

주파수 종속성을 갖는 고주파 해저면 반사손실 모델

Frequency Dependence of High-Frequency Bottom Reflection Loss Model

박 순 식*, 조 진 석*, 윤 관 섭*, 나 정 열*, 석 동 우*, 주 진 용**
(Soon-Shik Park*, Jinsuk Cho*, Kwan-Seob Yoon*, Jungyul Na*, Dong-Woo Suk*,
Jin-Yong Joo**)

*한양대학교 지구해양학과와 해양음향연구실, **에스브이(주)

(접수일자: 2004년 4월 1일; 수정일자: 2004년 6월 8일; 채택일자: 2004년 7월 6일)

수층과 사질 퇴적층이 이루는 경계면이 평탄할지라도 고주파수 (30 ~ 120 kHz) 음파의 반사손실은 퇴적물의 입도와 입사파의 파장에 따라 거친 경계면에서의 반사 효과를 갖게 된다. 경계면 거칠기 영향은 음향학적 거칠기 (acoustical roughness, g_n)로 표현하며 사질 퇴적물의 경우 $g_n \sim O(1)$ 이고 주파수에 따른 종속성을 가진다. 따라서 입도분포에 따른 반사손실의 편차 (deviation)와 주파수에 따른 종속성을 포함하는 개선된 해저면 반사손실 모델 (HYBRL 모델, Hanyang University Bottom Reflection Loss model)을 제안한다. 그리고 주파수 종속성과 해저면 물성이 갖는 편차를 포함하는 반사손실 모델을 검증하기 위해 수조실험과 해상실험을 실시하였다. 수조실험 및 해상실험에서 측정된 해저면 반사손실 결과 사질 퇴적물에서 모델의 특성을 잘 반영한다

핵심용어: 해저면 반사손실, HYBRL 모델, 입도분포, 음향학적 거칠기

투고분야: 수중음향 분야 (5.2)

The High-frequency (30 ~ 120 kHz) bottom reflection loss at rough water-sediment interface is affected by the grain size distribution of the sediments. The roughness of the bottom surface is represented by "acoustical roughness, g_n ". The grain size of sandy sediments is $g_n \sim O(1)$ and the dependence as a function of frequency. We suggest the modified bottom reflection loss model (HYBRL model, HanYang university Bottom Reflection Loss model) that include in the deviation of the reflection loss as a function of the grain size distribution and frequency dependence. And bottom reflection loss model of frequency dependence and deviation of bottom properties is verified by water tank and field experiments.

Keywords: Bottom reflection loss, HanYang university Bottom Reflection Loss model, Grain size distribution, Acoustical roughness

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.2)

I. 서론

수층과 퇴적층이 이루는 경계면에 입사한 음파는 반사와 산란 및 퇴적층 내로 투과한다. 본 논문에서 사용하는 주파수 대역 (30 ~ 120 kHz)의 경우 해저 퇴적물의 감쇠손실 α ($\alpha = kf^n$, k 는 상수, f 는 주파수 (kHz), n 은 주파수의 지수)는 20 ~ 60 dB/m이며 매질 내로 투과 현상이 현저히 낮다. 따라서 투과 현상에 대해서는

고려치 않으며, 경계면에서의 임피던스 (impedance)와 거칠기 영향에 의한 반사 및 산란 영향만 고려한다 [1-4].

Brekhovskikh 와 Lysanov[5]에 따르면 해저면은 해양에서 거친 경계면으로 작용하며 이것을 레일리 안자 (Rayleigh parameter)로 표시하였다. 즉 거칠기를 갖는 경계면의 경우 입사하는 음파의 파장에 대해 거칠기의 크기 $k\sigma$ (σ 는 거칠기의 제곱근 평균(RMS) 편차)를 결정하는 것이 중요하다. 일반적으로 $k\sigma \ll 1$ 인 경우 수직 입사 음파의 반향 (acoustic echo)은 코히어런트이고 진폭은 반사계수에 의해 결정된다. $k\sigma \gg 1$ 인 경우 코히어런트 반향의 진폭은 감소하며 거친 경계면으로부터 반향

책임저자 : 조 진 석 (chojs@ihanyang.ac.kr)
426-791 경기도 안산시 상록구 사1동 1271
한양대학교 지구해양학과와 해양음향연구실
(전화: 031-400-4233; 팩스: 031-502-6068)

되는 신호의 분포는 가우스 ($k\sigma \ll 1$) 분포와 레일리 ($k\sigma \gg 1$) 분포를 보인다.

Chotiros [6]는 수직 입사 음파를 이용하는 측심기의 음파 반사 연구에서 해저면으로부터 음의 반향을 수층과 퇴적층이 이루는 해저면의 반사로부터 기인한 코히어런트 성분 (coherent component)과 해저면 거칠기의 산란으로부터 기인한 랜덤 성분 (random component)으로 나누었다. 그리고 해저면 거칠기를 가우스 분포로부터 기인한 공간 상관 함수로서 모델화 하였으며 소오나의 빔폭 (beamwidth), 파면 곡률 (wavefront curvature) 및 거칠기의 국소 기울기 (local slope)의 효과를 반영하였다.

Medwin 와 Clay[7]는 경면반사 (Specular reflection)를 경계면의 입피턴스와 거칠기 영향에 의해 고정된 위상 관계를 갖는 코히어런트 성분과 랜덤한 위상 관계를 갖는 인코히어런트 성분으로 구분하였다. 이때 코히어런트 성분은 제곱근 평균 높이와 경계면 거칠기의 확률밀도 함수 (PDF, Probability Density Function)에 의존하며 인코히어런트 성분은 경계면의 이원적 통계 함수와 실험 형태에 의존한다. 또한 음향학적 거칠기 g_R ($4k^2 h^2 \cos^2 \theta$, k 는 파수, h 는 제곱근 평균 높이, θ 는 입사각)을 $g_R \gg 1$, $g_R \ll 1$ 으로 이분법적 기준으로 분류하여 $g_R \sim O(1)$ 과 같이 모호한 경우에 대해서는 내삽법(interpolation) 추정 외에 상세한 고려가 없었다.

따라서 본 논문에서는 경계면을 구성하는 입도가 가질 수 있는 거칠기의 영향과 이러한 거칠기 영향에 의해 주파수 30 ~ 120 kHz 대역에서 나타나는 반사손실 변화 양상을 주파수 종속성의 관점에서 살펴보고자 한다. 즉 기존 연구의 수조 실험실 실험 결과를 바탕으로 이론적 분석과 개선된 해저면 반사손실 모델의 제시 및 수조 실험 결과와 해상 실험을 통한 검증 등을 통해 입도분포에 의해 나타나는 주파수 종속성을 확인하였다.

II. 해저면 반사손실 모델

박 등은 수조 실험에서 수평입사각 및 주파수 증가에 따른 반사손실 증가 현상을 연구하였다 [1-4]. 본 논문에서 다루는 30 ~ 120 kHz 대역의 주파수는 사질 퇴적물의 입도와 제곱근 평균 높이를 비교하면 레일리 인자 ($2k\sigma \cos \theta$)가 $O(1)$ 을 갖게 된다.

Tolstoy와 Clay는 음향학적 거칠기 $g_R \gg 1$ 인 경우 해저면은 음향학적으로 거친 경계면이라 하며 주파수에 대한 영향이 없는 것으로, $g_R \ll 1$ 인 경우는 해저면이 음향학적으로 완만한 경계면이라 하며 주파수에 대한 영향을 고려하였다. 그리고 $g_R \gg 10$ 인 경우는 고주파 한계라고 정의하며 주파수에 대한 영향이 없는 것으로 간주하였다[8]. 그러나 실험 및 측정에서 얻은 값에서 그 사이의 임의의 값을 추정시 $g_R \gg 1$, $g_R \ll 1$ 경우에 이분법적으로 구분하며 $g_R \sim O(1)$ 인 경우에 대해서는 내삽법으로 추정하는 등 세부적인 고려가 없었다. 그러나 고주파수에 대한 사질 퇴적물의 음향학적 거칠기 g_R 을 계산해 본 결과 $g_R \sim O(1)$ 에 해당한다 (그림 1). 이것은 내삽법으로 간단히 정의하기에는 많은 오류를 포함할 수 있다.

고주파수 대역에서는 사질 퇴적물로 구성된 해저면은 경계면이 평탄할 지라도 입사파의 파장에 따라 거친 경계면으로 고려하여야 한다. 이 경우 반사는 수평 입사각에 따른 해저면 거칠기의 확률밀도 함수와 평균 제곱근 높이에 의존한다. 즉 해저면의 거칠기는 제로 평균으로부터 평균제곱근 편차를 의미하며, 입사파와 반사파가 서로 고정 위상 관계인 코히어런트 성분과 랜덤한 위상 관계인 인코히어런트 성분으로 구성된다. 그리고 코히어런트 성분은 평균제곱근 높이와 해저면 거칠기 확률밀도 함수에 의존하며 인코히어런트 성분은 이원적 통계 함수와 실험 배치에 의존한다. 그러나 경사를 갖지 않는 사질 퇴적물로 구성된 해저면에서 퇴적물의 입도분포에 의

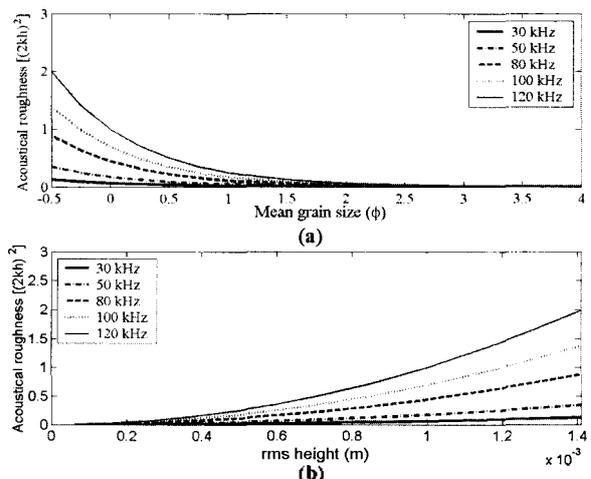


그림 1. 주파수별 음향학적 거칠기
 (a) 평균입도에 따른 음향학적 거칠기
 (b) 제곱근 평균 높이에 따른 음향학적 거칠기
 Fig 1. Acoustical roughness based on various frequencies.
 (a) Acoustical roughness based on the mean grain size.
 (b) Acoustical roughness based on the RMS heights.

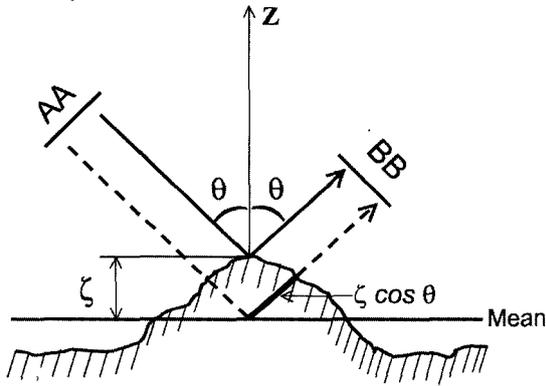


그림 2. 평균 해수면과 거친 해수면에서의 음파의 전달 경로 차이
 Fig 2. Path differences for specular scatter from a typical horizontal facet of a rough surface.

한 제곱근 평균 높이는 코히어런트 성분에 비해 인코히어런트 성분이 매우 작아 무시가능하므로 코히어런트 성분만으로 해저면의 반사 특성을 표현할 수 있다.

그림 2와 같이 거친 경계면에 입사하는 정현파 (CW) 의 평면파 성분 AA를 고려하자. 모든 경계면에서의 임피던스 차에 의한 반사계수는 \mathfrak{R}_{12} 이고 $ka \gg 1$ (a 는 곡률 반경 (radius) 이다. Kirchhoff 근사에 따라 경계면에서 반사된 음선은 평균면 (mean surface) 으로부터 위상차를 갖게 된다. 위상차는 k 와 평균면으로부터 변위 (displacement) ζ 와 입사각 θ 에 의존한다. 따라서

평균면에서의 완전반사 (perfect mirror-reflect)를 P_{b0} 라 할 때 거친 경계면으로부터 반사되어 공간 위상차 (spatial phase difference) $2k\zeta \cos\theta$ 를 갖는 실제 음압 P_b 는

$$P_b = \mathfrak{R}_{12} P_{b0} \cos(2k\zeta \cos\theta) \tag{2.1}$$

로 표현된다. 그리고 경계면의 특성을 가우스 분포 (Gaussian distribution)의 모든 거칠기(ζ)에 대해 적분하고 거친 면에서 반사된 음압과 평균면에서 반사된 음압의 비를 구하면 식 (2.2)를 얻을 수 있다.

$$\left\langle \frac{P_b}{P_{b0}} \right\rangle = \mathfrak{R}_{12} \int_{-\infty}^{\infty} \cos(2k\zeta \cos\theta) \left\{ \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\zeta}{\sigma}\right)^2\right] \right\} d\zeta \tag{2.2}$$

여기서 σ 는 평균제곱근 편차를 의미한다. 결국 가우스 거칠기 분포를 갖는 경우 코히어런트 반사계수는

$$\mathfrak{R}_{coh} = \left\langle \frac{P_b}{P_{b0}} \right\rangle = \mathfrak{R}_{12} \exp\left[-\frac{(2k\sigma \cos\theta)^2}{2}\right] \tag{2.3}$$

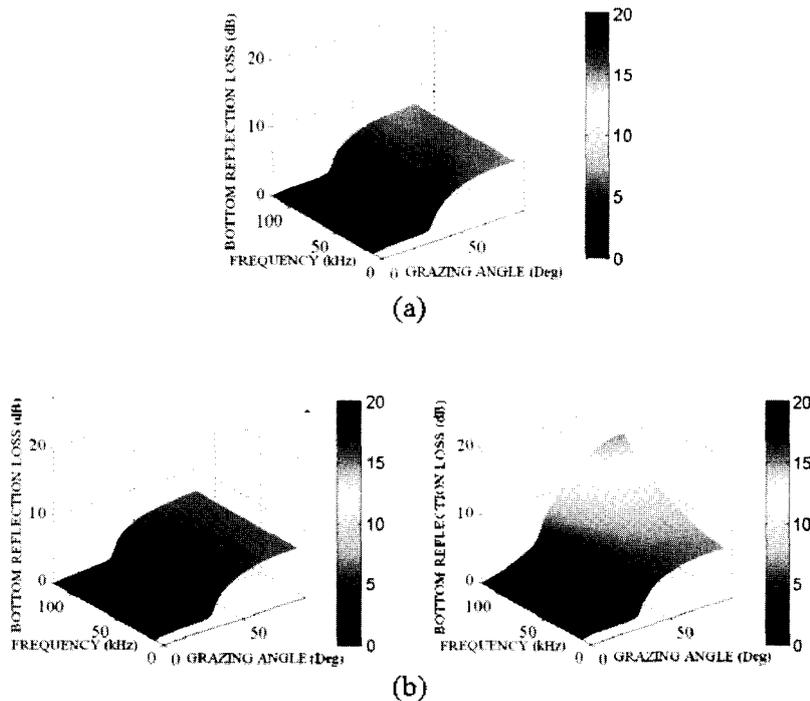


그림 3. (a) Mourad와 Jackson의 모델
 (b) HYBRIL 모델의 사질 퇴적물에 대한 반사손실의 상한 값과 하한 값
 Fig 3. (a) Mourad and Jackson's bottom reflection model
 (b) the upper bound and the lower bound on sandy sediment in HYBRIL model.

표 1. 수조 실험실내 지음형 인자

Table 1. Geoacoustic parameters of the water tank experimental set.

Sediment	
Type	Coarse sand
Mean grain size	0.5 ϕ
Mean sound velocity	1,875 m/sec
Thickness	0.5 m
Water	
Mean sound velocity	1,483 m/sec
Temperature	20.3 $^{\circ}$ C
Water tank size	5 \times 5 \times 5 m
Critical grazing angle	37 $^{\circ}$

로 나타낼 수 있으며 이것을 음의 세기로 표현하면

$$\mathfrak{R}_{coh}^2 = \mathfrak{R}_{12}^2 e^{-g_R} \tag{2.4}$$

이다. 이때 $g_R = 4k^2 \sigma^2 \cos^2 \theta$ 을 “음향학적 거칠기 (acoustical roughness)” 라 하고, $(g_R)^{1/2}$ 은 “레이리 인자 (Rayleigh parameter)” 라 하며 산란이론에서 경계면의 수직적 거칠기 (vertical roughness)를 표현하는 중요한 인자로 사용된다.

여기서 \mathfrak{R}_{coh} 는 거칠기의 영향을 포함한 해저면 반사계수, \mathfrak{R}_{12} 는 평탄한 해저면에 대한 반사계수이다. 기존

의 레일리 반사계수 \mathfrak{R}_{12} 는 임계각 이전의 손실이 없는 것으로 알려져 있으나 최근의 연구에 의하면 임계각 이전에도 적지만 손실이 있다. 따라서 임계각 이전의 반사손실의 문제점을 보완한 Mourad와 Jackson의 반사손실 (\mathfrak{R}_{b0}) 모델을 레일리 반사손실 모델 대신 대치하면, 임계각 이전의 손실 및 주파수에 대한 해저면 거칠기 영향을 포함한 새로운 반사손실(\mathfrak{R}_{br}) 모델이 된다[9-10].

위 식에서 사질 퇴적물의 입도분포가 고려된 반사손실 모델을 만들기 위해 재공급 평균 높이(σ)를 입도분포의 신뢰구간 m_l 에서부터 m_u 까지 포함되도록 한다. 그러면 위 식은 다음과 같이 반사손실로 표현할 수 있으며 그림 3과 같이 주파수의 종속성과 입도분포에 의해 나타날 수 있는 편차를 고려한 새로운 모델 결과를 얻을 수 있다. 이렇게 개선된 모델을 HYBRL 모델 (HanYang university Bottom Reflection Loss model)이라 한다 (그림 3).

$$\mathfrak{R}_{br}(m_l) = \mathfrak{R}_{b0} \exp(-2k^2 m_l^2 \sin^2 \theta) \tag{2.5.1}$$

$$\mathfrak{R}_{br}(m_u) = \mathfrak{R}_{b0} \exp(-2k^2 m_u^2 \sin^2 \theta) \tag{2.5.2}$$

$$BRL(dB) = -20 \log_{10}(\mathfrak{R}_{br}) \tag{2.5.3}$$

$$-20 \log_{10}(\mathfrak{R}_{m_l}) \leq BRL \leq -20 \log_{10}(\mathfrak{R}_{m_u}) \tag{2.5.4}$$

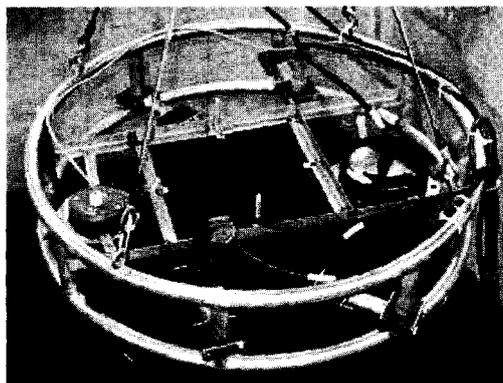
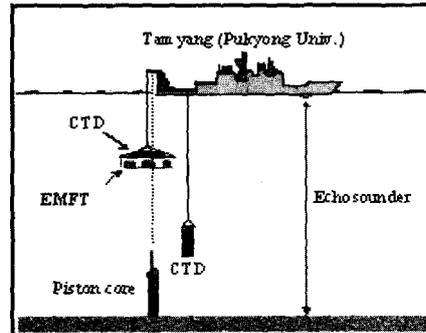
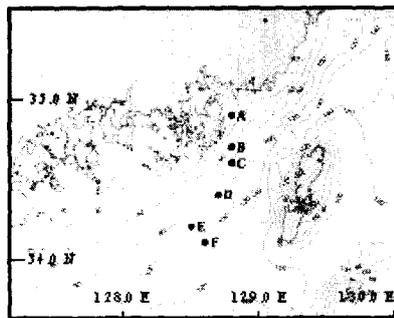


그림 4. 실험 정점 및 실험 장비 구성
Fig. 4. Experimental sites and layout.

표 2. 정점별 해저퇴적물 분석 결과

Table 2. Analysis results of geoaoustic parameter measurements.

Stat on	Water Content(%)	Composition(%)				Sediment Type	Moment			
		Grav.	Sand	Silt	Clay		Mz(ϕ)	Sort.	Skew.	Kurt.
A	55.0	0	35.3	64.7	0	sM	5.6	1.79	-0.44	0.69
B	29.3	0	99.2	0.8	0	S	2.2	0.79	-0.55	1.07
C	28.0	0	70.1	29.9	0	mS	3.0	1.48	0.29	0.77
D	54.6	0	5.9	94.1	0	M	6.0	0.92	-0.59	1.15
E	34.8	0	74.8	25.2	0	mS	3.6	2.57	0.66	1.13
F	Ref. KIGAM, 1990					S	3.0			

III. 실험개요 및 측정

모델 검증을 위하여 한양대학교 소재 수조와 남해 해상에서 음향 실험을 실시하였다.

수조 실험을 위해 수조바닥에 두께 0.5 m의 사질 퇴적물로 채웠으며 수층과 이루는 경계면은 평탄하게 조성하였으며, 입도분석으로 측정된 지음향 인자는 표 1과 같다[1].

주파수는 50, 80, 100, 120 kHz로 4개의 사용하였으

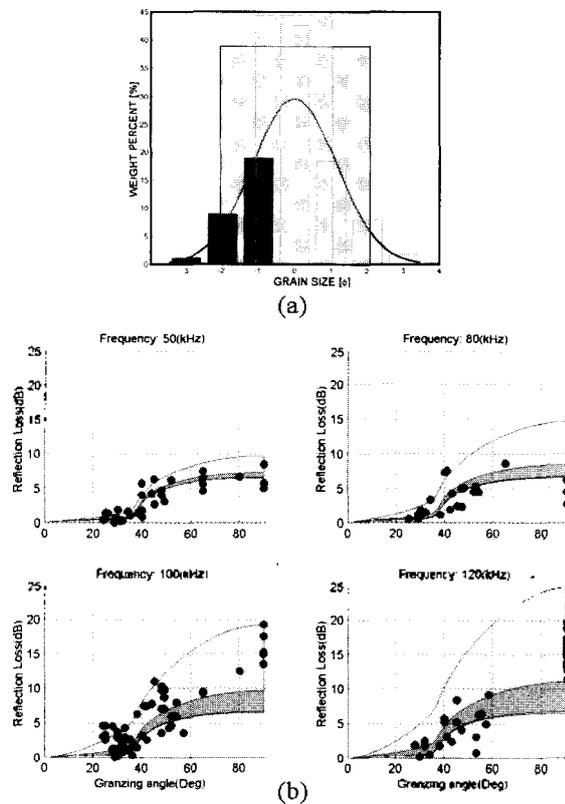


그림 5. (a) 수조 내 퇴적물의 입도분석결과 : 평균 입도 0.5 ϕ
 (b) 퇴적물 함량에 따른 주파수별 반사손실결과와 HYBRIL 모델 비교 (신뢰구간 : 50 %, 95 %)
 Fig. 5. (a) Grain-size distribution of water tank sediment : mean grain size 0.5 ϕ
 (b) Comparison of Measurements and HYBRIL model by sediment distribution (confidence limits : 50 %, 95 %)

며, 수평입사각은 25°, 40°, 65°, 80°, 90°를 주축으로 수평입사각에 대해 주파수별 반사손실을 측정하였다. 송신 신호는 펄스길이 0.3 ms의 정현파를 1초 간격으로 10회씩 반복 송수신하였다.

해상 실험은 2003년 5월 19 ~ 25일 기간 중 남해해역(거제도 ~ 대마도)에서 실험을 실시하였다. 실험은 6개 정점에 대해 CTD (SBE 911)를 이용하여 음속 구조를 획득하고 피스톤 코어를 이용하여 해저 퇴적물의 시료를 채취한 후 입도분석으로 해저면의 지음향 자료를 획득하였다. 실험 해역의 수심은 40 ~ 110 m였으며 기간 중 해상상태는 파고 0.5 m 이내로 매우 양호하였다. 음향 장비는 정선 후 수심 10 m에 설치하여 해저면과 수직지향 시켰다(그림 4). 음향 장비의 수심 변화를 모니터링 하기 위해 CTD (SBE 19)를 추가로 장착하였으며 양호한 해상상태로 수직 지향 시킨 장비의 지향각 및 수심 변화는 없었다.

실험 주파수는 30 ~ 120 kHz 대역의 5개 주파수를 사용하였으며 송신기는 T 128 (30 kHz), TC 2116 (50, 80, 100 kHz) 및 T 38 (120 kHz)이고 수신기는 TC

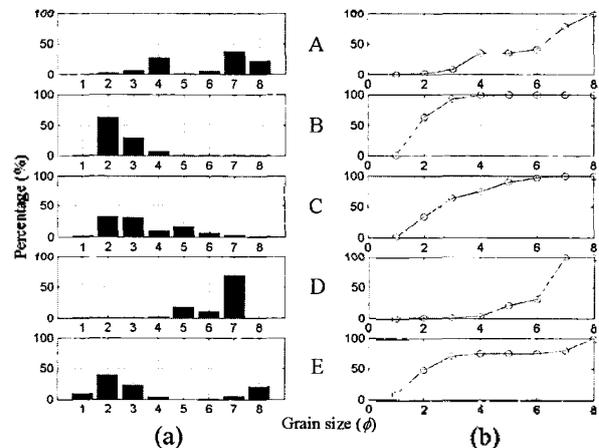


그림 6. 해상실험 정점의 퇴적물 입도분석결과 : (a) 히스토그램 (b) 누적분포 곡선
 Fig. 6. Grain size analysis of the sediment : (a) histogram (b) cumulative curve.

표 3. 해상 실험 정점의 주파수별 반사손실의 최소 제곱 근사 분석 결과와 모델 예측 결과
Table 3. Results of least square method and Model prediction at each sites.

Station	Sediment type	Mean grain size	RMS error	Y=b+aX		Model Prediction		
				b	a	Mean grain size	M _{min}	M _{max}
A	sM	5.6	1.23	30.9	-0.0023	7.3	5.7	9
B	S	2.2	4.11	26.4	0.0414	3.5	-0.9	8.2
C	mS	3.0	3.45	19.7	0.0491	2.6	-1	5.9
D	M	6.0	1.62	31.7	0.0002	3.8	2.9	4.7
E	mS	3.6	3.42	25.2	0.0141	4.2	-0.1	8.5
F	S	3.0	2.46	20.6	0.0259	2.2	-0.6	8.5

4014 청음기를 사용하여 해저면 반사신호를 획득하였다. 음원 신호는 펄스 길이가 5, 10, 20 ms인 정현파 신호를 사용하였고, 2 ~ 3초 간격으로 20회 이상 반복 송신하였다. 경계면으로부터 반사된 신호는 수신기로 수신하여 증폭, 고주파 대역통과 필터 후 사용된 주파수 성분만을 A/D 변환기를 거쳐 저장하였다.

수신된 신호는 송수신감도와 거리에 대한 손실을 보정하여 반사손실을 계산하였다

$$BRL = RL - SL + 20\log_{10} r + \alpha r \quad (3.1)$$

여기서 SL은 음원 준위(Source level)로 주파수에 따라 송신 감도를 달리 고려하였으며 RL은 수신 주파수에 따라 수신감도를 달리하여 계산한 잔향음 준위이다. 또한 거리에 대한 손실(TL)을 고려하여 반사손실을 산출하였다 (식 3.1).

VI. 측정결과 및 분석

수조실험 결과는 그림 5와 같이 주파수별(50, 80, 100, 120 kHz) 반사손실을 수평입사각에 따라 나타낸 것으로 HYBRIL 모델과 비교하였다. 해저면 입도분석결과 그림 5(a)는 수조 내의 퇴적물의 분포로 평균 입도 0.5 ϕ의 입자가 굵은 사질 퇴적물이며, 퇴적물의 입도분포에 따라 신뢰구간 50 %와 95 %가 갖는 HYBRIL 모델 결과는 그림 5(b)와 같이 두개의 음영으로 나타나며 이것은 실험에 사용된 사질 퇴적물의 입도에 의해 나타날 수 있는 반사손실의 편차와 주파수에 의한 영향을 나타내는 것이다. 실험에서 수층과 퇴적층 간의 반사손실 측정 실험 결과가 주파수 및 수평입사각의 증가에 따라 경계면을 음향학적으로 거칠게 인식한 결과임을 확인할 수 있다. 전체 입도분포 중 95 % 신뢰구간에 해당하는 -1.7 ~ 3.2 ϕ 구간을 고려하면 Mourad와 Jackson의 모

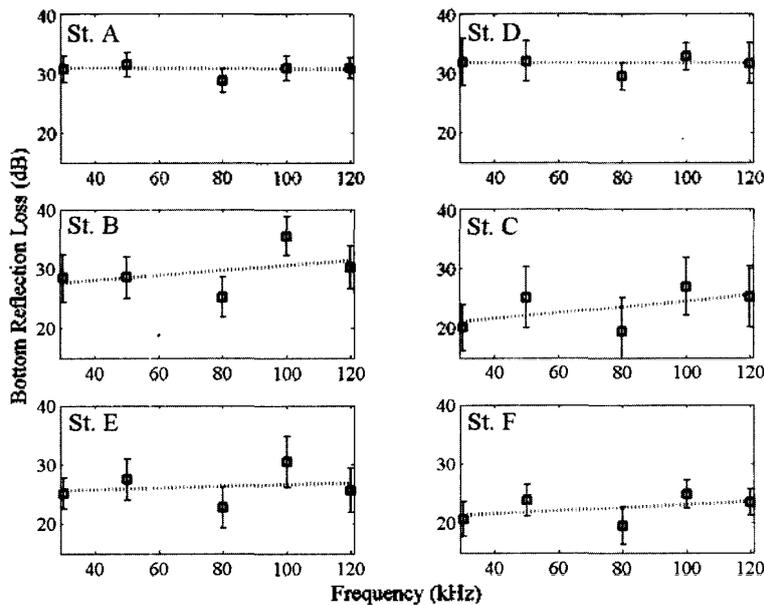


그림 7. 해상실험 정점에서의 주파수별 반사손실 측정 결과 : A, D는 니질 퇴적물, B, C, E, F는 사질 퇴적물

Fig. 7. Results of the bottom reflection loss measurement at each measurement site : The sediment type of ST. A and B are mud and ST. B, C, E and F are sand.

델은 주파수와 수평입사각에 따라 HYBRIL 모델과 같은 결과를 갖게 된다. 이는 실험 결과에서 나타나는 모델과의 차이를 매우 잘 반영하고 있으며 반사손실 모델의 새로운 방향을 제시해 주고 있다.

해상 실험 6개 실험 정점(ST. A ~ F)의 입도분석 결과를 그림 6 및 표 2에 나타냈으며, 정점 F의 경우 피스톤 코어로 샘플을 획득하지 못하여 한국지질자원연구원(KIGAM)의 해저퇴적물 분포도에 따른 입도분포를 사용하였다[12].

정점 A와 D는 니질 성분이 다량 포함되어 있고, 정점 B, C, E와 F는 사질 성분이 주요 퇴적물로 구성되어 있다. 실험에서 사용하는 주파수 대역은 니질 성분의 입도에서 $\phi_R \ll 1$ 로 거칠기로 인식하지 못하여 모델의 주파수 종속성과는 무관하다.

그림 7은 수직입사각에 대한 각 정점별 해저면 반사손실 측정 결과를 주파수에 따라 나타낸 것이다. 사각형 표시는 해당 주파수별 반사손실로서 해저면의 유동성은 없으나, 해상 실험선의 유동성을 고려하여 20 회 이상 반복 측정한 결과의 평균과 표준편차를 동시에 표시한 것이며 점선은 주파수 증가에 따른 반사손실의 변화 양상을 최소 제곱 근사법(Least square method)을 사용하여 살펴본 것이다. 정점 A와 D의 퇴적물은 니질로서 주파수에 따른 변화가 없으며 반사손실의 표준편차 또한 매우 작다. 그러나 정점 B, C, E, F의 퇴적물은 사질로

서 주파수에 비례하여 반사손실이 증가하며 평균에 대한 편차도 니질보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 해상 실험의 결과는 수조실험을 통해 관측된 사질 퇴적물에서의 반사손실의 주파수 종속성 나타내고 있으며, HYBRIL의 모델이 갖는 주파수 의존성을 잘 반영하고 있다.

또한 해상 실험에서 나타나는 반사손실의 특성을 이용하여 해저면의 구성 분포를 표 3과 같이 역추정하여 보았다. HYBRIL 모델을 사용하여 실험주파수에 대한 반사손실의 기울기와 절편을 최소 제곱 근사법을 이용하여 추출하고, 그 결과를 해상실험결과의 최소 제곱 근사법으로 추출한 절편과 기울기와 비교하였다(표 3). 절편(a)은 평균입도의 영향을 기울기(b)는 구성 물질의 분포에 영향을 나타낸다. 반사손실에 영향을 주는 최소 입도와 최대 입도는 표 3과 같이 예측되었으며, 그림 8에서와 같이 음영 구간으로 그 영향을 보이고 있다. 모델의 예측치는 해저면의 영향을 주고있는 입도의 분포 내에 중앙값(Median)을 나타내고 있으며, 음영부분은 해저면의 영향을 잘 표현하고 있으며, 구간 내에서 해저면의 모델의 평균입도 예측치와 지음향 자료의 결과 정점 D에서는 차이를 보이나, 나머지 정점에서는 입도분석 결과와 유사한 결과를 보이고 있다. 따라서 모델이 해저면의 신호 응답 특성을 잘 반영하고 있음을 확인하였다.

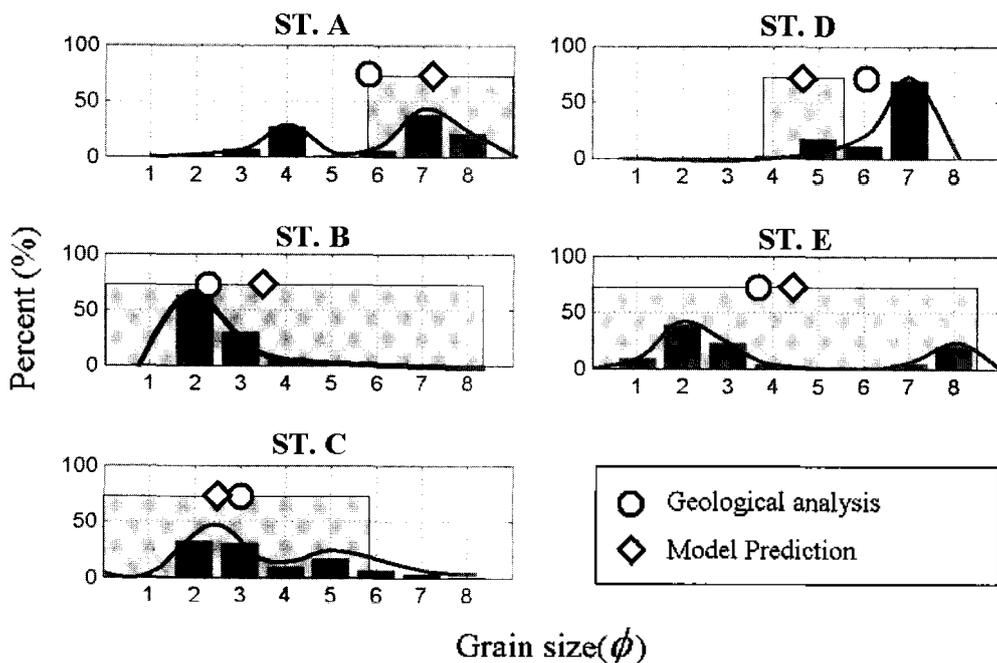


그림 8. 해상실험 정점의 퇴적물 입도분석 결과와 모델 예측결과 : 음영은 해저면의 주요 영향을 반영하는 입도분포
 Fig. 8. Comparison of Geological analysis and Model prediction in each sites : Shadow is Effective grain size distribution on sediment.

V. 결론 및 고찰

실험에 사용된 주파수 (30 ~ 120 kHz)와 사질 퇴적물의 입도분포는 음향학적 거칠기 $g_r \sim O(1)$ 인 경우로 중간 주파수에 해당되며 $g_r \gg 1$ 과 $g_r \ll 1$ 인 이분법적인 결과와는 달리 해석된다. 즉 해저면 반사는 거칠기 영향을 받아 주파수는 종속성을 가지게 된다.

고주파 해저면 반사손실 모델인 Mourad 와 Jackson 의 모델에 기초하여 신뢰도 95 %의 입도분포와 거칠기에 따른 주파수 종속성이 포함되도록 개선한 HYBRIL (HanYang university Bottom Reflection Loss) 모델을 제시하였다. 수조 실험 및 해상 실험을 통하여 사질 퇴적물에서 주파수에 따른 종속성을 확인 하였으며, 모델을 통한 역추정을 통하여 반사손실 모델의 신뢰성을 확인하였다.

이러한 결과는 해저면 분류 등의 연구를 위해 매우 중요한 인자가 될 수 있으며, 기존의 소나성능 예측을 위한 음파 전달 모델에 포함된 반사손실 모델의 보완에도 이용될 수 있을것으로 기대한다.

그러나 현재 모델의 해상검증실험이 90 °의 수직 입사각에서 이루어졌는데, 모델의 정확성 향상을 위해 다양한 수평입사각에 대해 다양한 퇴적환경에서 검증이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 수중음향특화연구센터의 연구지원에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 박순식, 윤관섭, 조진석, 나정열, 나영남, "고주파 해저면 반사손실의 주파수 종속성 측정", 제17회 수중음향학 학술발표회 논문집, pp. 83-86, 2002.
2. 박순식, 윤관섭, 조진석, 나정열, "고주파 해저면 반사손실 모델", 한국음향학 회 추계학술발표대회 논문집, 22(2s), pp. 207-210, 2003.
3. 박순식, 윤관섭, 조진석, 나정열, "고주파 해저면 반사손실의 주파수 종속성 측정", 한국음향학회지, 22(8), pp. 652-659, 2003.
4. K. S. Yoon, S. S. Park and J. Na, "Frequency dependence of high-frequency bottom reflection loss", Internoise 2003, CD, N450, pp. 3743-3748, 2003.
5. L. M. Brekhovskikh and Y. P. Lysanov, Fundamentals of

- Ocean Acoustics, 2nd ed., Springer-Verlag, New York, 1982.
6. N. P. Chotiros, "Reflection and reverberation in normal incidence echo-sounding", J. Acoust. Soc. Am., 96(5), pp. 2921-2929, 1994.
7. C. S. Clay and H. Medwin, Fundamentals of Acoustical Oceanography, Academic Press, San Diego, 1998.
8. I. Tolstoy and C. S. Clay, Ocean Acoustics: Theory and experiment in underwater sound, McGraw-Hill, New York, 1966.
9. P. D. Mourad and D. R. Jackson, "High frequency sonar equation models for bottom backscatter and forward loss," Proc. OCEAN89, New York, pp. 1168-1175, 1989.
10. APL-UW, "High-frequency Ocean Environmental Acoustic Model Handbook", Technical Report APL-UW TR 9407 AEAS 9501, 1994.
11. E. A. Hamilton, R. T. Bachman, "Sound velocity and related properties of marine sediments", J. Acoust. Soc. Am., 72, pp. 1891-1904, 1982.
12. R. A. Davis, Jr, Depositional systems : An introduction to sedimentology and stratigraphy, 2nd ed, Prentice Hall, 1992.

저자 약력

• **박순식 (Soon-Shik Park)**

한국음향학회지 제22권 제3호 참조

• **조진석 (Jinsuk Cho)**

한국음향학회지 제23권 제4호 참조

• **윤관섭 (Kwan-Seob Yoon)**

한국음향학회지 제21권 제5호 참조

• **나정열 (Jungyul Na)**

한국음향학회지 제21권 제8호 참조

• **석동우 (Dong-Woo Suk)**

한국음향학회지 제21권 제8호 참조

• **주진용 (Jin-Yong Joo)**

한국음향학회지 제23권 제4호 참조