

서해 천해환경에서 단상태 해저면 후방산란강도 측정

Measurements of Monostatic Bottom Backscattering Strengths in Shallow Water of the Yellow Sea

손우주, 손수욱, 최지웅,[†] 조성호,* 정섬규*

(Wuju Son, Su-Uk Son, Jee Woong Choi,[†] Sungho Cho,* and Seom-Kyu Jung*)

한양대학교 해양융합과학과 해양음향연구실, *한국해양과학기술원

(Received April 23, 2015; revised July 27, 2015; accepted August 23, 2015)

초 록: 한국해양과학기술원과 한양대학교가 2013년 5월 서해 경기만 남부의 연안해역에서 공동으로 수행한 해양음향 실험에서 주파수 6 ~ 14 kHz에 대한 해저면 후방산란강도 측정이 실시되었다. 실험해역의 지질 환경 특성은 다중빔 음향측심기, 스파커, 그래프를 이용하여 조사되었으며, 이로부터 정밀 해저지형 및 해저면 하부지층 구조, 표층 퇴적물 구성성분에 대한 자료를 획득하였다. 본 논문에서는 수평입사각 28° ~ 69°에 대한 해저면 후방산란강도 결과를 도출하여 람베르트 법칙(Lambert's law) 및 APL-UW 산란 모델과 비교하였다. 또한 실험해역의 해양물리/지형학적 특성을 고려하여 해저면 후방산란 특성에 영향을 미치는 지음향 인자들에 대한 토의를 수행하였다.

핵심용어: 해저면 후방산란강도, 잔향음, 해저면 거칠기, 해저면 체적산란강도

ABSTRACT: Measurements of bottom backscattering strengths in a frequency range of 6-14 kHz were made on the shallow water off the southern Gyeonggi Bay in Yellow Sea in May 2013, as part of the KIOST-HYU joint acoustics experiment. Geological surveys for the experimental area were performed using multi-beam echo sounder, sparker system, and grab sampling to investigate the bottom topography, sub-bottom profile and composition of surficial sediment, respectively. In this paper, the backscattering strengths as a function of grazing angle (in range of 28° ~ 69°) were estimated and compared to the predictions obtained by Lambert's law and APL-UW scattering model. Finally, the effects of geoacoustic parameters corresponding to the experimental area on the backscattering strengths are discussed.

Keywords: Bottom backscattering, Reverberation, Bottom roughness, Seafloor volume scattering

PACS numbers: 43.30.Gv, 43.30.Hw

1. 서 론

천해 해양환경에서 소나를 운용 시에 잔향음은 소나 성능을 저해하는 요소로 작용한다. 특히 천해 해양환경은 다양한 요인들에 의해 시공간적으로 변동하기 때문에 그 해양환경 특성을 정확히 파악하고 잔향음을 예측하는 것이 중요하다. 잔향음은 해양 경계면 및 체적 내의 불균질한 특성으로 인해 산란되어 수신기에 되돌아오는 신호의 시간에 따른 합으

로 정의되며, 그 발생 원인으로는 해수면 거칠기와 해수면 하부에 형성된 기포층에 의해 발생하는 해수면 잔향음, 해저 경계면 및 하부체적의 불균질성에 의한 해저면 잔향음, 어군·플랑크톤 등과 같은 체적 산란체에 의해 산란되는 체적 잔향음으로 구분할 수 있다.^[1] 특히 해저면의 해양환경은 퇴적물의 물리적 특성(음속, 밀도, 감쇠계수 등), 해저 경계면 거칠기 스펙트럼, 해저면 하부체적의 비균질성, 지층구조 등의 다양성을 가지고 있기 때문에 해저면 후방산란 특성을 이해하고 해석하기 위해서는 음향학적인 실험 뿐만이 아니라 해저면 해양환경 특성에 대한 조사가 함께 이루어져야 한다. 실제로 SAX99(Sediment

[†]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.”

Acoustics Experiment-99), SAX04 그리고 SW06(Shallow Water 06), ASIAEX(The Asia Seas International Acoustics Experiment) 등의 연구가 진행되어 해저면의 반사 및 산란 음향특성과 고해상도의 해양환경 및 지질환경 자료가 측정되었으며, 그 자료를 바탕으로 폭넓은 분야의 연구가 진행되었다. 국내에서도 천해 지질환경 특성에 대한 음향학적 특성 해석을 목적으로 2013년 5월 서해 경기만 남부 태안반도 해역에서 한국해양과학기술원(KIOST) 해양방위연구센터와 한양대학교 해양음향연구실이 공동으로 해양음향 실험을 수행하였고^[2] 그 실험의 일부로 해저면 후방산란 신호 측정이 이루어졌다.

본 논문에서는 측정된 해저면 잔향음 신호로부터 수평입사각 별 후방산란강도를 도출하였으며, KIOST에서 측정한 환경자료를 바탕으로 해저면 후방산란 특성에 영향을 미치는 지음향 인자들에 대한 토의를 수행하였다.

II. 실험방법 및 분석

2013년 5월 2일 경기만 남부 태안반도 서쪽해역 (36° 53' 4.92" N, 126° 6' 59.76" E), 평균 수심 약 43 m의 천해 환경에서 KIOST 소속 연구선인 이어도호를

이용하여 해저면 후방산란강도 측정실험을 수행하였다(Fig. 1). 실험해역의 정밀 해저지형과 해저면 하부지층 구조는 고해상도(0.5 m × 0.5 m) 다중빔음향측심기(Multi-beam Echo sounder, EM-3002), 중천부지층탐사기(Sparker system, SIG 2 mile)를 이용하여 측정되었고, 표층퇴적물 구성성분은 그랩을 이용하여 채취된 시료에 대하여 입도분석 및 전밀도 분석으로부터 파악되었다.^[2]

Fig. 2(a)는 다중빔음향측심기로부터 획득된 해저지형 결과이며 중앙의 흰색 직사각형은 해저면 잔향음 실험 해역을 표시한 것이다. 실험해역 해저지형

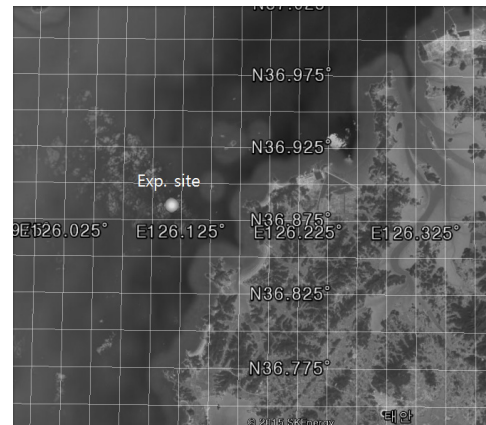


Fig. 1. Location of measurement site.

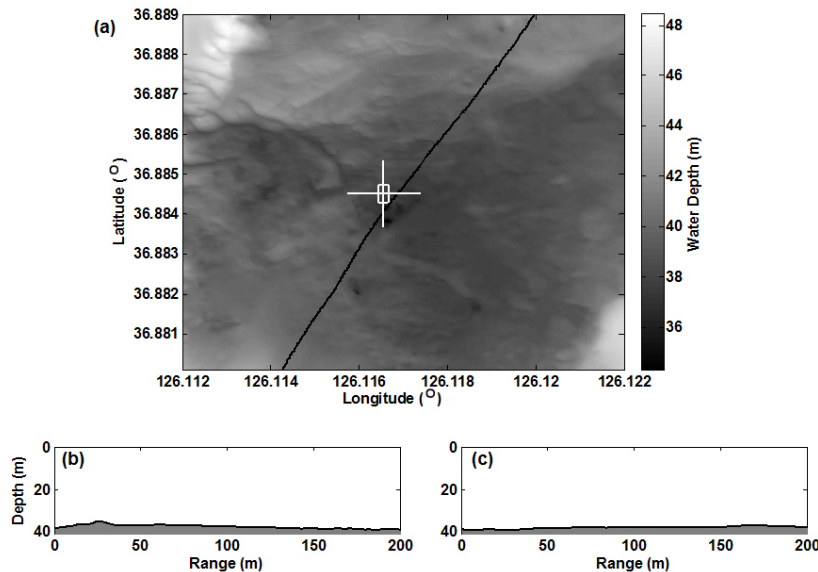


Fig. 2. (a) High-resolution bathymetry measured by multi-beam echo sounder. The white box indicates the experimental area and black line indicates the sparker survey track L8 near the area,^[2] (b) bathymetry in north-south direction and (c) bathymetry in east-west direction.

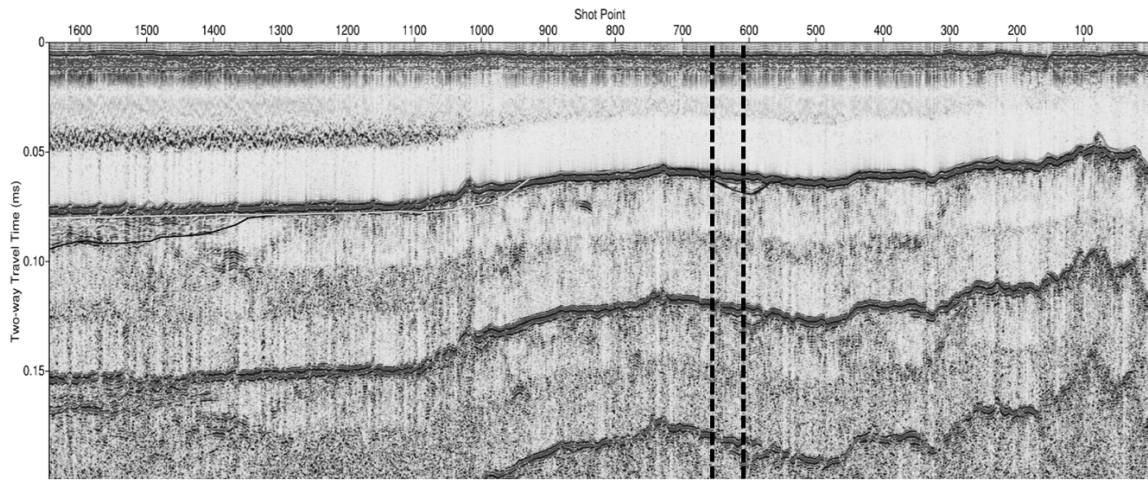


Fig. 3. A sparker profile for Line 8 section.

Table 1. Results of particle size analysis for the Grab sample taken in the measurement site.

Mean (ϕ)	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Sed. Type
0.8	14.7	85.0	0.4	0	gS

의 경사도를 파악하기 위해 남-북 방향[Fig. 2(b)], 동-서 방향[Fig. 2(c)]에 대한 수심 변화를 확인하였으며, 그 결과 실험지역의 수심은 각 방위별로 1° 미만의 기울기를 보이는 평탄한 지역으로 판명되었다.

KIOST는 경기만 남부 해역의 중천부 지층구조를 조사하기 위해 9개의 측선(L1 ~ L9)을 선정, 스파커 음원을 이용하여 중천부 지층탐사를 수행하였다.^[2] 해저면 잔향음 실험 해역과 근접한 측선은 L8이며, 측선 L8은 잔향음 실험해역에 비해 남동방향으로 약 50m 거리에 위치하였다[Fig. 2(a)]. Fig. 3은 측선 L8에 대한 스파커 음원 분석결과로서 가로축은 스파커 음원 신호의 송신 횟수를 나타내며, 세로축은 해저면 반사 이후 수신되는 음향신호의 도달시간을 의미한다.^[2] Fig. 3에서 검은색 점선은 해저면 잔향음 실험 해역과 가장 근접한 부분을 나타내며, 이 때 추출된 스파커 자료는 거리 110 m에 대한 하부 지층구조를 보여준다. 측선 L8의 스파커 신호 분석결과 표층의 퇴적층이 사박되어 첫 번째 하부 퇴적층이 수층에 드러나 있었으며, 두 번째 퇴적층도 점차 수층에 가까워지는 경향을 보이지만 표층과는 약 5m의 층 두께를 보인다. 하지만 본 연구에서 사용하는 6 ~ 14 kHz 주파수 대역에서는 퇴적층 감쇠손실로 인해 약 5 m 두께의 하부퇴적층 영향이 적을 것으로 예상하

여 단일층으로 가정하였다.

Table 1은 그래프를 통해 채취한 실험해역 표층퇴적물에 대한 입도분석 결과이다. 평균 입자크기는 0.8 ϕ [$\phi = -\log_2(d/d_0)$, d 는 입자의 직경(mm), d_0 는 기준 길이(1 mm)]이며, Folk^[3] 방법에 의한 퇴적상은 자갈모래(gS)로 분류되었다. 퇴적물의 전밀도는 해수를 포함한 퇴적물의 밀도로서 실험지역의 표층퇴적물의 경우 1.92 g/cm³로 분석되었다.

해저면 잔향음 신호를 획득하기 위하여 무지향성 송신기(D-11, Neptune)와 세 개의 무지향성 수신기(TC-4032, TC-4014, RESON)를 해저면으로부터 각각 약 13.3, 13, 16, 20 m 떨어진 위치에 놓았으며[Fig. 4(a)], 해저면에 가깝게 위치한 순서대로 수신기 I, 수신기 II, 수신기 III으로 정의하였다. 또한 송·수신기의 안정성을 유지하기 위하여 수신기로부터 약 2.6 m 아래에 무게추를 설치하였다. 본 논문에서는 송신기와 수신기의 간격이 약 30 cm로 가장 작은 수신기 I에서 수신된 신호를 단상태 잔향음 신호로 가정한 후 후방산란강도를 추출하는데 이용하였다. 음향실험을 수행하기 이전 CTD(Conductivity, Temperature, Depth)를 이용하여 수층의 수심별 수온, 염분, 음속을 측정하였고 그 결과, 전 층이 혼합되어 있는 수층 구조로 관측이 되었으며, 수심에 따른 평균음속은

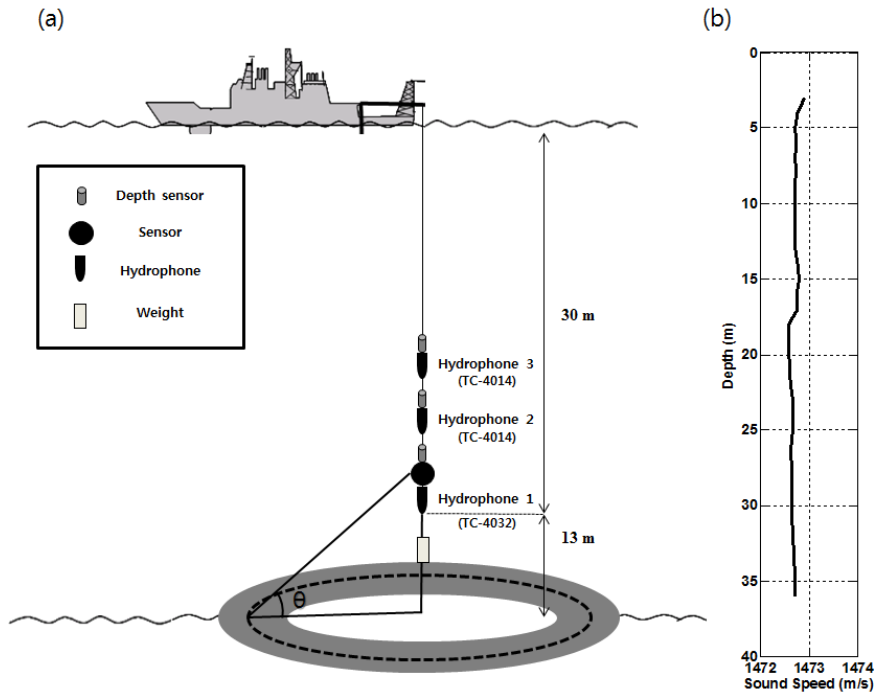


Fig. 4. (a) Experimental geometry for measurement of bottom backscattering strengths and (b) the sound speed profile of the water column measured by CTD casts.

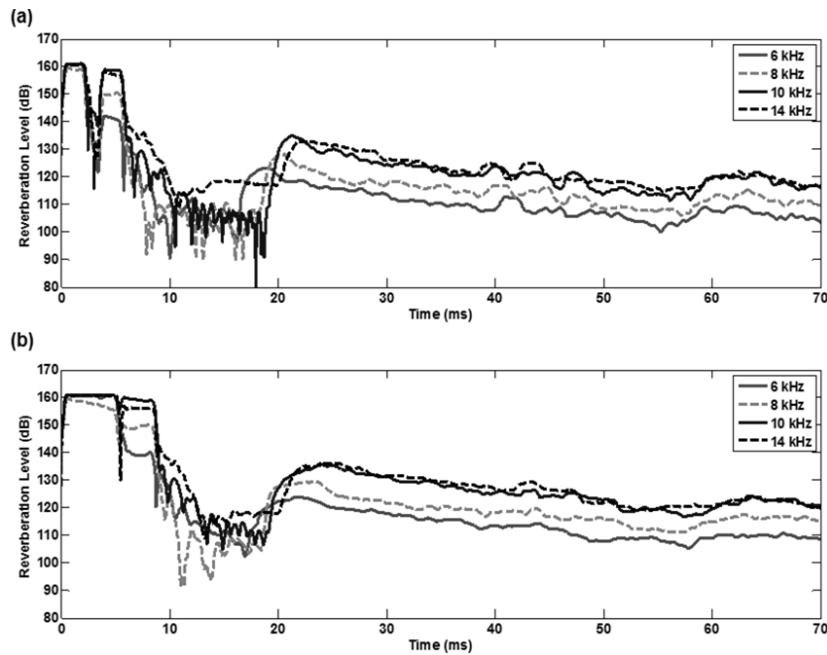


Fig. 5. Reverberation levels measure for 6, 8, 10, and 14 kHz with pulse lengths of (a) 2 and (b) 5 ms.

약 1473 m/s였다[Fig. 4(b)]. 송신신호로는 펄스길이 2, 5 ms, 주파수 6, 8, 10, 14 kHz를 갖는 CW 신호를 사용하였고 수신신호는 500 kHz로 샘플링 되어 각 실험

세트 별로 40핑씩 수신되었다.

Fig 5(a)와 (b)는 각각 펄스길이 2와 5 ms 일 경우 수신기 I에 수신된 잔향음 준위이다. 잔향음 준위는 총

40핑 신호의 앙상블 평균값을 사용하였다. 주파수 6, 8, 10, 14 kHz에 대한 음원준위는 각각 170.8, 176.1, 182.3, 184 dB였으며, 주파수에 따라 음원준위가 증가하였기 때문에 수신된 잔향음 준위도 전반적으로 증가하는 경향을 보였다. Fig. 5(a)에서 3 ms 이전 신호는 송신기에서 수신기로 직접 수신된 신호이며, 3~6 ms에 수신된 신호는 무계추로부터 반사되어 수신된 신호이다. 또한 7~12 ms에 수신된 신호는 수신기 I 보다 상부에 위치한 수신기 및 심도기록계에 의한 산란 신호로 판단된다. 해저면 후방산란신호 분석을 위한 신호구간은 해저면 산란신호가 수신기에 수신되는 시간을 시작으로 해수면 산란신호가 수신기에 도달하기 이전까지를 계산하여 17~38 ms 구간을 후방산란강도 분석에 사용하였다. Fig. 5(b)의 펄스길이 5 ms의 경우에도 해저면 산란신호가 수신되기 시작하는 약 18 ms에서 해수면 산란신호가 수신되는 약 40 ms 신호구간을 사용하였으며, 다른 실험 세트에서도 해저면 후방산란신호가 수신되는 신호구간을 선택하였다. 또한 실험 해역의 하부 지층구조는 단일층으로 판단되었기 때문에, 해저 경계면 하부지층으로부터 수신되는 신호의 간섭은 무시하였다(Fig. 3). 또한 실험세트별로 해저면 산란신호가

수신되는 시간이 변동하였는데 그 이유로는 실험해역의 조석차이로 인해 실험이 진행되는 동안 총 수심이 변동하였기 때문으로 판단된다. 따라서 수심변화에 대한 오차를 보정하기 위하여 3개의 수신기에서 획득한 신호의 다중경로 도달시간을 분석하여, 각 주파수별 실험세트(6, 8, 10, 14 kHz)에 대한 총 수심을 역산하였고 추정된 총 수심은 약 1.6 m 이내에서 변동한 것으로 평가되었다.

III. 후방산란 강도 측정결과 및 모델과의 비교

수신된 잔향음 신호로부터 해저면 후방산란강도를 도출하기 위한 소나방정식은 아래와 같다.^[1]

$$BS(\theta) = RL - SL + 2TL - 10\log A, \quad (1)$$

여기서 BS 는 수평입사각 θ 에서의 해저면 후방산란강도 (dB re $1\mu Pa$ at $1m^2$), SL 은 음원준위 (dB re $1\mu Pa$ at $1m$), RL 은 수신 음압준위 (dB re $1\mu Pa$)이다. 해저면 신호구간을 펄스길이로 나누어 세부구간을 다시 계산한 후, 각 세부구간의 잔향음 신호 평균값을 RL

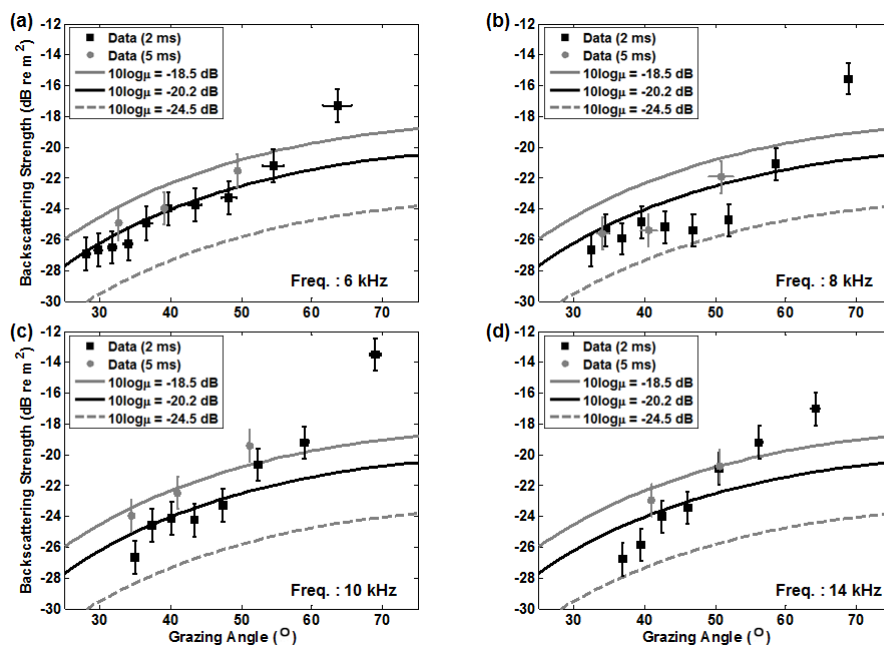


Fig. 6. Comparisons of the measured backscattering strengths with the predictions of Lambert's law for (a) 6, (b) 8, (c) 10 and (d) 14 kHz.

으로 사용하였으며 그 구간에 해당하는 수평입사각을 계산하였다. 또한 TL 은 전달손실로 음원으로부터 해저면까지의 구형분산을 가정하여 계산하였으며, 흡수손실은 주파수 14 kHz에서 약 1.7×10^{-3} dB/m로 예측되었으므로 다른 주파수 대역에서도 무시가능하였다.^[4] A 는 산란단면적이며, 송신기의 빔폭과 펄스길이의 함수로 구성된다. 무지향성 음원에 대한 산란단면적은 원형 환으로 가정하여 La 와 $Choi$ ^[5]에 의해서 제시된 방법을 이용하였다.

Fig. 6은 6, 8, 10, 14 kHz 주파수의 경우에 대하여 각각 펄스길이 2, 5 ms의 음원으로 측정한 후방산란강도를 수평입사각의 함수로 도시하였으며, 수평입사각 $28^\circ \sim 69^\circ$ 범위에서 -27~-13 dB의 후방산란강도 분포를 보였다. 펄스길이 2 ms 경우에는 해저면 신호구간에서 세부구간을 7~10개로 나누어졌으나, 펄스길이 5 ms 경우에는 2~3개의 세부구간으로 나누어졌다. 따라서 펄스길이 2 ms 경우에서 펄스길이 5 ms에 비해 좁은 간격으로 도출되었으며, 또한 펄스길이 변화에 관계없이 수평입사각이 증가함에 따라 후방산란강도도 함께 증가하는 경향을 보였다. 이로부터 해저면 후방산란강도가 펄스길이에 독립적인 것을 확인하였다.

측정된 후방산란강도에 표시되어 있는 수평 및 수직 에러바는 후방산란강도 및 수평입사각의 오차 범위를 의미한다. BT 곱(Bandwidth-Time product)이 1인 음원을 사용하여 획득한 해저면 후방산란 신호는 음파의 진폭이 레일리 분포(Rayleigh distribution)를 갖는 랜덤 신호이며, 이러한 신호의 데시벨(dB) 단위에서의 표준편차는 5.6 dB로 알려져있다.^[6] 본 실험에서 수행된 총 8개의 세트에서 계산한 평균 표준편차는 Fig. 7과 같다. 해저면 신호구간이 시작되기 전에는 직접파, 무계추에 의한 반사신호가 안정적으로 수신되는 것으로 판단할 수 있지만, 해저면 산란 신호구간이 시작되는 시간에서부터 5.6 dB에 수렴하는 특성을 확인할 수 있다.

또한 해상실험 이후 한양대학교 수조(5m×5m×5 m)에서 시스템 오차를 측정하였다. 이 때 송신기, 수신기, 저장장치에 의한 오차들을 모두 포함한 시스템 오차를 측정하기 위하여 해상실험과 동일한 방법으로 실험을 수행하였으며 0.5 dB 이내의 오차를 갖는 것으로 측정되었다. 마지막으로 총 수심 변화에 따른 오차를 보정하기 위하여 각 신호 세트별로 측정된 총 수심의 편차를 이용하여 수평입사각의 오차와 그에 따른 후방산란강도의 편차로 환산하였다.

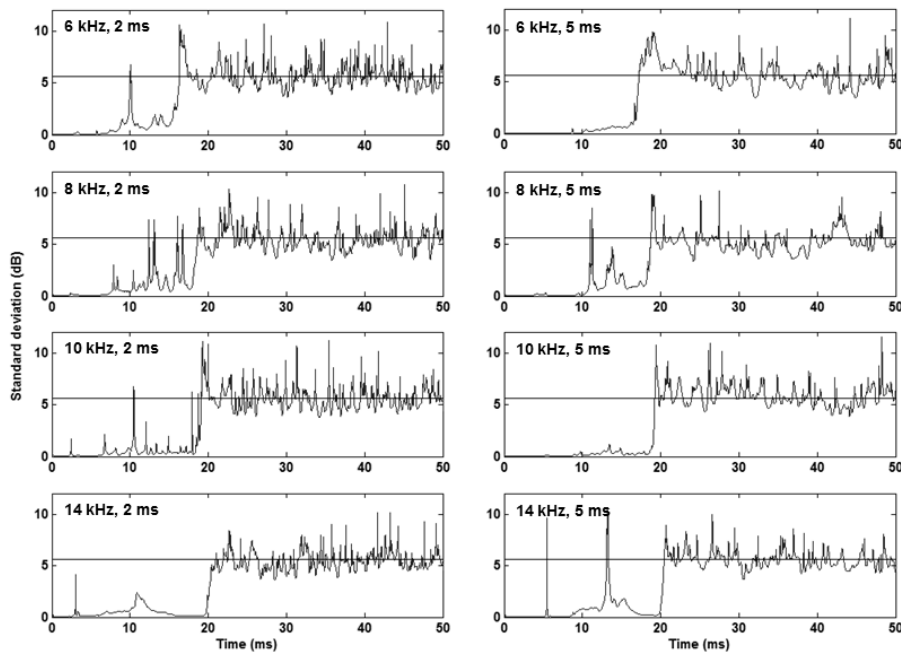


Fig. 7. Standard deviation (expressed in decibels) for bottom backscattering signals for frequencies of 6, 8, 10, and 14 kHz with pulse lengths of 2 and 5 ms.

수평 에러바는 총 수심의 오차로 인한 수평입사각의 오차를 의미하며, 수직 에러바는 측정된 후방산란강도의 표준편차, 시스템 오차, 총 수심 오차를 포함하는 오차 범위이다. 주파수 6 kHz 경우 수평입사각 54.5°와 63.6°에서, 주파수 8 kHz의 경우 수평입사각 50.8°에서 수신된 음향신호의 도달시간으로 계산한 총 수심의 오차범위가 크게 추정되었기 때문에 이에 따른 수평입사각에 대한 오차 범위도 크게 계산되었다.

측정된 해저면 후방산란강도는 람베르트 법칙과 APL-UW 산란모델을 이용하여 비교/분석하였다. 람베르트 법칙 모델은 후방산란강도의 경우, 아래식으로 표현된다.^[7]

$$BS_{LL} = 10\log\mu + 10\log(\sin^2\theta), \quad (2)$$

여기서 θ 는 수평입사각이며, μ 는 경험적으로 도출 가능한 비례상수를 의미한다. Jackson과 Richardson^[8]은 고주파수(20 ~ 140 kHz) 해저면 후방산란강도의 경우 $10\log\mu$ 의 최적 값으로 머드 -19.7 dB, 모래 -20.2 dB, 자갈 -11.7 dB의 값을 제시하였다. 본 논문에서는 해저면의 평균입도가 0.8ϕ 의 크기를 갖는 모래층으

로 평가되었기 때문에 $10\log\mu = -20.2$ dB를 우선 대입하였다(Fig. 6). 측정된 해저면 후방산란강도와 비교하였을 때 주파수 6 kHz, 수평입사각 60° 이하에서는 잘 일치하는 경향을 보였으나 다른 주파수에서는 전반적인 수평입사각에서 9 dB 이내의 범위에서 차이를 나타내었다. $10\log\mu = -24.5 \sim -18.5$ dB의 범위로 모의하였을 때 수평입사각 55° 이하의 측정치를 모두 포함하였다. 람베르트 법칙은 주파수나 해저면의 물리적 특성을 고려하지 않고 경험적 비례상수를 적용하기 때문에 모델 연산이 쉽고 빠른 장점이 있지만, 해저면의 다양한 물리적 특성을 해석하지 못하는 제한점을 가지고 있다.

APL-UW 산란모델은 해저면의 음속(v), 밀도(ρ), 감쇠계수(α), 해저면 하부 체적산란인자(σ_2), 해저면 거칠기 스펙트럼을 입력인자로 사용하여 해저면 후방산란강도를 예측하는 이론적인 모델이며, 해저 경계면에 의한 산란과 해저면 하부 체적에 의한 산란의 합으로 해저면 후방산란강도를 계산한다.^[8] 해저 경계면에 의한 산란은 중·저각의 수평입사각에서는 섭동이론(perturbation theory), 고각의 수평입사각에서는 Kirchhoff 근사법(Kirchhoff approximation)으로 계산한 후 이를 내삽법 처리한다.

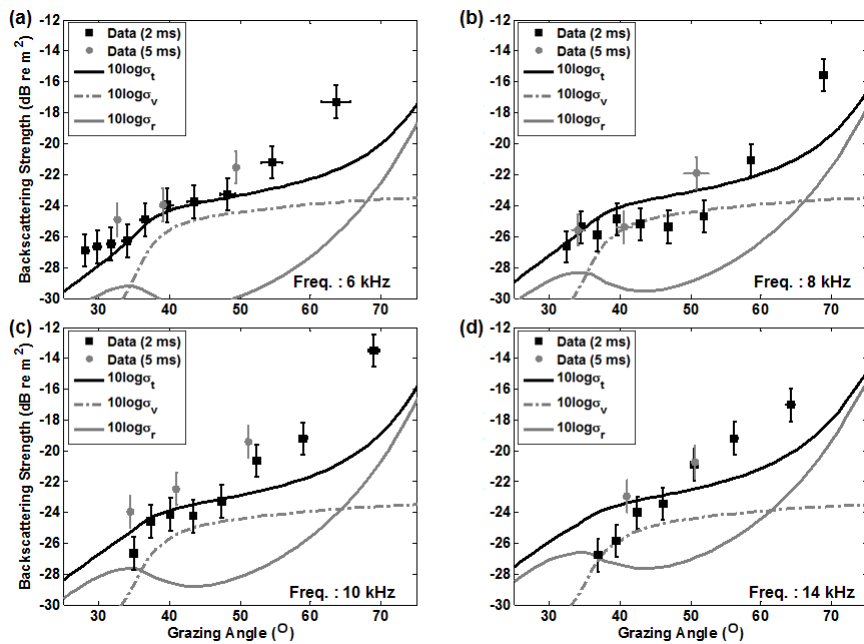


Fig. 8. Comparisons of the measured backscattering strengths with the predictions obtained by APL-UW scattering model for (a) 6, (b) 8, (c) 10 and (d) 14 kHz ($\gamma = 3.25$, $\omega_2 = 0.0061$ cm⁴, $\sigma_2 = 0.002$).

산란모델에 입력인자로 사용되는 표층 퇴적물의 입도크기 및 퇴적물 밀도는 KIOST에서 측정되었으나, 특히 해저면의 하부체적 산란인자는 직접적으로 측정이 어려운 입력인자이기 때문에 APL-UW 산란모델에서 제안한 기준을 적용하여 예측하였다. 그 외의 입력인자($v, \alpha, \gamma, \omega_2$)들은 Reference [8]에서 제시한 회귀 추정식을 이용하여 예측된 후 모델 입력인자로 사용되었다($v = 1881.9$ m/s, $\alpha = 0.456$ dB/m/kHz, $\gamma = 3.25$, $\omega_2 = 0.0061$ cm⁴, $\sigma_2 = 0.002$). Fig. 8은 APL-UW 산란모델을 이용한 예측결과와 측정된 해저면 후방산란강도의 비교를 보여준다. 여기서 회색 점선은 해저면 하부체적에 의한 산란의 모델 예측치, 회색 실선은 해저 경계면에 의한 산란의 모델 예측치이며, 검은색 실선은 두 산란 예측 모델 값의 내삽값이다. 모델로부터 예측된 후방산란강도는 수평입사각 약 30° 이하, 약 65° 이상에서는 해저 경계면에 의한 산란이 상대적으로 우세하며, 수평입사각 약 30°~65° 범위에서는 해저면 하부체적에 의한 산란이 상대적으로 우세한 경향을 보인다. 본 실험에서 측정된 수평입사각 28°~69° 범위에서는 해저 경계면에 의한 산란과 해저면 하부체적에 의한 산란이 후방산란강도에 함께 영향을 미치는 것으로 판단된다. 측정된 해저면 후방산란강도는 수평입사각 50° 이하에서는 모델 예측치와 비교적 잘 일치하였으나, 수

평입사각이 증가할수록 모델결과는 측정결과에 비해 최대 5 dB까지 낮은 경향을 보였다. Fig. 8에서는 퇴적물 밀도를 제외한 지음향인자에 대해 표층 퇴적물의 평균 입자크기를 이용하여 추정된 값을 입력하였기 때문에 부정확한 예측결과를 포함하는 것으로 판단된다. 특히 해저 경계면에 의한 산란이 하부체적에 의한 산란에 비해 상대적으로 우세한 수평입사각 범위(>55°)에서 모델과 측정결과의 차이가 증가하였으며, 이에 대한 심도있는 고찰을 위해서는 해저면 거칠기 스펙트럼의 도출이 필요하다.

본 논문에서는 다중빔음향측심기를 이용하여 획득한 정밀해저지형 자료로부터 해저면 거칠기 스펙트럼 인자(γ, ω_2) 평가를 시도하였다. 해저면 후방산란 실험이 수행된 해역의 정밀해저지형 자료는 0.5 m의 고해상도로 추출되었다. 정밀해저지형 자료로부터 위도/경도 방향으로 총 300개의 1차원 해저면 거칠기 신호를 추출하였으며, 1차원 거칠기 신호는 거리 r 와 수심 z 의 함수로 이루어지며 아래와 같이 표현 가능하다.^[8]

$$z = f(r). \tag{3}$$

1차원 거칠기 신호는 푸리에 변환을 통해 1차원 거칠기 스펙트럼으로 변환되었다. 스펙트럼 분석의 오차를 줄이기 위해 창문함수와 백색화 기법을 적용하

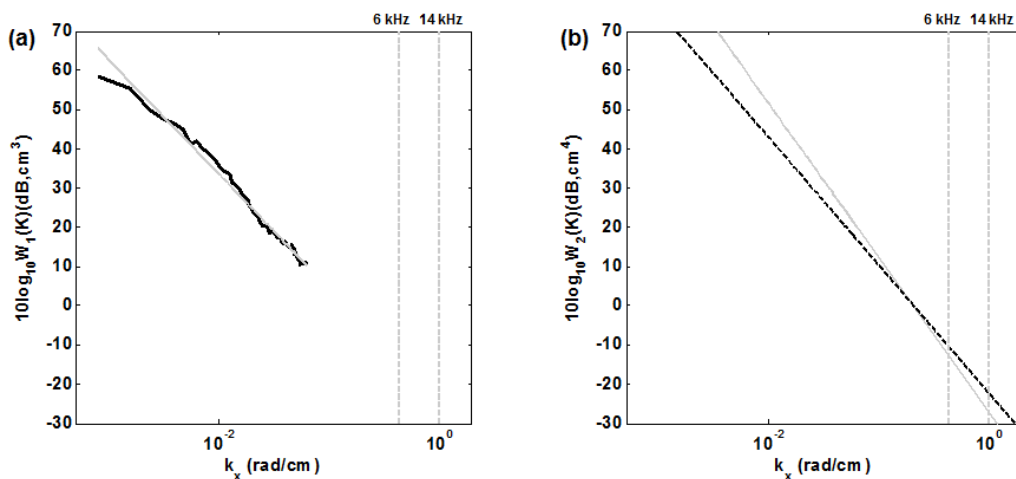


Fig. 9. (a) The estimated roughness spectrum (solid black line) determined by analysis of data from the multi-beam echo sounder with least-squares fit (solid gray line). Dashed gray lines indicate the range of bragg wavenumber for experimental frequency band, (b) comparison between 2D roughness power spectrum (solid gray line) converted from 1D regression curve and that (dashed black line) obtained using the relationship with mean grain size of 0.8ϕ .

였으며,^[9] 주파수 영역으로 변환된 300개의 1차원 거칠기 스펙트럼을 평균하였다[Fig. 9(a)]. 이와 같은 방법으로 계산되는 해저면 거칠기 스펙트럼은 고주파수에서 일반적으로 파워법칙을 따르는 것으로 알려져 있으며 아래와 같이 표현 가능하다.^[8]

$$W(K) = \frac{\omega_1}{K^{\gamma_1}}, \quad (4)$$

여기서 K 는 해저면 거칠기의 공간 파수(spatial wave number)이고, γ_1 와 ω_1 는 각각 1차원 스펙트럼 지수와 1차원 스펙트럼 강도이다. 도출된 1차원 거칠기 스펙트럼은 공간 파수가 증가함에 따라 일정하게 감소하는 경향을 보였으며, 이는 파워법칙을 잘 따르는 것으로 판단 가능하다. 따라서 1차원 해저면 거칠기 스펙트럼은 최소자승법(least squares method)을 이용한 회귀곡선(regression curve)을 도출하여 실험해역의 1차원 해저면 거칠기 스펙트럼 인자(γ_1, ω_1)를 계산하였다[Fig. 9(a)]. 도출된 1차원 해저면 거칠기 인자를 산란 모델에 적용하기 위하여 2차원 해저면 거칠기 인자로 변환하였으며,^[8] 변환된 2차원 거칠기

인자는 각각 $\gamma=3.92, \omega_2=0.002033 \text{ cm}^4$ 이다. Fig. 9(b)의 회색 실선은 해저정밀지형 자료로부터 도출된 2차원 거칠기 스펙트럼이며, 검은색 점선은 퇴적물 입자크기로부터 추정된 2차원 거칠기 스펙트럼이다. 산란모델에 적용되는 공간 파수 범위에서는 해저정밀지형 자료로부터 도출된 거칠기 스펙트럼이 APL-UW 산란모델에서 제안한 거칠기 스펙트럼에 비해 스펙트럼 준위가 약 2~3 dB 낮은 것을 확인할 수 있으며, 이는 해저면 거칠기 성분이 더 적게 분포하는 것을 의미한다. Fig. 9의 회색 점선은 주파수 6, 14 kHz, 수평입사각 30°에서의 브래그 파수(Bragg wave number)이며, 각각 6kHz 일 때 $10^{2.72} \text{ rad/cm}$, 14kHz 일 때 $10^{10.37} \text{ rad/cm}$ 로 계산된다. 브래그 파수는 해저면 후방산란을 계산할 때 필요로 하는 해저면 공간 파수의 범위를 의미하며, 음파의 파수, 음속, 수평입사각의 함수로 구성된다.^[8] 본 실험에서 측정된 해저면 공간 파수는 $10^{-3.1} \sim 10^{-1.2} \text{ rad/cm}$ 의 범위에 분포하였으며, 거칠기 스펙트럼 도출에 사용된 정밀해저지형 자료의 해상도 제한으로 인해 6~14 kHz 중·고주파수 대역에서 필요로 하는 브래그 파수의 범위를 만족시키지 못하였다. 하지만 본 실험에서 측정된 해

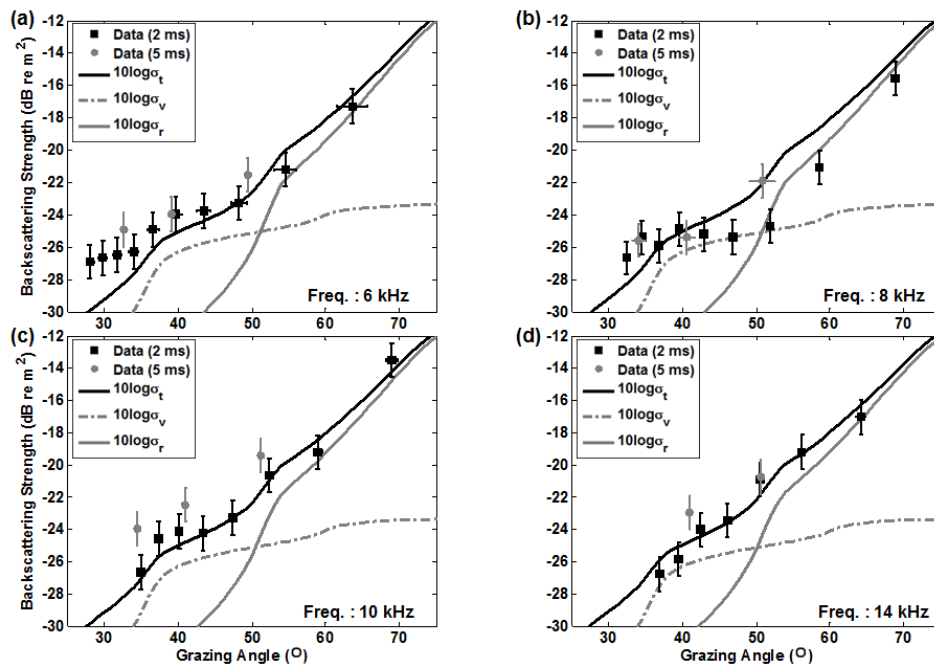


Fig. 10. Comparisons of the measured backscattering strengths with the predictions obtained by APL-UW scattering model for (a) 6, (b) 8, (c) 10 and (d) 14 kHz ($\gamma = 3.92, \omega_2 = 0.0020 \text{ cm}^4, \sigma_2 = 0.002$).

저면 거칠기 스펙트럼은 파워법칙을 잘 따르는 경향을 보이기 때문에 중·고주파수 대역에서의 해저면 후방산란 계산을 위한 공간 파수 범위로의 확장이 가능하다고 가정하였다.

Fig. 10은 추정된 거칠기 스펙트럼 인자를 사용하여 모델링한 결과이다. 정밀해저지형 자료로부터 도출한 거칠기 스펙트럼 인자를 입력변수로 이용한 모델 예측결과는 측정결과와 약 3 dB 이내에서 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 거칠기 스펙트럼 인자의 변화로 인해 약 55° 이상의 수평입사각에서 후방산란강도가 상대적으로 강하게 예측되었으며, 궁극적으로 측정값과 잘 일치하는 결과를 보였다. 본 실험에서 적용된 해저면 거칠기 스펙트럼 도출 방법은 중·고주파수 해저면 후방산란에 적용하기에는 해상도의 제한점을 가지고 있지만, 실험해역의 해저면 거칠기 스펙트럼이 파워법칙을 따르는 것을 가정함으로써 실측값에 잘 부합하는 모델 예측결과를 도출할 수 있었다.

IV. 요약

본 논문에서는 서해 경기만 남부 해역에서 해저면 특성에 따른 음향 특성 파악을 위해 한국해양과학기술원과 한양대학교가 공동으로 진행한 해상실험의 일환으로 주파수 6~14 kHz에 대해 측정된 해저면 후방산란강도 결과를 제시하였다. 실험해역의 지질환경 특성은 KIOST에 의해 획득한 다중빔음향측심기, 스파커 음원, 그랩 자료를 이용하여 분석한 결과 모래로 구성되어 있으며, 표층 퇴적물이 해저면 상부의 강한 조류에 의해 삭박되어 하부 퇴적층이 수층에 드러나 있는 특징을 보였다. 수평입사각 28°~69° 범위에 대하여 해저면 후방산란강도 측정결과는 -27~-13 dB의 분포를 보였다. 전반적으로 해저면 후방산란강도 실험 결과는 수평입사각이 증가할수록 후방산란강도는 증가하는 경향을 보였으며, 람베르트 법칙 모델과의 비교 시 $10\log\mu$ 는 -24.5~-18.5 dB 범위에서 약 60° 이하의 수평입사각에 대해 측정결과를 포함하였다. APL-UW 산란모델과의 비교를 위하여 밀도를 제외한 모델 입력인자들은 표층 퇴적물의 입자크기 0.8 ϕ 에 의해 추정되었다. 모델 예측

결과로부터 측정된 수평입사각 범위에서의 해저면 산란은 해저 경계면에 의한 산란과 해저면 하부 체적에 의한 산란이 함께 영향을 미칠 것으로 예측되었으며, 모델결과는 수평입사각이 증가할수록 측정결과와 비교적 큰 차이를 보였다. 이러한 차이는 표층 퇴적물 입자 크기에 의해 추정된 결과가 실험해역의 환경을 충분히 고려하지 못해 발생하는 차이로 본 논문에서는 정밀해저지형 자료를 이용하여 해저면 거칠기 스펙트럼 결과를 도출하였다. 도출된 거칠기 스펙트럼으로부터 모델의 2차원 거칠기 스펙트럼 입력인자인 γ 와 ω_2 를 구하였으며, 이를 밀도 측정치와 함께 산란모델에 적용하여 실험결과와 비교하였다. 전반적으로 모델 예측결과는 측정결과와 비교적 잘 일치하였다.

기존에 국내에서 진행된 해저면 후방산란 연구는 평균 입자크기만을 이용하여 산란강도를 추정하는 방법이 주로 이루어졌다. 하지만 이러한 방법은 실험해역의 해저지형 특성을 충분히 반영하지 못하기 때문에 해저면 산란특성을 해석하는데 제한적이었다. 본 논문은 실험해역에서 취득한 자료를 바탕으로 해저면 거칠기 특성을 파악하였으며 이를 모델에 적용하여 해저면 산란특성을 이해하고자 하였다. 해저면 거칠기 특성을 고려한 모델 예측결과는 입자크기만을 적용한 모델 예측결과보다 측정결과에 더 잘 일치하는 것을 확인하였다. 따라서 보다 심도있는 해저면 후방산란 특성 해석을 위해서는 퇴적물의 평균 입자크기뿐만 아니라 해저면 구성성분의 물성 및 해저면 거칠기 스펙트럼 그리고 해저면 하부체적의 비균질성 등에 대한 측정이 필요하다.

감사의 글

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

References

1. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound 3rd ed.*, (McGraw-Hill, NewYork, 1983) pp. 237-238.

2. 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).
3. R. L. Folk, "The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature," *J. Geology* **62**, 344-359 (1954).
4. R. E. Francois and G. R. Garrison, "Sound absorption based on ocean measurements: Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption," *J. Acoust. Soc. Am.* **72**, 1879-1890 (1982).
5. H. La and J. W. Choi, "8-kHz bottom backscattering measurements at low grazing angles in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.* **127**, EL160-165 (2010).
6. N. C. Makris, "The effect of saturated transmission scintillation on ocean acoustic intensity measurements," *J. Acoust. Soc. Am.* **100**, 769-783 (1996).
7. K. V. Mackenzie, "Bottom reverberation for 530- and 1030-cps sound in deep water," *J. Acoust. Soc. Am.* **33**, 1498-1504 (1961).
8. D. R. Jackson and M. D. Richardson, *High-Frequency Seafloor Acoustics*, (Springer, New York, 2006) pp. 171-175, 182-192, 237-238.
9. D. Tang, "Fine-scale measurements of sediment roughness and subbottom variability," *IEEE J. Oceanic Eng.* **29**, 929-939 (2004).

▶ 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

▶ 정 섬 규 (Seom-Kyu Jung)



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

저자 약력

▶ 손 우 주 (Wuju Son)



2013년 2월: 한양대학교 이학사
 2013년 2월 ~ 현재: 한양대학교 석사과정

▶ 손 수 욱 (Su-Uk Son)



2008년 2월: 한양대학교 이학사
 2010년 2월: 한양대학교 이학석사
 2015년 8월: 한양대학교 이학박사
 2015년 8월 ~ 현재: 한양대학교 박사 후 연구원