

천해에서 이동음원으로 측정된 해저면 후방산란의 통계적 특성

Statistical Characteristics of Bottom Backscattering by a Moving Source at a Shallow Water Site

박 정 수*, 정 문 섭*, 장 덕 흥*, 최 재 영*, 심 태 보*

(J. S. Park*, M. S. Jurng*, D. H. Chang*, J. Y. Choi*, Taebo Shim*)

요 약

산란강도의 변동에 따른 통계적 특성은 능동소나의 성능에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 주요 산란과정을 이해하는 측면에서 매우 중요하다. 본 논문에서는 천해에서 측정된 해저면 후방산란 신호의 통계적 특성 분석에 대한 내용을 기술하였다. 천천히 움직이는 30kHz의 실험용 소나로 해저면에 대한 자료를 수집하였다. 신호의 진폭변화에 대한 시·공간 상관함수를 계산하였다. 또한, 넓은 빔과 좁은 빔 신호의 포락선에 대한 분포함수와 오경보 확률을 계산하고, 이론 모델과 비교를 시도하였다. 분석 결과에서 이동음원에 의한 해저면 후방산란 변동의 통계적 특성은 고정된 음원의 경우와 다른 특징을 나타냈다.

ABSTRACT

Fluctuation statistics of scattering strength are not only important because they impact the performance of active sonar systems, but also because they may provide insight into the major scattering process. In this article, analysis of the statistical characteristics of bottom backscattering, measured in shallow water, are presented. The slowly moving experimental sonar was operated at 30kHz to gather data over the bottom. Spatial and temporal correlation functions of the signal amplitudes were measured. The distribution function and probability of false alarm function of the detected envelope of widebeam and narrowbeam signals were measured. An attempt was made to compare the results with existing theoretical models. The result suggests that the statistical characteristics of bottom backscattering fluctuation of moving source is differ from that of fixed source.

1. 서 론

능동소나의 성능 예측과 능동소나의 탐지기 설계는 물론 음파 산란 과정을 이해하기 위해서 잔향음 진폭 변화에 대한 이해가 필요하다. 특히 천해에서 잔향음에 크게 기여하는 해저면 후방산란강도의 진폭 변화에 관한 통계적 특성의 이해는 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 천해에서 이동음원으로 측정된 해저면 후방산란강도의 진폭 변화 특성을 통계적으로 분석하고 그 결과를 서술하였다.

Stanton[2]은 해저면 후방산란강도의 진폭 변화를 음파의 파수(k)와 해저면 기복(σ)의 관계로 설명하였으며, 해저면이 거친 조건일 때($4k^2\sigma^2 \gg 1$) 진폭 변화는 Rayleigh PDF(Probability Distribution Function), 준 평탄 조건일 때($4k^2\sigma^2 \ll 1$) Gaussian PDF, 두 경우의 중간 상태일 때

는 Rayleigh와 Gaussian PDF의 중간적인 특성을 갖는다고 하였다. 또한 그는 $4k^2\sigma^2 \geq 1$ 일 때는 언제나 Rayleigh-like PDF를 따른다고 하였다. Chotiros 등[1]과 Boehme 등[3]은 트랜스듀서의 빔폭에 따라 넓은 빔(21°)에 수신된 경우 Rayleigh PDF, 좁은 빔(2.8°)에 수신된 경우에는 log-normal PDF를 따른다고 하였다. 또 이들은 한 정점음 기준으로 방위각이 변하면 해저면의 거칠기가 일정하여도 ping 간의 일관성이 현저히 떨어진다고 하였다. Stanic과 Kennedy[4]는 동일한 특성의 산란체가 음파 입사면에 무작위로 분포되어 있는 경우에 Rayleigh PDF에 가깝고, 특정한 산란체들이 균대균대 분포되어 있는 경우에는 log-normal PDF에 가까워진다고 하였다. Stanton[5], McDaniel[6], Crowther[7] 등은 거친 해저면의 경우에 2차원적인 산란체 배열의 상관관계에 따른 산란은 Bragg 이론으로 설명할 수 있고, 빔 종속성이 강하며 대체로 Gaussian PDF를 따른다고 하였다. 이밖에도 잔향음의 통계적 특성에 대한 많은 연구 결과들이 보고되었다[8, 9, 10].

본 논문에서는 거의 일정한 속도로 이동하는 음원으로

*국방과학연구소 연구원
접수일자: 1996년 3월 11일

부터 획득한 해저면 후방산란의 진폭 변화 특성을 파악하기 위하여 시·공간적인 상관 함수, 확률 분포 함수, 오경보 확률(Probability of False Alarm, PFA) 등의 통계 처리 및 분석을 하였다. 통계 처리된 후방산란강도를 빔폭과 Rayleigh 및 log-normal 이론 분포와 비교하고, 이로부터 진폭 변화의 특성 및 원인을 추정하였다.

II. 잔향음 신호 획득

분석에 사용한 해저면 잔향음은 여름철에 수심 70m인 천해에서 1300톤급 실험선 현측에 약 300Kg되는 소나를 30m 수심에 내리고 일정 방향으로 표류시키며 측정하였다. 분석에 이용한 60개 ping을 측정하는데 소요된 시간은 4분으로써 실험선의 표류에 따른 음원의 이동 속도는 일정하였다. 측정 해역의 환경 조건, 측정 방법 및 주파 잔향음 측정 시스템의 구성도 등은 박 등[11]의 논문 에 기술되어 있으며, 실험선의 평균 이동 속도는 약 0.3m/sec, 파고 1m 이내, 평균 풍속 5노트, 방위각 310°의 상태에서 ping간격을 4초로 하여 측정을 반복하였다. 주파수는 100Hz 폭의 30kHz를 사용하고 수평 빔폭이 22°이고 수직 빔폭이 21°인 넓은 빔과 수평 빔폭이 8°이고 수직 빔폭이 140°인 좁은 빔 센서로 동시에 수신하였다. 그림 1은 넓은 빔과 좁은 빔의 빔폭으로 계산한 시간에 따른 해저면 입사각을 보여준다. 후방산란의 일관성 판단을 위해서 입사면이 충분히 중첩되도록 펄스 길이를 비교적 긴 0.05초로 하였다. 실험 해역의 퇴적물은 sand silt clay로써, 공간적인 조성 변화가 크지 않았다. 분석 대상 신호의 해저면 입사각은 12°부터 13°까지이며 해저면 음파 산란이 퇴적물의 층상 구조보다는 해저면 퇴적물 조성 및 굴곡의 영향을 지배적으로 받았다[11].

수신 잔향음으로부터 순간적인 신호의 전력을 구하기 위하여 도플러 변이가 있는 경우에도 전력 산출이 용이한 직각 위상검파(quadrature detection) 방법을 적용하였다. 직각 위상검파는 천해 잔향음과 같이 진폭 변화가 심한 협대역 신호에 그림 2와 같은 처리를 하여 반송파를 제거함으로써, 광대역 신호에 적용하는 단순한 제곱검파

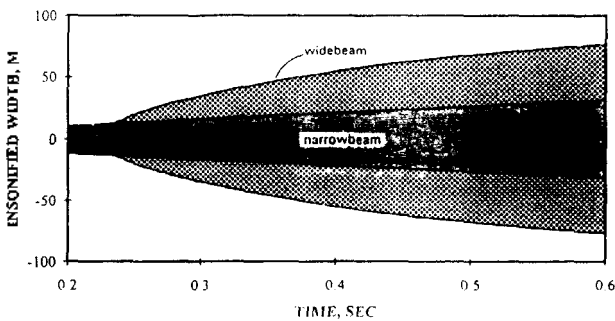


그림 1. 빔폭이 22°인 넓은 빔과 빔폭이 8°인 좁은 빔의 해저면 입사면적

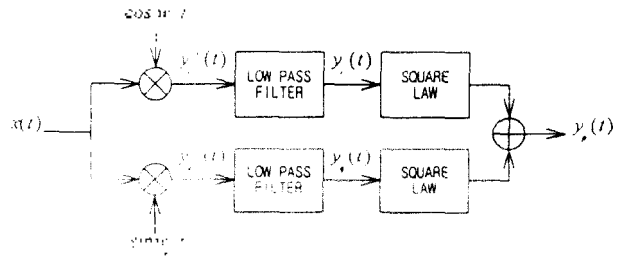


그림 2. 직각 위상검파(Quadrature detection) 과정

(square law detection)보다 우수한 성능으로 기저대역 신호의 위상 정보와 순간적인 신호의 전력 검출이 가능하다.

III. 상관 함수

펄스 음원에 의한 잔향음은 시간축에서 펄스 길이 만큼 연속적인 파형 중첩이 발생한다. 그러므로 임의의 시간에서부터 펄스 길이 만큼의 잔향음은 파형 중첩에 의하여 연관성이 크게 나타난다. 이동음원의 경우에도 ping 반복 시간 동안 이동 거리가 펄스의 중첩 길이보다 매우 작다면 ping 상호간의 연관성이 비교적 크게 나타난다. 본 실험의 경우에 0.05초 펄스에 의한 중첩 길이는 약 45m이고, 인접 ping간의 이동 거리는 약 1.2m로써 중첩 효과가 충분히 유지되었다. 움직이는 음원에 의한 잔향음의 상관성을 파악하기 위하여 도입한 정규화된 전력의 상호상관(normalized power crosscorrelation, C_{PP(t)})을 추정하는 식은 다음과 같다.

$$C_{PP(t)} = \left[\frac{\sum_{l=M}^{M+N} (y_p(t, n) y_p(t, n+r))}{\left(\sum_{l=M}^{M+N} y_p^2(t, n) \sum_{l=M}^{M+N} y_p^2(t, n+r) \right)^{1/2}} \right] \quad (1)$$

여기서 y_p는 전력, N은 샘플링 창, M은 창에서 첫번째 신호개수, r는 시간 변화, r은 증분이다.

해저면 잔향음이 미세한 0.48초부터 0.58초 사이의 신호를 선택하여 식 (1)로부터 r=0일 때의 자기상관을 추정

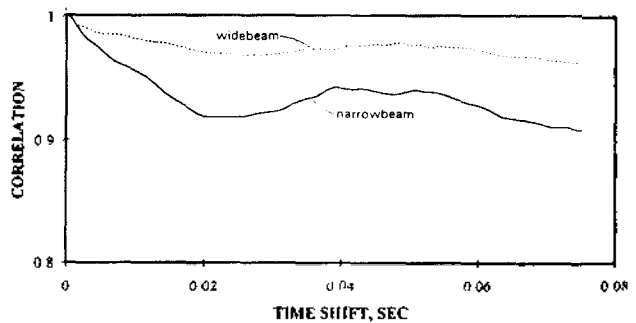


그림 3. 정규화된 후방산란강도의 자기상관

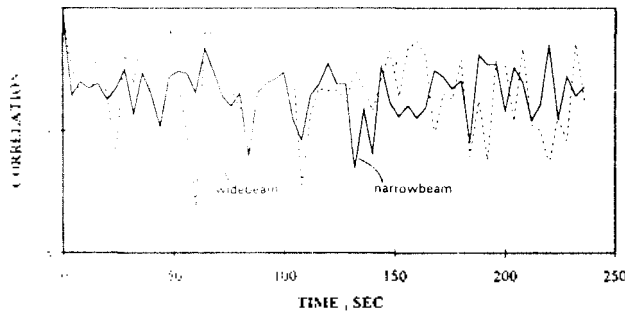


그림 4. $\tau=0$ 이고 $\tau=1\sim 60$ 일 때 정규화된 후방산란강도의 ping 간 상호상관

하였다. 거의 모든 ping에서 그림 3과 같이 넓은 빔의 자기상관이 좁은 빔보다 높다. 이러한 경향은 Chotiros 등 [1]이 설명한 바와 같이 넓은 빔의 2차원 중첩상관이 높고, 이로 인한 전폭 변화가 비교적 약하기 때문으로 볼 수 있다.

식 (1)을 사용하여 ping간의 상호상관을 추정하고 $\tau=0$, $\tau=1\sim 60$ 일 때의 상호상관을 그림 4에 나타냈다. 평균 상호상관은 넓은 빔이 좁은 빔보다 약간 높지만, 이것은 Chotiros 등 [1]이 $\tau=0$ 일 때 고정되어 있는 음원을 사용하여 측정한 결과보다는 낮다

IV. 확률 분포 함수

해저면 후방산란강도의 시·공간적 일관성 분석 및 추정 모델과 비교를 하기 위하여 비모수 검정(nonparametric testing) 방법인 Kolmogorov-Smirnov two-tailed 검정법(이후 K-S 검정법)을 사용하였다[12, 13]. K-S 검정법을 포함하는 비모수 검정법은 해저면 후방산란강도처럼 분포 함수가 Gaussian, Rayleigh, log-normal등의 다양한 분포를 따를 때 정보 손실이 작고 효율이 높은 방법이다[14, 15].

검정을 하기 전에 해저면 간향음 신호로부터 해저면 후방산란강도(backscattering strength, B_{ss})를 계산한다. 나 등[16]과 박 등[11]의 분석을 근거로 해저면 후방산란강도가 Lambert의 법칙을 따른다고 가정할 때 정규화된 후방산란강도(normalized backscattering strength, B_0)는 후방산란강도에서 해저면 입사각(grazing angle, θ_g) 영향을 제거하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$B_0 = B_{ss} - 10 \log(\sin^2 \theta_g) \quad (2)$$

이후의 모든 검정에서는 식 (2)에 의하여 산출한 정규화된 후방산란 강도를 사용하였다.

IV-1. 동질성 검정

인접 ping간의 동질성(homogeneity) 검정은 후방산란이 동일한 분포 함수, 다시 말하면 동일한 모집단의 영향을

받았는지를 알아보고 신호의 일관성을 추정하기 위한 과정이다. 분석 대상 60 ping [$B_0(t, n); 1 \leq n \leq 60$]은 240초 동안 소나가 약 0.3m/sec로 움직이며 송·수신한 것이다. 넓은 빔의 후방산란은 $B_{0W}(t, 1)$ 과 240초가 지난 $B_{0W}(t, 60)$ 사이에는 약 0.3초에서 0.6초까지 해저면 입사면적의 약 40% 이상이 중첩되어 있다. 반면 좁은 빔의 경우에는 $B_{0N}(t, 1)$ 의 입사면과 약 170초가 지난 후인 $B_{0N}(t, 42)$ 의 입사면 사이에 전혀 중첩이 발생하지 않았다. 따라서 좁은 빔의 경우에는 ping간 중첩이 유지될 수 있도록 다시 30 ping씩 선택하여 K-S 검정을 이용한 동질성 추정을 하였다. 자료의 분석은 전반 30 ping과 후반 30 ping 모두에 대하여 이루어졌으나, 전반과 후반이 서로 비슷한 결과를 보여 전반의 30 ping을 본 논문의 분석 대상으로 하였다.

K-S 검정을 위하여 먼저 누적 분포 함수를 구하며, 이를 위하여 15개씩의 ping에 대한 누적 분포를 다음과 같이 산출하였다.

$$\begin{aligned} G_i(X) &= P\{B_0(t, n) \leq X \mid 1 \leq n \leq 15\} \\ H_i(X) &= P\{B_0(t, n) \leq X \mid 16 \leq n \leq 30\} \end{aligned} \quad (3)$$

K-S 검정의 통계량 측정은 식 (3)에서 산출한 두 누적 분포간의 최대 간격($D_i(X)$)을 대상으로 하며, 다음 식에 의하여 계산된다.

$$D_i(X) = \max \text{diff}\{G_i(X) - H_i(X)\} \quad (4)$$

Tow-tailed K-S 검정을 위하여 절대 값을 취하면 식 (4)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$|D_i(X)| = \max \text{diff}\{|G_i(X) - H_i(X)|\} \quad (5)$$

식 (5)에서 구한 값을 검정하기 위하여 먼저 주어진 유의수준 0.1[8]을 만족하는 임계값(CV)을 구하고, 임계값으로부터 계산한 K-S 통계량(D_{CV})을 검정에 이용하며 [17], 이때의 검정가설은 다음과 같다.

귀무가설: $H_0: |D_i(X)| \leq |D_{CV}|$, 두 분포는 동질성이 있다고 본다.
대립가설: $H_1: |D_i(X)| > |D_{CV}|$, 두 분포는 동질성이 없다고 본다.

유의 수준이 0.1일 때의 K-S 통계량(D_{CV})은 0.198이며, 그림 5는 빔폭별로 계산한 $|D_i(X)|$ 의 시간 변화를 K-S 통계량과 비교한 결과이다. 그림 5를 살펴보면 0.2초에서 약 0.42초까지의 동질성이 약 0.42초부터 0.6초 구간보다 다소 떨어짐을 볼 수 있다. 이러한 경향은 그림 1에서 볼 수 있듯이 시간에 따라 빔폭이 커져서 약 0.42초 이상 구간의 입사면에 대한 빔과 위 안정성이 높기 때문으로 볼 수 있다. 또한 약 0.2초부터 약 0.42초 사이의 상대적인 이질성은 음원으로부터 가까운 해저 입사면의 빔과 위가 음원의 움직임 영향을 크게 받기 때문인 것으로 볼 수 있다.

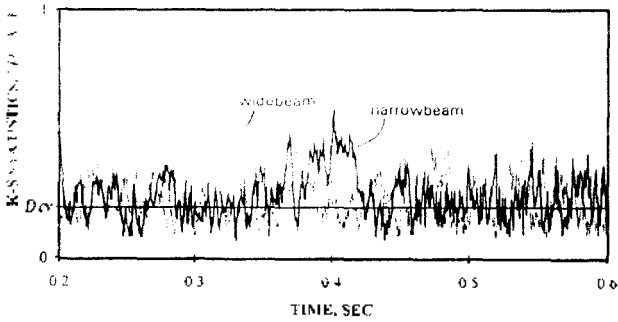


그림 5. 동질성 추정을 위한 빔별 K-S 검정

IV-2. 빔간의 동질성 검정

빔간의 동질성 추정을 위하여 빔별로 같은 시간에 수신된 30 ping씩을 선택하였다.

$$G_i(X) = P\{B_{0w}(t, n) \leq X \mid 1 \leq n \leq 30\}$$

$$H_i(X) = P\{B_{0n}(t, n) \leq X \mid 1 \leq n \leq 30\} \quad (6)$$

여기서 B_{0w} 와 B_{0n} 는 각각 넓은 빔과 좁은 빔으로 동시에 측정된 정규화된 후방산란강도이다. 이때 최대 간격은 식 (5)와 같다.

빔간의 모집단 동질성을 추정하기 위해 주어진 유의수준 0.1[1, 8]로 계산한 K-S 통계량(D_{cv})은 0.102이고, 계산한 $|D_i(X)|$ 와 비교하면 그림 8과 같다. 그림 6으로부터

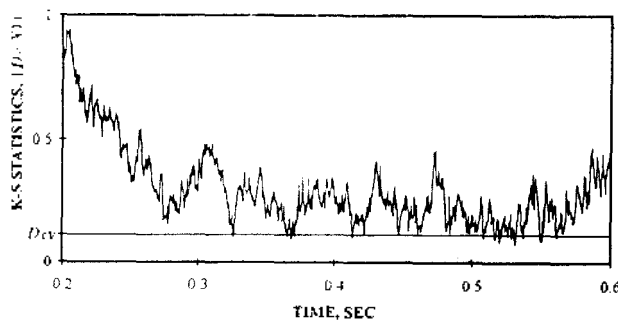


그림 6. 빔간의 동질성 추정을 위한 K-S 검정

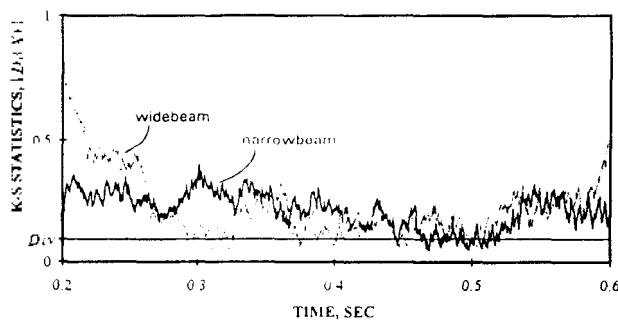


그림 7. 유사성 추정을 위한 후방산란강도의 PDF와 Rayleigh PDF 간의 K-S 검정

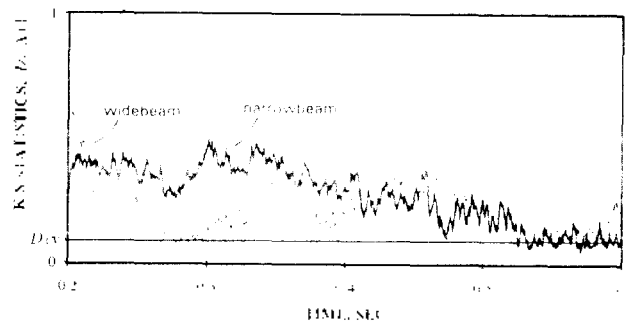


그림 8. 유사성 추정을 위한 후방산란강도의 PDF와 log-normal PDF간의 K-S 검정

비교적 D_{cv} 에 근접하는 구간인 약 0.49초에서 약 0.57초까지를 제외하고는 대부분의 구간에서 두 빔간 동질성이 떨어진다고 할 수 있을 것이다. 다시 말하면, 두 빔의 진폭 변화에 영향을 미친 모집단이 대부분의 구간에서 서로 다르다고 생각할 수 있다. 이것은 30 ping 동안 입사된 전체 해저면에서 특히 약 0.4초 이후의 음파 산란체의 무작위성이 상대적으로 높아 빔폭에 따른 분포 함수의 변화가 작기 때문으로 생각된다.

V. 오경보 확률

능동소나의 성능 분석과 탐지기를 설계할 때 후방산란 강도의 분포 함수 전체의 모양보다는 오경보 확률 0.1이하의 분포 모양이 중요한 역할을 한다[5]. 오경보 확률($PFA(X)$)은 아래와 같이 정의된다.

$$PFA(X) = 1 - PDF(X) \quad (7)$$

식 (7)에 의하여 계산된 오경보 확률은 동질성이 큰 구간의 해저면 후방산란강도 [$B_0(t, n); 1 \leq n \leq 60$]의 평균값과 표준편차 5.57dB[18]를 이용하여 계산한 Rayleigh 및 log-normal의 모델 분포와 비교하였다.

V-1. 빔폭에 따른 변화

오경보 확률을 계산하기 전에 후방산란강도의 PDF와 Rayleigh 및 log-normal PDF 사이의 유사성 검정을 수행하고, 검정을 통과한 구간의 후방산란강도를 택하여 오경보 확률을 구하였다. 검정 대상 후방산란강도의 누적 분포 함수를 아래와 같다고 할 때

$$G_i(X) = P\{B_0(t, n) \leq X \mid 1 \leq n \leq 60\} \quad (8)$$

모델의 누적 분포 함수를 $H_i(X)$ 라 하면 아래와 같고,

$$H_i(X) = P\{\hat{B}_0(t, n) \leq X \mid 1 \leq n \leq 60\} \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)의 K-S 검정을 위한 최대 간격은 식 (5)와 같다. 이때 주어진 유의 수준 $0.05[1]$ 를 만족하는 K-S통계량(D_{CV})은 0.093이고, 검정가설은 다음과 같다.

귀무가설: $H_0: |D_i(X)| \leq |D_{CV}|$, $G_i(X)$ 는 모델의 분포를 따른다고 본다.

대립가설: $H_1: |D_i(X)| > |D_{CV}|$, $G_i(X)$ 는 모델의 분포와 다르다고 본다.

그림 7과 8은 각각 후방산란강도의 PDF와 Rayleigh PDF 및 log-normal PDF 사이의 K-S 검정을 수행한 결과로서, 약 0.47초에서 약 0.52초 구간의 분포는 Rayleigh PDF를, 약 0.52초에서 약 0.58초 구간에서는 log-normal PDF를 주로 따르고 있다. 또한 넓은 빔의 경우에 Rayleigh PDF를 만족하는 구간이 좁은 빔의 경우 보다 약간 넓게 나타난다.

각 모델과의 유사성 검정을 통과한 구간에서 식 (10)과 같이 평균값을 변 정규화된 후방산란강도(B_{00})로부터 오경보 확률을 계산하였다.

$$B_{00} = B_0 - 10 \log(\langle 10^{B_0/10} \rangle) \quad (10)$$

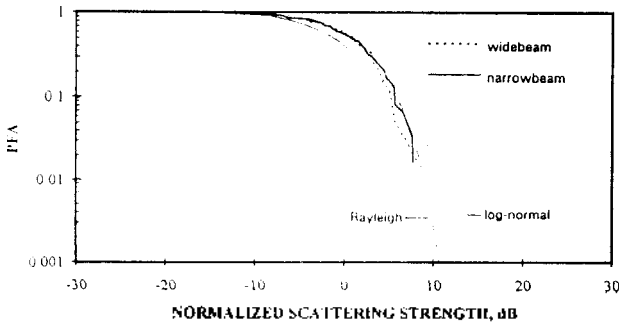


그림 9. Rayleigh PDF를 따르는 0.47초부터 0.52초 사이 구간의 후방산란강도의 PDF와 Rayleigh PDF의 오탐지 확률 비교

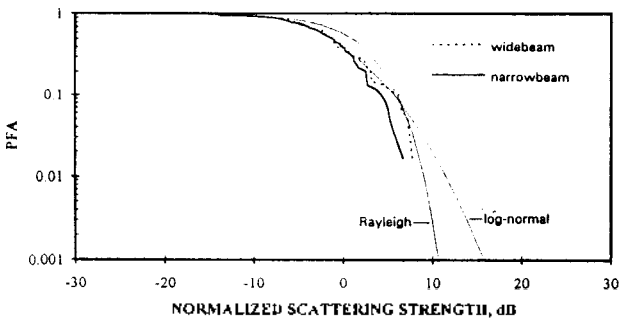


그림 10. Log-normal PDF를 따르는 0.52초부터 0.58초 사이 구간의 후방산란강도의 PDF와 log-normal PDF의 오탐지 확률 비교

여기서 $\langle \rangle$ 는 ensemble 평균을 의미한다. 산출한 모델의 오경보 확률과 비교해 보면 넓은 빔의 경우에 Rayleigh PDF와는 약 0.3에서부터, 좁은 빔의 경우에 약 0.03에서부터 모양이 달라지고, log-normal PDF와는 넓은 빔의 경우에 약 0.2에서부터, 좁은 빔의 경우에 약 0.3에서부터 모양이 달라진다(그림 9, 10). 특히 넓은 빔보다 좁은 빔의 분포가 Rayleigh PDF에 더 충실하고, 반면 좁은 빔보다 넓은 빔의 분포가 log-normal PDF에 좀더 충실하다. 좁은 빔과 넓은 빔 모두 log-normal PDF를 만족하는 구간에서 오경보 확률이 작아질 수록 Rayleigh PDF에 접근하며, 후방산란강도는 Rayleigh PDF보다 작다. 이러한 경향은 Chotiros 등[1]과 Boehme 등[3]의 고정된 소나의 빔 종속성에 대한 연구 결과와 일치하지 않으며, ping간의 연관성이 현저히 저하되었음을 알 수 있다. 다시 말하면, 음원의 움직임 때문에 해저면 입사면내의 산란체들 중에서 산란강도가 크고, 특정 주파수 또는 펄스에 민감한 산란체들의 영향은 줄어들고, 모집단의 산란 일관성이 저하되기 때문으로 볼 수 있다[19].

VI. 결 론

이동음원으로 측정된 해저면 후방산란강도의 진폭 변화에 대한 통계적 특성을 추정하고 이로부터 진폭 변화에 영향을 미치는 주된 원인을 추론하기 위한 일련의 분석을 하였다.

간향음 신호의 자기상관은 넓은 빔일 때가 좁은 빔일 때보다 높고, 상호상관은 고정음원의 경우보다 낮았다. 평균 상관계수가 0.5인 Gaussian 소음의 경우보다 높은 것은 긴 펄스에 의한 시간 및 공간상의 중첩 때문이고, 음원이 이동할 때는 좁은 빔이 Rayleigh PDF에 더 충실하고 넓은 빔은 log-normal PDF에 더 충실한 것으로 나타났다.

확률 분포 함수와 오경보 확률의 분석 결과 ping 상응간의 일관성 및 동질성이 상당히 저하되고, 음원이 고정된 경우의 빔에 따른 분포 경향과 다르게 나타났다. 이동음원에 의한 해저면 후방산란강도의 순간적인 진폭 변화는 수온의 변화나 수괴의 이동 등에 의한 교란 효과 또는 해저면의 고유한 산란 특성 변화보다는 이동에 의한 산란체 모집단과 빔파위의 불안정성 또는 모호성의 영향을 지배적으로 받고 있는 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. N.P. Chotiros, H. Boehme, T. G. Goldsberry, S. P. Pitt, R. A. Lamb, A. L. Garcia, and R. A. Altenburg, "Acoustic Backscattering at low Grazing Angles From the Ocean Bottom. Part II. Statistical Characteristics of Bottom Backscatter at a Shallow Water Site," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 77, No. 3, pp. 975-982, 1985.
2. T.K. Stanton, "Echo Fluctuations From the Rough Seafloor

: Predictions Based on Acoustically Measured Microrelief Properties," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 78, No. 2, pp. 715-720, 1985.

3. H. Boehme and N. P. Chotiros, "Acoustic Backscattering at low Grazing Angles From the Ocean Bottom," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 84, No. 3, pp. 1018-1029, 1988.
4. S. Stanic and E. Kennedy, "Fluctuations of High-frequency Shallow-water Seafloor Reverberation," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 91, No. 4, pp. 1967-1973, 1992.
5. T. K. Stanton, "Sonar Estimates of Seafloor Microroughness," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 75, No. 3, pp. 809-818, 1984.
6. S. T. McDaniel, "Seafloor Reverberation Fluctuations," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 88, No. 3, pp. 1530-1535, 1990.
7. P. A. Crowther, "Fluctuation Statistics of Sea-bed Acoustic Backscatter," in *Bottom Interacting Ocean Acoustics*, edited by W. A. Kuperman and F. B. Jensen, Plenum, pp. 609-622, 1980.
8. M. E. Frazer, "Some Statistical Properties of Lake Surface Reverberation," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 64, No. 3, pp. 858-868, 1978.
9. F. T. Ulaby, T. F. Haddock, and R. T. Austin, "Fluctuation Statistics of Millimeter-Wave Scattering From Distributed Target," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. 20, No. 3, pp. 268-281, 1988.
10. D. Alexandrou, C. de Moustier, and G. Haralabus, "Evaluation and Verification of Bottom Acoustic Reverberation Statistics Predicted by the Point Scattering Model," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 91, No. 3, pp. 1403-1413, 1992.
11. 박정수, 정문섭, 최재영, "천해해역에서 측정된 고주파 해저면 관향을 특성," *한국음향학회지*, Vol. 12, No. 6, pp. 5-12, 1993.
12. F. J. Massey, "The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of fit," *J. Am. Statistic. Assoc.*, Vol. 46, pp. 68-78, 1951.
13. T. P. Hettmansperger, *Statistical Inference Based on Ranks*, John Wiley & Sons, pp. 155-157, 1984.
14. M. Hollander and D. A. Wolfe, *Nonparametric Statistical Methods*, John Wiley & Sons, 1983.
15. W. W. Daniel, *Applied Nonparametric Statistics*, PWS-KENT, 1990.
16. 나정렬, 박정수, 김상무, 유해수, 김성렬, "아산만의 해저면 후방산란강도," *해양연구*, Vol. 12, No. 1, pp. 21-28, 1990.
17. W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling, *Numerical Recipes*, 2nd ed., Cambridge, 1992.
18. G. V. Frisk, "Intensity Statistics for Long-Range Acoustic Propagation in the Ocean," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 64, No. 1, pp. 257-259, 1978.
19. W. K. Stewart, D. Chu, and X. Tang, *A Preliminary Study of Shallow-Water Sonar Issues: Signal Motion Loss and Reverberation Noise*, WHOI-93-41, WHOI, 1993.

▲박 정 수(Joungsoo Park)

현재 : 국방과학연구소 연구원
(1993년 제12권 6호 참조)

▲정 문 섭(Moonsub Jurng)

현재 : 국방과학연구소 선임 연구원
(1993년 제12권 6호 참조)

▲장 덕 흥(Duckhong Chang)

현재 : 국방과학연구소 선임 연구원
(1994년 제13권 3호 참조)

▲최 재 영(Jaeyoung Chio)

현재 : 국방과학연구소 선임 연구원
(1993년 제12권 6호 참조)

▲심 태 보(Taebo Shim)

현재 : 국방과학연구소 책임 연구원
(1995년 제14권 1E호 참조)