

고주파 해저면 반사손실의 주파수 종속성 측정

Frequency Dependence of High-frequency Bottom Reflection Loss Measurements

박 순 식*, 윤 관 섭*, 최 지 웅*, 나 정 열*

(Soon-Shik Park*, Kwan-Seob Yoon*, Jee Woong Choi*, Jungyul Na*)

*한양대학교 지구해양학과와 해양음향연구실

(접수일자: 2003년 5월 6일; 수정일자: 2003년 9월 3일; 채택일자: 2003년 10월 6일)

사실로 이루어진 평탄한 경계면에서 수평입사각 (25° , 40° , 65° , 80°)에 따른 고주파 (40 ~ 120 kHz) 반사손실 측정 실험을 수조 내에서 수행하였다. $5 \times 5 \times 5$ m 크기의 수조는 바닥을 두께가 0.5 m이고 평균입도가 0.5 ϕ 인 사질 퇴적물로 채웠으며 퇴적층 경계면은 평탄하게 조성하였다. 측정된 주파수별 수평입사각에 따른 반사손실은 고주파 해저면 반사손실 모델인 APL-UW 모델 (Mourad & Jackson, 1989)과 비교하였다. 60 kHz 이하 주파수의 경우 모델과 실측치가 거의 일치하였으나 70 kHz 이상의 경우에는 주파수가 증가함에 따라 2 ~ 3 dB씩 증가하는 결과를 보였다. 70 kHz 이상의 경우 모델과 실측치 간의 차이는 모델에서 다루지 않는 거칠기 (입도)의 수직 크기 때문이며 고주파로 갈수록 산란이론의 레일리 인자 (Rayleigh parameter)의 값이 증가하여 거칠기에 의한 산란효과를 포함하기 때문이다. 따라서 평탄한 해저면일지라도 사실과 수층으로 이루어진 경계면에서의 반사손실 모델은 입도분포의 신뢰구간 내에서 갖는 거칠기 영향에 의한 주파수의 종속성을 고려하여야 한다.

핵심용어: 해저면 반사손실, APL-UW 모델, 주파수 종속성, 입도분포, 레일리인자

부고분야: 수중음향 분야 (5.2)

High-frequency (40 ~ 120 kHz) reflection loss measurements on the water-sandy sediment with a flat interface were conducted in a water tank for various grazing angles. The water tank ($5 \times 5 \times 5$ m) was filled with a 0.5 m-thick-flat bottom of 0.5 ϕ -mean-grain-size sand. Reflection losses, which were experimentally obtained as a function of grazing angle and frequency, were compared with the forward loss model, APL-UW model (Mourad & Jackson, 1989). For frequencies below 60 kHz, the observed losses well agree with the reflection loss model, however, in cases for frequencies above 70 kHz, the observed losses are greater by 2 ~ 3 dB than the model results. The model calculation, which does not fully account for the vertical scale of roughness due to grain size, produce less bottom losses compared to the observations that correspond to large roughness based on the Rayleigh parameter in the wave scattering theory. In conclusion, for the same grain-size-sediment, as frequencies increase, the grainsize becomes the scale of roughness that could be very large for the frequencies above 70 kHz. Therefore, although the sea bottom was flat, we have to consider the frequency dependence of an effect of roughness within confidential interval of grain size distribution in reflection loss model.

Keywords: Bottom reflection loss, APL-UM model, Frequency dependency, Grain size distribution, Rayleigh parameter

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.2)

1. 서론

비균질한 거칠기를 갖는 해수면과 해저면에 의한 음파 산란 연구는 Rayleigh와 Kirchhoff[1,2] 등의 많은 연

구가들에 의해 지금까지 지속적으로 수행되어져 왔다. 해양에서의 해저 경계면에 의한 음전달을 정확히 모델링 하기 위해서는 경계면의 거칠기, 경사도 그리고 퇴적층 경계면 구성물질의 지음향 특성들에 대한 정확한 이해가 선행되어야 한다. 특히 고주파수의 경우에는 퇴적층 내에서의 음파의 상호작용이 중요한 저주파수와는 달리 경계면에서의 음파 산란이 매우 중요하다. 최근에는 고

책임저자: 박순식 (sspark2002@ihanyang.ac.kr)
426-791 경기도 안산시 상록구 사1동 1271
한양대학교 지구해양학과와 해양음향연구실
(전화: 031-400-4233; 팩스: 031-502-6068)

주파수를 이용하여 해저 경계면에서의 반사와 산란을 측정함으로써 해저면 구성 물질과 형태 및 지음향 인자의 역산 등을 통한 원격 탐사가 활발히 진행 중이다[3].

Rayleigh[4]에 의해 제시된 반사손실 모델의 경우 매질 사이의 밀도와 음속차만을 이용하여 음파의 입사각의 함수로써 반사손실을 표현하였다. 소나 모델인 GSM (Generic Sonar Model)[5]에 사용되어지는 다양한 반사손실 모델은 해저면의 특성들 중 단편적인 정보만으로도 해저면의 반사손실을 예측 가능하도록 모델을 단순화시켜 제시하였다. 비교적 정확하다고 알려져 있는 해저 퇴적물 모델인 Biot 모델[6]의 경우 정확한 이론식으로 알려져 있음에도 불구하고 음전달 모델의 적용을 위해서는 13개 이상의 지음향 인자에 대한 정확한 정보를 측정 또는 계산하여야 한다는 단점이 있다. 결과적으로 입력 지음향 인자의 상당수가 실제 실험실에서조차 측정이 용이치 않거나 복잡한 정방향 예측 또는 역방향 계산과정을 통해서만 획득이 가능하므로 실제 해양에서의 적용은 용이치 않다. 또한 모델에서는 저주파수 대역의 수평입사 임계각 이전 (subcritical grazing angle)에서는 주파수에 따른 변화가 있으나 그 이상의 높은 수평입사각 (high grazing angle)에서는 고주파와 저주파수 대역에서 모두 주파수에 따른 변화가 거의 없으며 경계면 거칠기에 의한 영향은 무시한다. 최근에는 APL-UW에서 Mourad & Jackson [7]에 의해 레일리 반사 모델 (Rayleigh reflection model)을 해저 구성 물질의 평균입도 (mean grain size)로써 지음향 인자를 추출 (parameterization)하여 반사손실의 계산이 가능하도록 개선된 고주파 해저면 반사손실 모델 (forward reflection loss model)이 제시되었다 (이후 APL-UW 모델). 이 모델의 경우 평균입도으로써 다른 지음향 인자들을 추출하여 반사손실을 계산함으로써 고주파 음전달 모델링에 널리 이용되고 있다. 그러나 이 모델 역시 해저면의 거칠기에 대해서는 충분히 고려하지 않았기 때문에 주파수에 따른 변화는 찾을 수 없다[8].

Chotiros[10,11]는 사질 퇴적물에 대한 기존 연구 결과를 종합함으로써 실제 측정된 대부분의 반사손실 값들이 기존의 여러 모델들과는 상당한 차이가 있음을 확인하였다. 대부분의 경우 실험을 통해 직접 측정된 반사손실 값이 모델 값보다 높게 나타났다. 이러한 결과는 해저 경계면의 거칠기를 정확히 고려하지 않음으로써 나타나는 오차이며 따라서 주파수나 거칠기 영향 등을 정확히 고려한 모델의 예측이 요구된다.

기존의 해저면 반사손실 모델은 해저면의 거칠기와 경사도가 해수면에 비해 매우 평탄하거나 완만한 것으로

취급하였다[4-7]. 이 경우 해저면 반사손실은 높은 수평 입사각에서는 주파수의 영향이 없는 것으로 나타난다. 또한 Hamilton[19]은 해저 퇴적물의 감쇠손실 (α : attenuation loss, dB)을 $\alpha = kf^n$ 식으로 나타냈으며 이때 k 는 상수 (constant), f 는 주파수 (kHz), n 은 주파수의 지수 (the exponent of frequency)이다. 주파수 40 ~ 120 kHz 인 경우 감쇠손실은 22 ~ 66 dB/m로 고주파 대역에서는 매질 내 투과성이 현저히 낮아진다. 즉 경계면의 거칠기가 퇴적층 내의 매질 특성에 의한 영향보다 훨씬 높게 작용한다.

따라서 본 논문에서는 고주파 영역인 40 ~ 120 kHz의 주파수 대역에서 퇴적층 내의 물성보다는 수층과 사질 퇴적층 (water / sandy sediment)이 이루는 평탄한 경계면에서의 반사손실을 고려하여 실험을 하였다. 실험 결과와 모델의 비교를 위해서는 실험에 사용된 주파수가 적용 가능하며 평균입도만으로 해저 퇴적물에 따른 반사손실 값의 산출이 용이한 APL-UW 모델을 사용하였다. 또한 실험 결과에서 보여주는 주파수에 따른 반사손실의 변화 양상을 퇴적물의 입도와 레일리인자의 상관관계 관점에서 살펴보고자 한다.

II. 이론 연구

수층과 퇴적층이 이루는 경계면에서의 반사손실을 측정하기 위해 앞서 APL-UW 모델과 경계면의 거칠기 정도를 알 수 있는 레일리 인자 (Rayleigh parameter)에 대해 살펴보기로 한다. 모델은 고주파 대역인 10 ~ 100 kHz에 적용 가능하며 경계면 구성 물질의 평균입도 (mean grain size)에 의한 해저면 반사손실을 수평입사각에 따라 나타낸다. 그러나 이 모델에서는 평탄한 해저면을 고려하였기 때문에 평균입도 이외의 해저면 경사와 거칠기 영향은 무시하였다. 즉 모델 입력 인자를 모두 평균입도와의 상관관계로 표현한 실험식으로 제시하였다. 따라서 모델 예측 결과는 실제 해상실험에서 얻은 반사손실 측정치보다는 다소 낮은 값을 갖는다[9].

$$\begin{aligned}
 r_0 &= -20 \log_{10} |R(\theta)| \\
 R(\theta) &= \frac{y-1}{y+1} \\
 y &= \frac{\rho \sin \theta}{P(\theta)} \\
 P(\theta) &= \sqrt{k^2 - \cos^2 \theta} \\
 k &= \frac{k_2}{k_1} = \frac{k_{2r} + ik_{2i}}{k_1} = \frac{1}{v} [1 + i\delta]
 \end{aligned} \tag{1}$$

- r_0 : 해저면 반사손실 (forward reflection loss)
- θ : 수평입사각 (grazing angle)
- ρ : 밀도비 (density ratio)
- k : 파수비 (wavenumber ratio)
- v : 음속비 (sound speed ratio)
- δ : 손실인자 (loss parameter)

식 (1)은 APL-UW 모델 기본 계산식이며 식에서 파수비는 주파수를 포함하는 입력인자이지만 실제 모델에서는 모든 입력 인자가 평균입도에 의해 단일 변수화 되어 입력되어지므로 주파수에 따른 영향은 무시된다. 즉 수평입사각에 따른 평균입도별 반사손실 값은 그림 1과 같이 평균입도에 의한 영향은 나타나지만 주파수에 의한 변화는 볼 수 없다. 또한 모델의 검증은 적용 주파수 범위 10~100 kHz 중 일부인 30 kHz 이내에서만 이루어졌고 입사각은 수직입사각 (normal incident angle)과 수평입사 임계각 이전에서만 수행되어졌다. 따라서 40 kHz 이상의 고주파수와 높은 입사각에 대한 모델 검증이 요구된다. 또한 실험에 사용된 퇴적물은 세립 사질 성분 (> 3.0 ϕ)으로 고주파 대역에서 거친 경계면을 형성할 수 있는 조립 사질 퇴적층에서의 모델 검증이 미흡하였다[9].

경계면에 입사하는 음파는 경계면의 형태에 따라 반사 및 산란의 다양한 형태로 나타난다. 그림 2는 경계면의 형태에 따른 음파 에너지의 반사손실 과정을 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 완전히 평탄한 경계면에서는 전반사가 발생함을 의미하며 그림 2(b)는 거칠기가 있는 경계면에서 산란 영향 증가로 인한 반사손실의 증가를 의미하며 그림 2(c)는 매우 거친 경계면에서는 대부분의 에너지가 산란 되므로 반사되는 에너지는 거의 없음을 의미한다[12].

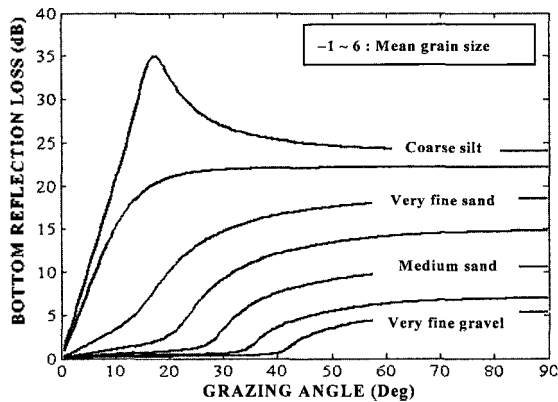


그림 1. APL-UW 모델의 수평입사각에 따른 평균입도별 반사손실
Fig. 1. Reflection loss for mean grain size as a function of grazing angle by APL-UW model.

또한 해저면 거칠기 정도는 레일리 인자 (Rayleigh parameter: x)[13,14]로 표시된다.

$$\chi = kH(\sin \theta_i + \sin \theta_r) \tag{2}$$

여기서, k 는 음파의 파수 (acoustic wavenumber)이고, H 는 해저면 거칠기의 제곱평균근 (rms) 값이며, θ_i 와 θ_r 는 각각 수평입사각과 산란각을 의미한다. 반사의 경우 수평입사각과 산란각이 같으므로 레일리 인자 (Rayleigh parameter: x)는

$$\chi = 2kH \sin \theta, \tag{3}$$

으로 나타낼 수 있다. $x \ll 1$ 인 경우 평탄한 해저면으로서 산란 영향보다는 반사 영향이 크다. 이와는 반대로 $x \gg 1$ 인 경우 해저면은 거칠기와 경사도가 심하고 산란 영향이 크게 증가하여 반사 영향은 감소하게 된다.

한편 해수면과 마찬가지로 해저면에 대해서도 주파수에 따라 달라지는 산란이론 및 반사이론과 모델 등에 대해서는 이미 많은 연구가들에 의해서 다양한 관점에서 연구되어진 바 있으나[13,14], 아직 경계면 효과에 대한 실험결과와 이론적 모델 간의 일치성에 대해서는 해석이

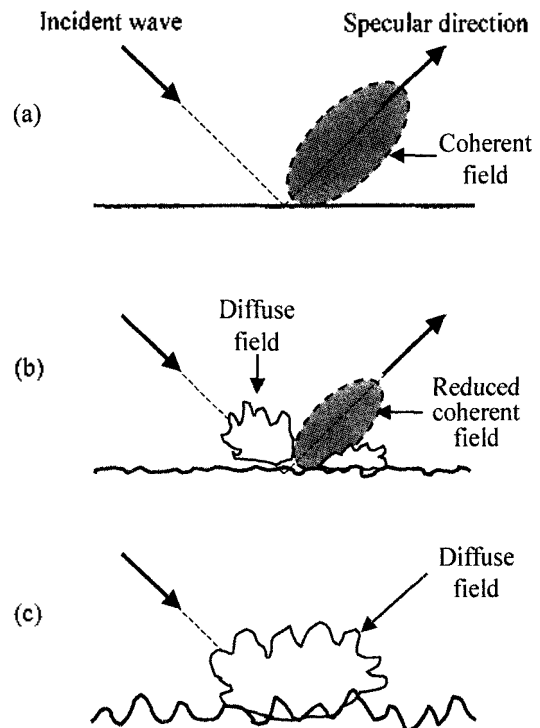


그림 2. 경계면의 거칠기 증가에 따른 반사손실 에너지의 분포도 (Ogilvy, 1991)
Fig. 2. Schematic of the change in reflected energy distribution, as interface roughness increases (Ogilvy, 1991).

많은 차이를 보인다.

따라서 본 논문에서는 고주파 대역에서 수평입사각의 증가에 따른 해저면 반사손실의 주파수 종속성 확인을 위해 수층과 사질 퇴적층으로 이루어진 경계면에서 반사손실을 측정하고 모델과 비교 및 분석하였으며 앞으로의 연구 방향에 대해 제시하였다.

III. 실험개요 및 측정

본 연구를 위한 실험은 2002년 7월부터 8월 사이에 실내 수조 실험실 (5×5×5 m)에서 수행되었다. 수조 실험실 바닥에 두께 0.5 m의 사질 퇴적층을 조성하였으며 평탄한 경계면에서의 반사손실을 측정하기 위해 사질 퇴적층 경계면을 평탄하게 만들었다.

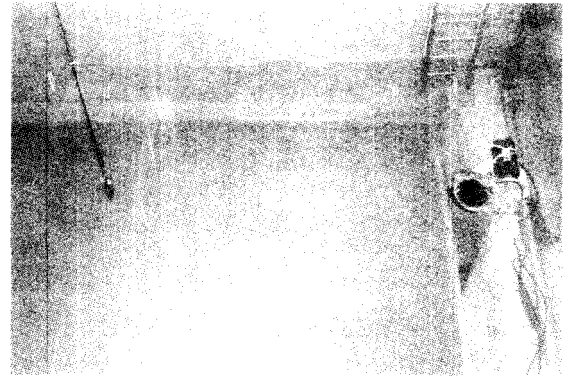
입도 분석은 상부 5 cm의 퇴적층을 채취하여 체질법 (dry sieving method) [17]으로 실시하였으며 그 결과 평균입도는 0.5 ϕ의 사질 퇴적층으로 분석되었다 (그림 5). CTD (SBE-19)를 이용하여 측정된 수직적인 평균 수온은 20.3°C, 평균음속은 1,483 m/s였으며 퇴적층의 음속 1,875 m/s, 이때의 수평입사 임계각은 약 37°였다. 이때 퇴적층의 음속은 Hamilton과 Bachman의 실험식을 사용하였다[18,19].

주파수는 40 kHz에서부터 10 kHz 간격으로 120 kHz까지 8개의 주파수를 사용하였으며, 40 ~ 100 kHz까지는 RESON사의 TC 2116, 120 kHz는 NEPTUNE SONAR사의 T38 송신기를 사용하였다. 이때 수평입사각을 25°, 40°, 65°, 80°로 변화시키면서 각각의 주파수에 대해 반사손실을 측정하였다. 송신 신호는 펄스길이 0.3 ms의 정현파를 1초 간격으로 10회씩 반복 송신하였다. 수층과 퇴적층이 이루는 경계면으로부터 반사된 신호는 RESON사의 TC 4014 청음기 (hydrophone)를 사용하여 수신하여 A/D 변환기를 통하여 저장되었다. 송신기경계면수신기 간의 거리는 원거리 음장 (far field) 조건을 만족하도록 충분히 유지하였다 (그림 3(a), (b)). 실험에 사용된 송수신 장비의 성능 및 감도는 표 2와 같다.

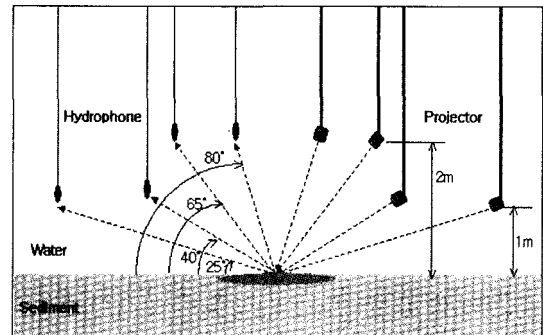
수신된 신호는 사용된 주파수 성분만을 보기 위해 대역 통과 필터를 사용하여 해당 주파수 이외의 주파수 성분은 제거하였으며, 각각의 신호에 대해서는 앙상블 평균 (ensemble average)을 취한 후 수신 감도 (RVS: Receiving Voltage Response)를 고려하여 수신된 잔향음 준위를 계산하였다.

실험에 앞서 수조 내에서 수층의 전달손실 (TL: Trans-

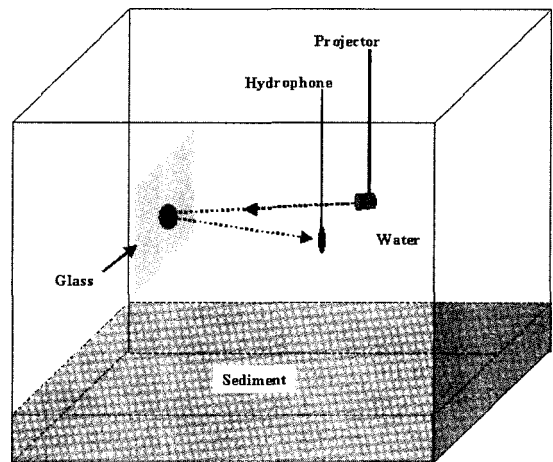
mission Loss)을 측정된 결과, $20 \log_{10} r$ (r : 음파의 이동 거리)을 잘 따르고 있음을 확인하였으며, 감쇠손실 (attenuation loss)은 수조의 규모를 고려하여 무시하였다. 결과적으로 해저면 반사손실 (BRL: Bottom Reflection Loss)은 식 (4.2)와 같이 계산할 수 있다[20,21].



(a)



(b)



(c)

그림 3. 반사손실 측정 실험 배치도: (a), (b) 수층과 사질 퇴적층 경계면, (c) 수층과 유리 경계면

Fig. 3. Experimental layout for measurements of reflection loss: (a), (b) the water / sandy sediment interface, (c) the water / glass interface.

$$BRL = SL - RL - 20 \log_{10} r - \alpha r \quad (4.1)$$

$$BRL = SL - RL - 20 \log_{10} r \quad (4.2)$$

여기서 SL은 음원 준위 (source level)로 주파수에 따라 송신 감도 (TVR: Transmitting Voltage Response)를 달리 고려하였으며 RL은 수신 주파수에 따라 수신 감도를 달리하여 계산한 잔향음 준위 (reverberation level)를 의미한다.

또한 완전히 평탄한 경계면에서의 주파수에 따른 반사손실을 측정하기 위해 유리면 (glass surface)에서의 반사손실 실험을 병행하였다 (그림 3(c)). 이때는 단지 수층과 사질 퇴적층에서 측정된 주파수에 따른 반사손실 결과와 비교 검증하기 위해 수평입사각 80에 대해서만 실험을 실시하였다.

IV. 측정결과 및 분석

퇴적층 평균입도 (0.5 ϕ)의 반경은 0.35 mm이며 주파

수별 해저면 거칠기의 레일리 인자는 그림 4와 같이 표현할 수 있다[22].

그러나 퇴적물 입도 분석 결과 평균입도 0.5 ϕ보다 굵은 입도 (0 ~ -2 ϕ)를 갖는 사질 성분, 즉 직경 1~3 mm인 사질 성분이 약 30%를 차지하고 있음을 알 수 있다 (그림 5).

그러므로 상위 30%를 차지하는 입자들에 의한 거칠기를 고려하면 거칠기 정도(x)는 O(1)을 가지며 이는 해저면이 음파의 파수에 비해 충분히 거친 해저면을 구성한다고 할 수 있다. 특히 이러한 경향은 주파수와 수평입사각이 증가할수록 큰 영향을 받는다.

그림 6은 평균입도 0.5 ϕ에 해당하는 APL-UW 모델과 실측자료를 비교한 그림이다.

주파수 40~60 kHz에서는 실험치와 해저면 반사손실 모델이 잘 일치하며 주파수 70~80 kHz에서는 임계각 이전의 수평입사각에서는 모델과 잘 일치하나 임계각 이후에서는 실측치가 모델보다 2~3 dB 높은 경향을 보인다. 90 kHz 이상의 주파수 대역에서는 주파수가 증가함에 따라 모델과의 차이가 상당히 증가함을 보인다. 특히

표 1. 수조 실험실내 환경 지음향 인자

Table 1. Environmental geacoustic parameters in the water tank.

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℃
Water tank size	5×5×5 m
Critical grazing angle	37°

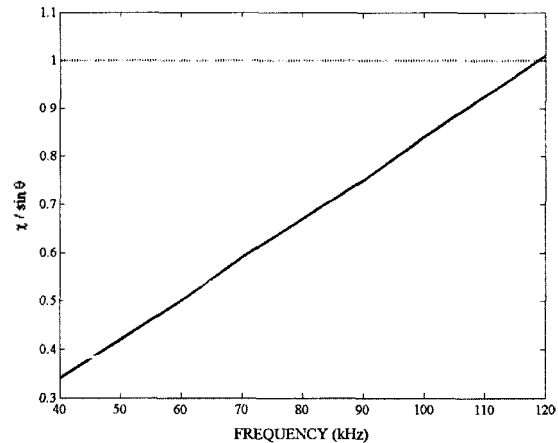


그림 4. 주파수에 따른 레일리 인자 (x)

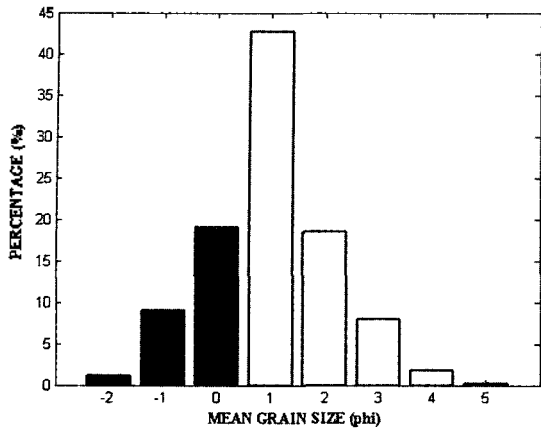
Fig. 4. Rayleigh parameter (x) as a function of frequency.

표 2. 송·수신기 장비 성능

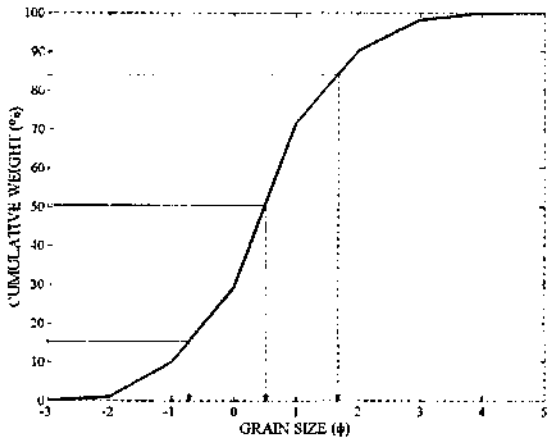
Table 2. Specification of Projector and Hydrophone.

Spec.	Type	Projector		Hydrophone
		TC 2116	T 38	TC 4014
Company		RESON (USA)	Neptune Sonar (USA)	RESON (USA)
Frequency range		40 ~ 100 kHz	120 kHz	15 Hz ~ 480 kHz
Sensitivity		165.3 ~ 172.9 dB	174.9 dB	-186 dB ± 3 dB
Beam width		14.6°	9.6°	-
Horizontal Directivity		-	-	Omni directional ± 2 dB at 100 kHz
Vertical Directivity		-	-	270° ± 2 dB at 100 kHz

※ Projector: dB re 1 μPa/V at 1 m, Hydrophone: dB re 1V/μPa.



(a) 히스토그램 (흑색: 평균입도 이상의 조립 사질 성분)
(a) Histogram (black: coarse sand over mean grain size)



(b) 누적분포 곡선
(b) Cumulative curve

그림 5. 퇴적물 입도분석 결과
Fig. 5. Grain size analysis of the sediment.

주파수와 수평입사각이 증가할수록 모델과의 차이는 더욱 커짐을 알 수 있다.

또한 수층과 사질 퇴적층이 이루는 경계면과 완전히 평탄한 경계면과의 반사손실 양상을 비교하기 위해 수층과 유리면이 이루는 경계면에서도 수평입사각 80°에서 각 주파수별 동일한 방법으로 반사손실을 측정하였다. 그 결과 그림 6의 우측 하단 점선 내와 같은 결과를 얻었다. 즉 수층과 사질 퇴적층이 이루는 경계면에서는 그림 2(b)와 같은 손실 양상을 나타내는 반면, 완전히 평탄한 유리면에서는 그림 2(a)와 같이 거의 전반사가 일어남을 잘 나타내고 있다. 또한 수층과 사질 퇴적층 경계면에서는 주파수에 따라 반사손실이 점점 증가하는 양상을 보이거나 완전히 평탄한 경계면을 갖는 유리면에서는 반사손실이 거의 일어나지 않으며, 주파수의 증가와는 무관함을 알 수 있었다. 즉 평탄하게 모의된 굵은 사질 퇴적물과

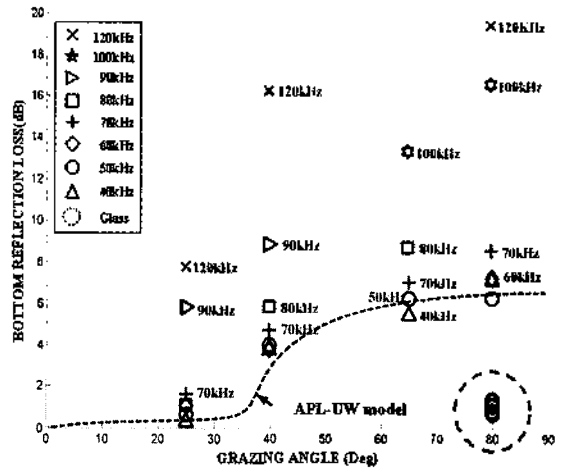


그림 6. 수평입사각에 따른 주파수별 반사손실 측정 결과와 APL-UW 모델 결과 비교 (점선 내부는 유리면에서의 실험 결과)
Fig. 6. Comparison of measured data and APL-UW model results for the frequencies of 40 ~ 120 kHz (experimental data on the glass interface within the dashed line).

완전히 평탄한 경계면인 유리면과의 실험 결과, 반사손실 값의 증가와 주파수의 증가 양상이 일정한 상관성을 가짐을 알 수 있었다.

두 실험에서 살펴보았듯이 수층과 퇴적층 간의 반사손실 측정 실험 결과가 주파수 및 수평입사각의 증가에 따라 많은 차이를 보이는 현상은 실험적 오차로서는 차이를 설명할 수가 없다. 그러나 경계면 효과에 의한 결과임은 확신할 수 있다.

그림 4, 5에서 살펴보았듯이 입도분포에 의한 거칠기 영향은 입사 신호에 대해 식 (3)의 레일리 인자와 같은 위상차를 갖게 하며 이로 인해 경계면에서의 반사계수는 $R \cdot \exp[-(2KH \sin \theta)^2 / 2]$ 와 같은 형태가 된다[23]. 여기서 H 는 해저면 거칠기의 평균제곱근 (rms) 값이며 평탄한 경계면에서 이것은 입도분포로 대체할 수 있다. 그림 5의 전체 입도분포 중 95% 신뢰구간에 해당하는 $-1.7 \sim 3.2 \phi$ 구간을 고려하면 APL-UW 모델은 주파수와 수평입사각에 따라 그림 7과 같은 새로운 결과를 갖게 된다. 즉 평균 입도 미만의 세립사질 성분은 모든 주파수에서 거칠기를 인식하지 못하지만 평균입도 이상의 조립사질 성분에서는 주파수의 증가에 따라 경계면을 거칠게 인식하며 따라서 반사손실도 증가하는 양상을 보인다. 이는 실험 결과에서 나타나는 모델과의 차이를 매우 잘 반영하고 있으며 반사손실 모델의 새로운 방향을 제시해 주고 있다.

사질 퇴적층의 경우 고주파 대역에서의 해저면 반사손실은 수평입사각이 증가함에 따라 일정한 증가를 보이는

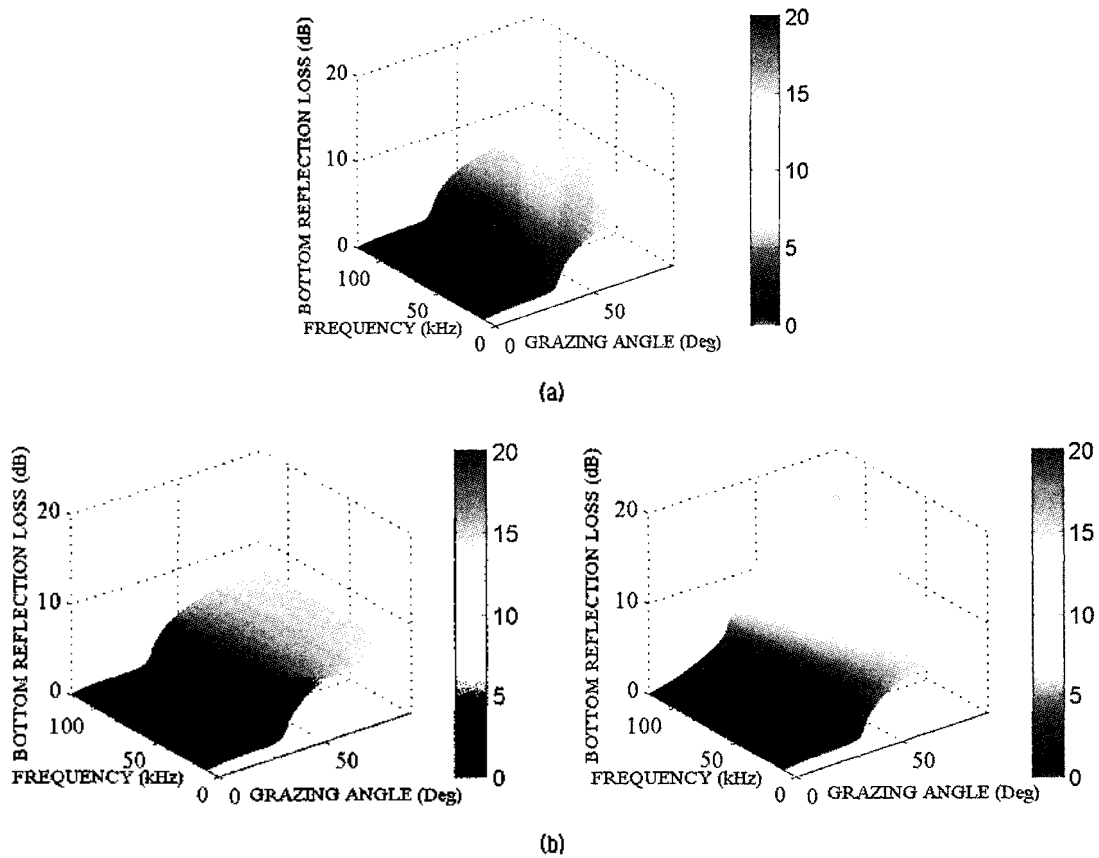


그림 7. 주파수와 수평입사각에 따른 해저면 반사손실 모델 결과: (a) 평균입도 0.5ϕ 의 APL-UW 모델 결과, (b) 입도분포 $-1.7 \sim 3.2 \phi$ (95% 신뢰구간)의 주파수 종속성을 고려한 모델 결과

Fig. 7. Bottom reflection loss model results as frequencies and grazing angles: (a) APL-UW model predictions at mean grain size 0.5ϕ , (b) Frequency dependence model predictions with grain size distribution $-1.7 \sim 3.2 \phi$ (95% confidential interval).

주파수 종속성을 갖는다. 특히 본 논문에서는 다른 고주파 해저면 반사손실 모델에서는 볼 수 없었던 높은 수평입사각에서도 주파수가 증가함에 따라 반사손실 값이 증가하는 결과를 보였다.

V. 결론 및 고찰

고주파 대역에서 수층과 사질 퇴적층의 평탄한 경계면에 의한 반사손실을 측정하기 위해 실내 수조 환경에서 실험을 하였다. 측정된 실험 자료는 수평입사각 (25° , 40° , 65° , 80°)에 따른 주파수별 (40 ~ 120 kHz) 반사손실로서 고주파 해저면 반사손실 모델 (Mourad & Jackson, 1989)인 APL-UW 모델과 비교하였으며 그 결과 주파수의 증가에 따라 높은 수평입사각에서도 반사손실 값이 증가하는 특이한 실험 결과를 관찰할 수 있었다. 고주파 해저면 반사손실 모델로서 널리 사용되고 있는 APL-UW 모델과

실험결과를 비교해 보면 주파수 60 kHz 이하의 경우 모델 예측치와 실측치가 거의 일치하였고 주파수 70 ~ 80 kHz의 경우 수평입사 임계각 이전에서는 모델과 잘 일치하나 높은 수평입사각에서는 실측치가 모델보다 2~3 dB 높은 경향을 보인다. 또한 주파수 90 kHz 이상의 주파수 대역에서는 주파수가 증가함에 따라 모델과의 차이가 상당히 증가하며 최대 10 dB까지의 차이를 보였다.

평균입도 0.5ϕ 의 사질 퇴적층이 수층과 이루는 경계면의 경우 거칠기 정도(x)가 $O(1)$ 에 해당하며 이는 주파수에 따라 입도의 거칠기를 달리 인식하게 된다. 실험 결과 주파수와 수평입사각이 증가할수록 반사손실이 높게 나타났으며, 특히 높은 수평입사각에서도 주파수에 따라 반사손실이 증가하는 강한 주파수 종속성을 확인하였다. 또한 전체 입도분포 중 신뢰구간 95%에 해당하는 입도 구간을 고려시 모델은 주파수와 평균입도에 따라 새로운 결과를 보였으며 실험에서 나타난 결과를 잘 반영하고 있었다.

따라서 고주파 영역의 해저면 음파전달 영향을 정확히 파악하기 위해서는 주파수에 따른 종속성이 고려된 반사 손실 모델을 개발해야 할 것이다. 특히 경계면 효과가 크게 작용하는 환경 하에서 고주파 소나 시스템을 운용하는 경우 반드시 높은 수평입사각에서도 주파수 종속성이 고려된 모델을 이용해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 수중음향특화연구센터의 연구지원에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

1. A. P. Lyons and T. H. Orsi, "The effect of a layer of varying density on high-frequency reflection, forward loss, and backscatter," *IEEE Oceanic Eng.*, 23 (4), 411-422, Oct. 1998.
2. E. I. Thorsos, "The validity of Kirchhoff approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum," *J. Acoust. Soc. Am.*, 83 (1), 78-92, Jan. 1988.
3. E. I. Thorsos and M. D. Richardson, "Guest editorial," *IEEE Oceanic Eng.*, 27 (3), 341-345, July 2002.
4. H. Medwin and C. S. Clay, *Acoustical Oceanography: Principles and Applications*, John Wiley & Sons, New York, Chap. 8, 258-261, Chap. 2, 5571, 1997.
5. H. Weinberg, "Generic Sonar Model," Naval Underwater Syst. Ctr., Tech. Doc. 5971A, 1980.
6. R. D. Stoll and T. K. Kan, "Reflection of acoustic waves at a water-sediment interface," *J. Acoust. Soc. Am.*, 70 (1), 149156, July 1981.
7. P. D. Mourad and D. R. Jackson, "High frequency sonar equation models for bottom backscatter and forward loss," *Proc. OCEAN'89*, New York, 1168-1175, 1989.
8. H. Weinberg, "CASS Roots," *IEEE Oceanic Eng.*, 1071-1076, 2000.
9. APL-UW High-frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook, APL-UW TR 9407, Oct. 1994.
10. N. P. Chotiros, "Acoustic modeling of sandy ocean sediments," *Proc. Int. Symp., Int. Tech.*, 231-236, 2002.
11. N. P. Chotiros, "Normal incident reflection loss from a sandy sediment" *J. Acoust. Soc. Am.*, 112 (5), 1831-1841, Nov. 2002.
12. J. A. Ogilvy, *Theory of Wave Scattering from Random rough*

Surfaces, Adam Hilger, Bristol, Chap. 1, 1-8, 1991.

13. P. H. Dahl, "On bistatic sea surface scattering: Field measurements and modeling," *J. Acoust. Soc. Am.*, 105 (4), 2583-2595, Apr. 1999.
14. 최지웅, 나정열, 나영남, "양상태 해수면 음파산란 측정," *한국음향학회지*, 20 (4), 81-86, 2001.
15. S. Stanic, E. Kennedy and R. I. Ray, "High-frequency bistatic reverberation from a smooth ocean bottom," *J. Acoust. Soc. Am.*, 93 (5), 2633-2638, May 1993.
16. N. V. Studenichnik, "Studies of the ocean-bottom reflection coefficient at angles of total internal reflection," *Acoustical Physics*, 48 (4), 473-480, 2002.
17. R. A. Davis, Jr., *Depositional Systems*, Prentice-Hall, New Jersey, Chap. 1, 134, 1992.
18. E. L. Hamilton and R. T. Bachman, "Sound velocity and related properties of marine sediments," *J. Acoust. Soc. Am.*, 72 (6), 1891-1904, Dec. 1982.
19. E. L. Hamilton, "Compressional-wave attenuation in marine sediment," *Geophysics*, 37 (4), 620-646, Aug. 1972.
20. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, McGraw-Hill, New York, Chap. 5, 99-111, 1983.
21. 최지웅, 나정열, 박경주, 윤관섭, 박정수, 나영남, "고주파 해수면 후방산란 신호 측정," *한국음향학회지*, 21 (4), 421-429, 2002.
22. L. Brekhovskikh and Yu. Lysanov, "Fundamentals of ocean acoustics," Springer-Verlag, Berlin, Chap. 9, 173-187, 1982.
23. H. Medwin and C. S. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, Academic Press, San Diego, Chap. 13, 1998.

저자 약력

● 박 순 식 (Soon-Shik Park)



1991년 3월~1995년 3월: 해군사관학교 조선공학과 (공학사)
 2002년 3월~현재: 한양대학교 지구해양과학과 석사과정 재학 중
 ※ 주관심분야: 수중음향

● 윤 관 섭 (Kwan-Seob Yoon)

한국음향학회지 제21권 제5호 참조

● 최 지 웅 (Jee Woong Choi)

한국음향학회지 제21권 제8호 참조

● 나 정 열 (Jungryul Na)

한국음향학회지 제21권 제8호 참조