

# 신호대잡음비에 따른 신뢰도 기반의 광대역 음향측정 정확도 예측

## Estimation of Wide-Band Acoustic Measurement Accuracy Based on Confidence as Variation of Signal-to-Noise Ratio

도 경 철\*, 최 재 용\*, 손 경 식\*\*

(Kyeong Cheol Dho\*, Jae Yong Choi\*, Kyung Sik Son\*\*)

### 요 약

미지신호에 대한 측정에서는 오차분산의 명확한 표현이 어렵다. 본 연구에서는 이와 같은 수동측정에서의 측정정확도를 예측하기 위한 방법을 정립한다. 제안된 예측 방법은 신뢰도를 기반으로 신호대잡음비 및 주파수대역폭과 시간적분과의 곱에 의해 정확도를 표현한다. 본 논문에서는 배경소음 환경에서의 측정음향을 그대로 분석하는 경우와 배경소음을 예측하여 측정음향에서 제거시키는 경우를 구분하여 광대역 음향측정시의 성능예측 기준을 시뮬레이션하고 정확도를 예측한다.

### ABSTRACT

The error variance in the passive measurement of the unknown signal is not clearly described. This study introduced an algorithm to estimate the measurement accuracy. In this algorithm, the accuracy is presented as the function of SNR and BT based on the cofidency. In this paper, the measurement accuracy for wide-band signal is estimated as the results of simulations in the background noise condition and the background noise rejected condition.

## I. 서 론

탐지(detection)성능 예측에는 크라마-라오 최저 경계(Cramer-Rao Lower Bound, CRLB)가 유용하게 이용되어 왔다. CRLB는 시지연(time delay)예측에 대한 분산최저치 예측 방법으로써 Helstrom[1] Whalen[2] Carter[3] Quazi [4] 및 Dho[5] 등에 의해 계산된 바 있다. 시지연에 의한 표적방위추출이 궁극적인 목적인 음향탐지의 경우 시지연 예측오차가 탐지정확도에 가장 큰 영향을 미치므로 시지연 예측오차의 분산을 CRLB에 적용시켜 탐지성능을 이론적으로 예측한다[4].

그러나 표적음향의 깨끗한 원음(raw signal)녹음을 최 우선으로 하는 측정(measurement)에서는 시지연에 의한 입사각 추출이 목적이 아니고 표적음향의 에너지 및 신호 특성을 왜곡없이 수신하는 정도가 곧 정확도이다. 따라서 측정에서 시지연 예측오차 분산의 산정은 현실적으로 어렵고 물리적으로도 의미가 없으므로 CRLB적용이 곤란하다. 뿐만 아니라 측정에서는 보다 높은 신뢰도의 성능예측기준이 필요하다.

그러므로 음향측정에서는 신뢰도 부등식을 이용한 실질적인 성능예측 및 정확도예측 방법이 요구된다. 본 연구에서는 이와 같이 에너지 수신측면에서의 신뢰도 부등

식을 이용한 성능예측방법을 유도하고, 이를 이용하여 광대역 음향측정 정확도를 고찰하고자 한다.

## II. 광대역 음향측정 정확도 예측기법 제안

### 2.1 광대역 음향측정 및 분석 개념

일반적으로 음향측정에서 신호분석은 그림 1의 스펙트럼 분석에 의해 수행된다. 신호는 주파수대역 B의 필터를 거치고 T시간 동안 적분된다. 여기서 Z는 측정음향 에너지이고 X와 Y는 표적신호와 함께 측정된 잡음으로서, 정규분포를 갖고 상호 독립적인 랜덤(random) 잡음이다. a와 b는 표적신호 주파수의 실수 및 허수성분으로서  $(a^2 + b^2)$ 는 표적신호에 대한 음원준위(source level)에 해당한다.

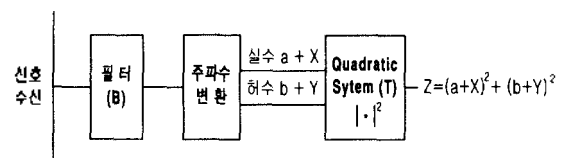


그림 1. 음향측정에서의 일반적 스펙트럼 분석 개념  
Fig. 1. General concept of spectrum analysis for acoustic measurement.

### 2.2 광대역 측정정확도 예측기법 제안

음향측정은 평균값을 기준으로 어느 정도의 분산을 가

\* 국방과학연구소

\*\* 부산대학교 전자공학과

접수일자: 1998년 10월 14일

진 신호를 녹음한다. 그러므로 수신신호 분산에 대한 신뢰도를 임의 값으로 가정한다면, 수신신호에 대한 음원순위 예측치  $\hat{E}$ 는 특성신호  $Z$ 의 평균  $E(Z)$ 와 표준편차  $\sigma(Z)$ 의 가감으로 표현할 수 있다. 즉, 표준편차 또는 분산에 대한 신뢰도를  $\beta$ 라 하면, 예측치  $\hat{E}$ 의 경계는 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

$$E(Z) - \beta\sigma(Z) < \hat{E} < E(Z) + \beta\sigma(Z) \quad (1)$$

음향측정 정확도는 음원순위의 예측치  $\hat{E}$ 와 실제전력  $P_s$ 와의 비로서 정의할 수 있으므로, 식(1)의 각 항을 실제 전력  $P_s$ 로 나누면 측정정확도  $d_b$ 에 대한 경계를 구할 수 있다. 식(2)는 이를 나타낸다.

$$d_b = \hat{E} / P_s \quad (2)$$

그리고 식(2)를 식(1)에 적용시키면, 음향측정 정확도 경계식은 식(3)으로 표현된다.

$$\frac{[E(Z) - \beta\sigma(Z)]}{P_s} < \frac{\hat{E}}{P_s} < \frac{[E(Z) + \beta\sigma(Z)]}{P_s} \quad (3)$$

### 2.3 신호전력 및 BT에 의한 평균 및 표준편차 표현

음향측정에서 식(3)의 평균  $E(Z)$ 와 표준편차  $\sigma(Z)$ 은 예측이 어려우므로 정확도  $d_b$ 는 식(3)에 의해 직접 산출할 수 없다.  $E(Z)$ 와  $\sigma(Z)$ 을 신호대잡음비 SNR 및 주파수대역폭  $B$ 와 시간적분  $T$ 와의 곱으로 표현할 수 있어야 식(3)에 의한 측정정확도 예측이 가능하다.

측정된 음향신호는 표적음향신호와 배경소음의 합성신호이다. 일반적으로 배경소음은 측정음향을 편향시키므로, 편향된 환경에서의 측정음향을 그대로 분석하는 경우와 배경소음을 예측하여 측정음향에서 제거시키는 경우를 구분하여  $E(Z)$ 와  $\sigma(Z)$ 를 신호전력과 BT의 항으로 표현하여야 한다.

먼저 배경소음이 일정한  $N_b$ 를 갖는 경우 수신신호는 그만큼 편향(bias)된다. 광대역 표적 음향신호 전력을  $P_s$ 로 표시하면,  $Z$ 는 식(4)의 일차 모멘트를 갖는 정규 프로세서가 된다[4].

$$E(Z) = N_b + P_s \quad (4a)$$

$$\sigma(Z) = (N_b + P_s) / (BT)^{1/2} \quad (4b)$$

다음으로 전력  $P_n$ 의 배경소음이 정상적(stationary) 상태인 경우, 배경소음 예측전력  $\sigma_n^2$ 는 식(5)의 일차모멘트를 갖고, 표적음향신호와 배경소음의 합신호에 대한 예측전력  $\sigma_s^2$ 는 식(6)의 일차모멘트를 갖는다[6,7].

$$E(\sigma_n^2) = P_n = N_b \quad (5)$$

$$E(\sigma_s^2) = P_n + P_s = N_b + P_s \quad (6)$$

만약 합신호 예측전력  $\sigma_s^2$ 에서 배경소음 예측전력  $\sigma_n^2$ 을 제거시키면 원하는 표적음향 신호를 수신할 수 있다. 원하는 표적음향신호  $\sigma_s^2 - \sigma_n^2$ 에 대한 예측전력을  $\hat{E}_{bs}$ 로 표기하면  $\hat{E}_{bs}$ 에 대한 일차모멘트는 식(5)와 식(6)으로부터 식(7)과 같이 계산할 수 있다[6].

$$E(\hat{E}_{bs}) = P_s \quad (7a)$$

$$\sigma(\hat{E}_{bs}) = [(N_b + P_s)^2 / BT + N_b^2 / BT]^{1/2} \quad (7b)$$

끝으로 만약 배경소음이 정상적 상태라 하더라도 잘못된 예측에 의해 편향된 경우에는, 예측된 배경소음 에너지에 편향 정도를 가감하여 측정 합신호에서 제거하므로써 측정정확도를 높여야 한다. 예측되는 편향 정도를  $\delta$ 로 표현하면, 정상적 상태의 배경소음이 편향된 경우 배경소음의 예측전력  $\sigma_n^2$ 에 대한 일차모멘트는 식(8)로 표현되고, 표적음향신호와 배경소음의 합신호에 대한 예측전력  $\sigma_s^2$ 에 대한 일차모멘트는 식(9)와 같다[6,7].

$$E(\sigma_n^2) = P_n = \delta N_b \quad (8)$$

$$E(\sigma_s^2) = P_n + P_s = N_b + P_s \quad (9)$$

정상적 상태의 배경소음이 편향된 경우, 원하는 표적음향신호  $\sigma_s^2 - \sigma_n^2$ 의 예측전력  $\hat{E}_{bs}$ 에 대한 일차모멘트는 식(8)과 식(9)로부터 식(10)으로 계산할 수 있다[6].

$$E(\hat{E}_{bs}) = P_s - (\delta - 1)N_b \quad (10a)$$

$$\sigma(\hat{E}_{bs}) = [(N_b + P_s)^2 / BT + \delta^2 N_b^2 / BT]^{1/2} \quad (10b)$$

그러므로 식(4), 식(7) 및 식(10)은 측정시 포함된 배경소음의 조건에 따라 측정음향 평균과 표준편차를 신호전력 및 BT의 항으로 표현하고 있다. 이를 이용하면 식(3)의 경계조건을 계산할 수 있게 된다.

### III. 광대역 음향측정 정확도예측 기준

측정음향 평균과 표준편차를 신호전력 및 BT의 항으로 표현한 식(4), 식(7) 및 식(10)을 식(3)에 적용시키면 각각의 경우에 대한 상대적 측정정확도 경계를 식(11)과 같이 구할 수 있다. 식(11a)는 수신신호에서 배경소음을 제거하지 않은 경우이며, 식(11b)와 (11c)는 배경소음이 정상적 또는 편향적이라고 판단하여 수신신호에서 제거시킨 경우이다. 식(11)에서 신호대잡음비  $SNR = P_s / N_b$ 의 역수를  $N_b / P_s = 1 / SNR = \alpha$ 로 표현하고 있다.

$$1 + \alpha - \frac{\beta(1 + \alpha)}{(BT)^{1/2}} < \frac{\hat{E}_{bs}}{P_s} < 1 + \alpha + \frac{\beta(1 + \alpha)}{(BT)^{1/2}} \quad (11a)$$

$$1 - \beta \left[ \frac{1 + 2\alpha + 2\alpha^2}{BT} \right]^{1/2} < \hat{E}_{bs}/P_s < 1 + \beta \left[ \frac{1 + 2\alpha + 2\alpha^2}{BT} \right]^{1/2} \quad (11b)$$

$$1 - (\delta - 1)\alpha - \beta \left[ \frac{1 + (1 + \delta^2)\alpha^2 + 2\alpha}{BT} \right]^{1/2} < \frac{\hat{E}_{bsb}}{P_s} < 1 - (\delta - 1)\alpha + \beta \left[ \frac{1 + (1 + \delta^2)\alpha^2 + 2\alpha}{BT} \right]^{1/2} \quad (11c)$$

식(11a)에서 상대적 측정정확도가 최대값을 갖게 될  $\hat{E}_{bs}/P_s$ 의 상위조건을  $d_{bs}$ 로 정의하면 이 경우의 대역폭과 시석분과의 곱  $BT_{bs}$ 는 식(12)로 표현된다.

$$BT_{bs} = \beta^2 (1 + \alpha)^2 / (d_{bs} - 1 - \alpha)^2 \quad (12)$$

식(11b)에서 정상적 배경소음을 예측하여 제거하는 경우 상대적 최소 측정정확도  $\hat{E}_{bs}/P_s$ 를  $d_{bs}$ 로, 식(11c)에서 편향된 배경소음을 예측하여 제거하는 경우 상대적 최소 측정정확도  $\hat{E}_{bsb}/P_s$ 를  $d_{bsb}$ 로 표기하면, 각각에 대한  $BT_{bs}$  및  $BT_{bsb}$ 는 식(13)과 식(14)로 표현된다.

$$BT_{bs} = \beta^2 (1 + 2\alpha + 2\alpha^2)^2 / (1 - d_{bs})^2 \quad (13)$$

$$BT_{bsb} = \frac{\beta^2 [1 + 2\alpha + (1 + \delta^2)\alpha^2]^2}{(1 - d_{bsb} - (\delta - 1)\alpha)^2} \quad (14)$$

식(12), 식(13) 및 식(14)에서 BT는 SNR의 역수, 신뢰도 및 정확도의 향으로 표현되고 있다. 그러므로 측정정확도가 신뢰도를 기반으로 SNR 및 BT의 향으로 예측가능해진다.

#### IV. 성능예측 시뮬레이션 및 결과 고찰

##### 4.1 측정정확도에 대한 BT 및 SNR

신뢰도 95%와 97%에서 1.5dB 및 2.5dB 측정정확도를 얻기 위하여 요구되는 SNR은 그림 2~5와 같다. 95%와 97%는 물리적으로 달성가능한 신뢰도 가운데 비교적 높은 값들이다. 배경소음 편향 또는 배경소음 예측의 편향은 크게 발생하지 않음을 고려하여 시뮬레이션에서 0.6dB로 가상하였다. 표 1은 신뢰도 97%의 3가지 BT에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. BT80은 적분시간이 5초인 경우 대역폭 16Hz의 저주파수를 의미한다.

배경소음을 예측하지 않는 경우에 BT를 80으로 설계하기 위해 요구되는 신뢰도 97%의 SNR은 표 1에서 대략 8.6dB(측정정확도 1.5dB)~3.5dB(측정정확도 2.5dB) 수준이다. 정상적 배경소음을 예측하여 제거시키면 6.8dB(측정정확도 1.5dB)~1.3dB(측정정확도 2.5dB)의 상대적으로 낮은 SNR이 요구된다. 그러나, 편향된 배경소음으로 예측하거나 배경소음 예측에 편향오차가 수반되면 8.6dB(측정정확도 1.5dB)~3.0dB(측정정확도 2.5dB)의 수준이 요구되어 배경소음을 예측하지 않은 경우와 결과가 유사해진다. 따라서 낮은 주파수대역에서는 정상적 상태의 배경소음을 예측하여 제거시키는 방안이 바람직하다. BT = 200의 경우는 6.6dB 이하의 SNR이 요구되고 이는 해상에서

물리적으로 얻을 수 있는 수준이다.

그림 2~5 및 표 1에서 보는 바와 같이 저주파수대역에서는 배경소음 예측 및 제거를 통하여 SNR 소요를 줄임이 바람직하다. BT가 증가할수록 배경소음 예측 및 제거 효율은 더욱 좋아진다. 그리고 이 효과는 측정정확도가 높을수록 더 크다. 이는 배경소음 예측 및 제거를 수행하는 효과가 정확도가 높을수록 더 우수함을 의미한다. 또한 BT가 증가하더라도 요구 SNR은 포화됨을 그림에서 알 수 있다.

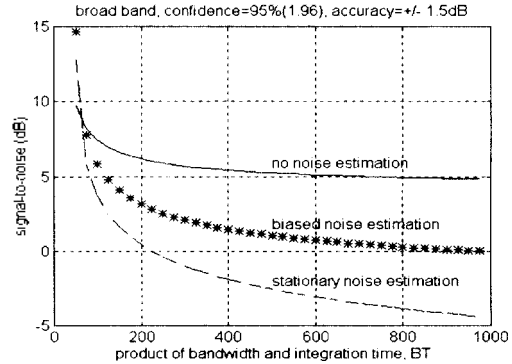


그림 2. 신뢰도 95% 및 정확도 ±1.5dB의 광대역 측정성능  
Fig. 2. Wideband measurement performance in confidence 95% and accuracy ±1.5dB.

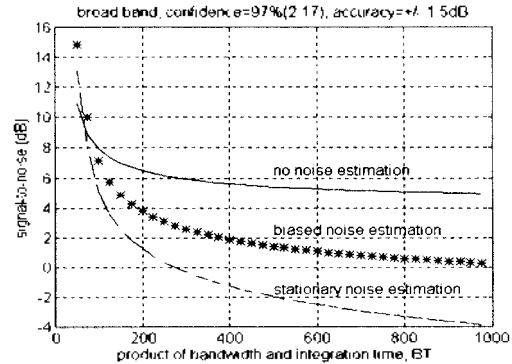


그림 3. 신뢰도 97% 및 정확도 ±1.5dB의 광대역 측정성능  
Fig. 3. Wideband measurement performance in confidence 97% and accuracy ±1.5dB.

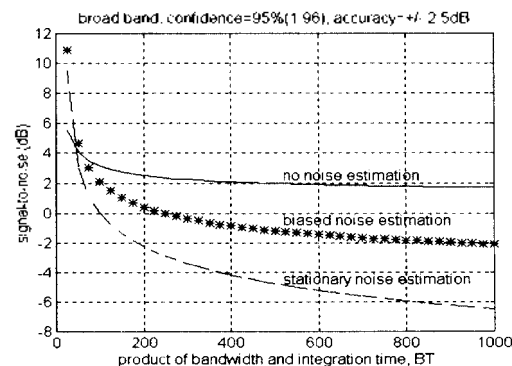


그림 4. 신뢰도 95% 및 정확도 ±2.5dB의 광대역 측정성능  
Fig. 4. Wideband measurement performance in confidence 95% and accuracy ±2.5dB.

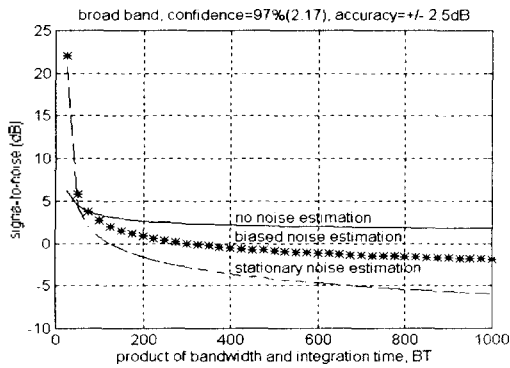


그림 5. 신뢰도 97% 및 정확도 ±2.5dB의 광대역 측정 성능  
Fig. 5. Wideband measurement performance in confidence 97% and accuracy ±2.5dB.

표 1. BT에 따른 신뢰도 97%의 광대역 음향측정 소요 SNR (단위: dB)

Table 1. Required SNR for acoustic measurement as variation of BT in confidence 97%(dB).

측정 환경	정확도	BT 80	BT 200	BT 1000
배경소음 예측 없는 경우	±1.5	8.6	6.6	5.0
	±2.5	3.5	2.5	2.1
편향된 배경소음 예측 및 제거 경우	±1.5	8.6	3.8	0.3
	±2.5	3.0	1.0	-1.9
정상상태 배경소음 예측 및 제거 경우	±1.5	6.8	1.4	-4.0
	±2.5	1.3	-1.5	6.1

4.2 정확도에 따른 측정성능 예측

정확도에 따른 시뮬레이션 결과는 그림 6~8과 같다. 배경소음을 예측하지 않는 경우에는 측정정확도 차이에 일장비례하여 SNR 요구수준이 차이가 난다. 그러나 배경소음을 예측하여 제거시키는 경우에는 측정정확도가 좋아지면 SNR 요구수준 차이가 증대된다. 이는 측정정확도가 증가할수록 배경소음 예측 및 제거 효과가 우수함을 의미한다. 그러나 SNR의 절대적인 감소면에서는 측정정확도가 낮을수록 배경소음 예측 및 제거의 효과가 우수하다.

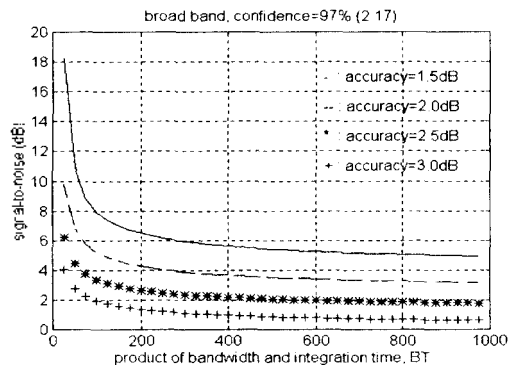


그림 6. 배경소음 제거없는 경우 정확도에 따른 측정성능(신뢰도 97%)  
Fig. 6. Measurement performance as variation of accuracy in background noise condition(confidence 97%).

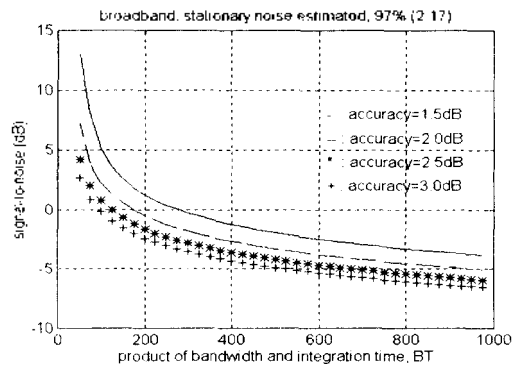


그림 7. 정상적 배경소음 예측/제거시 정확도에 따른 측정성능 (신뢰도 97%)  
Fig. 7. Measurement performance as variation of accuracy when the stationary noise is rejected by estimation (confidence 97%).

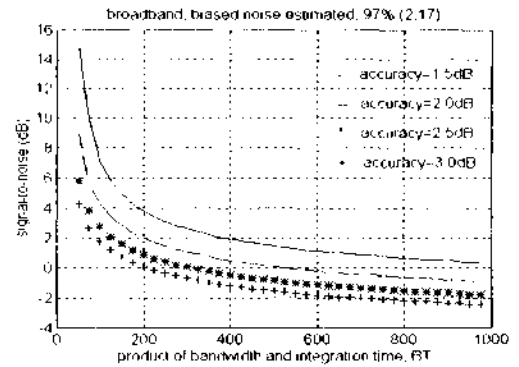


그림 8. 편향 배경소음 예측/제거시 정확도에 따른 측정성능(신뢰도 97%)  
Fig. 8. Measurement performance as variation of accuracy when the noise is rejected by biased estimation(confidence 97%).

4.3 신뢰도에 따른 측정성능 예측

신뢰도에 따른 시뮬레이션 결과는 그림 9~11과 같다. 배경소음을 예측하지 않는 경우에는 신뢰도 차이에 일장

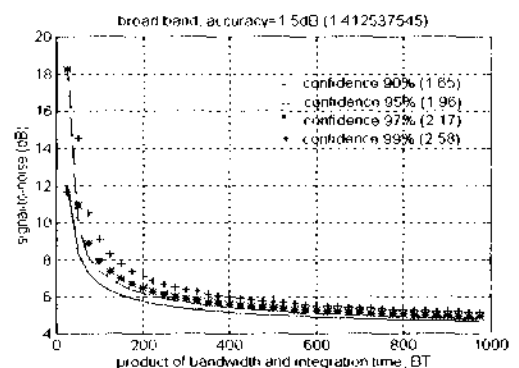


그림 9. 배경소음 제거없는 경우 신뢰도에 따른 측정성능(정확도 1.5dB)  
Fig. 9. Measurement performance as variation of confidence in background noise condition(accuracy ±1.5dB).

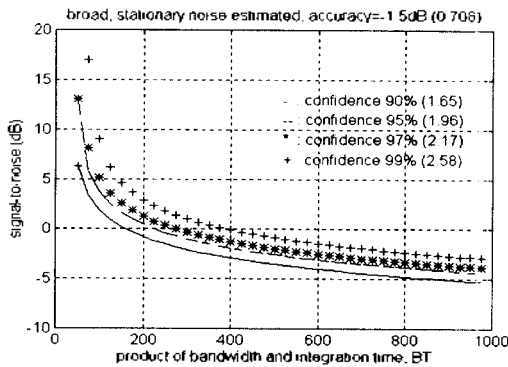


그림 10. 정상적 배경소음 예측/제거시 신뢰도에 따른 측정 성능(정확도 1.5dB)

Fig. 10. Measurement performance as variation of confidency when the stationary noise is rejected by estimation (accuracy  $\pm 1.5\text{dB}$ ).

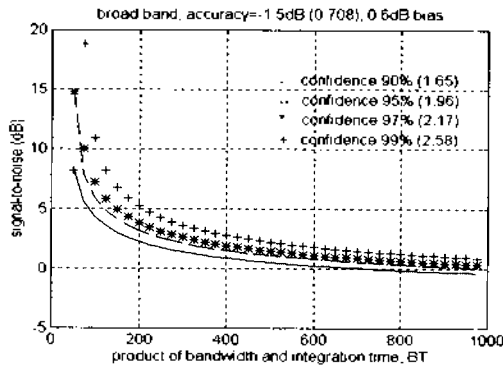


그림 11. 편향 배경소음 예측/제거시 신뢰도에 따른 측정 성능(정확도 1.5dB)

Fig. 11. Measurement performance as variation of confidency when the noise is rejected by biased estimation (accuracy  $\pm 1.5\text{dB}$ ).

비례하여 SNR 요구수준이 차이가 난다. 그리고 배경소음을 예측하여 제거시키는 경우에도 그 양상은 유사하다. 다만 BT가 매우 증가하면 신뢰도 차이에 의한 SNR의 차이가 조금씩 줄어들어 갈 수 있다. 배경소음을 예측하여 측정음향에서 제거하는 경우와 배경소음을 예측하지 않는 경우를 비교하면 동일한 신뢰도 차이에서 배경소음 예측 및 제거시 그 효과가 우수함을 그림 9~11에서 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 오차분산의 명확한 표현이 어려운 음향 측정 성능을 사전 예측하고자 신호대잡음비 SNR에 따른 신뢰도 기반의 측정정확도 예측 방법을 제안하였다. 제안 알고리즘은 원하는 측정정확도를 얻기 위한 SNR을 측정음향의 평균과 분산의 항으로 표현하지 않고 주파수대역폭 B와 수신적분시간 T와의 곱 BT항으로 표현하였다.

측정음향은 표적음향신호와 배경소음의 합성신호이므로 본 논문에서는 배경소음 환경에서의 측정음향을 그대로

분석하는 경우와 배경소음을 예측하여 측정음향에서 제거시키는 경우를 구분하여 시뮬레이션하고 그 결과를 고찰하였다.

시뮬레이션 결과, 광대역 음향측정의 경우 97%의 신뢰도와 정확도  $\pm 1.5\text{dB}$ 를 전반적으로 실현시키기 위해 요구되는 SNR는 6dB 이하로서 해상에서 물리적으로 얻을 수 있는 수준으로 확인되었다. 이는 음향측정체계의 한국해역 운용 가능성을 시사한다. 그러나 낮은 주파수대역에서는 8.6dB(신뢰도 97%, 정확도  $\pm 1.5\text{dB}$ )의 비교적 높은 SNR이 요구되므로, 배경소음 예측 및 제거를 통하여 SNR 요구수준을 낮춤이 바람직하다. 광대역 음향측정에서의 배경소음 예측 및 제거는 주파수대역이 높을수록, 그리고 측정정확도가 높을수록 효과가 더욱 우수함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. C. W. Helstrom, *Statistical Theory of Signal Detection*, New York, Pergamon, pp. 274-319. 1968.
2. Anthony. D. Whalen, *Detection of Signal in Noise*, New York, Academic Press, pp. 337-339. 1968.
3. G. C. Carter, "Time delay Estimation", H. G. Urban(ed), *Adaptive Methods in Underwater Acoustics*, D.Reidel Publishing Company, pp 175-196. 1985.
4. A. H. Quazi, "An overview on the time delay estimation in active and passive systems for target location", *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, Vol. ASSP-29, No.3, pp. 527-533, Jun 1981.
5. 도경철, 김용범, "CRLB를 이용한 수중음동추적체계 설계성능 예측", *한국음향학회지* 제12권 제3호, pp. 34-42, 1993.
6. Julius S. Bendat, Allan G. Piersol, *Random Data*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1991.
7. William S. Burdic, *Underwater Acoustic System Analysis*, 2nd ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1991.

▲도 경 철(Kyeong-Cheol Dho)

한국음향학회지 제12권 3호 참조

1984년 2월 : 부산대학교 전기기계공학과(공학사)

1986년 2월 : 부산대학교 대학원 전자공학과(공학석사)

1995년 3월~현재 : 부산대학교 대학원 전자공학과 박사과정

1986년 2월~현재 : 국방과학연구소 선임연구원

※주관심분야 : 수중음향신호처리 및 수중추적신호처리

▲최 재 용(Jae-Yong Choi)

1994년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)

1996년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)

1996년 2월~현재 : 국방과학연구소 연구원

※주관심분야 : 수중음향신호처리 및 광대역음향분석

▲손 경 식(Kyung-Sik Son)

한국음향학회지 제16권 7호 참조

현재 : 부산대학교 전자공학과 교수