. 특히, APL-UW 모델을 이용하여 모의한 비간섭 잔향음이 관측 시간 1.5초 동안 실측 데이터와 그 경향과 준위에 있어 유사함을 확인할 수 있다. 이는 Lambert법칙은 실험을 기반으로 하나의 계수로 산란 크기와 경향을 결정하지만 이론 기반의 APL-UW 모델은 해저면의 음속, 감쇠 계수와 물리적 특성과 지형학적인 영향을 고려하여 산란 강도를 계산하기 때문이다.

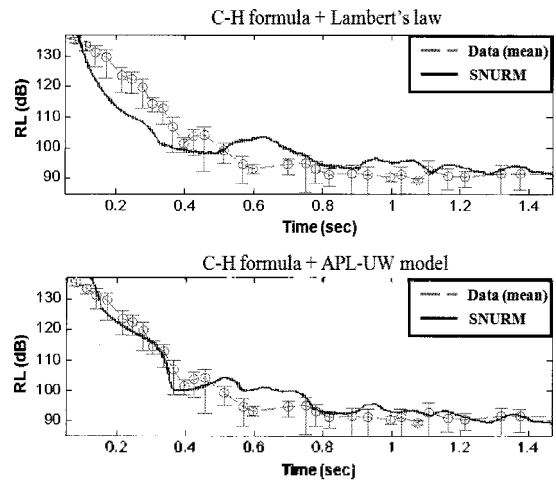


그림 14. 모의 비간섭 잔향음 준위 vs. 실측 데이터(CW 음원): Lambert 법칙(위)과 APL-UW 모델(아래)
 Fig. 14. Modeled incoherent reverberation level vs. experimental data (CW source): Lambert's law (above) and APL-UW model (below).

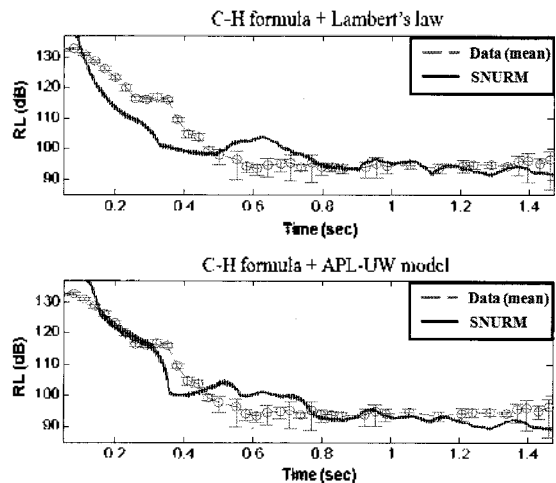


그림 15. 모의 비간섭 잔향음 준위 vs. 실측 데이터(LFM 음원): Lambert 법칙(위)과 APL-UW 모델(아래)
 Fig. 15. Modeled incoherent reverberation level vs. experimental data (LFM source): Lambert's law (above) and APL-UW model (below).

4.3. 비간섭 잔향음 실측 데이터와 잔향음 모의 신호 비교 - 동해

4.3.1. 실험환경

동해 잔향음 신호는 2007년 12월에 국방과학연구소가 수행한 '표적 반사 신호 측정'에 관련된 실험에서 측정되었다. 이 때 해양 환경의 수층 음속은 해수면에서 수온 약층 상단부까지의 음속 변동량이 거의 없으며, 수온 약층에서 급격한 음속 변동이 발생한 후, 해저면까지 상향 굴절형 구조를 나타낸다. 측정 지역의 수심은 약 1500 m 이며, 거리에 대해 그 값이 거의 일정하다. 또한 해저면 성분의 대부분은 진흙 (silty clay)으로 구성되어 있다. 남해에서 수행된 실험과 같이 실험 지점의 해저면 물성치를 측정하지 못하였으므로 남해 해저면 물성치를 결정했던 방법과 동일하게 동해 해저면의 물성치를 결정하였다. 실험 당시의 풍속은 3.7~6.7 m/s 이며, 해상 상태는 1~3이었다. 무지향성의 205dBre 1μPa 준위를 갖는 음원이 깊이 약 30 m에 위치하였으며, 음원으로 CW 신호와 LFM 신호가 사용되었다. 수신기는 남해 해상 실험과 같이 10개의 채널을 갖는 VLA를 사용하였으며 음원과 근접한 채널에 수신된 잔향음을 이용하였으므로 음원과 수신기가 동일한 단방향 잔향음 신호라 간주하였다. 이 때 수신기의 RVSS는 123dBre 1V/μPa이다. 그림 16은 실험 해역의 특성을 반영한 모의 실험 환경이다.

4.3.2. 실측 잔향음과 모의 비간섭 잔향음 신호 비교 동해

본 절에서는 음원이 50 ms 펄스 길이를 갖는 5 kHz 대역의 CW와 LFM 신호일 때 모의된 잔향음 신호와 실측 잔향음 신호를 비교, 분석하며 이를 통해 각 시간에 지배적인 산란 메커니즘을 확인한다.

남해와 같은 천해 환경과 달리 동해와 같이 심해 환경에서 음원이 해수면에 근접하게 위치한 경우, 해수면과 해저면 산란 신호가 분리되는 구간이 발생한다. 특히, 초기 2초간 동해 잔향음 신호는 해수면에 의한 산란 신호임을 예상할 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 음원의 위치가 해수면에 근접하며 실험 당시 해상 상태가 1~3으

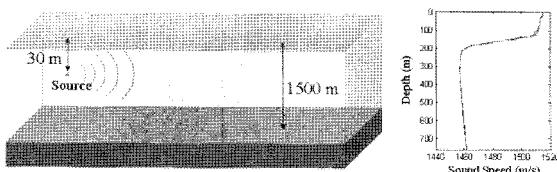


그림 16. 모의 실험 환경 (동해)
Fig. 16. Numerical experimental environment (East Sea).

로 남해 해상 실험에 비해 해수면이 변동성이 심하고 더 거칠기 때문이다. 본 절에서는 2초간의 잔향음 신호를 모델을 통해 모의한 후 실측 데이터와 비교하여 남해상에 비해 상대적으로 거친 해상에서의 잔향음 신호 특징을 분석한다.

그림 17은 실험 시 관측된 풍속 자료와 Chapman-Harris 식을 이용하여 모의한 해수면 비간섭 잔향음 준위와 실측 데이터를 비교한 결과이다. 이 때, 음원은 5kHz 대역 50ms CW 신호이다. 그림 17에서 보는 것과 같이 모의된 잔향음 신호가 실측된 잔향음 신호에 비해 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 모의된 해수면 잔향음 신호 경향은 Chapman-Harris식의 후방 산란 강도와 밀접한 연관이 있는데, Chapman-Harris식의 저점지각 후방 산란 강도가 실제 산란보다 낮게 예측하기 때문이다.

Dahl [2]은 30도 이하의 낮은 점지각과 3m/s 이상의 풍속에서 기포에 의한 산란이 전체 산란에 큰 영향을 미친다고 주장하였다. 따라서 Dahl [2]이 제안했던 기포 산란을 Chapman-Harris 식과 결합하여, 저점지각에서 낮은 산란 강도를 보완하였다. 이와 같은 방법을 통해 실험 당시 동해 해상 상태에 근접한 해수면 산란 강도를 예측하였다. 또한 기포에 의한 음속 변동 [24]과 해수면과 음원 사이의 시간 지연을 고려하여 최종적인 해수면 비간섭 잔향음 준위를 보의하였다. 그림 18은 앞과 같은 과정으로 보의한 해수면 잔향음 신호이다.

실험에 사용된 5kHz 대역의 CW 음원과 LFM 음원에 대해 모의한 비간섭 잔향음 신호와 실측 잔향음 신호의 경향과 크기가 상호 유사함을 그림 18을 통해서 확인할 수 있다. 특히, 초기 관측 시간 2초 동안에 CW 음원에 대한 모의 해수면 잔향음 준위는 평균 실측 잔향음 데이터의 이내에 존재한다.

한편, 그림 19는 4초간의 전체 잔향음 신호와 모의 비간섭 잔향음 신호를 비교한 결과이다. 해저면 잔향음 신호는 Lambert 법칙을 이용하여 계산하였다. 그림 19의

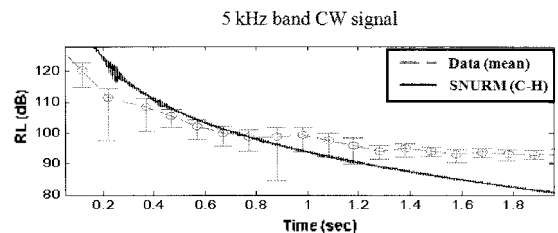


그림 17. 동해 모의 해수면 비간섭 잔향음 준위(CW 음원): Chapman-Harris 식
Fig. 17. Sea surface incoherent reverberation level for East Sea(CW source): Chapman-Harris formula.

두 음원에 대한 실측 데이터를 보면 잔향음 감소 경향이 천해에서 측정된 남해 잔향음 신호와 다르게 나타남을 알 수 있다. 이는 다음과 같이 설명될 수 있다. 그림 14, 15에 나타난 남해의 비간섭 잔향음 신호의 경우 backscattering path 이외의 hybrid path에 의한 산란 신호로 인해 잔향음 신호가 부분적으로 굴곡이 있다. 반면, 동해 초기 2초간의 잔향음은 해수면까지의 backscattering path에 의한 산란 신호만 존재하므로 남해 잔향음 신호에 비해 단조롭고 일정하게 감소하는 경향을 나타낸다 (여기서 backscattering path와 hybrid path는 각각 특정 산란 면적에 대한 입사 경로와 산란 경로가 동일한 음선과 상호 다른 음선을 의미한다). 2초 직후, 해저면의 산란

신호로 인해 그 이전의 잔향음 준위보다 높게 나타난다. 이로 인해 동해 잔향음이 남해 잔향음에 비해 다양한 경향을 보인다. 이 같은 특성을 갖는 동해 잔향음 신호는 본 잔향음 모델을 통해 그림 19와 같이 모의될 수 있다. 모의된 잔향음 신호는 실측 잔향음 신호에서 관측된 바와 같이 초기에는 해수면 산란 신호로 인해 단조롭게 감소하며, 2초 직후에 수신 되는 해저면 산란 신호에 의해 감소하는 잔향음 신호가 그 이전에 비해 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 잔향음 모델로 도출된 잔향음 신호와 실측 잔향음 데이터의 경향과 크기를 비교, 분석할 수 있는데 이러한 과정에서 각 시간대에 기여하는 산란 신호를 구분할 수 있고, 나아가 실험 시 전체 잔향음에 기여한 각 산란체의 산란 강도 특징을 예측할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 음선 이론을 이론 혹은 실험 기반으로 유도된 산란 모델과 결합하여 잔향음 모델을 개발하였다. 본 잔향음 모델은 거리 종속 환경에 적용 가능하며 사용하는 산란 모델에 따라 적용할 수 있는 주파수가 제한된다. 본 논문에서는 이러한 방법으로 개발된 잔향음 모델을 검증하기 위해서 Ellis [6]와 2006 잔향음워크샵 [21]에 발표된 기존의 잔향음 모의 결과와 비교하였다. 이러한 비교를 통해서 여러 음속 구조를 가지는 해양 환경에서 본 모델 결과의 타당성을 확인하였다.

모델간의 비교를 통해 검증된 잔향음 모델을 이용하여 한국 근해 환경에서의 비간섭 잔향음 준위를 계산하고 이를 실측 데이터와 비교하였다. 시간 영역에서 음압 단위로 기록된 잔향음 신호를 모델 결과와 비교하기 위해 동일 지점에서 반복적으로 관측된 데이터를 에너지 평균하여 각 해역의 비간섭 잔향음 준위를 계산하였다. 앞서 언급한 바와 같이 실측 데이터와 모의 잔향음 신호를 시간 영역에서 비교함으로써 각 시간 별 기여하는 산란 메커니즘을 구분하고, 이를 통해 실험 해역의 경계면 혹은 산란체에 대한 산란 강도 경향을 추정할 수 있다.

한국 근해의 잔향음 신호는 각 해역의 해저 지형이나 측정 당시의 해상 상태에 따라 그 특징이 달라진다. 대륙붕이 넓게 발달된 남해의 경우 천해 환경이기 때문에 해수면과 해저면에 의한 산란 신호가 동시에 수신기에 입사되어 각 시간 별로 지배적인 산란 메커니즘 구분이 어렵다. 따라서 관측된 실측 데이터를 실험 해양 환경으로 도

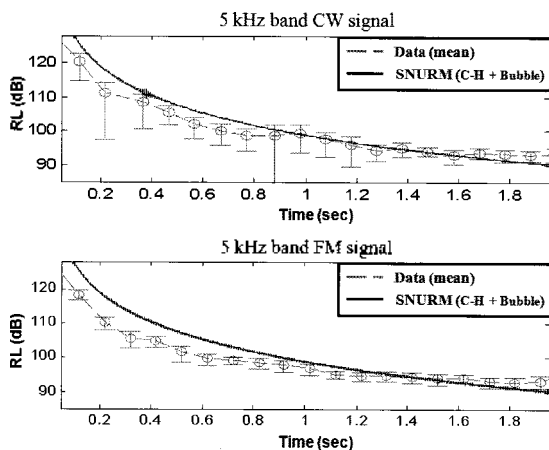


그림 18. 동해 모의 해수면 비간섭 잔향음 준위(CW 음원(위)과 LFM 음원(아래)): Chapman-Harris 식+ 기포 산란
 Fig. 18. Sea surface incoherent reverberation level for East Sea (CW source (above) and LFM source (below)): Chapman-Harris formula + bubble scattering.

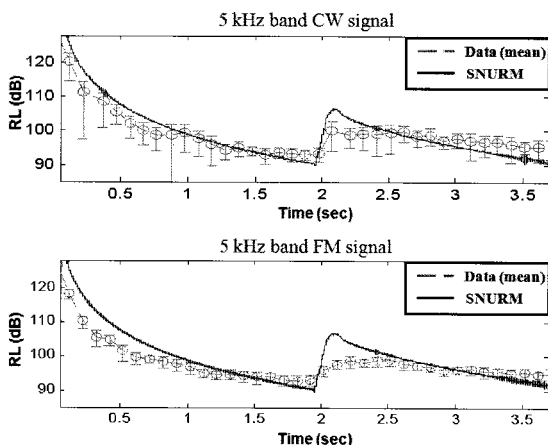


그림 19. 동해 모의 해수면/해저면 비간섭 잔향음 준위: CW 음원(위)과 LFM 음원(아래)
 Fig. 19. Sea surface/bottom incoherent reverberation level for East Sea: CW source (above) and LFM source (below).

출된 모의 잔향음 신호와의 비교를 통해 관측 시간에 따른 산란 신호를 구분할 수 있으며, 해저면 불성지의 변화나 해상 상태 변화에 따른 잔향음 신호를 분석할 수 있다. 한편, 동해는 대륙 사면 이후 심해 환경을 가지며 이로 인해 음원의 위치에 따른 해수면/해저면 산란 신호 구분이 용이하다. 특히, 음원의 위치가 해수면에 근접할 때 해수면 산란 신호를 구분할 수 있고, 관측된 잔향음 신호와 모의 잔향음 신호 비교를 통해 해상 상태에 따른 산란 메커니즘을 추정할 수 있다.

본 논문에서 모델의 결과와 실측 데이터를 비교하는 과정에서 불규칙적인 위상을 가지는 산란 신호간의 간섭 효과를 배제하였다. 하지만 심해양 실험에서 잔향음 신호의 간섭 현상이 관측됨에 따라 각 산란체에 의한 신호들의 간섭 효과에 대한 관심이 증대되었고, 이로 인해 간섭 잔향음 신호 보정이 필요하다. 간섭 잔향음 신호를 모의하기 위해서는 분리적, 수학적 의미가 있는 산란 변적을 유도해야 한다.

한편, 한국 해역에 타당한 중주파수 대역 잔향음 신호를 모의하고 분석하기 위해서 각 해역의 해수면, 해저면 특징이나 체적, 어군 분포 등을 반영하는 중주파수 대역 산란 모델 개발이 필요하다. 이러한 부분을 보완하면 한국 해역에 적합한 잔향음 모델을 개발할 수 있으며, 이를 이용하여 표적 신호와 잔향음 신호를 더 용이하게 구별할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 연구 지원에 의해 수행되었습니다. 본 논문에 사용된 실험데이터를 제공해 주신 국방과학연구소의 실험 관계자 여러분에게 심심한 감사의 말씀을 드립니다.

참고 문헌

1. D. R. Jackson and M. D. Richardson, *High-frequency seafloor acoustic*, Springer, New York, 2007.
2. P. H. Dahl, "The contribution of bubbles to high-frequency sea surface backscatter: A 24-h time series of field measurements," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 113, no. 2, pp. 769-780, 2003.
3. A. Ishimaru, *Wave propagation and scattering in random media, Volume 1, Single Scattering and Transport Theory*, Academic, New York, 1978.
4. R. P. Chapman and J. H. Harris, "Surface backscattering strengths measured with explosive sound sources," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 34, no. 10, pp. 1592-1597, 1962.
5. K. V. Mackenzie, "Bottom reverberation for 530- and 1030-cps sound in deep water," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 33, no. 11, pp. 1498-1504, 1961.
6. D. D. Ellis, "A shallow-water normal-mode reverberation model," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 97, no. 5, pp. 2804-2814, 1995.
7. F. Desharnais and D. D. Ellis, "Data-model comparisons of reverberation at three shallow-water sites," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 22, no. 2, pp. 309-315, 1997.
8. R. E. Keenan, "An introduction to GRAB eigenrays and CASS reverberation and signal excess," in *Proc. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference*, pp. 1065-1070, Sep. 2000.
9. H. Weinberg and R. E. Keenan, "Gaussian ray bundles for modeling high-frequency propagation loss under shallow-water conditions," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 100, no. 3, pp. 1421-1431, 1996.
10. H. Weinberg, "CASS roots," in *Proc. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference*, pp. 1071-1076, Sep. 2000.
11. 오택환, 라형술, 나정열, 박치형, "중주파수 양상대 잔향음 모델," *한국음향학회지*, 25권, 8호, 389-394쪽, 2006.
12. 하홍훈, "경계면 평면화 기법을 이용한 해수면 산란해석을 위한 시간영역 유사스펙트럼 모델링," *공학박사학위논문*, 서울대학교, 2009.
13. C. H. Harrison, "Closed-form expressions for ocean reverberation and signal excess with mode stripping and Lambert's law," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 114, no. 5, pp. 2744-2756, 2003.
14. 박철수, 조용진, 안중우, 성우제, "천해 음파전달 모의에 적합한 음선기반 광대역 신호 모델링 기법에 관한 연구," *한국음향학회지*, 25권, 6호, 298-304쪽, 2006.
15. 김경섭, 성우제, 박철수, 김성일, "전구음원 신호를 이용한 시간영역 지음향학적 인자 역산," *한국음향학회지*, 24권, 6호, 334-342쪽, 2005.
16. Z. Y. Zhang, "A simple function for modeling three-dimensional scattering strength from the ocean surface," *Acoustics Australia*, vol. 33, no. 2, pp. 47-50, 2005.
17. D. D. Ellis, "Bistatic reverberation calculations using a three-dimensional scattering function," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 89, no. 5, pp. 2207-2214, 1991.
18. A. G. Voronovich, *Wave scattering from rough surfaces*, Springer, Berlin, 1994.
19. 최지웅, 나형술, 나정열, "중주파수 해저면 후방산란강도 측정 및 산란모델과의 비교," *한국음향학회 2006년도 추계학술발표대회 논문집*, 27권, 2호, 405-406쪽, 2006.
20. R. J. Urick, *Principle of underwater sound for engineers*, McGraw-Hill, New York, 1967.
21. *Reverberation workshop information*, <ftp://ftp.ccs.nrl.navy.mil/pub/ram/RevModWkshp>, 2006.
22. 김대철, 김신정, 서영교, 정지현, 김양은, 김길영, "황해 남동부 니질대의 물리적 성질: 동해 및 남해 니질대와 비교," *한국해양학회지(바다)*, 5권, 4호, 335-345쪽, 2000.
23. C. Eggen and K. Williams, "APL-UW high-frequency ocean environmental acoustic handbook", Applied Physics Laboratory, University of Washington, APL-UW TR 9407, AEAS 9501, 1994.
24. R. S. Keiffer, J. C. Novarini, and G. V. Norton, "The impact of the background bubble layer on reverberation-derived scattering strengths in the low to moderate frequency

range." *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 97, no. 1, pp. 227-234, 1995.

저자 약력

•추 영 민 (Young min Chu)

2005년: 서울대학교 조선공학과 (학사)
현재: 서울대학교 조선해양공학과 박사과정
*관심분야: 음전달 모델링, 진함음 모델링, 선관 모델링

•성 우 제 (Woojae Seong)

한국음향학회지 제 27권 3호 참조

•양 인 식 (In-Sic Yang)

한국음향학회지 제 23권 2호 참조

•오 원 천 (Won-Tchon Oh)

한국음향학회지 제 20권 2호 참조