



신호처리를 고려한 양상태 소나 시스템의 표적 위치 추정 오차 분석

윤 경 식*

Localization Error Analysis of Bi-static Sonar System Considering Signal Processing

Kyung-Sik Yoon*

이 논문은 2016년 김천대학교 교내학술연구비 지원에 의한 것임(gc16102).

요 약

능동 소나 시스템(Active Sonar System)은 수중의 은밀한 표적을 탐지, 추적, 식별하기 위해 사용되는 시스템으로 최근 송신과 수신 플랫폼이 이격되어 있는 양상태 소나(Bi-Static Sonar System)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. S. Coraluppi는 양상태 소나의 기하학적 구조와 다양한 오차를 고려했을 때 나타나는 표적의 위치 추정 오차를 해석적으로 분석하였다. 그러나 이 연구는 오차의 값을 임의로 설정하여 분석하였기 때문에 실제 해상환경이나 신호처리 알고리즘의 영향을 반영하지 못하였다. 본 논문에서는 신호처리 알고리즘의 오차를 분석하고 이를 반영하여 나타나는 표적 위치 오차를 분석하였다. 시뮬레이션 결과 신호처리 알고리즘의 특성이나 배열센서의 특성 등이 표적 위치 추정에 반영되는 보다 실제적인 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract

Active Sonar System is a system used to detect, track, and identify silent targets in the underwater. Recently, research on Bi-Static sonar system has been actively conducted. S. Coraluppi analytically analyzed the target localization error when considering the geometric structure and the various errors of the sonar system. However, this study does not reflect the effect of the actual ocean environment or signal processing algorithm because it is analyzed by arbitrarily setting the error value. In this paper, we analyze the error of the signal processing algorithm and analyze the target localization error that reflects it. Simulation results show that the characteristics of the signal processing algorithm and the characteristics of the array sensor are reflected in the target position estimation.

Keywords

bi-static sonar, target localization, matched filter, delay-sum beamforming

* 김천대학교 IT 융복합공학과
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8618-5733>

• Received: Nov. 29, 18, 2018, Revised: Jan. 14, 2019, Accepted: Jan. 17, 2019
• Corresponding Author: Kyung-Sik Yoon
Dept. of IT Convergence Engineering, Gimcheon University, Korea
Tel.: +82-45-420-4143, Email: kyungsy@gimcheon.ac.kr

I. 서론

능동 소나 시스템(Active Sonar System)은 잠수함과 같은 수중의 표적을 탐지, 추적, 식별하기 위해 사용되는 시스템이다. 기존의 능동 소나 시스템은 송신과 수신을 동일한 플랫폼에서 수행하는 단상태 소나(Mono-Static Sonar System)로 주로 운용되었으나 최근 송신과 수신 플랫폼이 이격되어 있어 탐지 영역과 은밀성 등에서 장점을 가지는 양상태 소나(Bi-Static Sonar System)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 양상태 소나는 시스템의 특성상 표적과의 기하학적인 구조가 단상태 소나에 비해 복잡하게 나타나고, 송신 플랫폼과 수신 플랫폼 간의 정보공유가 필수적이다. 따라서 양상태 소나 시스템을 이용하여 실제 수중의 표적의 위치를 추정할 경우 다양한 요인에 의해서 영향을 받게 된다 [1]-[3].

S. Coraluppi는 양상태 소나의 기하학적 구조와 송신 플랫폼과 수신 플랫폼의 위치 오차, 수중에서 음속의 오차, 시간지연 추정 오차, 방위각 추정 오차, 그리고 수신 플랫폼의 이동 방향(Heading) 오차를 고려했을 때 나타나는 표적의 위치 추정 오차를 해석적(Analytic)으로 분석하였다[4]. 이때 표적 위치 추정 오차를 계산하기위해 사용하는 오차의 분산 값은 사용자가 임의로 정해주는 값이며, 따라서 실제 신호처리 과정을 적용하였을 때 어떤 양상으로 나타날지 예상하기 어렵다. 실제 능동 소나 시스템에서 표적 에코(Echo)의 시간지연을 추정하기 위해 사용되는 정합필터의 성능은 해상의 환경, 잔향, 사용되는 펄스, 전처리과정, 전달손실 등의 다양한 요인에 따라 영향을 받으며, 배열 신호처리를 이용하여 얻어진 방위각 추정 값 역시 다양한 환경으로 인해 영향을 받게 된다[5]-[7].

본 논문에서는 신호처리 알고리즘을 수행하여 그 오차를 분석하고, 이를 통해 알고리즘이나 배열센서의 특성 등을 양상태 소나 표적 위치 추정 오차 분석 시에 반영하고자 하였다. 이때 다중경로와 전달손실 등의 환경적인 요인도 고려하였다. 본 논문의 구성은 1장의 서론에 이어 2장에서 양상태 소나 시스템의 신호처리 과정을 설명하고, 3장에서 해석적

인 표적 위치 오차 분석을 설명한다. 4장에서는 본 논문에서 제안하는 신호처리를 고려한 표적 위치 추정 오차를 분석하고 5장에서 결론을 맺는다.

II. 양상태 소나 시스템 신호처리

그림 1에 양상태 소나의 기하학적 구조에 대해서 나타내었다. 그림에서 R_1 은 음원(Source)와 표적(Target)간의 거리, R_2 는 표적과 수신기(Receiver)간의 거리, R_3 는 음원과 수신기간의 거리를 의미하며, α 는 음원-수신기-표적 사이의 각, θ 는 수신기의 진행방향과 표적 사이의 각 그리고 ϕ^R 은 음원의 위치는 (x^S, y^S) , 표적의 위치는 (x^T, y^T) , 그리고 수신기의 위치는 (x^R, y^R) 이다[4].

양상태 소나 시스템에서 표적의 위치를 확정하기 위해서는 표적의 방위각 $(\theta + \phi^R)$ 과 거리 R_2 가 추정되어야하며 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x^T &= x^R + R_2 \cos(\theta + \phi^R) \\ y^T &= y^R + R_2 \sin(\theta + \phi^R) \end{aligned} \quad (1)$$

표적의 거리 R_2 는 아래의 수식으로 구할 수 있다.

$$R_2 = \frac{c^2 \tau^2 - R_3^2}{2(c\tau - R_3 \cos \alpha)} \quad (2)$$

여기서 c 는 수중에서 음파의 전달속도이며 일반적으로 1500m/s로 가정된다. 음원-수신기-표적 사이의 각 α 는 식 (3)으로 표현된다.

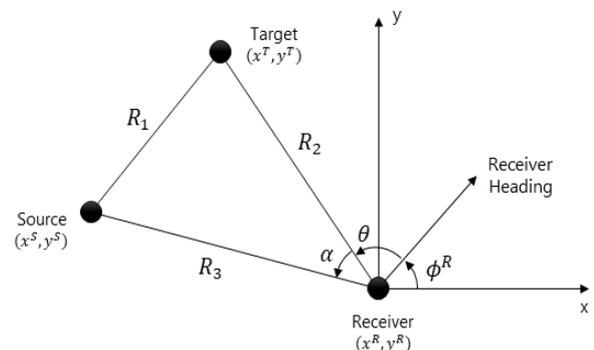


그림 1. 양상태 소나 시스템의 기하학적 구조
Fig. 1. Geometry of bi-static sonar system

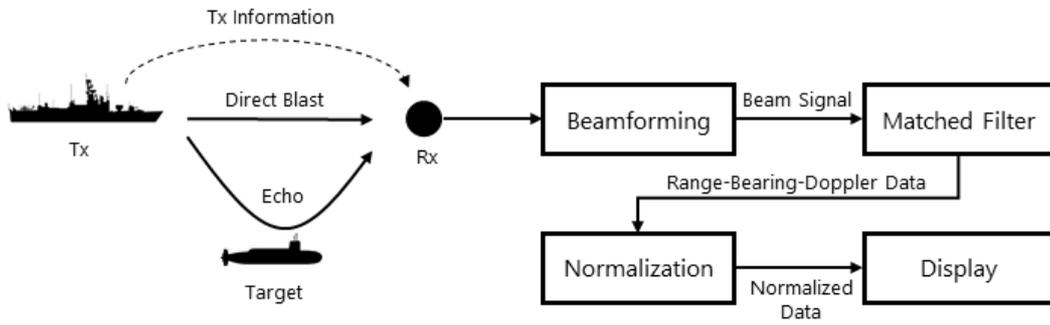


그림 2. 양상태 소나 시스템의 신호처리 흐름도
Fig. 2. Flow diagram of bi-static sonar system

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{y^S - y^R}{x^S - x^R}\right) - \theta - \phi^R \quad (3)$$

따라서 표적의 위치를 추정하기 위해서는 송신 플랫폼의 위치 정보와 자함의 진행방향 ϕ^R 를 사전에 알고 있어야하고 방위각 추정 알고리즘을 이용하여 θ 를 추정해야 한다.

그림 2에 양상태 소나의 신호처리 흐름도를 간략하게 나타내었다. 송신 플랫폼에서 송신된 펄스가 표적에서 반사되어 수신 플랫폼의 배열센서(Array Sensor)로 수신되며, 이때 송신 펄스, 송신 시점, 송신 플랫폼의 위치 정보 등을 공유한다. 배열센서로 수신된 신호는 빔형성(Beamforming) 기법의 입력으로 사용되어 방위별 빔 신호로 출력된다. 출력된 방위별 빔 신호에 정합필터(Matched Filter)를 수행하여 거리-방위-도플러 데이터를 생성한다. 이렇게 생성된 데이터는 규준화(Normalization)을 통과한 뒤 목적에 알맞게 화면에 전시된다. 표적의 방위 정보는 빔형성 과정을 통해 추정할 수 있으며, 표적의 거리 정보는 정합필터를 이용하여 추정한 시간 지연 정보로부터 구할 수 있다.

III. 양상태 소나 시스템의 해석적 표적 위치 추정 오차 분석

S. Coraluppi는 그림 1의 기하학적 구조와 음원-표적-수신기까지의 시간지연 τ , 방위각 θ , 수신기의 진행방향 ϕ^R , 송신 플랫폼의 위치 (x^S, y^S) , 수신 플랫폼의 위치 (x^R, y^R) , 그리고 수중에서 음속 c 에 대한 오차를 고려했을 때 나타나는 표적 위치 추정

오차를 구하였다[4]. 이때 수신 플랫폼이 정지해있다고 가정할 경우($\phi^R = 0, \sigma_{\phi^R}^2 = 0$), 표적 위치 추정 오차는 식 (4)와 같이 구해진다.

$$\text{Localization Error} = \sqrt{\sigma_{x^T}^2 + \sigma_{y^T}^2} \quad (4)$$

이때 표적 x, y 위치의 분산 $\sigma_{x^T}^2, \sigma_{y^T}^2$ 은 각각 식 (5)와 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\sigma_{x^T}^2 = \sigma_{x^R}^2 + \cos^2(\theta)\sigma_{R_2}^2 + R_2^2\sin^2(\theta)\sigma_{\theta}^2 + 2\cos(\theta)\sigma_{x^R R_2} - 2R_2\cos(\theta)\sin(\theta)\sigma_{\theta R_2} \quad (5)$$

$$\sigma_{y^T}^2 = \sigma_{y^R}^2 + \sin^2(\theta)\sigma_{R_2}^2 + R_2^2\cos^2(\theta)\sigma_{\theta}^2 + 2\sin(\theta)\sigma_{y^R R_2} - 2R_2\sin(\theta)\cos(\theta)\sigma_{\theta R_2} \quad (6)$$

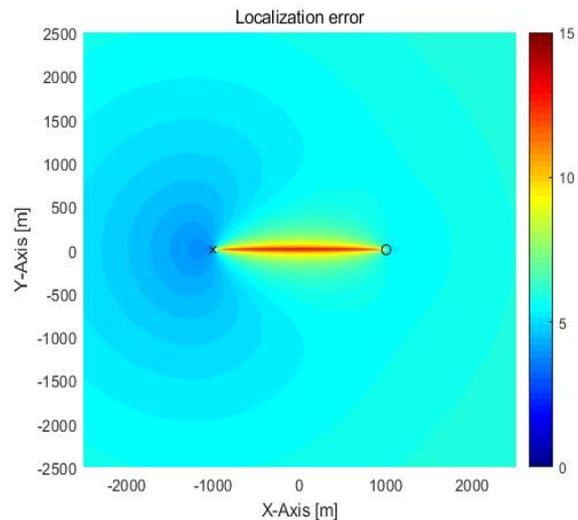


그림 3. 양상태 소나의 표적 위치 추정오차 예시
Fig. 3. Example of bi-static sonar localization error

그림 3에 시간지연 추정 오차의 표준편차를 0.05s, 방위각 추정 오차가 0.5[deg]라고 할 경우 각 위치에서 나타나는 표적 위치 추정 오차를 나타내었다. 송신 플랫폼은 (1000m, 0m), 수신 플랫폼은 (-1000m, 0m)에 위치한다. 이때 X축과 Y축은 -2500m에서 2500m의 범위를 고려하였으며 10m 간격으로 오차 값을 계산하였다. 표적 위치 추정 오차를 그림으로 나타낼 때 크기는 자연로그를 취하여 나타내었다.

그림에서 송신 플랫폼과 수신 플랫폼을 기준으로 패턴이 나타나는 것을 수신 플랫폼 근처에서 송신 플랫폼과 반대되는 위치에서 가장 낮은 오차를 가지는 것을 확인할 수 있다.

또한 송신 플랫폼과 수신 플랫폼의 사이에 표적 위치 추정의 오차가 매우 크게 나타나는 특이점(Singularity)이 발생하며, 따라서 여기에 표적이 위치할 경우 위치를 추정하는 것이 매우 어려운 것을 알 수 있다.

IV. 신호처리를 고려한 양상태 소나 시스템의 표적 위치 추정 오차 분석

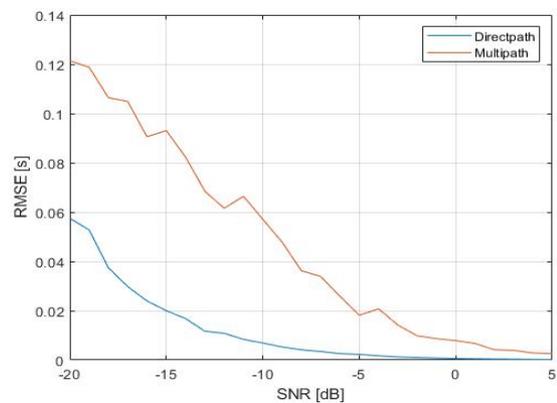
3장에서 제시한 S. Coraluppi의 결과는 각 오차들이 모든 위치에서 동일한 표준편차를 가진다고 가정하고 계산한 것이다. 그러나 실질적으로 신호처리를 통해 얻어진 추정값은 기하학적 구조와 사용된 알고리즘의 특성에 따라서 다양하게 나타나며 따라서 이를 반영하여 오차를 분석하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 정합필터와 지연합 빔형성 기법(Delay-Sum Beamforming)에 의한 신호처리적인 오차를 분석하였다. 또한 다중경로, 잔향, 전달손실 등의 다양한 해상환경 또한 고려하여 분석하였다.

4.1 펄스의 종류에 따른 정합필터의 성능 분석

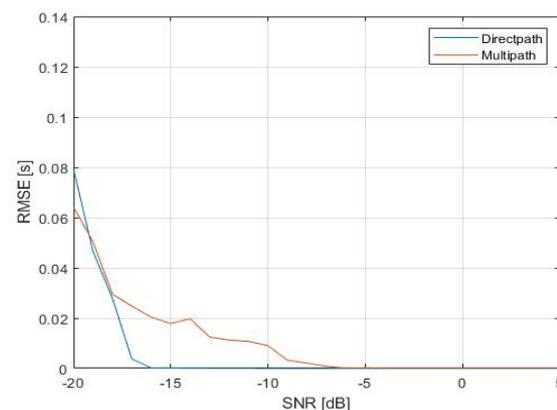
능동소나에서 사용되는 대표적인 펄스로 CW(Continuous Wave) 펄스와 LFM(Linear Frequency Modulated) 펄스가 있다. 시간 지연 추정의 CRLB(Cramer-Rao Lower Bound)를 분석해보면 시간-대역폭 곱(Time-Bandwidth Product)이 클수록 추정 성능

이 우수하다. 따라서 광대역 신호인 LFM 펄스가 시간 지연 추정에서 우수할 것이라고 예상할 수 있다[8].

그림 4의 (a)와 (b)에 정합필터를 이용하여 신호처리를 수행, 시간 지연을 추정하였을 때 나타나는 오차를 CW 펄스와 LFM 펄스에 대하여 각각 나타내었다. 시뮬레이션의 표본화 주파수는 4kHz이고, 펄스의 파라미터는 중심 주파수 1kHz, 대역폭 500Hz, 펄스 길이 0.5s이다. 펄스가 수신된 시간은 0.2s로 설정하였으며, 다중경로의 영향을 고려하기 위해 다중경로의 신호가 수신되었다고 가정한 경우도 같이 분석하였다. SNR은 -20dB부터 5dB까지 분석하였으며 1000회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.



(a) CW 펄스의 RMSE
(a) RMSE of CW pulse



(b) LFM 펄스의 RMSE
(b) RMSE of LFM pulse

그림 4. 정합필터의 시간지연 추정 오차 분석
Fig. 4. Time delay estimation error analysis of matched filter

그림에서 CW 펄스에 비해서 LFM 펄스가 우수한 시간 지연 추정 성능을 가지는 것과 다중경로가 존재할 경우에 직접경로만 존재하는 경우에 비해 시간지연 추정 오차가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

4.2 지연합 빔형성 기법의 성능 분석

일반적으로 사용되는 빔형성 기법은 지연합 빔형성 기법으로 신호의 특성변화에 영향이 없이 높은 신뢰성과 안정성을 가지고 있다.

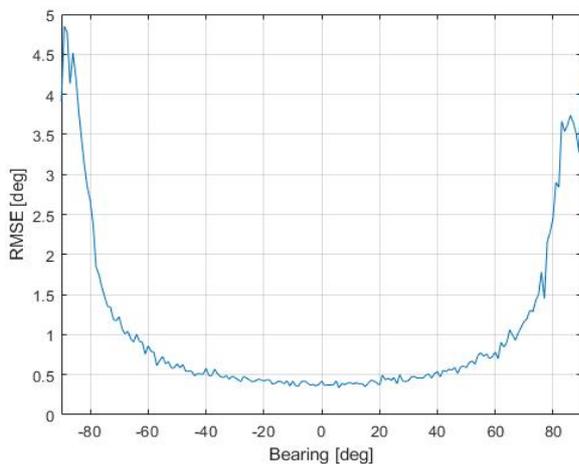


그림 5. 지연합 빔형성 기법의 방위각 추정 오차 분석
Fig. 5. Bearing estimation error analysis of delay-sum beamforming

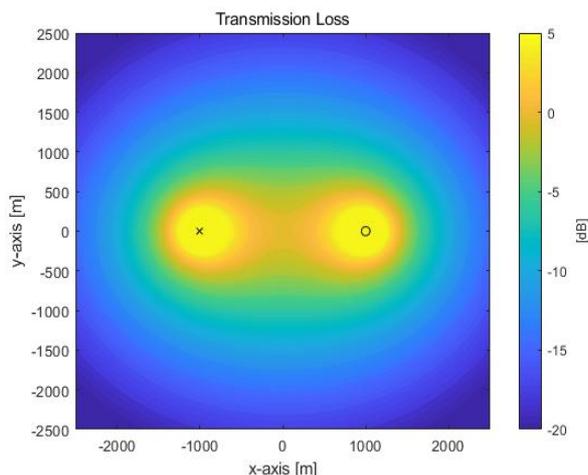


그림 6. 전달손실을 고려한 수신 전력 패턴
Fig. 6. Received power pattern considering transmission loss

방위각 추정성능의 CRLB를 분석해보면 배열의 Broadside에 위치한 표적에 대한 방위 추정 성능은 우수한 반면 Endfire에 위치한 표적에 대해서는 낮은 추정 성능을 보인다. 이는 Broadside에서 Endfire로 갈수록 배열의 어퍼처(Aperture)가 짧아 보이기 때문이다[8].

그림 5에 지연합 빔형성 기법의 방위각 추정 오차를 나타내었다. 이때 배열의 센서 개수는 16개, 센서 간격은 0.6m로 설계 주파수가 1250Hz이며, 각 센서가 가우시안 분포를 가지며 표준편차가 50 μ s인 위상오차를 가진다고 가정하였다. 그림에서 Broadside에 위치할 경우 낮은 RMSE를 가지고 Endfire로 갈수록 오차가 커지는 특성을 가지는 것을 확인할 수 있다.

4.3 표적의 위치에 따른 수신 전력 패턴

음원에서 송신된 신호는 송신이후 전달되는 과정에서 손실이 발생한다. 그림 6에 표적의 위치에 따라 나타나는 수신 전력 패턴을 나타내었다. 이때 송신 음원의 레벨은 120dB이며 전달 손실은 20log r 로 가정하였다[6]. r 은 신호가 전파된 거리를 의미한다. 그림에서 송신 플랫폼과 수신 플랫폼의 주위로 높은 수신 전력을 가지고 멀어질수록 낮아지는 카시니 난형선(Cassini Oval)의 형태를 가지는 것을 확인할 수 있다.

4.4 신호처리를 고려한 표적 위치 추정 오차

앞의 절에서 얻어진 결과들을 이용하여 표적의 위치 추정 오차를 구하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 송신 플랫폼의 위치는 (1000m, 0m), 수신 플랫폼의 위치는 (-1000m, 0m)이다. X축과 Y축의 범위는 -2500m에서 2500m를 고려하였으며 10m 간격으로 계산하였다. 수신 플랫폼에서 운용하는 수신 배열은 X축 상에 존재한다고 가정하였다.

그림 7에 정합필터의 시간지연 추정 오차만을 고려한 표적 위치 추정 오차를 나타내었다. 그림에서 송수신기를 기준으로 비슷한 패턴의 오차가 나타나지만 펄스의 종류와 다중경로 수신 등에 따라 그 값이 차이는 것을 확인할 수 있다.

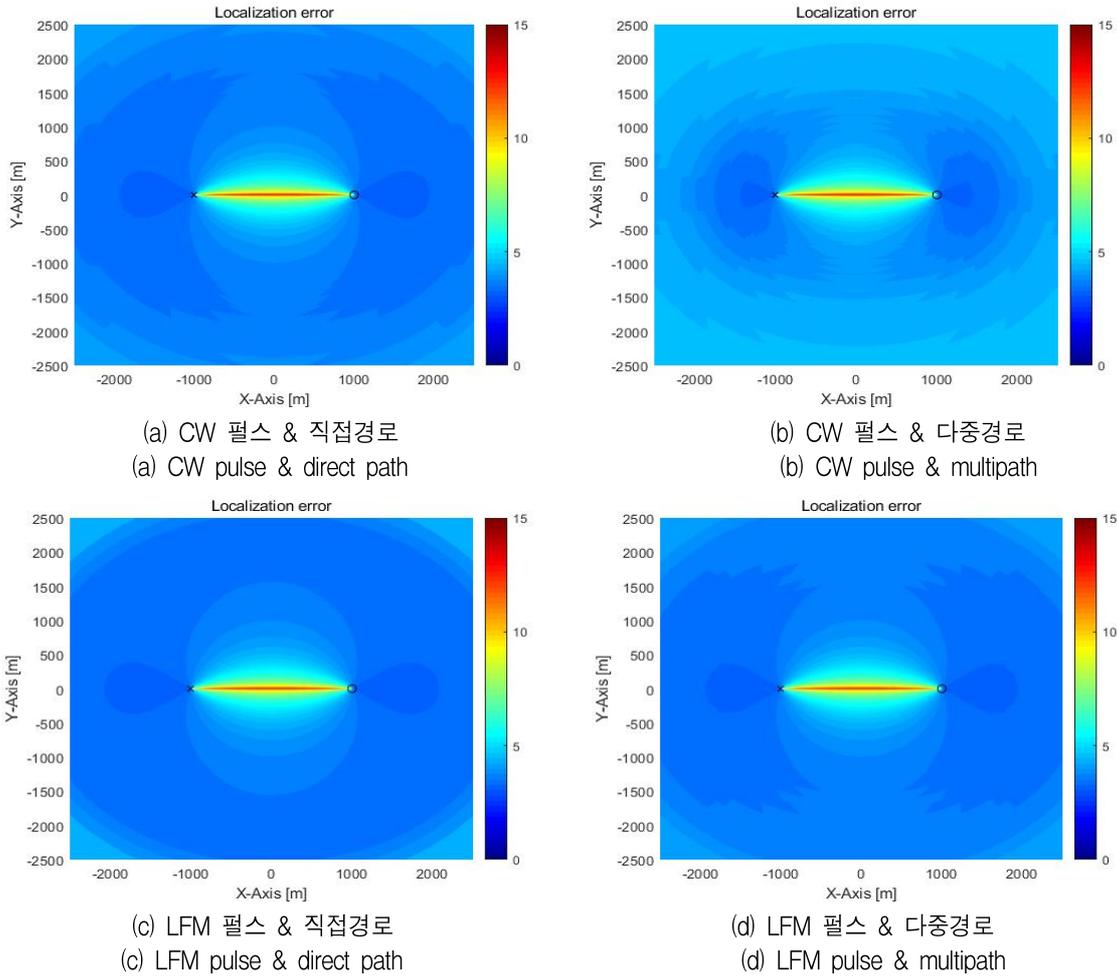


그림 7. 정합필터의 시간지연 오차만 고려한 표적 위치 추정 오차

Fig. 7. Target localization error with time delay estimation error of matched filter

이를 분석하기 위해 특이점이 발생하는 지점을 제외한 나머지 위치의 오차 평균을 구해보면 CW 펄스의 경우 직접경로로 수신시 3.62(≈37.3m), 다중경로로 수신시 4.24(≈69.9m)이며, LFM 펄스의 경우 직접경로로 수신시 3.54(≈34.5m), 다중경로로 수신시 3.58(≈36.1m)의 오차를 가진다. 직접경로에서는 CW 펄스와 LFM 펄스 간의 위치 추정 오차의 차이가 3m로 작게 나타나지만 다중경로의 경우 LFM 펄스가 CW 펄스에 비해 위치 추정 시 35m 정도 정밀하게 추정할 수 있는 것으로 분석된다.

그림 8에 지연합 빔형성 기법의 방위각 추정 오차만 고려한 표적 위치 추정 오차를 나타내었다. 그림에서 그림 3과 마찬가지로 송신 플랫폼과 수신 플랫폼 사이의 표적 탐지 불가 영역이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

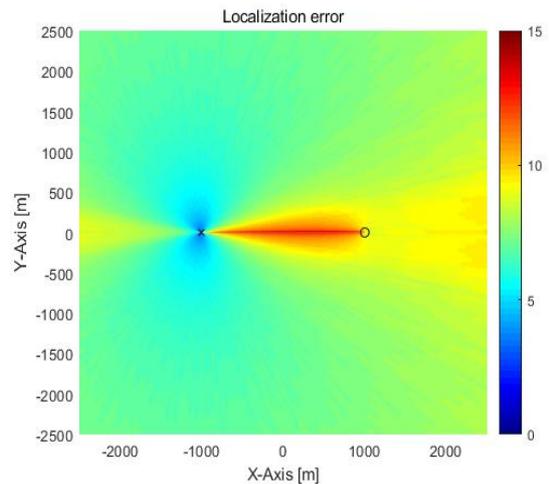


그림 8. 지연합 빔형성의 방위각 추정 오차만 고려한 표적 위치 추정 오차

Fig. 8. Target localization error with bearing estimation error of delay-sum beamforming

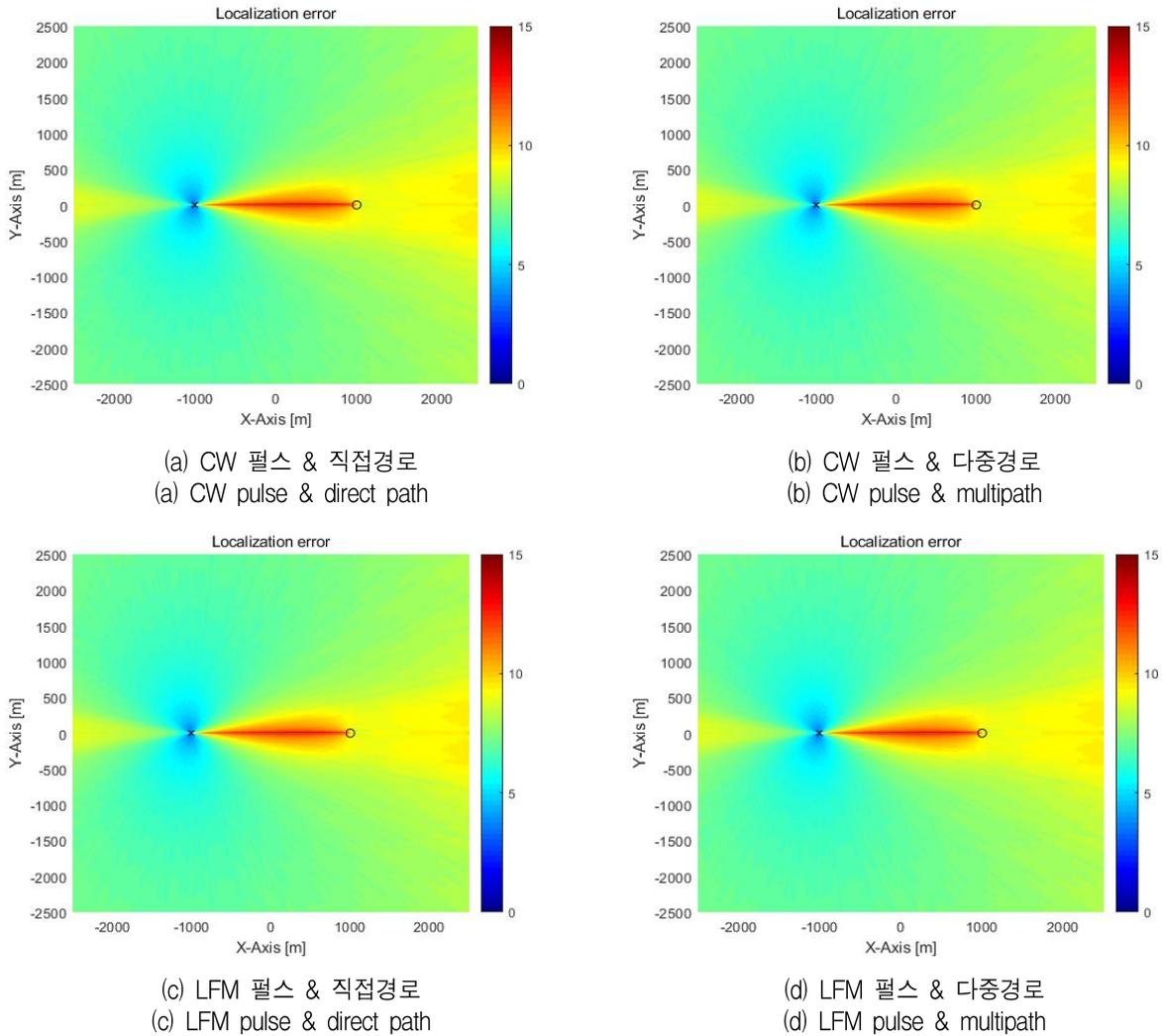


그림 9. 시간지연과 방위각 추정 오차를 모두 고려한 표적 위치 추정 오차
Fig. 9. Target localization error with time and bearing estimation errors

그림 9에 시간지연 오차와 방위각 추정 오차를 모두 반영한 표적 위치 추정 오차의 결과를 나타내었다. 현재 설정된 파라미터로 시뮬레이션을 수행한 결과 펄스의 종류와 다중경로에 무관하게 방위각 추정 오차만 반영된 그림 8의 결과와 비슷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이는 현재 시뮬레이션에서 방위각 오차가 다소 높게 설정되어 있기 때문으로 분석되며, 표적 위치 추정이 방위각 추정 오차에 종속된다고 결론짓는 것은 아니다. 표적 위치 추정 오차는 배열센서의 파라미터나 사용되는 알고리즘에 따라 다르게 나타날 수 있다. 향후 다양한 분석을 통해 상황에 적합한 시뮬레이션을 수행한다면 유용한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

V. 결 론

본 논문에서는 양상대 소나의 해상환경과 신호처리를 고려하여 표적 위치 추정 오차를 분석함으로써 기존의 해석적인 분석이 사용자가 설정한 오차에 의해 편향되거나 실제 신호처리를 반영하지 못하는 것을 보완하였다. 시뮬레이션 결과 다중경로 환경에서 CW 펄스가 LFM 펄스에 비해 표적 위치 추정 오차가 35m 크게 나타는 것으로 분석되었으며, 배열센서의 특성이 반영되어 Endfire의 경우 Broadside에 위치한 표적에 비해서 2000m 이상의 오차가 발생할 것으로 분석되는 등 신호처리의 과정이 표적 위치 추정에 반영되는 결과를 얻을 수 있었다. 이와 같은 연구는 실제 신호처리가 어떻게

반영될지를 가늠해보는 척도로 사용될 수 있으며, 양상태 소나 시스템의 연구 방향을 설정하거나 실제 시스템을 운용할 때 나타나는 성능을 평가할 때 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대한다. 향후 연구를 통해 다양한 해양환경 모델링 기법을 알고리즘에 반영할 경우 더욱 실제적인 표적 위치 추정 오차를 획득할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] Cox, Henry, "Fundamentals of bistatic active sonar", Underwater acoustic data processing. Springer, Dordrecht, Vol. 161, pp. 3-24, 1989.
- [2] Donghwa Lee, Tae Jin Jung, Kyun Kyung Lee, and Hyun Myung, "Source Information Estimation Using Enemy's Single-Ping and Geographic Information in Non-cooperative Bistatic Sonar", IEEE Sensors Journal, Vol. 12, No. 9, pp. 2784-2790, Sep. 2012.
- [3] H. Schmidt-Schierhorn, A. Corsten, B. Strassner, S. Benen, and M. Meister, "The Use of Bistatic Sonar Functions on Modern Submarines", UDT EUROPE 2007 Italy, pp. 5-7, June 2007.
- [4] Stefano Coraluppi, "Multistatic sonar localization", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 31, No. 4, pp. 964-974, Oct. 2006.
- [5] Nielsen, "Richard O. Sonar signal processing", Artech House, Inc., pp. 187-228, 1991.
- [6] Waite, Ashley D. and A. D. Waite, "Sonar for practising engineers", Vol. 3. London: Wiley, 2002.
- [7] Urick, Robert J., "Principles of underwater sound for engineers", Tata McGraw-Hill Education, pp. 202-290, 1967.
- [8] Kay, Steven M., "Fundamentals of statistical signal processing, volume i: Estimation theory (v. 1)", PTR Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp. 27-82, 1993.

저자소개

윤 경 식 (Kyung-Sik Yoon)



1987년 2월 : 경북대학교
전자과(공학사)
1989년 2월 : 경북대학교
전자공학과(공학석사)
2002년 2월 : 경북대학교
전자공학과(공학박사)
1989년 2월 ~ 1995년 2월 :

국방과학연구소 연구원

1995년 3월 ~ 현재 : 김천대학교 IT융복합공학과 교수
관심분야 : 수중음향 신호처리, 음성 신호처리