

# 양상태 해수면 음파산란 측정

## Measurements of Bistatic Sea Surface Scattering Signals

최지웅\*, 나정열\*, 나영남\*\*  
(Jee Woong Choi\*, Jungyul Na\*, Young Nam Na\*\*)

\*한양대학교 지구해양과학과, \*\*국방과학연구소

(접수일자: 2001년 2월 1일; 수정일자: 2001년 3월 26일; 채택일자: 2001년 4월 11일)

126-kHz 양상태 해수면 음파산란 측정을 강원도 삼척시 연안에서 수행하였다. 수평입사각을  $38^\circ$ ,  $52^\circ$ 로 고정시킨 상태에서 트랜스듀서와 청음기의 거리를 변화시키면서 산란각의 변화에 따른 전방산란 신호의 변화를 관찰하였다. 해저면 산란신호와는 달리 해수면 산란신호는 해수면 유동성에 의해서 도달시간 변이와 진폭의 변이를 나타내었으며 신호간의 상관관계도 불규칙적인 경향을 나타내었다. 전방산란강도를 계산하여 Kirchhoff approximation (KA)과 small slope approximation (SSA)을 비교한 결과 두 모델 모두 실측치와 잘 일치하였다.

**핵심용어:** 양상태 해수면 산란, 잔향음, 파수 스펙트럼, 자기상관함수, 해수면 거칠기  
**투고분야:** 수중음향 분야 (5,2)

126-kHz bistatic sea surface scattering measurements were conducted in the shallow waters off the east coasts of Korea. The range from source to receiver was altered to change the scattering angle at the grazing angles of  $38^\circ$  and  $52^\circ$ . Unlike bottom scattering signal, the arrival time and the amplitude of sea surface scattering signals were varied due to the fluctuation of sea surface. The measured forward scattering strengths were compared to model predictions of Kirchhoff approximation and small slope approximation. In overall, the tendency of the scattering strengths showed reasonable agreement among the experimental data, Kirchhoff approximation, and small slope approximation.

**Keywords:** Bistatic sea surface scattering, Reverberation, Wave-number spectrum, Autocorrelation, Sea surface roughness

**ASK subject classification:** Underwater acoustics (5,2)

### I. 서 론

음원에서 방사된 음파는 해수면, 해저면 및 체적의 비균질성에서 산란된 후 해수내에 오랫동안 음장 (sound field)을 형성하게 된다. 이러한 경계면에 의한 음파 산란은 수중 표적 탐지와 수중 통신 시스템 운용에 제한 요소로 작용한다. 특히 시간에 대해 독립적인 해저면에 비해 해수면은 시공간적인 변화가 심하므로 해수면 음파산란

패턴 및 특성 파악은 표적 신호와 해수면 산란 신호의 효과적인 분리에 필수적이다. 해수면에 입사된 음파는 해수면 거칠기와 해수면 부근의 공기방울층에 의해서 전(全)방향으로 산란되며 이러한 산란신호의 각도에 따른 산란 패턴은 소나 시스템을 운용하는데 매우 중요하다. 특히 천해의 경우 음향 채널이 해수면과 해저면에 의해 형성되며 해수면과 해저면에 의한 전방산란은 음파 전달에 중요한 요소로 작용하게 된다. 그러나 이미 알려진 단상태 소나를 이용한 해수면 후방산란 특성 연구와는 달리 양상태 소나를 이용한 해수면의 전방산란 특성 연구는 실험의 복잡성 및 정확성 미비로 인해서 거의 실시되지

책임저자: 최지웅 (choij@ihanyang.ac.kr)

425-791 경기도 안산시 사1동 1271번지

한양대학교 지구해양과학과 해양음향연구실

(전화: 031-400-4233; 팩스: 031-406-6458)

못하였으며 기존의 연구 또한 반사각 위주의 연구에 국한되고 있다[1,2]. 음파를 이용한 해양 탐사 방법은 음원과 수신기가 같은 위치에 존재하는 단상태 시스템에서 음원과 수신기가 서로 분리된 양상태 시스템으로 발전하고 있는 상황에서 경계면 특히 해수면에서의 음파 전방산란 특성 연구의 중요성이 부각되고 있다. 따라서 본 논문에서는 해수면 음파산란 실험을 통하여 천해에서의 음파전달에 큰 영향을 미치는 해수면 전방산란 특성을 파악하고자 하였으며 Kirchhoff approximation (이후 KA)[3]과 small slope approximation (이후 SSA)[4,5]을 이용하여 예측한 산란강도와 실측치를 비교 분석하였다.

해수면 거칠기는 음파의 파장에 비해 rms 해수면 파고가 큰 저주파 성분과 rms 해수면 파고가 상대적으로 작은 고주파 성분으로 구분할 수 있으며, 음파산란을 이해하는데 있어서 반사각 부근의 산란인 경우 저주파 성분의 해수면 거칠기에 의한 모델인 KA가 적합하며 반사각 범위에서 벗어나는 산란일수록 perturbation 이론이 적합하다[6]. 따라서 해양에서의 음파 산란을 이해하기 위해서는 이 두 이론을 혼합한 composite roughness 이론이 사용되어진다[1,7,8]. 그러나 이 이론은 KA와 perturbation 이론이 연결되는 부분에서 내삽법(interpolation)을 이용한 임의적 연결을 시켜야 하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 해수면 거칠기를 저주파 성분과 고주파 성분으로 구분함 없이 KA와 perturbation 이론을 연결해 주는 SSA가 개발되었다[4]. 그 후 SSA 이론에 대한 많은 연구와 다른 이론들과의 비교를 통하여 SSA의 정확성을 확인하고자 하였으나 실제 관측 자료와의 비교를 통한 연구는 미비하였다[9~11]. Dahl[5]은 수평어레이(HLA) 청음기를 이용하여 반사각에서의 해수면 산란의 수평적인 상관관계를 파악하였으며 이를 SSA와 비교 분석하였다. 그러나 반사각 위주의 분석만을 수행하였을 뿐 산란 각의 변화에 따른 산란 패턴을 파악하지는 못하였다.

국내에서는 Na 등[12]이 perturbation 이론을 이용하여 해수면 상태를 역추정 하였으며, 최 등[13]이 composite roughness 이론과 공기방울 산란 모델을 이용한 예측치와 천해에서의 해수면 후방산란 강도를 비교하였으나 모두 단상태 해수면 산란에만 국한되었다. 해저면의 경우 Choi 등[14]에 의해서 해저면을 평탄한 면, 수평 연흔, 수직 연흔으로 모의한 후 해저면 거칠기 변화에 따른 3차원 산란 패턴을 측정하였으나 해수면 양상태 산란 실험은 국내에서는 아직까지 수행된 적이 없다.

본 논문에서는 해수면 전방산란 특성을 파악하기 위하여 2000년 8월 강원도 삼척시 연안 해역에서 수평입사각

(incident angle,  $\theta_i$ )과 산란각 (scattering angle,  $\theta_s$ )을 변화시키면서 해수면 전방산란 신호를 측정하여 양상태 해수면 진향을 특성을 파악하고자 하였으며 전방산란강도를 구하여 KA 및 SSA와 비교하였다.

## II. 산란 이론

본 논문에서 사용한 KA에 의한 양상태 산란 단면적 ( $\sigma_{kr}$ )은 아래식과 같다[3,15].

$$\sigma_{kr} = \frac{k^2 f^2(\theta) R^2}{2\pi} \int_0^\infty r J_0(2\pi r) \exp(-P^2 [1 - C(r)]) dr \quad (1)$$

여기서,  $P$ 는 해수면 거칠기의 함수인 Rayleigh 파라메터로

$$P = kH(\sin \theta_i + \sin \theta_s) \quad (2)$$

이며  $H$ 는 rms 해수면 파고이다. 또한  $f(\theta)$ 는

$$f(\theta) = \frac{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}{\gamma} \quad (3)$$

$$2\alpha = \cos \theta_i - \cos \theta_s \cos \phi_b$$

$$2\beta = -\cos \theta_s \sin \phi_b$$

$$2\gamma = -(\sin \theta_i + \sin \theta_s) \quad (4)$$

로 표현되어지며  $\phi_b$ 는 방위각(bistatic angle)이다(그림 1).  $J_0$ 는 영차 Bessel 함수이며  $x$ 는  $k\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$ 을 나타내고  $R$ 은 해수면 반사계수이다.  $C(r)$ 는 해수면 거칠기 변이에 대한 등방성 자기상관함수(isotropic autocorrelation function)로서 아래와 같은 관계식으로 구해진다.

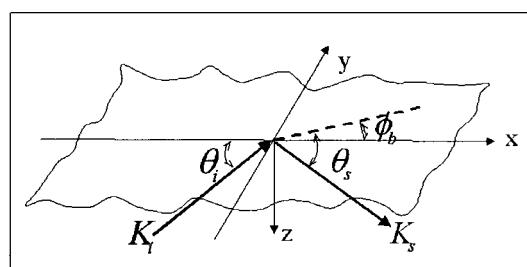


그림 1. 양상태 산란각의 정의.  $\theta_i$ : 수평입사각  $\theta_s$ : 산란각  $\phi_b$ : 방위각

Fig. 1. Definition of bistatic angles.  $\theta_i$ : grazing angle,  $\theta_s$ : scattering angle,  $\phi_b$ : bistatic angle.

$$C(r) = \frac{1}{H^2} \int_0^\infty K J_0(Kr) W(K) dK \quad (5)$$

여기서  $W(K)$ 는 지향 평균 파수 스펙트럼 (directionally averaged wave-number spectrum)이다.

SSA에 의한 산란단면적( $\sigma_s$ )은 KA와 아래와 같은 관계식에 의해서 계산되어진다[5,11].

$$\sigma_s = \sigma_{kr} / G^2 \quad (6)$$

여기서  $G$ 는

$$G = \frac{\gamma \sin \theta_i - \alpha \cos \theta_i}{\sin \theta_i \sin \theta_s} \quad (7)$$

이다.

### III. 실험 및 분석 방법

양상태 해수면 음파산란 실험은 2000년 8월 12일 강원도 삼척시 근덕면 부근 해상에서 실시되었다(그림 2). 실험 당시의 해수면 거칠기는 목측에 의하면 0.5m 이내로 잔잔한 상태였으며 당시의 해상풍 속도 또한 1m/sec 이하였다.

측정 해역의 수심은 약 4.4m였으며 트랜스듀서는 수심 2.7m에 위치시켰다. 수신기로는 무지향성인 B&K 8106을 사용하였으며 트랜스듀서에서 4m 떨어진 곳에 설치한 후 12m까지 1m씩 거리를 증가시키면서 해수면 산란 신호

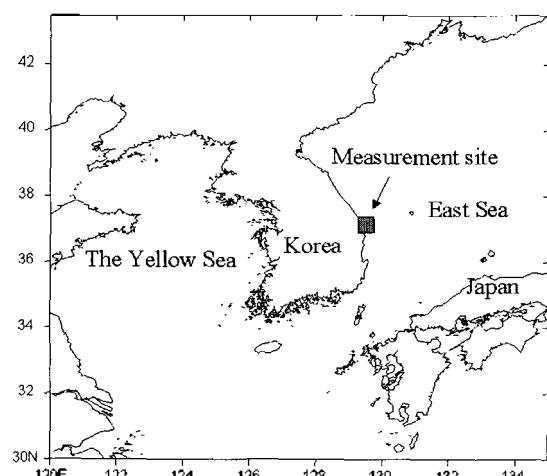


그림 2. 실험 해역

Fig. 2. Location of measurement site.

를 측정하였다(그림 3).

실험 해역의 수심이 음원에서 멀어질수록 조금씩 증가되었으므로 수신기의 설치 수심 또한 거리에 따라 증가되었다. 다중 경로 영향을 줄이기 위하여 음원의 범폭이 10 인 지향성 음원을 사용하였으므로 음파의 진행방향에 수신기를 위치시키기 위해 지지대를 사용하여 지향오차를 최소화 하였다(그림 3). 본 실험에서는 수평입사각을 38° 와 52°의 두 가지 경우에 대하여 실험을 실시하였으며 38°의 경우 산란각의 범위는 약 22~80°, 52°의 경우의 산란각 범위는 19~57°였다. 음원 준위로는 192.05 dB re 1 μPa 1m를 사용하였으며 수신기의 수신감도 (RVS)는 -193.76 dB re 1V/1 μPa이였다.

음원 신호는 펄스길이가 0.4 msec인 126 kHz 정현파 신호였으며 1.5초의 간격으로 50번씩 반복하여 송신하였다. 수신기에 수신된 산란신호는 measuring amplifier (B&K 2610)에서 30 dB 증폭된 후 A/D 변환기를 거쳐 대역통과 필터를 통과시킨 후 컴퓨터에 저장하였다. CTD 측정 결과 실험 해역의 음속은 수심에 따라 1520 m/sec로 균일하였다.

수신된 신호는 산란강도를 구하기 위하여 양상을 평균(ensemble average)을 취한 후 RVS를 고려하여 잔향음 준위를 계산하였다(그림 4). 산란강도는 계산된 잔향음 준위를 아래 공식에 대입하여 계산할 수 있다[16].

$$SS = RL - SL - TL_1 + TL_2 - 10 \log A \quad (8)$$

여기서 SS는 전방산란강도 (dB re 1 m<sup>2</sup>), RL은 잔향음 준위 (dB re 1 μPa), SL은 음원 준위 (dB re 1 μPa at 1m)이며,  $TL_1$ 과  $TL_2$ 는 각각 음원에서 해저면까지, 해저면에서 수신기까지의 전달손실(dB re 1m)이다. A는 insonified 면적으로 범폭과 펄스 길이에 의해서 결정되어진다.

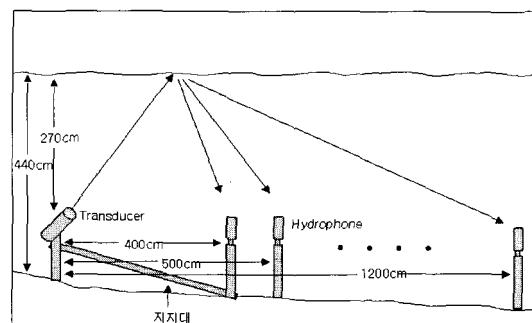


그림 3. 해수면 전방산란 신호를 측정하기 위한 시스템 구성도

Fig. 3. Experimental layout for measurements of forward scattering signal from the sea surface.

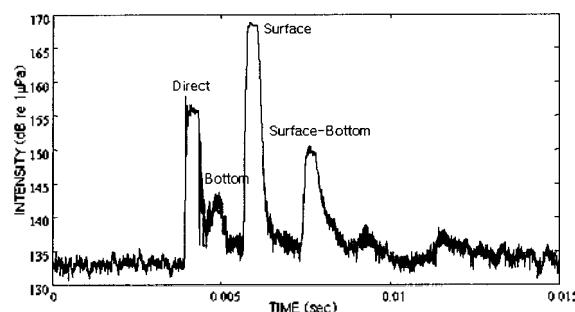


그림 4. 앙상블 평균에 의해서 구해진 수신 신호 준위. 직접파와 해저면 반사파, 해수면 반사파, 해수면-해저면 반사파를 구분할 수 있다

Fig. 4. Ensemble-averaged intensity of signal showing the primary arrivals: direct, bottom bounce, surface bounce, and surface-bottom bounce.

본 논문에서는 무지향성 파수 스펙트럼 (omni-directional wave-number spectrum,  $\tilde{W}(K)$ )으로 Donelan 등[17]과 Pierson[18]의 모델을 이용하여 계산하였다. 파수 스펙트럼 최대점에서의 파수를  $K_p$ 라고 정의하였을 때  $K \leq 10K_p$ 인 낮은 파수 부분에서는 Donelan의 모델을,  $K \geq 0.942\text{cm}^{-1}$ 인 경우는 Pierson 모델을,  $10K_p \leq K \leq 0.942\text{cm}^{-1}$ 의 범위에서는 Pierson이 제시한 두 모델간의 내삽법을 사용하여 파수 스펙트럼을 모델링 하였다[8]. 만개해 (fully developed sea)의 경우  $K_p$ 는  $g/(1.2U_{10}^2)$ 이며  $g$ 는 중력가속도,  $U_{10}$ 은 해수면에서 10m 높이에서의 해상풍 속도이다.

그림 5는 실험 당시 해상풍 속도인 1m/sec일 경우 Pierson과 Donelan의 모델에 의해서 계산된 해수면 파수 스펙트럼이다. 실선 부분은 Donelan 모델 적용 구간이며 점선 부분은 내삽법 구간을 포함한 Pierson 모델 적용 구간이다. 해상풍 속도가 약할수록 전체적인 파수는 높은 파수 대역에 분포하며, 해상풍 속도가 강해질수록 낮은 파수 대역의 에너지 증가가 강하게 일어나므로 낮은 파수 대역의 분포가 상대적으로 높게 나타난다. 실험 해상은 해수면이 잔잔한 경우였으므로 비교적 높은 파수 대역에서 높은 에너지 분포를 보이고 있다.

#### IV. 측정 결과

수신된 신호는 음원과 수신기 사이의 거리와 도달 시간 차에 의해서 해수면과 해저면 산란파와 직접 도달파 신호를 구분할 수 있다(그림 4). 사용된 트랜스듀서는 범폭이

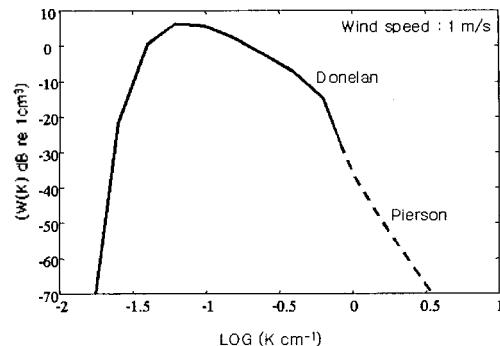


그림 5. Pierson(1976)과 Donelan(1985)의 모델을 사용하여 계산한 해수면 파수 스펙트럼

Fig. 5. Ocean surface wave number spectrum using Pierson (1976) and Donelan et al.(1985).

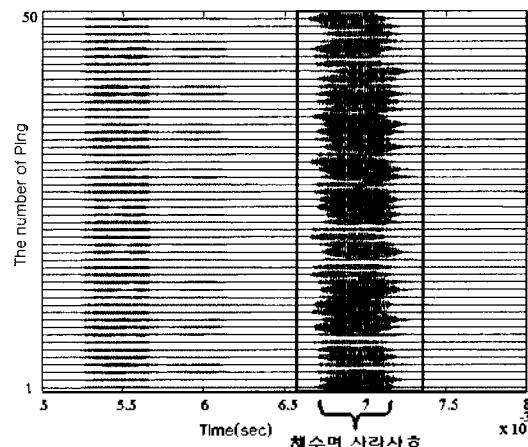


그림 6. 양상태 고주파 해수면 산란신호 ( $38^\circ, 36^\circ, 0^\circ$ )

Fig. 6. High-frequency bistatic sea surface scattering signals ( $38^\circ, 36^\circ, 0^\circ$ ).

$10^\circ$ 인 지향성 음원을 사용하였으므로 주빔 (main lobe)에 의한 해수면 산란파가 부엽 (side lobe)에 의한 직접파보다 높은 전향음 준위를 나타내고 있다. 또한 음원 신호의 펄스 길이가 0.4 msec였으므로 각 경로의 신호들의 분리가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

해저면파는 달리 해수면은 유동성을 가지므로 50개의 해수면 산란 신호들간에 도달시간 변이와 진폭 변이를 보이고 있다(그림 6). 또한 신호들간의 시간적 상관함수 (temporal coherence)를 살펴보면 해수면 유동성으로 인해 신호들간의 상관관계가 불규칙적이다(그림 7).

그림 5의 파수 스펙트럼에서 가장 우세한 파수는 약  $10^{-1.23}\text{cm}^{-1}$ 이며 해수면이 잔잔하였으므로 해수면 파수들이 비교적 높은 파수들로 구성되어 있다. 가장 우세한 파수를 천해에서의 분산관계 (dispersion relation)인

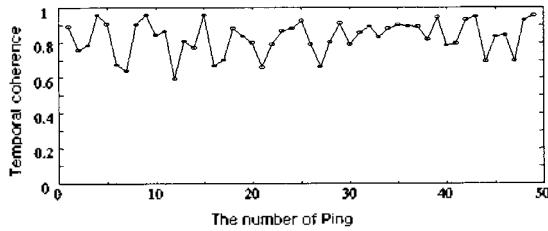


그림 7. 해수면 전방산란 신호의 시간적 상관함수  
Fig. 7. Temporal coherence of sound forward scattered from the sea surface.

$\omega^2 = gk \tanh kH$ 를 이용하여 파랑의 주기로 환산하면 실험 당시 가장 우세한 파랑의 주기는 약 0.83초로 신호들간의 시간차인 1.5초보다 훨씬 작은 주기를 가진다. 따라서 본 실험의 신호들간의 상관관계를 이용하여 해수면의 주기를 파악하는 데는 어려움이 있다.

## V. 모델과 비교

모델에 의한 산란강도를 계산하기 위해 자기상관함수를 식(5)를 이용하여 구하였다(그림 8). 일반적으로 해수면 파고(height) 분포와 rms 파고와는 서로 다른 의미로 사용된다. 즉, rms 파고가 같을 경우라도 해수면 파고 분포는 서로 다르게 분포할 수 있다. 따라서 거리에 따른 해수면 파고의 변화폭은 서로 다르기 때문에 해수면 자기상관함수는 매우 중요한 의미를 가진다[19]. 해수면 상관함수는  $r=0$ 에서 '1'의 값을 가지며 거리가 증가할수록 '0'으로 감소하게 되는데 이러한 감소 양상은 해수면 형태에 따라 달라지게 된다. 그러므로 모델에 의해 산란강도를 계산하기 위해서는 실험 해역의 해수면 거칠기의 에너지 분포를 정확히 파악하는 것이 중요하다.

식(1)과 (6)에 의해서 계산된 KA와 SSA는 반사각 부근에서는 두 모델이 일치하며 반사각에서 멀어질수록 SSA가 KA에 비해서 낮은 산란강도를 나타낸다(그림 9, 10). 이는 식(7)의 영향으로  $G$ 는 반사각에서 '1'의 값을 가지므로 KA와 정확히 일치하게 된다. 수평입사각이  $38^\circ$ 인 경우 실험치는 반사각이 반사각을 포함하는  $20\sim40^\circ$  범위에서 두 모델에 비해  $2\sim3$ dB 높은 산란강도를 나타내고 있으며 반사각이 증가할수록 모델에 의한 예측치에 비해  $1\sim5$ dB 낮은 산란강도를 나타내고 있다(그림 9). 수평입사각이  $52^\circ$ 인 경우는 반사각  $20\sim40^\circ$  범위에서 두 모델에 비해  $1\sim3$ dB 높은 산란강도를 나타내며 반사각  $45^\circ$ 와  $57^\circ$ 에서는 모델보다  $3\sim4$ dB 낮은 산란강도를 나타내고 있다(그림 10). 전반적으로 시스템 오차 및 측정시 발생하는

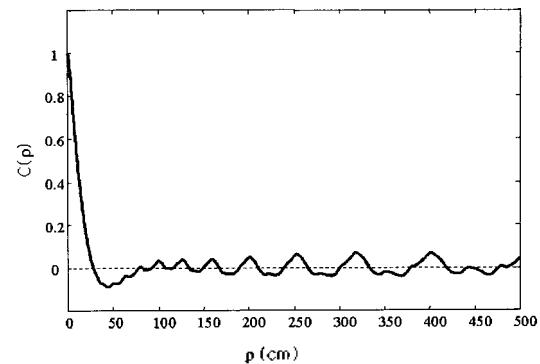


그림 8. 해수면 파수 스펙트럼에 의해서 모의된 자기상관함수  
Fig. 8. Simulated correlation function by wave-number spectrum.

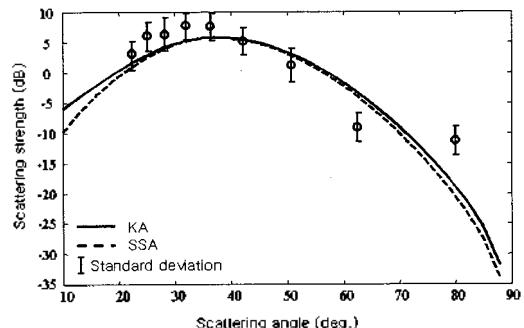


그림 9. 모델과 측정된 산란강도 비교. 수평입사각:  $38^\circ$   
Fig. 9. Comparison of model and measured data. Grazing angle:  $38^\circ$ .

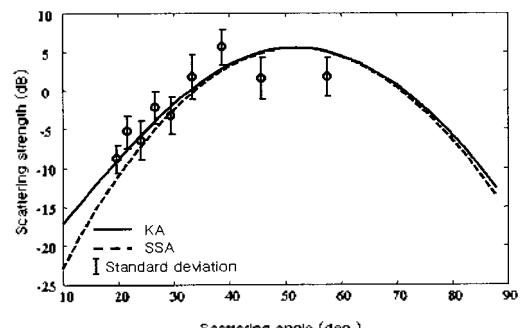


그림 10. 모델과 측정된 산란강도 비교. 수평입사각:  $52^\circ$   
Fig. 10. Comparison of model and measured data. Grazing angle:  $52^\circ$ .

지향 오차를 고려시 실측치는 두 모델과 잘 일치하는 것으로 판단되나 두 모델 중 더욱 정확한 모델을 판단하기는 본 측정 결과에서는 어려우며 이를 위해서는 측방산란 및 후방산란까지 포함된 방향에서의 3차원 산란 패턴 측정 및 모델간의 비교가 필요하다.

본 실험에서는 실험 당시 해상풍 속도가  $1\text{ m/sec}$  미만이었고 해수면 또한 상당히 잔잔한 상태였으므로 공기방울에 의한 산란 영향을 고려하지 않았다. 그러나 해수면

이 거칠어질수록 쇄파에 의해 생성되는 공기방울에 의한 음파산란이 중요한 부분을 차지하므로 공기방울에 의한 산란 영향도 고려되어야 할 것이다.

## VI. 결론

해수면 양상태 음파 산란 특성을 파악하기 위하여 천해에서 지향성 음원을 사용하여 전방산란 신호를 측정하였다. 수평입사각을  $38^\circ$ 와  $52^\circ$ 로 고정시킨 상태에서 음원과 수신기의 거리를 점차 늘려가면서 산란각을 변화시켰다. 같은 조건에서 측정된 50개의 신호들은 해저면 신호와는 달리 해수면 유동성에 의해서 도달시간 변이와 진폭 변이를 보이고 있으며 또한 신호들간의 상관관계가 불규칙적이었다. 전방산란강도를 계산하여 산란강도 예측 모델과 비교한 결과 KA과 SSA에 의한 예측치와 잘 일치하였다. 그러나 두 모델 중 더욱 정확한 모델을 판단하기에는 본 측정 결과에서는 어려우며 이를 위해서는 측방산란 및 후방산란까지 포함된 전 방향에서의 3차원 산란 패턴 측정 및 모델간의 비교가 필요하다. 또한 이번 실험에서는 해수면 파수 스펙트럼으로 낮은 파수 영역에서는 Donelan의 모델을, 높은 파수 영역에서는 Pierson의 모델을 사용하였으나 더욱 정확한 예측치를 계산하기 위해서는 wave buoy를 이용한 실험 해역의 해수면 거칠기를 파악하여야 한다. 또한 해수면이 거칠어질수록 쇄파에 의해 생성되는 공기방울에 의한 음파산란이 중요한 부분을 차지하므로 공기방울에 의한 산란 영향도 고려되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 논문을 위하여 함께 실험에 참가해 준 한양대학교 지구해양과학과 해양음향연구실 잔향음 연구팀의 박사과정 박경주 소령, 석사과정 김형수, 윤관섭군과 해군해양전술정보단 박길선 대위에게 감사드립니다.

## 참고 문헌

- S. T. McDaniel and A. D. Gorman, "Acoustic and radar sea surface backscatter," *J. Geophys. Res.*, Vol. 87(C6), pp. 4127–4136, 1982.
- P. H. Dahl, "On the spatial coherence and angular spreading of sound forward scattered from the sea surface: Measurements and interpretive model," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 100, pp. 748–758, 1996.
- I. Tolstoy and C. S. Clay, *Ocean Acoustics: theory and experiment in under-water sound*, McGraw-Hill, 1966.
- A. G. Voronovich, *Wave Scattering from Rough Surfaces*, Springer-Verlag, New York, 1993.
- P. H. Dahl, "On bistatic sea surface scattering: Field measurements and modeling," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 105(4), pp. 2155–2169, 1999.
- L. M. Brekhovskikh and Yu. P. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*, 2nd ed, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
- B. F. Kuryanov, "The scattering of sound waves at a rough surface with two types of irregularity," *Sov. Phys. Acoust.*, Vol. 8, pp. 252–257, 1963.
- S. T. McDaniel, "Sea surface reverberation: A review," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 94(4), pp. 1905–1922, 1993.
- S. T. McDaniel, "A small-slope theory of rough surface scattering," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 95(4), pp. 1858–1864, 1994.
- E. I. Thorsos and S. L. Brosch, "An investigation of the small slope approximation for scattering from rough surfaces. Part I. Theory," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 97(4), pp. 2082–2093, 1995.
- S. L. Brochat and E. I. Thorsos, "An investigation of the small slope approximation for scattering from rough surfaces. Part II. Numerical studies," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 101(5), pp. 2615–2625, 1997.
- J. Na and S. K. Kim, "Estimation of the sea surface wind from surface reverberation signals," *J. Acoust. Soc. Korea.*, Vol. 15(2E), pp. 45–49, 1996.
- 최지웅, 나정열, 조운현, 내만에서의 해수면 후방산란신호 특성, 한국음향학회지, 제19권 2호, pp. 46–53, 2000.
- J. W. Choi, J. Na and W. Seong, "240-kHz bistatic bottom scattering measurements in shallow-water," *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. 26(1), pp. 54–62, 2001.
- P. Beckmann and A. Spizzichino, *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, Pergamon, Oxford, 1963.
- R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1983.
- M. A. Donelan, J. Hamilton, and W. H. Hui, "Directional spectra of wind generated waves," *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A*, Vol. 315, pp. 509–562, 1985.
- W. J. Pierson, "The theory and applications of ocean wave measuring systems at and below the sea surface, on the land, and from aircraft and spacecraft," NASA Contract Rep. CR-2646, NASA, Washington DC, 1976.
- J. A. Ogilvy, *Theory of wave scattering from random rough surfaces*, Adam Hilger, Bristol, 1991.

## 저자 약력

### ● 최지웅 (Jee Woong Choi)

한국음향학회지 제19권 2호 참조

### ● 나정열 (Jungyul Na)

한국음향학회지 제8권 6호 참조

### ● 나영남 (Young Nam Na)

한국음향학회지 제15권 3호 참조