

# 퇴적층 구성 매질 및 표면 형태에 따른 후방산란 강도 측정

## Measurements of Backscattering Strength from Various Shapes of Sediment Surfaces and Layers

김형수\*, 최지웅\*, 나정열\*, 석동우\*  
(Hyung-Soo Kim\*, Jee-Woong Choi\*, Jungyul Na\*, Dong-Woo Suk\*)

\*한양대학교 지구해양과학과 해양음향연구실

(접수일자: 2002년 10월 14일; 채택일자: 2002년 12월 30일)

고주파 (126-kHz) 음향 신호를 이용하여 퇴적층의 구성 매질 및 표면 형태에 따른 산란 신호 변화를 측정하였다. 퇴적층은 구성 매질에 따라 사니질 (sandy mud), 사질 (sand), 자갈 (gravel)의 세가지 경우와 이를 혼합한 경우로 하였으며, 표층 연흔 (ripple) 형태에 따라 연흔과 음파 진행방향이 직각을 이루는 경우 및 평행한 경우를 모의하였다. 평면입사각 변화 및 연흔 구성 형태에 따른 후방산란 강도는 평면입사각에 비례하여 증가하였으며, 연흔 형성 방향과 음파 진행 방향이 이루는 각이 작을수록 삼차원적인 측방산란이 강하게 나타났다. 연흔과 음파가 이루는 각이 증가할수록 후방산란은 증가하였으며, 지음향적 요소 외에도 연흔 형성과 방향에 음파 산란이 강하게 의존함을 알 수 있었다.

**핵심용어:** 해저면 후방산란, 잔향음, 연흔, 해저면 거칠기

**주요분류:** 수중음향 분야 (5.2)

High-frequency (126-kHz) bottom backscattering measurements with various bottom types were conducted at the water tank in Ocean Acoustic Laboratory, Hanyang University. For the purpose of investigating the energy distribution of bottom scattering with various bottom types, the sediment was varied with gravel, sand, sandy mud and mixed bottoms. To examine the anisotropic nature of the scattering due to the orientations of bottom ripple, the footprints were made transverse and longitudinal to the direction of incident wave. The total scattering characteristics are that the larger grazing angles the larger backscattering strengths become and backscattering strengths for a transverse ripple case are higher than those of longitudinal ripple case. Finally, the variations of scattering strength depend mainly on the ripple's orientation.

**Keywords:** Bottom backscattering, Reverberation, Ripple, Bottom roughness

**ASK subject classification:** Underwater acoustics (5.2)

## I. 서론

잔향음이란 해수층의 음파가 매질의 시공간적 변화에 의한 다양한 전파 경로를 거친 후 해수면, 해저면과 같은 경계면에 의해 산란되어 수신되는 음의 총합을 말하며 발생 원인에 따라 해수면 잔향음, 체적 잔향음, 해저면 잔향음으로 구분할 수 있다[1]. 이러한 잔향음을 일으키는 산란 현상 중 음원이 위치한 방향으로 산란되는 것을 후방산란이라 한다. 해저면 잔향음의 생성에 영향을 미치는 요인으

로는 해저면의 거칠기와 퇴적층내의 비균질성을 들 수 있다. 특히 고주파의 경우 퇴적물을 구성하는 입자의 크기에 따라, 즉 조립질로 구성된 퇴적물 (sand, gravel)에서는 경계면 거칠기에 의한 영향을 많이 받으며, 세립질로 구성된 퇴적물 (mud)에서는 체적에 의한 영향을 많이 받는다[2].

Mackenzie는 해저면 산란 강도를 계산하기 위한 경험식으로 람베르트의 법칙 (Lambert's law)을 사용하였으나 [3], 이 경험식은 입사각에 의해서만 결정되는 모델로 해저면 상태에 따른 음파의 산란을 고려하지 못하는 단점이 있다[4]. 이러한 단점을 보완하기 위하여 음파의 파장에 비해 경계면의 거칠기가 작은 경우에는 섭동 (Perturbation) 근사법을 이용하며[5], 경계면 거칠기가 음파의 파장보

책임저자: 김형수 (husems@hanmail.net)  
425-791 경기도 안산시 사1동 1271번지  
한양대학교 지구해양과학과 해양음향연구실  
(전화: 031-400-4233; 팩스: 031-406-6458)

다 훨씬 큰 경우에는 Kirchhoff 근사법을 이용한다[6]. 그러나 실제로 해저면 거칠기는 일정하지 않고, 음파의 파장에 비하여 큰 것과 작은 것이 혼합되어 존재하므로 두 모델 중 한 모델만을 적용하기에는 어려움이 따른다. 이러한 두 모델의 단점을 보완하기 위하여 복합 거칠기 (Composite roughness) 모델이 제시되었으며[7], Jackson 등은 Composite roughness 모델과 해저면내 체적 산란의 영향을 고려한 해저면 산란 모델을 제시하였다[8]. 천해에서 고주파 소나를 이용하여 퇴적층의 구성 성분에 따른 음파의 산란 특성 연구는 Hamilton, Jackson, Stanic, Gensane 등에 의해 이루어졌으며, 국내의 경우 Choi 등에 의해 해저면 거칠기에 따른 양상태 산란 특성에 대한 연구가 이루어졌으나, 퇴적층의 구성 성분에 따른 음파의 산란 특성에 대한 연구는 이루어지지 않았다[9-13]. 따라서 본 논문에서는 구성 성분에 따른 퇴적층과 경계면 형태에 따른 퇴적층의 시료를 제작하여 각각의 경우에 대한 경계면 산란 신호를 획득하고, 후방산란 강도를 계산하여 퇴적층의 구성 성분에 따른 음파의 산란 패턴을 파악하고자 하였다.

## II. 실험 및 분석

본 논문에 사용된 산란 신호 및 자료들은 2001년 4월 한양대학교 해양음향 연구실내 수조에서 실시한 실험으로부터 획득되었다. 퇴적층의 시료를 구성 성분에 따라 여러 가지 형태로 제작한 후 그에 따른 후방산란 신호와 경계면 연흔 (ripple)의 존재 유무에 따른 후방산란 신호의 변화를 측정하였으며, 실험 장소에 대한 환경자료를 얻기 위하여 CTD (SBE-19)를 사용하여 수온을 측정하였고, 음속을 구하였다. 또한 퇴적층 구성 성분의 입도 분석을 통하여 입자의 평균 크기를 결정하였으며, 계산된 입자의 평균 크기

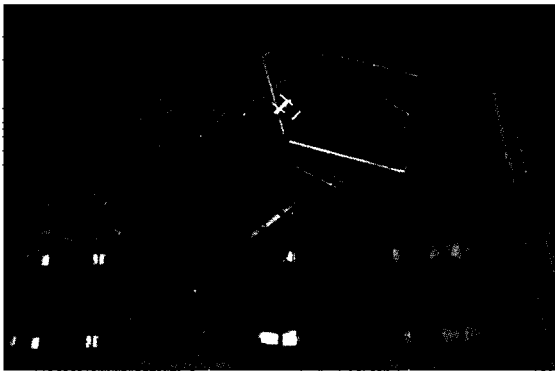


그림 1. 실험 장비 구성도

Fig. 1. Photo and experimental layout of sediment backscattering measurement system.

와 Hamilton 모델[14]을 이용하여 구성 성분에 따른 퇴적층의 지음향 특성 (geoacoustic property)을 파악하였다.

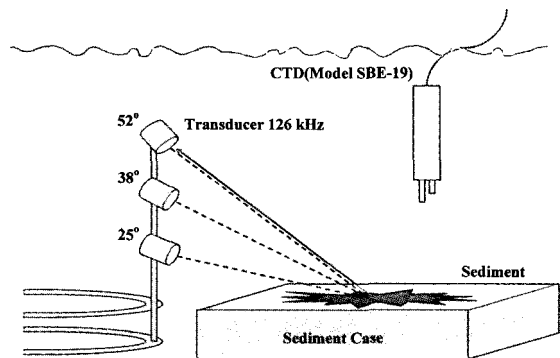
음원 신호는 평면입사각 (grazing angle)을  $25^\circ$ ,  $38^\circ$ ,  $52^\circ$ 로 변화시킨 후 각각의 평면입사각에 대하여 펄스 길이 (pulse length)가 0.1 ms, 0.4 ms인 126 kHz 정현파 신호를 1초 간격으로 50번씩 반복하여 송신되었으며, 퇴적층으로부터 수신된 후방산란 신호는 A/D 변환기를 통하여 저장되었다. 센서와 경계면 간의 거리는 원거리 음장 (far field) 조건을 만족하도록 충분히 유지되었다 (그림 1).

수신된 신호는 대역통과 필터 (band-pass filter)를 이용하여 사용 주파수 대역 이외의 주파수 성분을 제거하였으며, 각각의 신호에 대하여 포락선 (envelope)을 구한 후 수신된 모든 신호를 평균하여 잔향음 준위를 계산하였다.

퇴적구 (sediment case) 재질이 소나 돔에 사용되는 재질로 몰과 임피던스가 유사하여 음파 투과율이 좋은 재질로 구성되어 있음에도 불구하고 산란 신호에서 퇴적구 모서리 부분에 의한 산란 신호가 퇴적층 후방산란 신호보다 강하게 수신되었다. 퇴적층에 의한 음파의 후방산란 강도는 아래의 식 (1)을 이용하여 계산된다[1].

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

여기서  $SS$ 는 후방산란 강도 ( $\text{dB re } 1 \text{ m}^2$ ),  $RL$ 은 잔향음 준위 ( $\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}$ ),  $SL$ 은 음원 준위 ( $\text{dB re } 1 \mu\text{Pa at } 1 \text{ m}$ ),  $TL$ 은 전달손실을 각각 나타내며,  $A$ 는 입사 면적으로 빔폭과 펄스 길이에 의해서 결정된다. 음원 준위는 송신 신호의 진폭을 측정하여 계산하였으며, 잔향음 준위는 수신된 신호로부터 후방산란 신호를 획득하여 계산하였다. 또한 음원으로부터 퇴적물 경계면까지 거리를 계산하여 전달손실을 계산하였으며, 입사 면적은 아래의 식 (2)와 (3)을 이용하여 계산하였다[1].



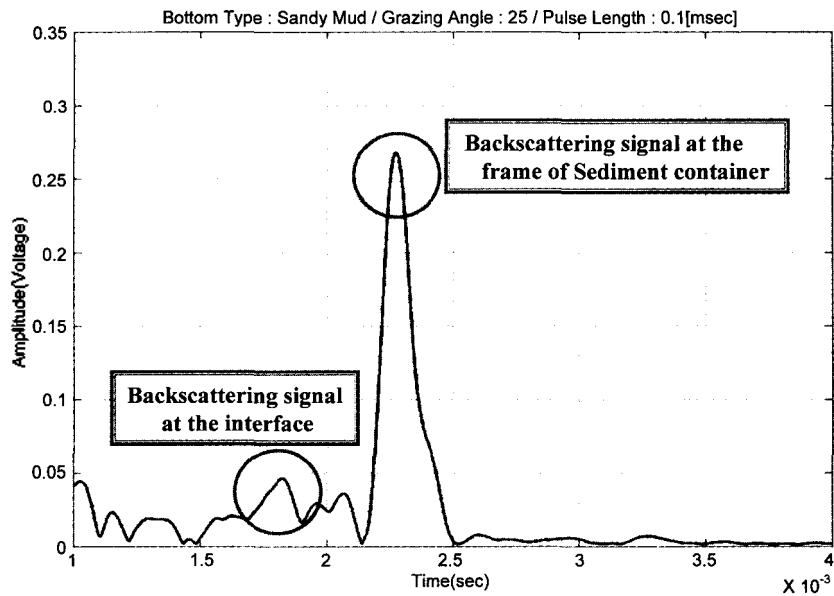


그림 2. 모의 퇴적층 및 퇴적구에 의한 후방산란 신호  
 Fig. 2. Envelope of backscattering signal showing the patterns scattered from sediment and sediment case.

$$A = \frac{c\tau}{2} \phi r \quad (2)$$

$$10 \log \phi = 10 \log y - 12.8 \quad (3)$$

식 (2)에서  $\tau$ 는 펄스 길이,  $c$ 는 음속을 나타내며, 식 (3)에서  $y$ 는 빔폭으로 실험에서 사용된 송신기에서는  $\pm 6^\circ$ 였다.

CTD 자료로부터 계산된 수조 내 수층의 평균 음속은 1448.25 m/s, 평균 수온은 10.22°C로 전 층에서 균일한 분포를 나타내었다. 또한 퇴적층을 구성하고 있는 시료의 특성을 파악하기 위하여 입도 분석을 실시하였다. 채취된 시

료는 탄산염과 유기물을 제거하기 위한 전처리 과정 후 조립질 시료와 세립질 시료로 나뉘었으며, 조립질 시료는 건조시킨 후 기계식 체질기 (Ro-tap shaker)에 의해 약 15분 동안 체질하여  $1\phi$  (퇴적물 입자의 크기를 나타낸 단위임,  $\phi = -\log_2 D$ 로 여기서  $D$ 는 mm로 나타낸 퇴적물 입자의 직경임.) 간격으로 분석되었고, 세립질 시료는 피펫 방법으로  $1\phi$  간격으로 분석되었다. 입도 분석으로부터 획득한 자료는 입도 누적확률분포 곡선상에 나타내져, Folk and Ward (1957)의 그래프 방법에 의해 시료의 조직 변수를 나타내는 평균 입도 (mean), 분급도 (sorting), 왜도

표 1. 입도분석 결과 및 구성 성분 분포  
 Table 1. Distribution of bottom components.

		Sandy Mud	Sand	Gravel
Mean		4.34	1.20	-2.35
Sorting		0.94	0.71	0.62
Skewness		0.09	-0.28	0.09
Kurtosis		2.13	1.14	1.34
Gravel	-4 ~ -2 $\phi$	0%	0.60%	79.20%
Sand	-1 ~ -4 $\phi$	23.27%	98.79%	20.80%
Mud	5 ~ 9 $\phi$	76.73%	0.61%	0%

표 2. 퇴적층의 구성 성분에 따른 물리적 특성  
 Table 2. Average values of sediment geoaoustic properties.

Bottom Type	Mean Size ( $\phi$ )	Porosity (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Velocity Ratio*	Attenuation (dB/m)
Sandy Mud	4.34	55.22	1.77	1.02	8.28
Sand	1.20	32.61	2.17	1.20	5.45

\*: Velocity in Sediment / velocity in water tank at 10.22°C

(skewness), 첨도 (kurtosis)를 구하였으며 각각의 시료에 대한 분석 결과를 표 1에 나타내었다[15]. 사니질 (sandy mud) 시료의 구성 성분은 니질 (mud) 성분이 76.73%, 사질 (sand) 성분이 23.27%로 각각 나타났으며 사질 시료는  $-4 \sim 4 \phi$ 까지의 입자가 99% 이상 분포하였다. 자갈 성분의 시료는 전체가 3 ~ 20 mm의 분포를 보였으며 Wentworth의 척도 (scale)에 의해 자갈 (granules ~ pebbles)로 나타났다[16]. 또한 입도 분석에 의한 결과를 기초로 하여 사니질과 사질 성분의 퇴적층에 대한 자음향 특성을 Hamilton의 방법으로 구하여 표 2에 나타내었다.

### III. 실험 결과

퇴적층에 의한 후방산란 신호는 126 kHz 고주파 음원 신호를 이용하여 입사각과 펄스 길이, 구성 성분 및 연흔 방향을 변화시키면서 측정되었다. 구성 성분에 따른 퇴적층은 각각 사니질, 사질, 자갈로 구성된 경계면과 사질 및 자갈 성분이 층을 이루거나 또는 혼합되어 있는 경우로 제작되었다 (그림 3). 또한 경계면 거칠기에 따른 산란 신호의 변화를 파악하기 위하여 사질 경계면에 대하여 평탄한 면과 연흔이 존재하는 경계면 각각의 후방산란 신호를 비교하였다.

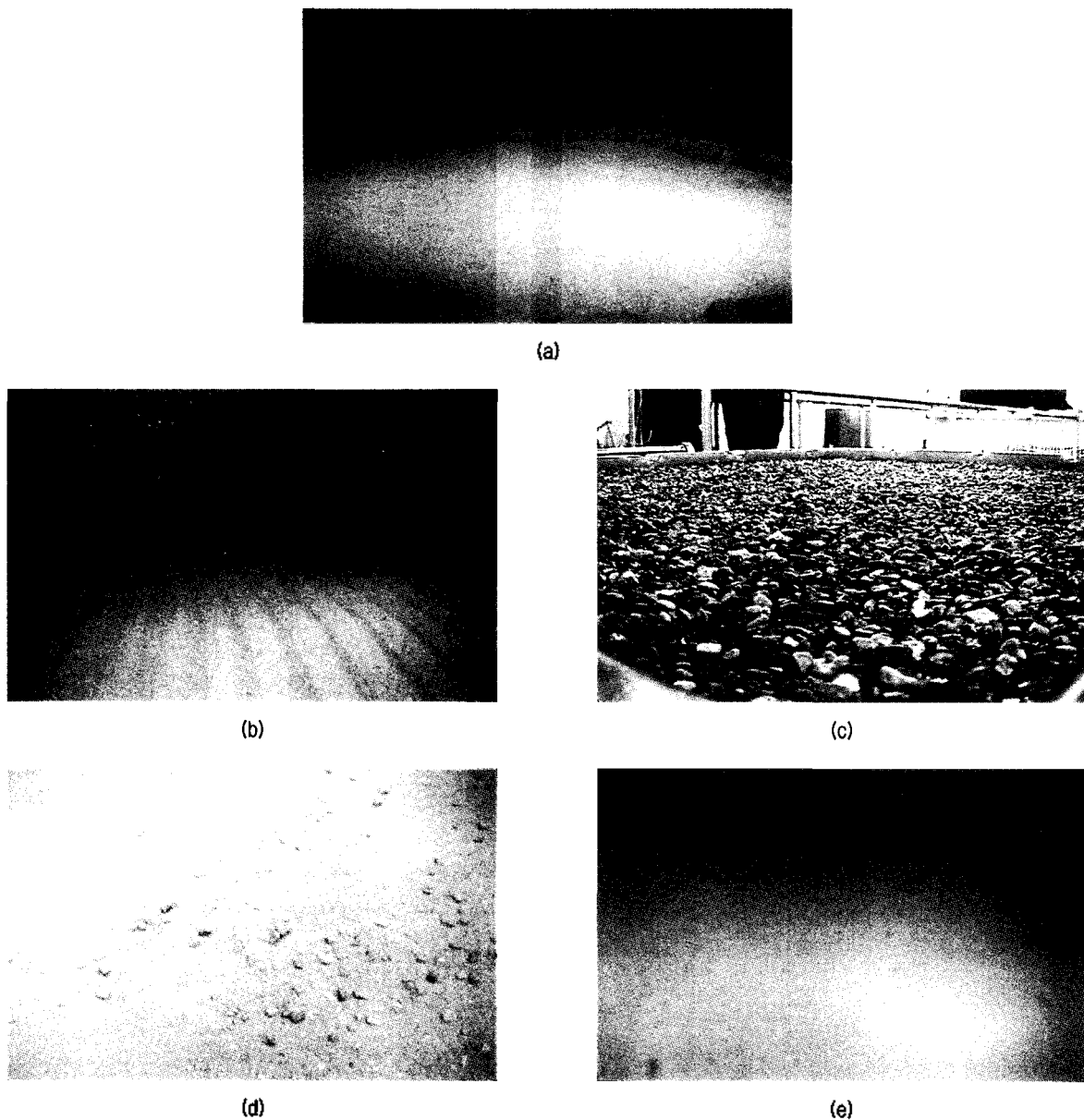


그림 3. 구성 성분에 따른 경계면 상태

Fig. 3. Photographs with various sediment types: (a) Sandy Mud, (b) Sand, (c) Gravel, (d) Randomly mixed bottom, and (e) Layered bottom.

### 3.1. 구성 성분에 따른 신호 분석

그림 4는 사니질 성분으로 구성된 경계면에서의 평면 입사각 변화에 따른 후방산란 신호의 변화를 나타낸 그림이다. CTD 자료에 의한 음속과 센서에서 산란 면적까지의 거리 차를 이용하여 계산한 후방산란 신호의 도달시간은 평면입사각이 25°, 38°, 52°로 변화함에 따라 각각 1.80 ms, 2.04 ms, 2.78 ms로 나타났다. 수신된 신호로부터 후방산란 신호를 구분하기 위하여 후방산란 신호의

도달시간이 포함된 신호 대역에서 가장 큰 첨도 (peak) 값을 구한 후, 구한 첨도 값으로부터  $\pm \lambda/2$ , 즉 펄스 길이만큼의 범위를 후방산란 신호로 분리하였으며, 분리한 후방산란 신호로부터 잔향음 준위를 계산하였다.

음파가 퇴적물의 경계면에 입사되는 면적 (insonified area)은 평면입사각이 25°에서 52°로 증가함에 따라 좁아지게 되며 후방산란 신호 또한 짧은 시간 동안 획득됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 퇴적물이 사질과 자갈로

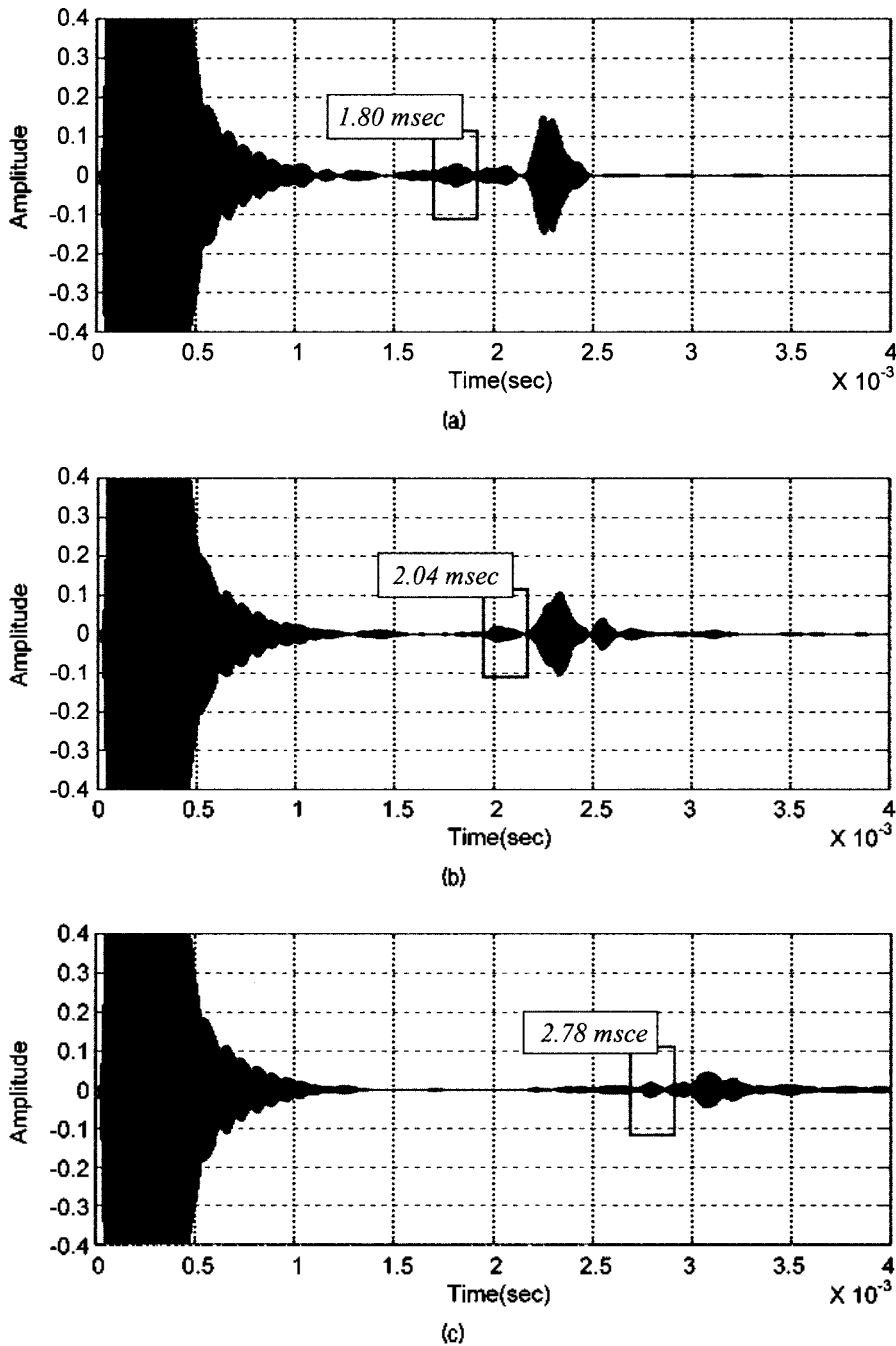


그림 4. 평면입사각 변화에 따른 후방산란 신호의 변화  
 Fig. 4. Backscattering signals for grazing angles of (a) 25°, (b) 38°, and (c) 52°: bottom type - Sandy Mud.

구성되어 있을 경우에도 유사하게 나타나고 있다. 그러나 퇴적물의 경계면이 자갈로 구성되어 있는 경우는 다른 구성 물질로 경계면이 구성되어 있을 때와는 달리 산란되는 신호가 분리되는 현상이 나타남을 볼 수 있다. 이러한 현상은 자갈로 이루어진 경계면이 사니질과 사질로 구성된 경우에 비해 거칠기 때문에 나타나는 현상으로 판단되

며, 아래의 그림 5는 평면입사각이 25° 인 경우로 경계면 거칠기에 따른 산란 신호의 분리 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다.

획득한 신호로부터 계산한 후방산란 강도를 구성 성분과 평면입사각의 변화에 따라 나타내면 그림 6과 같다. 평면입사각이 증가할수록 각 구성 성분에 따른 후방산란

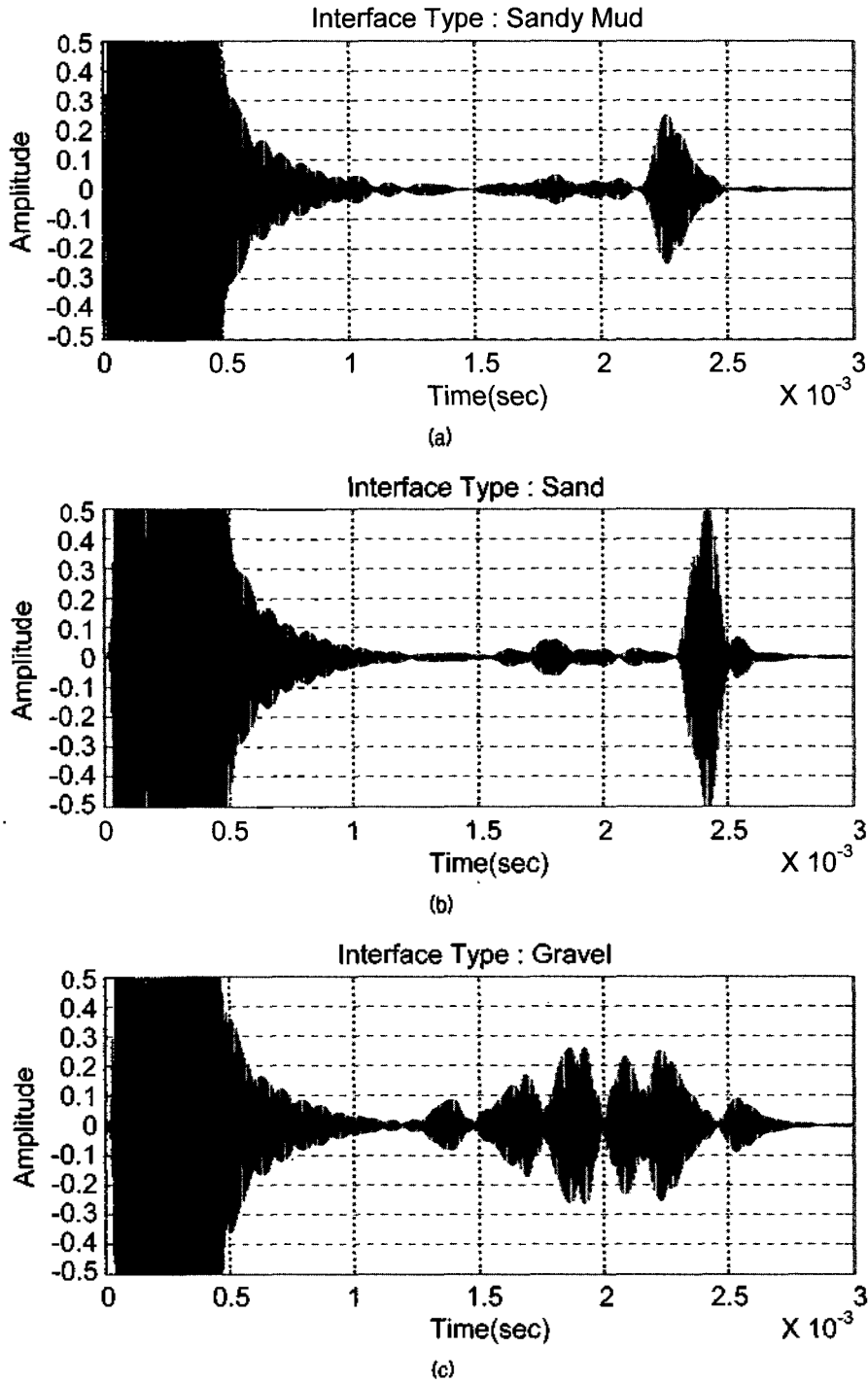


그림 5. 경계면 구성 성분 변화에 따른 후방산란 신호의 변화  
 Fig. 5. Backscattering signals for various interface components: (a) Sandy Mud, (b) Sand, and (c) Gravel.

강도가 증가하고 있으며, 평균 입자 크기가 증가할수록 후방산란 강도도 증가함을 알 수 있다. 이는 입자의 크기가 작은 성분으로 구성되어 있는 경계면 일수록 경계면으로부터 후방산란되는 음파의 양보다 퇴적층 내로 투과되어 손실되는 음파와 반사파가 증가하기 때문이다.

퇴적층을 구성하는 각각의 성분에 대한 평균 입자 크기는 사니질 성분으로 구성되어 있을 경우 4.34  $\phi$ , 사질 및 자갈 성분일 경우 각각 1.21  $\phi$ 와 -2.35  $\phi$ 로 각 구성 성분들간의 크기 차이, 즉 사니질과 사질 성분의 크기 차이와 사질 성분과 자갈 성분의 크기 차이는 약 3  $\phi$ 로 나타났다. 이러한 구성 성분들간의 입자 크기 차이와 각 경계면에서의 후방산란 강도를 비교해 보면, 각 경계면을 구성하고 있는 성분들과 구성 성분들 사이(사니질-사질, 사질-자갈)의 후방산란 강도 차이는 평면 입사각이 증가함에 따라 거의 일정하게 나타나고 있음을 볼 수 있다(그림 6). 경계면의 평균 입자 크기가 증가함에 따라 후방산란 강도가 증가하며 이러한 양상은 경계면이 평탄하였음에도 각각의 퇴적층 구성 성분 크기에 따라 경계면 거칠기에 변화가 나타나기 때문이다. 즉, 앞서 언급한 지음향 요소(표 2) 또한 음파의 산란에 많은 영향을 미치는 요소들이나 각각의 경우 퇴적물을 구성하는 성분에 변화가 없고, 체적 산란보다 경계면 산란이 우세한 구성 성분들이므로 음파 산란은 지음향 요소들에 의한 영향보다는 경계면 거칠기에 의한 영향이 더욱 우세하게 나타났기 때문으로 생각된다.

혼합층의 경우는 사질과 자갈 성분을 3:1 비율로 구성하였으며, 층상 구조의 경우는 자갈층 위에 약 15cm의 사질층을 구성하였다. 이러한 두 경우에 대한 후방산란 강도

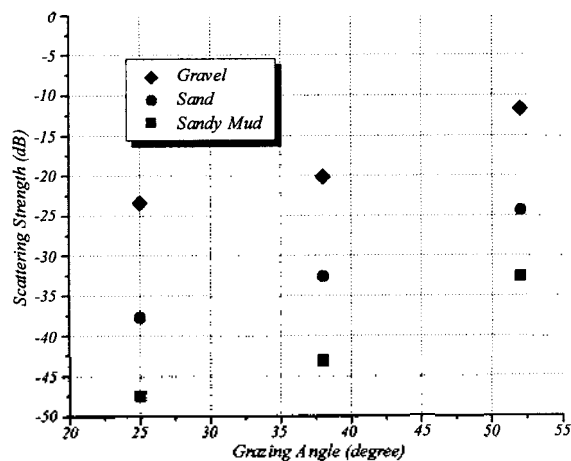


그림 6. 평면입사각 및 구성 성분에 따른 후방산란 강도 변화  
Fig. 6. Backscattering strength for bottom components of Sandy mud, Sand, and Gravel.

또한 평면입사각이 증가할수록 증가하는 경향을 보였으나, 퇴적층 전체가 혼합되어 있는 경우의 후방산란 강도 (mixed)가 층을 이루고 있는 퇴적층에 의한 후방산란 강도 (layered)보다 크게 나타났으며, 평면입사각이 25°인 경우 후방산란 강도 차이는 크게 나타났었다(그림 7). 이러한 현상은 구성 성분이 층을 이루는 경우 퇴적층의 표층은 사질 성분만 분포하게 되며 퇴적층 하부의 체적 산란에 비해 경계면 산란이 우세한 사질 퇴적층에서는 사질과 자갈 성분이 혼합되어 있는 경계면보다 평균 입자 크기가 작기 때문에 작은 후방산란 강도 값을 나타냈을 것으로 생각된다. 또한 평면입사각이 작은 경우 (25°) 후방산란 강도는 평면입사각이 다른 두 경우 (38°, 52°)와 비교했을 때와는 차이가 많이 나타남을 알 수 있는데, 평면입사각이 25°인 경우는 Hamilton의 지음향 모델과 Snell의 법칙을 이용하여 계산한 경계면에서의 임계각 (critical angle) 33°보다 작은 각도로서 경계면 거칠기의 영향만이 산란 요소로서 작용했기 때문이다. 그러나 평면입사각이 38°, 52°인 두 경우 모두 임계각보다 큰 각도로서 경계면에 의한 산란뿐만 아니라 모의한 퇴적층 안으로 음파의 투과가 일어나므로 전 층이 혼합된 경우와 층을 이룬 경우 모두 경계면에서의 영향과 체적에 의한 영향이 작용했을 것으로 판단된다. 일반적으로 사질의 경우 니질에 비해 퇴적층 내에 투과된 후 재산란되는 체적 산란 영향보다는 경계면 산란이 우세하다. 본 실험에서도 사질층 하부에 자갈층이 존재할 경우 하부 자갈층에 의한 산란 영향은 미비하며 이러한 경향은 사질만으로 구성된 경우와 층상 구조의 경우가 비슷한 산란 강도를 보이는 것으로 확인할 수 있다(그림 6, 7). 그러나 가장 높은 평면입사각인 52°

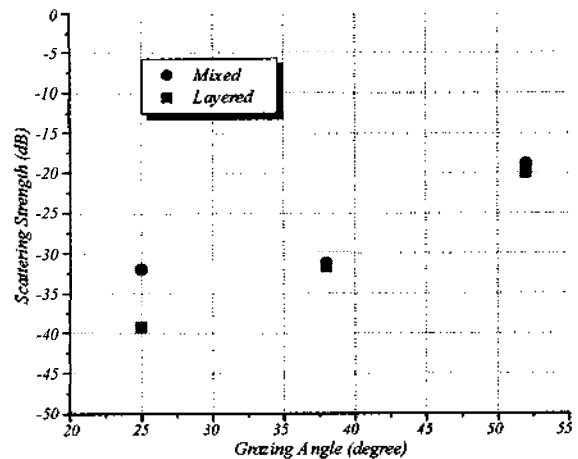


그림 7. 퇴적층 변화에 따른 후방산란 강도 비교  
Fig. 7. Comparison of backscattering strength for the layered bottom and randomly mixed bottom.

에서는 층상 구조에서의 산란 강도가 사질 구조의 산란 강도보다 크며 이러한 원인은 평면입사각이 높아질수록 투과되는 양도 증가하므로 이에 따른 하부 퇴적층의 산란이 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.2. 연흔 (ripple) 방향에 따른 신호 분석

사질 성분으로 경계면을 구성하여 연흔의 유무와 방향에 따른 후방산란 강도의 변화를 측정하였다 (그림 8). 후방산란 신호의 산란 강도는 음파 진행방향과 경계면의 연흔 방향이 직각을 이룰 때 (transverse ripple bottom) 가장 큰 후방산란 값을 나타냈으며, 음파 진행방향과 연흔 방향이 평행할 경우 (longitudinal ripple bottom) 직각을 이루는 경우에 비해 8 ~ 10 dB 낮은 후방산란 값을 나타내고 있다. 또한 연흔 방향이 음파 진행방향과 약 45° 기울어져 있는 경우 (azimuthal ripple bottom) 산란 강도는 평탄한 경계면에서의 산란 강도와 유사한 값을 나타내고 있으며, 연흔 방향이 음파의 진행방향과 직각을 이루고 있는 경우와 평행한 경우에 비해 상대적으로 낮은 산란 강도값을 나타내고 있다 (그림 9).

Choi 등은 본 실험과 유사한 연흔 방향에 따른 전방, 측방 산란 패턴 측정을 통하여 음파 진행 방향과 연흔이 직각을 이루고 있는 경계면에서는 전방산란의 영향이 크

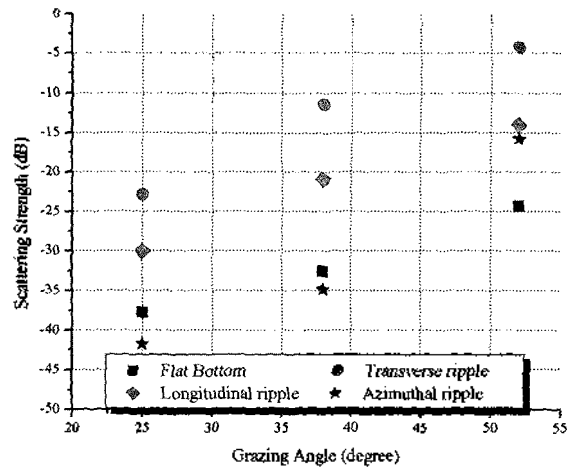


그림 9. 연흔 방향에 따른 후방산란 강도 변화  
Fig. 9. Comparison of backscattering strength with different bottom types.

고 측방 산란의 영향은 상대적으로 작아지며, 연흔이 음파의 진행방향과 평행하게 존재하는 경계면에서는 전방 산란보다 측방산란이 강하게 일어남을 확인하였다[13]. 따라서 Choi의 결과와 본 실험으로부터 음파 진행 방향과 연흔이 직각을 이룰 경우 전방산란과 후방산란이 강하게 일어나며, 즉 음원과 경계면이 이루는 이차원면에서의 산란이 강하게 일어나며 음파 진행 방향과 연흔이 평행하

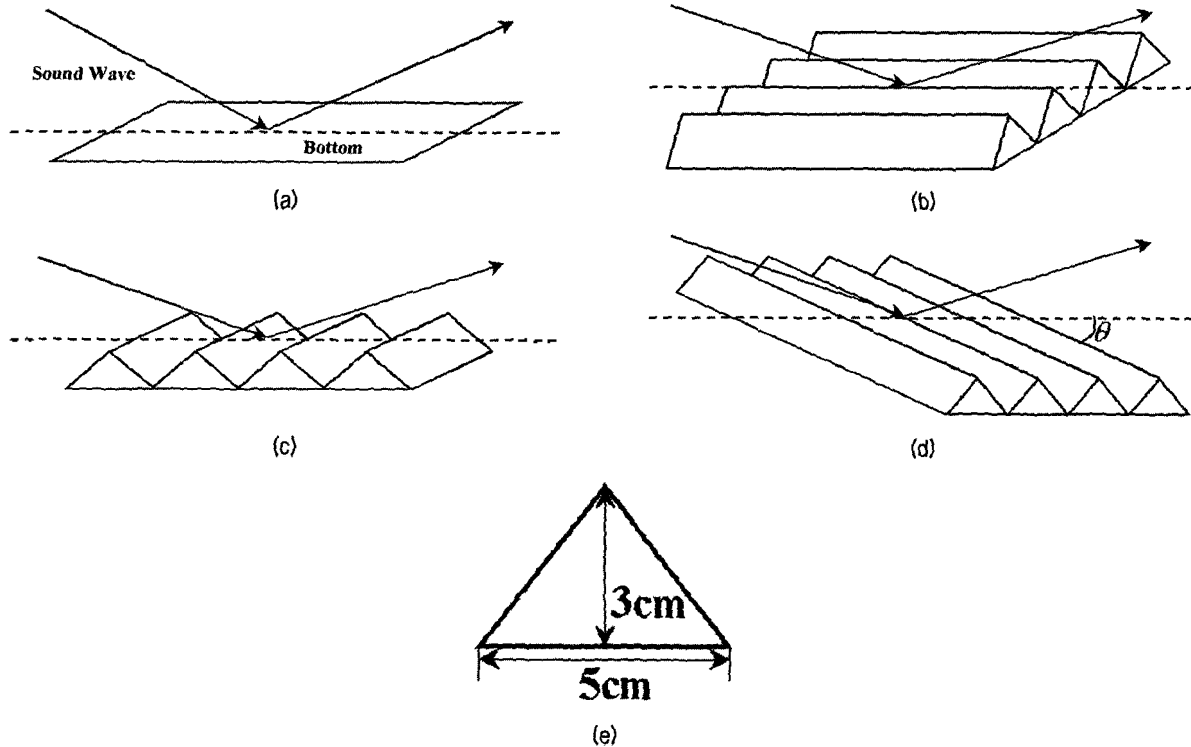


그림 8. 연흔의 형태 및 단면도  
Fig. 8. Schematic diagram of bottom roughness cases: (a) Flat bottom, (b) longitudinal ripple bottom, (c) transverse ripple bottom, (d) 45° ripple bottom, and (e) single ripple cross section dimensions.



게 존재하는 경우 전방 산란에 비해 측방 산란 영향이 증가하면서 평탄한 면에 비해서는 후방산란 또한 8 ~ 12 dB 증가함을 알 수 있다. 45°로 기울어진 연흔이 존재할 경우 연흔의 영향으로 전 방향 (omni-direction)에 대한 산란이 우세하게 일어나며, 이로 인하여 평탄한 면에 비해 후방산란이 적게 나타날 것이다. 이러한 결과는 그림 9에서와 같이 연흔이 존재할 때의 산란 강도가 평탄한 면에서의 산란 강도에 비해 적게 나타나는 것으로 알 수 있다. 그러나 평면입사각이 52°인 경우 연흔이 존재할 때의 산란 강도는 다른 두 경우와 반대의 결과가 나타나는데, 이는 연흔 골 (trough) 내부에서의 음파 다중 산란에 의한 영향으로 생각된다.

#### IV. 결론

실험실내 수조에서 퇴적층 성분 변화와 경계면 거칠기 변화가 음파 산란에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험을 실시하였다. 지향성 음원을 이용하여 평면입사각 변화에 따른 후방산란 신호를 획득하였으며 두 가지 매질 성분이 혼합 또는 층을 이루고 있는 경우에 대한 실험도 병행하여 실시하였다. 구성 성분 변화에 따른 후방산란 강도는 구성 성분의 평균 입자 크기가 커질수록 증가하는 경향을 나타냈으며 또한 평면입사각이 증가함에 따라 증가하였다. 구성 성분들간의 평균 입자 크기 차이 (자갈-사질 간, 사질-사니질 간)는 약 3배로 비슷하게 나타났으며, 각각의 평면입사각에 대하여 입자 크기 변화에 따른 산란 강도 변화량은 거의 비례하는 경향을 나타냈다. 사질 성분 매질과 자갈 성분 매질이 혼합되어 있는 경우에 대한 후방산란 강도 변화 또한 평면입사각이 증가함에 따라 증가하는 결과를 나타내었으며, 두 성분이 층을 이루는 경우보다 전 층이 혼합되어 있는 경우 더 높은 산란 강도값을 나타냈다. 이러한 결과는 층을 이루고 있는 경계면에서는 사질 성분에 의한 산란이 우세하게 일어나지만, 혼합되어 있는 경우 사질 성분뿐만 아니라 자갈 성분에 의한 산란 영향이 크게 나타나기 때문이다. 즉 평면입사각이 25°일 때 두 경우에 대한 경계면에서의 산란 강도는 평면입사각이 큰 경우에 비해 차이가 많이 나타나고 있음을 볼 수 있는데 이는 임계각 (33°)보다 작은 각도 (25°)에서는 전반사가 주로 일어났기 때문에 두 경우 모두 경계면 거칠기 영향이 뚜렷이 나타난 것이며 평면입사각이 임계각보다 큰 경우 (38°, 52°)는 경계면에서의 영향과 음파

가 퇴적층 내로 투과한 이후의 영향이 함께 나타남으로 인해 산란 강도값이 큰 차이를 보이지 않았다.

퇴적층 표면 형태에 따른 후방산란 강도는 음파 진행 방향과 연흔 (ripple)이 직각을 이루고 있는 경우, 평행한 경우 및 연흔이 45°로 기울어져 있는 경우 후방산란 강도를 계산하였다. 구성 성분 변화에 따른 후방산란 강도 변화와 마찬가지로 경계면 거칠기 변화에 의한 후방산란도 평면입사각이 증가할수록 후방산란 강도 또한 비례하여 증가하였으며, 거칠기 변화에 따른 후방산란 신호 변화는 연흔 형성 방향과 음파 진행 방향 변화에 따라 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 음파 진행 방향과 연흔이 직각으로 형성되어 있는 경우 가장 큰 후방산란 강도를 나타내는데 이는 다른 경우에 비해 반사되는 음파의 양도 많지만 후방산란되어 수신되는 음파의 양 또한 많음을 의미한다. 연흔이 음파 진행 방향과 평행하게 형성되어 있는 경우의 경계면에서는 이차원적인 전방산란, 후방산란보다 삼차원적인 측방산란이 강하게 나타나므로 센서방향으로의 후방산란이 상대적으로 작아짐을 알 수 있다. 또한 연흔 형성 방향이 음파 진행 방향과 평행한 경우 산란 강도는 약 45°의 기울기를 가지고 기울어져 있는 연흔의 경우보다 큰 산란 강도값을 갖는다. 이러한 결과들도 음파의 산란이 연흔 형성 방향에 강하게 의존하고 있음을 의미한다.

#### 참고 문헌

1. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3<sup>rd</sup> ed, New York, McGraw-Hill, 1983.
2. D. R. Jackson and K. B. Briggs, "High-frequency bottom backscattering : Roughness versus sediment volume scattering," *J. Acoust. Soc. Am.*, **92**, 962-977, 1992.
3. K. V. Mackenzie, "Bottom reverberation for 530- and 1030-cps sound in deep water," *J. Acoust. Soc. Am.*, **33**, 1498-1504, 1961.
4. 최지웅, 나정열, 석동우, 오선택, 박정수, "천해에서의 고주파 해저면 후방산란강도 측정," 한국음향학회 하계학술발표대회 논문집, **18** (1(s)), 198-201, 1999.
5. E. I. Thorsos and D. R. Jackson, "The validity of the perturbation approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum," *J. Acoust. Soc. Am.*, **86**, 261-277, 1989.
6. E. I. Thorsos, "The validity of the Kirchhoff approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum," *J. Acoust. Soc. Am.*, **83**, 78-92, 1988.
7. B. F. Kuryanov, "The scattering of sound at a rough surface with two types of irregularity," *Sov. Phys. Acoust.*, **8**, 252-257, 1963.
8. D. R. Jackson, D. P. Winebrenner and A. Ishimaru, "Appli-

- cation of the composite roughness model to high-frequency bottom backscattering," *J. Acoust. Soc. Am.*, **79**, 1410-1422, 1986(a).
9. E. L. Hamilton, "Compressional-wave attenuation in marine sediments," *Geophysics*, **37**, 620-646, 1972.
10. D. R. Jackson, "High-frequency bottom backscatter measurements in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.*, **80**, 1188-1199, 1989.
11. S. Stanic, K. B. Briggs, P. Fleischer, W. B. Sawyer, and R. L. Ray, "High-frequency acoustic backscattering from a coarse shell ocean bottom," *J. Acoust. Soc. Am.*, **80**, 125-136, 1989.
12. M. Gensane, "A statistical study of acoustic signals backscattered from the sea bottom," *IEEE J. Oceanic Eng.*, **14**, 84-93, 1989.
13. J. W. Choi, J. Na, and W. Seong, "240-kHz bistatic bottom scattering measurements in shallow water," *IEEE J. Oceanic Eng.*, **26**, 54-62, 2001.
14. E. L. Hamilton and R. T. Bachman, "Sound velocity and related properties of marine sediments," *J. Acoust. Soc.*

*Am.*, **72**, 1891-1903, 1982.

15. 박용관, 해양지질학 및 퇴적학 실험, 집문당, 7-59, 1982.

16. Richard A. Davis Jr, *Depositional System*, 2<sup>nd</sup> ed, New Jersey, Prentice Hall, 1992.

---

## 저자 약력

---

### ◆ 김 형 수 (Hyung-Soo Kim)

1999년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 (이학사)

1999년 3월 ~ 2001년 8월: 한양대학교 지구해양과학과 대학원 (이학석사)

2001년 9월 ~ 2002년 2월: 한국해양연구소 극지부

\* 주관심분야: 수중음향

### ◆ 최 지 웅 (Jee-Woong Choi)

한국음향학회지 제21권 제8호 참조

### ◆ 나 정 열 (Jungyul Na)

한국음향학회지 제21권 제8호 참조

### ◆ 석 동 우 (Dong-Woo Suk)

한국음향학회지 제21권 제8호 참조