

# 서해 천해환경에서의 중주파수 해저면 반사손실 측정

## Measurements of Mid-frequency Bottom Loss in Shallow Water of the Yellow Sea

윤영글, 이찬길, 최지웅<sup>†</sup>, 조성호\*, 오선택\*, 정섬규\*

(Young Geul Yoon, Changil Lee, Jee Woong Choi<sup>†</sup>, Sungho Cho\*, Suntaek Oh\*, and Seom-Kyu Jung\*)

한양대학교 해양융합학과와 해양음향연구소, \*한국해양과학기술원 해양방위연구센터

(Received April 23, 2015; revised July 17, 2015; accepted August 9, 2015)

**초 록:** 한국해양과학기술원과 한양대학교에서 공동으로 진행한 해양음향 실험이 2013년 5월에 경기만 태안반도 서쪽에 위치한 천해에서 실시되었다. 본 논문에서는 측정된 중주파수(6~16 kHz) 해저면 반사손실 결과를 제시하고 수평입사각 17~60° 범위에서 레일리 반사계수 모델과 비교분석한다. 실험해역 지질은 다층 퇴적층으로 구성되어 있었으며, 표층 퇴적물이 다양한 구성성분(평균 입도 5.9  $\phi$ )으로 이루어져 있는 지역이었다. 분석 결과에 의하면 표층 퇴적물의 평균 입자를 고려한 모델결과는 측정된 반사손실과 다소 차이를 보였으며, 퇴적층의 지음향 정보를 역산한 결과 약 4  $\phi$  평균입도에서 측정치와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 차이의 원인은 표층 퇴적물 입도의 표준편차가 4.3  $\phi$ 로 다른지역에 비해 상당히 컸기 때문일 것으로 추측된다. 상부 퇴적층은 역산 결과로부터 얻어진 지음향 파라미터를 사용하고 하부 퇴적층은 1.3  $\phi$ 의 평균입도로부터 예측된 지음향 파라미터를 사용하였을 때, 모델결과는 측정된 반사손실 결과와 전체적으로 일치하는 경향을 나타냈다.

**핵심용어:** 해저면 반사손실, 레일리 반사계수, 지음향 인자, 지음향 역산

**ABSTRACT:** KIOST-HYU joint acoustics experiment was performed on the western shallow water off the Taean peninsula in the Yellow Sea in May 2013. In this paper, mid-frequency (6~16 kHz) bottom loss data measured in a grazing angle range of 17~60° are presented and compared to the predictions obtained using a Rayleigh reflection model. The sediment structure of the experimental site was characterized by multi-layered sediment and the components of the surficial sediment consisted of various types of particles with a mean grain size of 5.9  $\phi$ . The model predictions obtained using the mean grain size were not in agreement with the measured bottom loss, and those obtained using the grain size of 4  $\phi$ , which was estimated by an inversion process, showed a best fit to the measurements. It would be because the standard deviation of the grain-size distribution of surficial sediment is 4.3  $\phi$ , which is much larger than those of other areas around the experimental site. Finally, the model predictions obtained using the geoacoustic parameters estimated from the inversion process for the surficial sediment layer and those corresponding to the mean grain size of 1.3  $\phi$  for lower layer are reasonably agreement with the measured bottom loss data.

**Keywords:** Bottom loss, Rayleigh reflection coefficient, Geoacoustic parameters, Geoacoustic inversion

**PACS numbers:** 43.30.Ma, 43.30.Pc

## 1. 서 론

해양 지질과 해양 음향의 상호 융합 연구를 위해

<sup>†</sup>**Corresponding author:** Jee Woong Choi (choijw@hanyang.ac.kr)  
Department of Marine Sciences and Convergent Technology,  
Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu,  
Ansan 15588, Republic of Korea  
(Tel: 82-31-400-5531, Fax: 82-31-406-6255)

“이 논문은 2014년도 한국음향학회 추계학술대회에서 발표하였던 논문임”

한국해양과학기술원 해양방위연구센터와 한양대학교 해양음향연구소가 2013년 5월 2일부터 4일까지 서해 연안 천해환경인 충남 태안군 태안반도 서쪽 해역에서 공동 해양음향실험을 실시하였다.<sup>[1]</sup> 음향특성에 영향을 주는 지질학적 요소를 파악하기 위해 음파전달, 반사손실, 잔향음, 수중소음 측정이 이

루어졌고, 실험 해역의 지질 환경 특성을 파악하기 위해 다중음향측심기를 이용한 정밀 수심 측정과 천부지층탐사기 및 중천부지층탐사기를 이용한 해저면 하부 지층 탐색이 실시되었다. 또한 그래프로 표층 퇴적물의 시료를 채집하여 퇴적층의 지음향 특성을 분석하였다.

천해에서 해저면 반사는 음파 전달 특성을 이해하기 위한 중요한 요소이다.<sup>[2,3]</sup> 천해에서 해저 경계면을 고려한 음파전달 연구는 Pekeris<sup>[4]</sup>의 정상 모드 이론 연구를 시작으로 많은 연구가 이루어졌다. Choi와 Dahl,<sup>[5]</sup> Lee *et al.*<sup>[2]</sup>은 수평입사각에 따른 해저면 반사손실을 이용하여 해저면 물성을 역산하는 연구를 진행하였고, Choi *et al.*<sup>[6]</sup>은 주파수 변화에 따른 해저면 반사손실 특성을 연구하였다. Holland *et al.*,<sup>[7]</sup> Isakson *et al.*<sup>[8]</sup>은 해저면 반사손실을 측정하여 거칠기에 대한 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 중주파수 대역(6~16 kHz)을 이용하여 수평입사각에 따른 해저면 반사손실을 측정 한 뒤, 레일리 반사계수 모델의 예측결과와 비교하여 실험해역의 지음향 인자 특성을 파악하였다. 또한 측정 전 환경자료를 바탕으로 해저면의 음향학적 특성을 비교·분석하였다.

## II. 해상실험 및 환경

한국해양과학기술원과 한양대학교 간의 공동 실험 중 수평입사각에 따른 해저면 반사손실 측정은

2013년 5월 4일, 충청남도 태안군 소원면 의항항 북서 5 km 해역(북위 36.870740°, 동경 126.118162°)에서 수행되었으며, 실험 환경 모식도는 Fig. 1과 같다.

실험 해역의 수심은 약 52m이며, 음원(D/11, NEPTUNE)은 이어도호(한국해양과학기술원 조사선) 후미에서 내려 수심 9m에 위치시켰다. 수신부는 장시간 수중에 계류시켜 신호를 수신할 수 있는 자동기록식 수중청음기(Self-Recording Hydrophone, SRH)를 사용하였으며 수중청음기(TC-4032, Reson), 증폭기, 자동 저장장치로 구성되어 있다. SRH 5대를 수심 15 m부터 27 m까지 3 m 간격으로 수직 선배열하여 부이에 설치하였다. 심도 기록계(DR-1050, RBR)를 송·수신기 각각에 고정하여 반사손실 측정 시 정확한 수심 정보를 획득하였다. 실험의 정확도를 높이기 위해 조사선을 1점 묘박 후 SRH 부이를 밧줄로 연결, 조류 방향인 북서 방향으로 표류시켜 거리를 고정하였다. 조사선과 SRH 부이 사이의 간격(40, 55, 100, 140, 185 m)을 변화시키면서 17~60°의 수평입사각에 대한 해저면 반사손실을 측정하였으며, 음원이 위치한 조사선 후미와 SRH 부이에 DGPS를 설치하여 각 간격에 따른 송·수신기의 수평거리를 확인하였다.

실험시 송신 신호는 6~16 kHz 대역의 2와 3 ms 길이의 정현파 신호였고, 샘플링 주파수는 60 kHz 였다. 해저면 반사손실을 측정하기 위해서는 해저면 반사파는 다른 경로의 신호와 분리되어야 하므로 음원과 수신기의 거리가 짧아 상대적으로 경로 분리가 쉬운 40, 55, 100 m 에서는 3 ms 길이의 송신 신호를 이

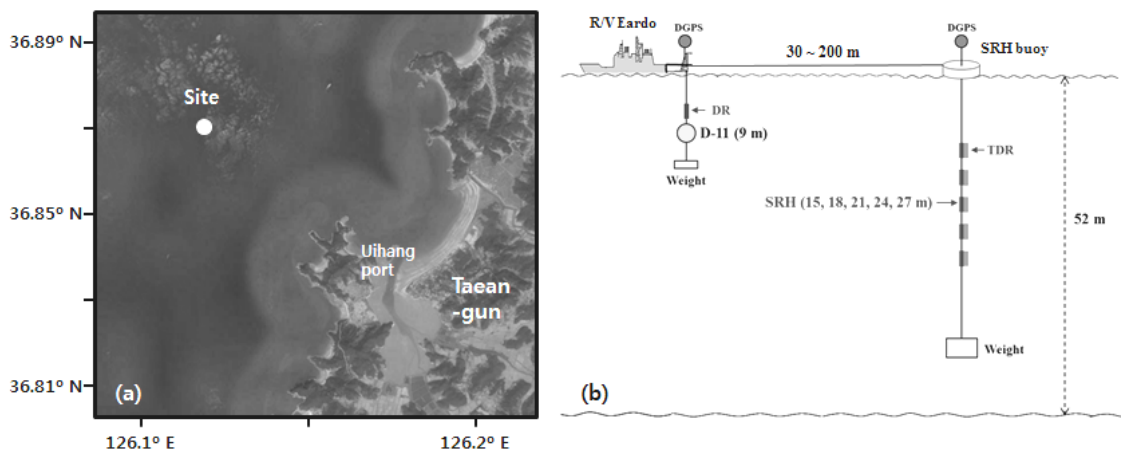


Fig. 1. (a) Experiment area (circle) and (b) experimental geometry.

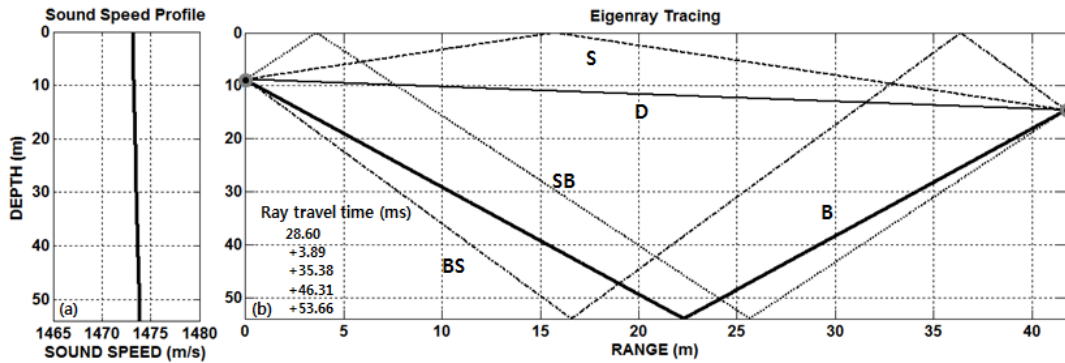


Fig. 2. (a) Sound speed profile and (b) eigenray tracing for a source-receiver range of 42 m. Source and receiver depth are 9 and 18 m respectively. The third arrival is bottom bounce path B.

Table 1. Composition of surficial sediment.

Composition (%)				Textural Parameter		Density (kg/m <sup>3</sup> )	Porosity (%)	Sediment Type
Gravel	Sand	Silt	Clay	Mz (φ)	St. De. (φ)			
9.12	29.26	26.21	35.4	5.90	4.34	1610	59.08	gM

용하였고, 거리가 멀어 경로간의 간격이 짧은 140, 185 m에서는 2 ms 신호로 실험을 실시하였다. 측정은 40 m 부터 송·수신기의 간격을 증가시키면서 진행하였으며, 각 거리마다 6kHz 부터 2kHz 씩 주파수를 높여가며 순차적으로 측정을 실시하였다. 신호는 주파수별 각 30 핑 씩 1 s 간격으로 송수신 하였다.

Fig. 2는 음속구조에 따른 신호의 고유 음선 추적 결과이다. Fig. 2(a)는 실험 당시의 음속 구조로써, 해저면 반사손실 실험 전후로 CTD를 이용하여 측정하였다. 음속은 전 수층에서 1473 ± 1 m/s 인 등음속 구조였으며, 실험 전후의 음속 차이는 1 m/s 이하로, 측정이 진행되는 동안 매우 안정적이었다. Fig. 2(b)는 송신기와 수신기가 수심 9m, 18m 에 각각 위치하고 송·수신기 간격이 42m 인 경우 음속구조를 반영한 천해환경에서의 고유 음선 추적 결과이다. 예측된 도달 시간상 해저면 반사파는 사용된 송신 신호 길이와 비교시 다른 경로 신호들과 중첩되지 않는 것을 확인할 수 있다.

해저면의 구성성분을 파악하기 위해서 음향실험 직후 그랩으로 표층 퇴적물을 1회 채취하여, 한국해양과학기술원에서 분석하였다. 해저 퇴적층의 평균 입자크기는 5.9φ였으며, 표준편차는 4.3φ인 자갈땔(gM)로 분석되었다(Table 1). 표층 퇴적물은 우세한 구성성분 없이 모래, 실트, 점토가 약 30%의 비슷한

비율로 존재하여 표준편차가 매우 높게 나타난 것으로 판단된다.

### III. 해저면 반사손실 측정방법

수평입사각에 따른 해저면 반사손실은 각각 전달 손실이 보정된 직접파의 수신전압준위와 해저면 반사신호의 수신전압준위 차이로 계산할 수 있으며, 이는 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.<sup>[6,9]</sup>

$$BL(\theta) = (dBV_d + TL_d) - (dBV_b + TL_b), \quad (1)$$

$dBV$ 는 수신전압준위로써 송신기로부터 수신된 신호 전압의 데시벨 값이다.  $TL$ 은 전달 손실을 나타내며, CTD를 통해 측정된 수직음속 구조를 입력인자로 사용하여 음선 이론 모델인 Bellhop<sup>[10]</sup>을 통해 예측되었다. 아래첨자  $d$ 와  $b$ 는 각각 직접파와 해저면 반사파를 의미한다.

### IV. 해저면 반사손실 결과

Fig. 3은 주파수 및 수평입사각에 따른 해저면 반사손실 실험 결과와 단일 경계면에서의 레일리 반사계수 모델 결과의 비교를 보여준다. 레일리 반사계

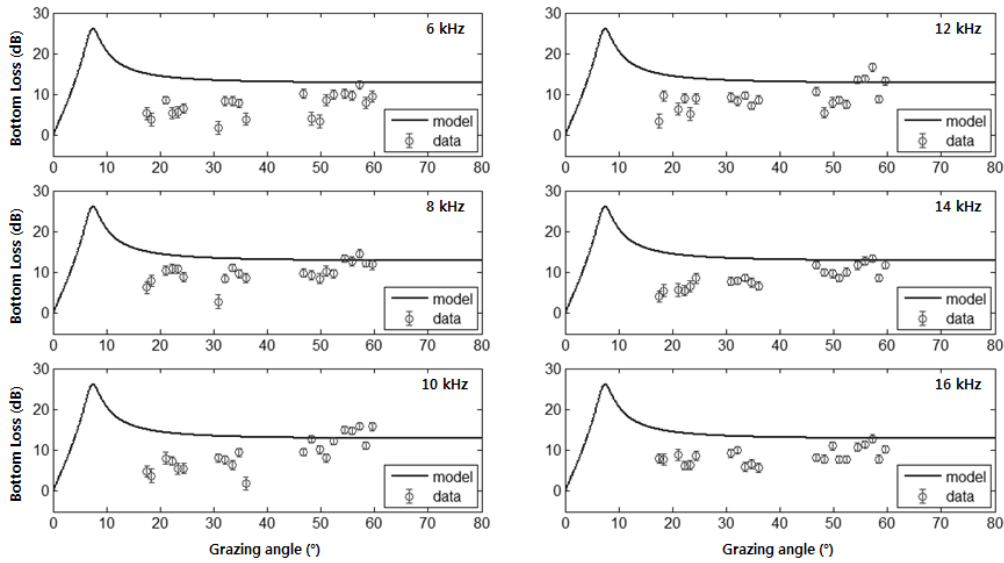


Fig. 3. Measured bottom loss as functions of grazing angle and frequency compared to the model predictions for a homogeneous half-space with geoacoustic parameters corresponding to mean grain size.

수 모델은 수층의 음속 및 밀도와 해저면의 음속, 밀도, 감쇠계수를 입력인자로 갖는다.<sup>[11]</sup>

해저면의 음속 및 감쇠계수는 Jackson과 Richardson<sup>[12]</sup>에 나와있는 회귀곡선으로 계산된 수치를 사용하였다.

$$v_p = -0.0024324M_z + 1.0091, \quad 5.3 \leq M_z < 9, \quad (3)$$

$$k = 0.20098M_z^2 - 2.5228M_z + 8.0399, \quad 4.5 \leq M_z < 6.0, \quad (4)$$

여기서  $M_z$ ,  $v_p$ ,  $k$ 는 각각 평균 입자크기, 해수와 퇴적층의 음속비, 감쇠율이다. 퇴적물을 이용하여 직접 측정된 물리적 특성을 모델에 입력하는 것이 정확하지만, 아쉽게도 본 연구에서는 측정상의 어려움 등으로 인해 측정을 못하였으므로 퇴적물의 평균 입자크기로부터 유추된 음속과 감쇠계수를 사용하였다. 예측된 해저면의 음속은 1456 m/s, 감쇠계수는 0.15 dB/m/kHz로 퇴적층의 음속이 해수의 음속보다 느린 물렁한 해저면으로 예측되었다. 밀도는 1610 kg/m<sup>3</sup>으로 측정 결과를 이용하여 예측한 결과, 전반적으로 모든 수평입사각에서 반사손실 모델 결과가 실측치에 비해 비교적 높은 준위를 나타내었다. 모델결과에서는 약 10° 이내의 낮은 수평입사각에서 해저면의 음속이 해수면 음속보다 작아 해저면 반사손실

이 급격히 증가하는 현상을 보이지만, 실측 반사손실에서는 그 수평입사각 범위에 해당하는 자료의 부족으로 인해 확인이 불가능하였다.

5.9φ의 평균입자 크기를 이용하여 계산된 해저면의 물성을 바탕으로 예측된 해저면 반사손실 결과와 실제 측정 결과의 오차는 실험 해역의 표층 퇴적물 분석표(Table 1)에서 충분히 예측할 수 있다. 즉, 실험 해역의 평균 입자는 5.9φ지만 표준편차가 약 4.3φ로써, 이번 공동 실험에서 조사한 15개의 정점 중에서 가장 높게 나타났으며,<sup>[11]</sup> 실험 해역을 제외한 나머지 정점에서는 평균 입자에 대한 표준편차가 약 1.9φ였다. 따라서 실험 해역의 평균입자 크기를 대표값으로 해저면의 물성을 계산하는 것은 이러한 오차를 유발하고 있다고 판단되며, 본 연구에서는 실측된 해저면 반사손실을 토대로 유전자 알고리즘을 이용하여 해저면의 물성 역추정을 시도하였다. 유전자 알고리즘의 파라미터 중 재생산과 교배 확률은 일반적으로 알려진 값을 사용하였지만, 돌연변이 확률은 0.5라는 다소 높은 값을 선정하였다. 이 값이 증가하면 활발한 전역 탐색이 가능하지만 수렴성이 떨어지게 된다. 하지만 유전자 알고리즘의 세대가 진행될수록 돌연변이 범위를 감소시키는 알고리즘을 적용하여 두 가지 장점을 모두 적용하였다.<sup>[13]</sup> Table 2는 유전자 알고리즘의 초기 설정값을 보여주며, Table 3

은 지음향 인자의 역산 범위를 나타낸다. 각각의 역산 범위는 실험 해역의 평균입자에 따른 표준편차를 고려하여 비교적 광범위하게 설정하였다. 역산 결과 해저면의 음속은  $1534.7 \pm 6.0$  m/s, 밀도는  $1750 \pm 51$  kg/m<sup>3</sup>에서 실측값과 가장 일치하는 경향을 보였다. 역산된 해저면의 음속을 기준으로 회귀곡선에 대입한 결과 약  $4\phi$ 의 평균입자 크기가 예측되었다. 역산된 감쇠계수는 역산 범위내의 최대값으로 수렴하였고, 이를 검증하기 위해 감쇠계수의 범위를 변경시켜 가며 역산을 실시하였으나 감쇠계수는 항상 최대

값으로 역산되었다. 일반적으로 감쇠계수는 임계각 주변에서의 반사손실에 가장 민감하게 반응하는데 역산에 이용된 측정 결과는 임계각 부근의 자료가 부족하여 이에 대한 정확한 역산이 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 이와 같은 이유로 감쇠계수는 역산된 음속으로 도출한 평균 입자크기를 이용하여 0.4 dB/m/kHz로 가정하였다. 밀도의 경우, 역산 결과는 실측치에 비해 약 9% 증가한 것을 알 수 있다. 실험해역의 해저면 밀도는 약 1610 kg/m<sup>3</sup>인 것으로 보고되었으나 아쉽게도 오차 범위에 대한 정보를 획득하지 못하였고 따라서 역산된 해저면 밀도인  $1750 \pm 51$  kg/m<sup>3</sup>와 직접적인 비교는 어려웠다. 하지만 Jackson과 Richardson<sup>[12]</sup>에서 제시된 결과로부터 음속비 1.04에 대한 해저면 밀도는 1704 kg/m<sup>3</sup>로 본 역산 결과와 일치하고, 약 1600-1900 kg/m<sup>3</sup>의 범위에서 넓게 분포함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서도 역산 결과인  $1750 \pm 51$  kg/m<sup>3</sup>을 실험해역의 해저면 밀도로 고려하였다.

Table 2. Genetic Algorithm parameters used to estimate the geoaoustic parameters.

Generation	1000
Popsze	30
Parallel run	100
Reproduction coefficient	1.7
Crossover probability	0.9
Mutation probability	0.5

Table 3. Search spaces of geoaoustic parameters used for the inversion.

Sediment sound speed (m/s)	1400 ~ 1900
Sediment density (kg/m <sup>3</sup> )	1000 ~ 2500
Sediment attenuation (dB/m/kHz)	0.01 ~ 0.80

Fig. 4는 역산된 결과를 레일리 반사계수 모델의 입력인자로 사용한 뒤, 실측값과 모델값을 비교한 결과이다. 수평입사각이 증가함에 따라 커지는 해저면 반사손실의 경향이 비교적 잘 일치하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 하지만 해저면을 단층으로 가정한 뒤 수행한 모델 결과와는 달리 실측값에서는

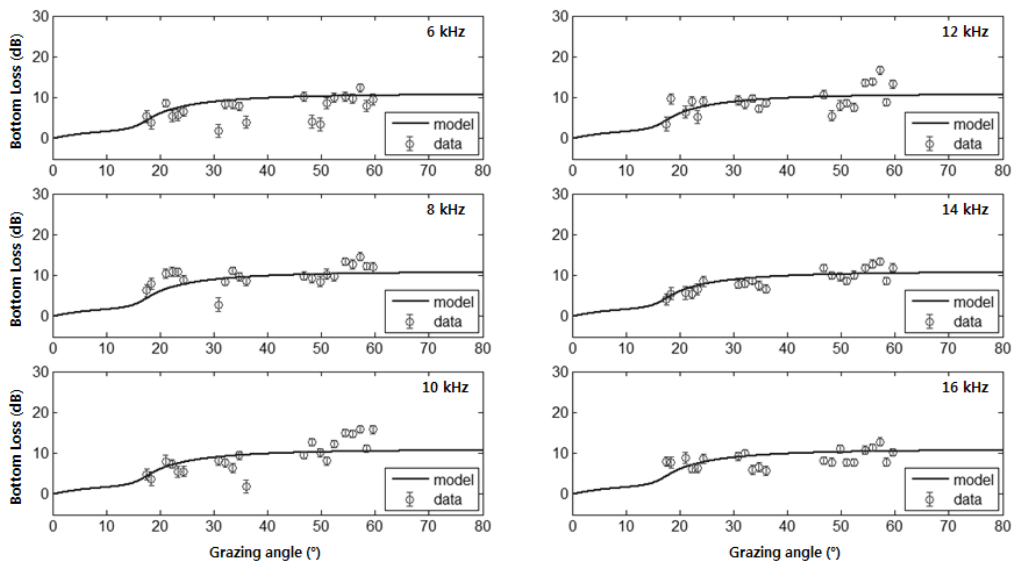


Fig. 4. Measured bottom loss as as functions of grazing angle and frequency compared to the model predictions for a homogeneous half-space with the best fit geoaoustic parameters.

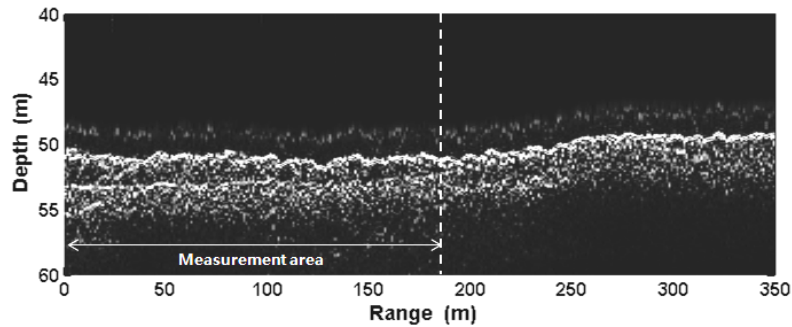


Fig. 5. Seismic survey result for measurement site (source position: 0 m).

<b>Water</b>	$c_1 = 1474 \text{ (m/s)}$ $\rho_1 = 1.00 \text{ (g/m}^3\text{)}$	
<b>Surficial Sediment Layer</b>	$c_2 = 1535 \text{ (m/s)}$ $\rho_2 = 1750 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ $\alpha_2/f = 0.4 \text{ (dB/m/kHz)}$	2 m
<b>Halfspace</b>	$c_2 = 1748 \text{ (m/s)}$ $\rho_2 = 1900 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ $\alpha_2/f = 0.5 \text{ (dB/m/kHz)}$	

Fig. 6. Diagram of geoacoustic parameters for two-layered sediment model.

수평입사각이 변화함에 따라 해저면 반사손실 값이 위아래로 약간씩 변동하는 경향을 보인다. 일반적으로 이러한 경향은 해저면이 단층이 아닌 다층구조로 존재할 때 발생 가능하다.<sup>[5-7]</sup> 수 m 이내에 층이 존재할 경우, 중주파수 대역에서의 해저면 반사손실은 수평입사각 변화에 따라 변동이 존재할 수 있다. 실험 해역에 대한 천부지층탐사기를 이용한 하부 퇴적층 분석 결과에 의하면, 해저면 하부 약 2 m 지점에 하부퇴적층이 존재하는 것으로 파악되었다(Fig. 5).<sup>[1]</sup> 해저면 하부 약 2 m 지점에 층이 존재하지만 음원으로부터 거리가 증가함에 따라 층의 두께가 점차적으로 얇아져서, 약 200 m 이후부터는 단층구조 특성을 보였다. 실험 해역의 하부 퇴적층에 대한 지음향 파라미터 측정은 이루어지지 못하였지만, 구조적 특성으로 미루어볼 때 음원으로부터 200 m 이후 해역의 상부 퇴적층의 물성과 유사할 것으로 판단되었다. 공동 실험에서 수행된 15개의 그래프 정점 중에서 본 실험이 이루어진 지점과 가장 가까운 두 정점에서의 평균입사 크기는 약  $1.3 \pm 0.1 \phi$ 로 나타났으므로 실험 해역의 하부 퇴적층의 평균입사 크기 역시  $1.3 \phi$ 로 가

정한 뒤, 회귀곡선을 토대로 해저면의 물성을 계산하였다.

Fig. 6은 모델 입력 파라미터로 사용된 이층 구조 해저면의 지음향 인자 특성을 나타낸다. 상부 퇴적층의 음속, 밀도, 감쇠계수는 역산을 통해 추정된 값으로써 각각 1535 m/s, 1750 kg/m<sup>3</sup>, 0.4 dB/m/kHz로 설정하였다. 상부 퇴적층의 두께는 천부지층소나를 이용하여 실측된 값으로써 실험 지역의 평균 두께인 2 m 를 사용하였다. 또한 모델입력에 사용된 하부 퇴적층의 음속, 밀도, 감쇠계수는 각각 1748 m/s, 1900 kg/m<sup>3</sup>, 0.5 dB/m/kHz였다. 이와 같은 지음향 인자들을 바탕으로 실험 해역을 이층 구조로 가정한 뒤, 레일리 반사계수 모델을 이용하여 실측값과의 비교를 수행하였다.

Fig. 7은 이층 구조 레일리 반사계수 모델값과 실측값의 비교를 나타낸다. 단층 구조 결과와 비교할 때 표층 임계각(16.2°)을 기준으로 해저면 반사손실이 많은 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 임계각보다 낮은 수평입사각에서는 단층 및 이층 구조의 모델링 결과가 유사하게 나타나지만, 임계각보다 높은 수평입사각에서는 이층 구조일 때 수평입사각이 변화함에 따라 해저면 반사손실 값이 변동하는 것을 볼 수 있다. 이러한 특성은 상부 퇴적층 두께에 따라 표층과 하부층에서 다중반사된 신호들의 위상차이로 인한 간섭에 의해 발생된다. 또한 주파수가 증가함에 따라 이러한 진동폭이 점차적으로 줄어드는 경향을 보이며, 실험 결과에서도 주파수가 증가할수록 수평입사각에 따른 해저면 반사손실 변동폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

하지만 일부 주파수 대역의 수평입사각(예, 6 kHz

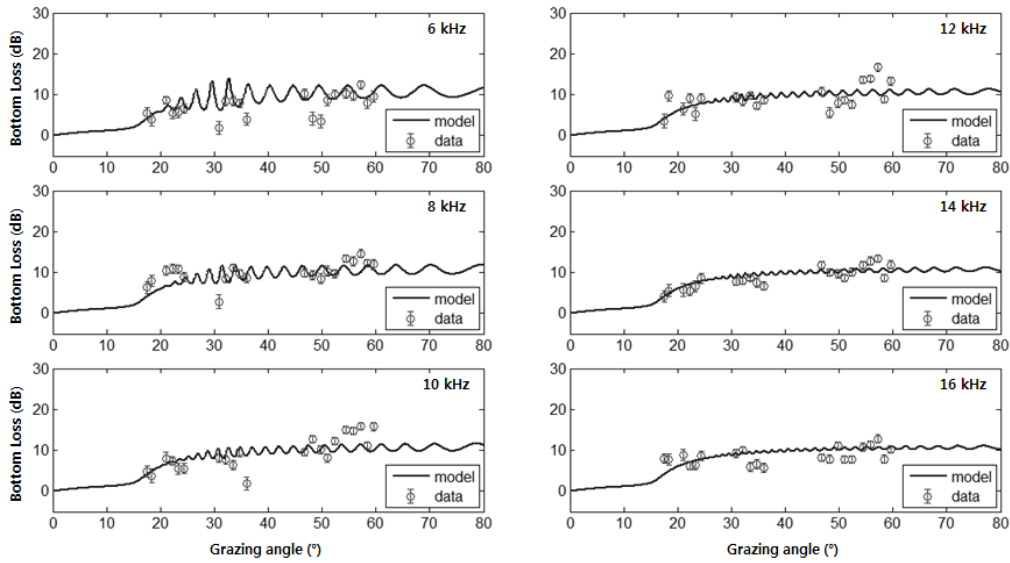


Fig. 7. Measured bottom loss as as functions of grazing angle and frequency compared to the predictions obtain using two-layered model.

의 31°와 36°, 8 kHz의 31°, 10 kHz의 36°)에서는 여전히 모델과 실측치 사이에 차이가 존재하며, 이는 다층 구조 효과 이외에 해저면 비균질성에 의한 산란이나 사용된 주파수 대역으로 분해하기 어려운 표층 퇴적층 내부의 미세 퇴적층에 의한 오차 또는 해저면 굴곡에 의해 발생할 가능성이 있다. 그러나 전반적인 측정 결과는 이층 경계면 반사계수 모델 결과 범위내에 포함되어 있어 해저면 반사손실 특성을 잘 반영하고 있음을 보여준다.

### V. 요약 및 토의

충청남도 태안 주변 해역에서 수평입사각 별 중주파수 해저면 반사손실을 측정하였고, 측정된 해저면 반사손실은 이층 경계면 반사계수 모델과 비교하여 해저면 음속, 밀도, 감쇠계수의 지음향 파라미터를 예측하였다. 퇴적층 밀도는 표층 퇴적물로부터 직접 측정 되었으나, 음속과 감쇠계수는 해저면 평균 입자 크기를 이용하여 회귀곡선으로부터 예측되었다. 채취된 상부 퇴적물의 평균 입도 크기 약 6φ로부터 유추된 음속은 1456 m/s였으나 실측된 반사손실과 오차를 보였고, 역산값인 1535 m/s일 때 실측치와 가장 잘 일치하였다.

이층 경계면 반사계수 모델의 상부 퇴적층은 단일

경계면의 역산 결과와 동일하게 가정하였고, 하부 퇴적층의 지음향 인자들은 음원으로부터 200 m 이상 떨어진 하부층이 상부로 용기된 지역의 입도분석 결과를 기준으로 음속은 1748 m/s, 밀도는 1900 kg/m<sup>3</sup>, 감쇠계수는 0.5 dB/m/kHz로 가정하였다. 전반적으로 측정 결과와 모델 예측치가 잘 일치하나 일부 수평 입사각에서의 차이가 발생하였고, 이러한 차이는 여러 요인으로 인해 발생 가능하다. 그 중 해저면 굴곡이 그 원인일 가능성도 있으며 고해상도 정밀지형자료<sup>[1]</sup>를 이용하여 실험해역의 실효치 파고를 확인하였을 때, 실험해역은 약 0.35m의 소형 모래파가 존재하는 지역이다. 반사계수 모델은 평평한 경계면을 가정한 모델으로 해저면의 굴곡을 포함하지 못하지만, 실제 해저면은 소형 모래파로 인하여 지역적인 수평 입사각이 변화하게 된다. Cho *et al.*<sup>[14]</sup>에 의하면 서해에서 발생하는 사구가 형성된 해저면은 다른 비균질한 경계면에 비해 해저면 음파 상호작용에 큰 영향을 발생시키는 요인으로 작용한다. 따라서 본 실험에서도 측정 환경에 따라 해저면 반사손실의 크기가 달라질 수도 있을 것이다.

Fig. 8은 반사손실 측정이 이루어진 측선의 다중음향측심기를 이용한 해저 수심자료를 바탕으로 고유음선 추적 결과를 나타내었다. 실험 환경과 동일하게 송수신기 위치를 설정하였으며, 특정 수신기에 3

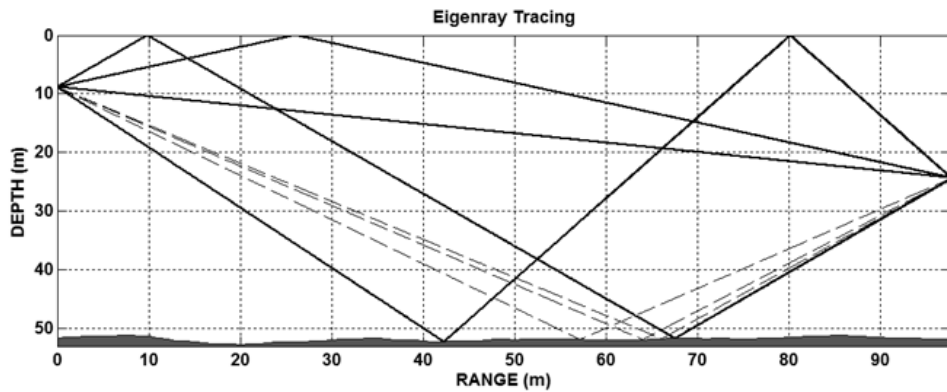


Fig. 8. Eigenray tracing for the rough bottom interface.

개의 해저면 반사파 경로(점선)가 수신되는 것을 확인하였다. 해저면 반사파가 여러 경로로 수신기에 도달하게 되면 수신 신호의 강도가 증가할 수 있고 따라서 해저면 반사손실이 상대적으로 낮게 평가될 가능성이 있다.

또 다른 해저면 반사손실 오차 원인으로는 퇴적층에 의한 체적 산란에 의한 영향이 있다. Kim *et al.*<sup>[15]</sup>은 퇴적층 내의 비균질성에 의한 체적산란이 음파산란에 영향을 미친다고 보고하였다. 본 실험이 이루어진 퇴적층은 자갈, 모래, 실트 그리고 점토가 모두 포함되어 있고, 평균 입자크기의 표준편차가 4.3 $\phi$ 로 매우 비균질한 퇴적층이었다. 모델과의 오차가 큰 부분은 대부분 낮은 주파수 대역 6, 8, 10 kHz였고, 낮은 주파수가 고주파 대역에 비해 투과성이 좋으므로 해저면 반사손실의 변동성은 퇴적층의 비균질성에 의한 영향이 포함되었을 가능성을 배제할 수 없다.

본 논문에서는 2 m 정도의 상부 퇴적층을 갖는 해역에서 중주파수 해저면 반사손실 측정하고, 그 결과를 이층 경계면 반사계수 모델을 이용한 예측치와 비교하였다. 해저면 반사손실은 수평 입사각에 따라 위아래로 변동성을 보였으며, 주파수가 증가함에 따라 변동폭이 감소하였다. 또한 모델링 결과는 상부 퇴적층의 두께 변화에 민감하게 수평입사각에서 반사손실의 변동 위치가 변화하였다. 이로 인해 정확한 퇴적층 두께를 예측하기가 어려움이 있으나, 전반적으로 측정된 2 m 두께로부터 예측된 반사손실의 변동 범위내에 실측치가 존재하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원의 천해 지질환경과 음파전달 환경과의 상호 연계 연구(PE98978)의 지원으로 수행되었다.

## References

1. S. Cho, D. Kang, C. -K. Lee, S. -K. Jung, J. W. Choi, and S. Oh, "Overview of results from the KIOST-HYU joint experiment for studying on acoustic propagation in shallow geological environment" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **34**, 411-422 (2015).
2. C. Lee, S. Cho, J. W. Choi, T. Shim, and Y-K. Lee, "Geoacoustic inversion of mid-frequency bottom loss data in shallow water off the East Coast of Korea," *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**, 07GG01-1-07GG01-4 (2012).
3. H. La and J. W. Choi, "8-kHz bottom backscattering measurements at low grazing angles in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.* **127**, EL160-EL165 (2010).
4. C. L. Pekeris, "Theory of propagation of explosive sound in shallow water," *Geol. Soc. Am. Mem.* **27**, 1-116 (1948).
5. J. W. Choi and P. H. Dahl, "Mid-to-high-frequency bottom loss in the East China Sea," *IEEE J. Oceanic Eng.* **29**, 980-987 (2004).
6. J. W. Choi, P. H. Dahl, and J. A. Goff, "Observations of the R reflector and sediment interface reflection at the Shallow Water '06 Central Site," *J. Acoust. Soc. Am.* **124**, EL128-EL134 (2008).
7. C. W. Holland, R. Hollett, and L. Troiano, "Measurement technique for bottom scattering in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.* **108**, 997-1011 (2000).
8. M. J. Isakson, N. P. Chotiros, R. A. Yarbrough, and J. N.



Piper, "Quantifying the effects of roughness scattering on reflection loss measurements," *J. Acoust. Soc. Am.* **132**, 3687-3697 (2012).

9. P. H. Dahl, J. W. Choi, N. J. William, and H. C. Graber, "Field measurements and modeling of attenuation from near-surface bubbles for frequencies 1-20 kHz," *J. Acoust. Soc. Am.* **124**, EL163-EL169 (2008).

10. M. B. Porter and H. P. Bucker, "Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields," *J. Acoust. Soc. Am.* **82**, 1349-1359 (1987).

11. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics 2nd Ed.* (Springer, New York, 2011), pp. 38-50.

12. D. R. Jackson and M. D. Richardson, *High-Frequency Seafloor Acoustics* (Springer, New York, 2007), pp. 125-151, 310-320.

13. C. Lee, *Geoacoustic inversion for mid-frequency bottom loss data measured in East sea* (Master's thesis, University of Hanyang, 2011), pp. 39-42.

14. S. Cho, S. Oh, D. Kang, S-K, Jung, and J. W. Choi, "Variability of underwater sound propagation due to the sand wave" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr. Suppl.* 2(s) **33**, 367-368 (2014).

15. H. Kim, J. W. Choi, J. Na, D. Suk, J. Park, K. Park, K. Yoon, and Y. N. Na, "Characteristics of bottom scattering from inhomogeneous bottom layer" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr. Suppl.* 2(s) **19**, 89-91 (2000).

**저자 약력**

▶ 윤 영 글 (Young Geul Yoon)



2012년 2월: 한양대학교 학사  
 2014년 2월: 한양대학교 석사  
 2014년 3월 ~ 현재: 한양대학교 박사과정

▶ 이 찬 길 (Changil Lee)



2009년 2월: 경원대학교 학사  
 2011년 2월: 한양대학교 석사  
 2011년 3월 ~ 현재: 한양대학교 박사과정

▶ 최 지 웅 (Jee Woong Choi)



1996년 2월: 한양대학교 학사  
 1998년 2월: 한양대학교 석사  
 2002년 8월: 한양대학교 박사  
 2002년 11월 ~ 2007년 8월: Applied Physics Lab., Univ. of Washington, USA, Research Associate  
 2004년 ~ 현재: 미국음향학회 수중음향 기술위원회 위원  
 2007년 9월 ~ 현재: 한양대학교 해양융합 과학과 부교수

▶ 조 성 호 (Sungho Cho)



2005년 2월: 한양대학교 이학사  
 2007년 2월: 한양대학교 이학석사  
 2012년 2월: 한양대학교 이학박사  
 2012년 ~ 현재: 한국해양과학기술원 해양방위연구센터 연구원

▶ 오 선 택 (Suntaek Oh)



1992년 2월: 한양대학교 이학사  
 1995년 2월: 한양대학교 이학석사  
 2003년 8월: 한양대학교 이학박사  
 2012년 ~ 2015년 6월: 한국해양과학기술원 해양방위연구센터 연구원  
 2015년 7월 ~ 현재: LIG넥스원(주) MARITIME 연구소 전투체계연구센터

▶ 정 섬 규 (Seom-Kyu Jung)



1991년 2월: 부산대학교 이학사  
 1993년 8월: 부산대학교 이학석사  
 2011년 2월: 인하대학교 이학박사  
 1997년 ~ 현재: 한국해양과학기술원 해양방위연구센터 책임연구원