

## 도플러 환경에서 모호 함수를 이용한 수중 기동 표적의 거리 추정 기법

한민수<sup>1†</sup> · 이희창<sup>2</sup> · 김태형<sup>3</sup>

(Received March 23, 2018 ; Revised April 19, 2018 ; Accepted May 15, 2018)

### Distance estimation method for underwater maneuvering target using ambiguity function in doppler shift environment

Min-Su Han<sup>1†</sup> · Hee-Chang Lee<sup>2</sup> · Tea-Hyung Kim<sup>3</sup>

**요약:** 수중 운동체의 방사소음을 측정하는 경우 음원과 수신기 사이의 거리 정보가 중요한 요소이다. 일반적으로 표적의 거리를 추정하기 위해 고 정밀 동기화된 송·수신기 사이의 전송 시간차를 측정하는 단방향 ToA (Time of Arrival) 기법을 이용한다. 하지만 표적이 수신기로 근접 기동하게 되면 계측기간의 상대속도로 인해 송신신호에 도플러 천이가 발생하여 ToA 성능이 급격히 저하된다. 본 논문에서는 표적의 상대속도로 발생할 수 있는 송신신호의 최대/최소 도플러 천이 주파수 구간을 파악하고 일정 간격의 복제신호를 배치하여 단방향 ToA 성능 향상을 도모하였다. 이때, 복제신호의 개수 및 간격은 송신신호 도플러 주파수 해상도의 3dB 값을 계산하는 모호 함수를 이용해 추정한다. 제안한 기법의 성능검증을 위해 모의실험 및 호수실험을 수행하였다.

**주제어:** 단방향 도래 시간, 도플러 천이, 모호 함수, 거리 추정

**Abstract:** While measuring the radiated noise of an underwater target, range information between acoustic source and receiver is an important evaluating factor. In general, the target distance is estimated using a one-way Time of Arrival (ToA) method that calculates the time difference between transmitted and received signals from the two accurately synchronized devices. However, when the target is in close proximity to the receiver in the near field, the one-way ToA performance is deteriorated rapidly because of the Doppler shift effect of the transmitted signal. For improvement of the one-way ToA performance, we estimated the bandwidth of the Doppler shift effect caused by the relative velocity of the target, and placed replica signals at regular intervals. The number and interval of the replica signals were estimated using an ambiguity function that calculates the 3dB width of the Doppler shift frequency resolution of the transmitted signal. The validity of the proposed estimation scheme was confirmed through simulation study and underwater trial in a lake.

**Keywords:** One-way time of arrival, Doppler shift, Ambiguity function, Distance estimation

### 1. 서론

함정이나 수중 표적의 방사소음 측정은 전술 음향정보 관리, 소음수준에 대한 적부 평가 및 소음 감소를 위한 정비유지 기초자료로 활용된다[1]. 이러한 수중방사소음 준위를 산출함에 있어 음원과 수신단사이의 거리에 따른 전달 손실이 계산되어야 하고, 그에 따라 음원과 수신단사이의 거리 정보가 매우 중요하다.

일반적으로 수중에서 기동하는 표적을 추적하기 위한 방법으로 수동 및 능동추적 기법을 활용한다. 수동추적은 표적이 기동함으로써 발생하는 미지 소음을 이용하는 방법으

로 추적이 상당히 어려운 반면에, 능동추적은 알고 있는 특정 신호를 인위적으로 송신하여 표적을 추적하는 기법으로 추적이 상대적으로 용이하다[2]. 대표적인 능동추적 기법으로 단방향과 양방향 ToA(Time of Arrival) 방식이 존재하며, 그 중 양방향 ToA 방식은 표적이 고속기동 할 경우 유체소음으로 인한 표적 추적 오차가 커지는 단점이 있다. 따라서 본 논문에 서는 고 정밀 동기화된 음원 및 수신기를 이용해 송신한 신호의 시간차를 상관기(correlator)로 계산하여 두 계측기 사이의 거리를 측정하는 단방향 ToA 기법을 이용한다. 이때, 송신된 신호와 수신된 신호의 중심주파는 정확히

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9998-6265>): The 6th(Naval System) R&D Institute, Agency for Defense Development, Chungjang-ro, 10-61, Jinhae, Changwon, 645-600, Korea, E-mail: hansonhan@add.re.kr, Tel: 055-540-6351

2 The 6th(Naval System) R&D Institute, Agency for Defense Development, E-mail: icaruswings@add.re.kr, Tel: 055-540-6354

3 The 6th(Naval System) R&D Institute, Agency for Defense Development, E-mail: kth1201@add.re.kr, Tel: 055-540-6353

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

일치해야 상관기 출력 에너지 값이 최대가 되며, 수중 거리 추정 정확도를 높일 수 있다[3]. 하지만 표적이 수신기로 근접 고속 기동하게 되면, 송신신호에 도플러 천이 현상이 발생해 중심 주파수가 변하게 된다. 이는 상관기 출력 값을 급격히 저하시키는 요인이 될 뿐만 아니라 수중 거리 추정 오차를 야기한다[4]. 따라서 수중 거리 추정 정확도 향상을 위해서는 도플러 주파수 변화를 파악하고 그로 인한 왜곡 보상이 필요하다.

모호 함수 기법은 송신신호와 수신신호간의 시간 지연 및 도플러 주파수 차이에 따른 상관기 출력값 변화량을 나타내는 기법으로 이동성이 고려된 환경에서 도플러에 대한 왜곡된 송신신호의 중심주파수 정보를 보상하기 위해 수중 통신 및 수중 추적 성능 향상을 위해 연구되어 왔다[5][6].

본 논문에서는 모호 함수를 이용해 송신신호의 도플러 해상도가 -3dB 되는 주파수 구간을 파악한 후 표적의 상대속도로 발생할 수 있는 최대/최소 도플러 주파수 구간에 -3dB 폭의 복제신호를 도플러 बैं크 형태로 배치하여 기존의 단방향 ToA 기법 성능 향상을 도모하였다. 이때, 도플러 해상도의 분해능을 높이기 위해 CZT(Chirp Z Transform) 기법을 사용하였으며, 다수의 복제신호에 따른 계산량 증가를 감소시키기 위해 송신신호와 다른 주파수 대역을 갖는 C·W(Continuous Wave) 펄스 신호를 추가하여 대략적인 도플러 주파수를 파악한 후 일부 복제신호 구간에서만 상관기가 계산 되도록 설계 하였다. 그리고 기존의 단방향 ToA 기법과 제안된 기법의 성능 비교를 위해 벨롭(Bellop) 모델링 기반의 모의실험과 함께 실제 호수실험을 수행하고 성능을 분석하였다.

## 2. 제안된 수중표적 거리 추정 기법

수중 음원에서 송신되는 신호는 식 (1)과 같으며,  $f_c$  및  $f_s$ 는 중심주파수와 샘플링주파수를 나타내고  $N$ 은 송신신호의 총 데이터 길이이다.

$$x[n] = \exp\left(\frac{j2\pi f_c n}{f_s}\right), \quad n = 0 : N-1 \quad (1)$$

여기서 Figure 1과 같이 표적이 수신기로 근접 기동하면 표적으로부터 방사되는 소음은 일정한 경로를 거쳐 시간지연이 발생한 후 수신되며, CPA(Closest Point of Approach)를 기준으로 수신되는 신호의 에너지  $E(t)$ , 표적의 중심주파수 성분  $f_c$  정보는 증가 및 감소하게 된다. 이때, 수신된 신호  $y[n]$ 은 식 (2)와 같이 나타낸다[7].

$$y[n] = A \cdot x[n(1-\Delta) - n_0] + g[n] \quad (2)$$

위 식에서  $\Delta$ 는 도플러 변화량이며, 단위는 Hz이고  $n_0$ 는 경로에 따른 시간지연 값을 나타낸다.  $A$ 는 시간에 따른 표적 신호의 전달 에너지  $E(t)$ 의 변화 값이며,  $g(n)$ 은 배경 소음을 나타낸다. 도플러 요소  $\Delta$ 는 아래와 같다.

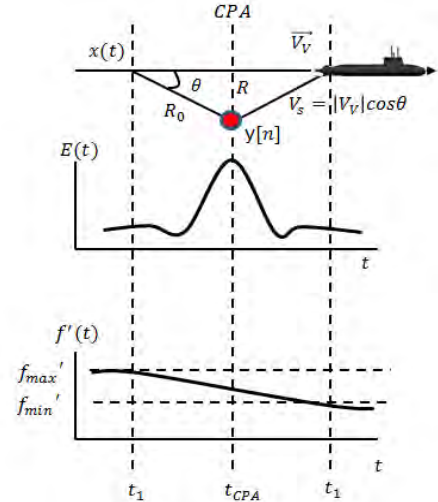


Figure 1: Information of received signal when target moving at a constant velocity on a straight path

$$\Delta = \frac{|V_V| \cdot \cos\theta}{c} \quad (3)$$

$c$ 는 수중음속,  $\theta$ 는 계측기간의 방위각,  $V_V$ 는 표적의 진속도를 나타낸다. 원 신호  $x[n]$ 의 전체 길이는  $\Delta$ 로 인해 압축 및 팽창하게 되고 식 (4)와 같이 송신신호의 중심주파수  $f_c$ 가 변화하게 된다. 이때,  $n_0$  및  $g(n)$  0이라 가정한다.

$$x_d[n] = \exp\left[\frac{2\pi(f_c - f_c\Delta)n}{f_s}\right], \quad n = 0 : N-1 \quad (4)$$

여기서 신호  $x_d[n]$ 는 도플러 주파수  $f_c\Delta$ 에 의해 중심주파수가  $(f_c - f_c\Delta)$ 만큼 천이된 신호이며, 표적의 상대속도에 따라 중심주파수의 최대/최소 범위  $f'_{max}/f'_{min}$ 이 결정된다. 기존의 ToA 기법은  $f_c\Delta$ 를 고려하지 않으므로 송신된 신호와 수신된 신호의 중심주파수 변화가 커질수록 상관기 출력 에너지가 급격히 감소한다. 이를 극복하기 위해 모호 함수를 이용하여  $(f_c - f_c\Delta)$  변화에 따른 송신신호의 상관기 출력 에너지가 3dB 이상 감소하는 구간을 파악하고 표적의 상대속도로 발생할 수 있는 최대/최소 도플러 주파수 구간에 송신신호의 중심주파수를 변경시킨 복제신호를 최적의 방법으로 배치시키는 연구가 필요하다. 또한, 복제신호로 인해 증가되는 상관기 계산량을 감소시키는 기법이 필요하다.

### 2.1 모호 함수 기반의 설계 신호 도플러 해상도 해석

송신신호  $x[n]$ 의  $(f_c - f_c\Delta)$  변화에 따른 상관기 출력에너지의 변화를 추정하기 위해 식 (2)의  $\Delta$ 값을 임의로 일정량 변화시킨 비정상상태 신호  $y[n]$ 과 식 (1)의 송신신호간의 상호상관관계 출력값을 식 (5)와 같이 계산한다. 여기서 앞항은 계측기간 상대거리로 인해 발생하는 실제 시간지연  $n_0$ 와 ToA 추정치  $\hat{n}$ 에 따른 상관기 출력 값이며, 뒷항은 표적간의 상대속도 인해 발생하는  $\Delta$ 에 따른 상관기 출력 값이다.

$$R(\hat{n}, \Delta) = \sum_{n=n_1}^{n_2} y[n] \cdot x^*[n] \quad (5)$$

$$= \sum_{n=n_1}^{n_2} \exp\left(\frac{j2\pi f_c(\hat{n}-n_0)}{f_s}\right) \cdot \exp\left(\frac{-j2\pi f_c \Delta n}{f_s}\right)$$

여기서, 상관기의 범위는  $-N/2 \leq n \leq N/2$ 이며, ToA 추정치  $\hat{n}$  및 도플러  $\Delta$ 를 고려한 상관기 범위  $n_1$ 과  $n_2$ 의 값은 식 (6)과 같다.

$$n_1 = \max\left[-\frac{N}{2} + \hat{n}, \left(-\frac{N}{2} + n_0\right) / (1 - \Delta)\right] \quad (6)$$

$$n_2 = \min\left[\frac{N}{2} - 1 + \hat{n}, \left(\frac{N}{2} - 1 + n_0\right) / (1 - \Delta)\right]$$

식 (6)에서  $\delta=0$ 일 때,  $n_0 < \hat{n}$  이면  $n_1 = -\frac{N}{2} + \hat{n}$  부터  $n_2 = \frac{N}{2} + n_0$ 의 범위에서 상호 상관기 계산이 되고  $n_0 \geq \hat{n}$  이면  $n_1 = -\frac{N}{2} + n_0$  부터  $n_2 = \frac{N}{2} + \hat{n}$ 의 범위에서 상호 상관기 계산이 된다.

위 식에서 계산된 상호 상관기 출력 값 크기의 절대 값 또는 제곱이 거리-도플러 주파수에 따른 모호 함수를 나타내며, 모호 함수 제곱의 전체 부피는 신호 에너지 제곱과 같다[8]. 하지만 시간영역에서 발생 가능한 모든 도플러 주파수 신호들에 대하여 상호 상관기를 계산하면 상당히 많은 계산량이 소모된다. 따라서 본 논문에서는 Figure 2와 같이 Parseval 및 Winner-khinchine 정리에 따라 주파수 영역에서 상관기를 계산하였다[9].

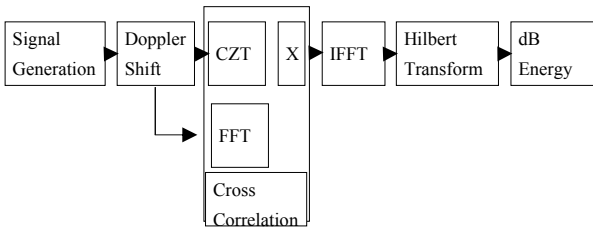


Figure 2: Block diagram of the ambiguity function

여기서, 매우 짧은 시간동안 주파수가 큰 폭으로 변하는 비정상상태 Chirp 신호를 주파수 영역으로 치환 및 해석하기 위해 CZT(Chirp Z-Transform)를 이용하였다. CZT는 Z 변화의 일종으로 나이퀴스트 주파수 스펙트럼보다 좁은 주파수 대역 내의 신호에 대한 협대역 주파수 분석을 정밀하게 관찰할 수 있는 기법으로 zero-padding을 이용하는 STFT (Short Time Fourier Transform)보다 월등히 계산량이 낮다는 장점이 있으며, 다음 식과 같다[10].

$$X[m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]z^{-n}, \quad z = A \cdot W^{-m} \quad (7)$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} x[n]A^{-n} \cdot W^{mn}$$

$A$ 는 주파수 단위원상의 시작위치,  $W$ 는 등고선 상에서 점들 사이의비를 뜻하며, 식 (8)과 같다. 그리고  $m$ 은 주파수 영역의 변환 길이를 나타낸다.

$$A^{-n} = \exp\left(\frac{-j2\pi f_1 n}{f_s}\right), \quad n = 0 : N-1 \quad (8)$$

$$W^{mm} = \exp\left(\frac{-j2\pi(f_2 - f_1)nm}{M \cdot f_s}\right), \quad m = 0 : M-1$$

위 식에서  $f_2 - f_1$ 은 관찰하고자 하는 주파수 대역을 나타낸 것으로 분석 대역을 제한하기 때문에 식 (9)와 같이 주파수 해상도  $\Delta f_{CZT}$ 를 크게 상승시킬 수 있다.

$$\Delta f_{CZT} = \frac{f_2 - f_1}{f_s} \quad (9)$$

최종적으로 주파수 영역에서의 비정상상태 신호와 원 신호의 곱을 통해 계산된 상관기 출력값을 IFFT (Inverse Fourier Transform)하여 시간영역으로 가져오고 Hilbert Transform을 이용해 포락선을 계산한 후 포락선 에너지를 dB 값으로 치환해 송신신호의 도플러 주파수 해상도를 해석한다.

## 2.2 도플러 बैं크 기반 ToA 기법

표적의 상대속도로 도플러 발생시 설계 신호의 중심주파수가 변화하여 기존의 ToA 기법으로는 시간지연추정 값  $\hat{n}$ 을 정확히 계산할 수 없다. 따라서 도플러로 인해 왜곡된 정보를 보상하기 위해 Figure 3과 같이 복제신호 기반의 도플러 बैं크 ToA 시스템을 구성하였다. 그리고 복제신호로 인해 증가되는 상관기 계산량을 감소시키기 위해 시간지연 추정을 위한 신호 외에 대략적인 도플러 천이 주파수를 파악할 수 있는 C·W펄스를 복합적으로 설계하였다[6].

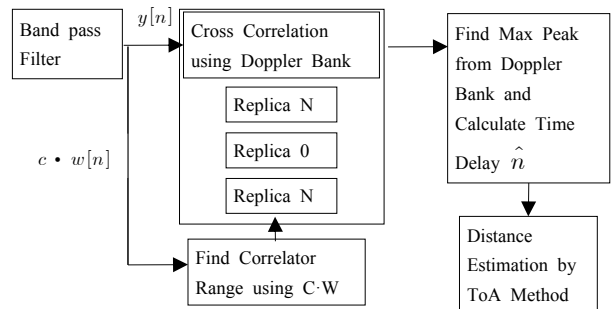


Figure 3: Block diagram for ToA system based on doppler filter bank

Figure 3에서 수신 신호  $y(t)$ 를 대역통과필터를 통해 시간 지연추정을 위한 신호가 포함된  $y[n]$ 과 도플러 천이 주파수 파악을 위한  $c \cdot w[n]$  신호로 대역 분할한다. 이때, Cross Correlation 블록에 구성된 복제신호는 아래 식과 같다.

$$Repli[m, n] = \sum_{m = -(f_{\max} - f_{\min})/k/2}^{(f_{\max} - f_{\min})/k/2} \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left[\frac{2\pi(f_c - km)n}{f_s}\right] \quad (10)$$

위식에서  $k$ 는 식 (5)에서 계산된 도플러 해상도의  $-3\text{dB}$  지점이며,  $N-1$ 길이를 가진  $m$ 개의 복제신호가  $(f_c - km)$ 의 중심주파수로 생성된다. 그리고 수신신호  $y[n]$ 과 모든  $m$ 개의 복제신호와와의 상관기 출력 값 중 최대값을 찾아  $\hat{n}$ 을 추정한 후 ToA를 계산한다. 이때,  $m$ 개의 개수에 따라 상관기 계산량이 급격히 증가함으로 계산량 감소를 위해 Find Correlator Range 블록에서 W. J. Park *et al.* [6]과 같이 설계 신호와 다른 주파수 대역을 갖는  $c \cdot w$  펄스 신호를 FFT 하여 표적의 상대속도로 발생한 대략적인 도플러 천이 주파수를 파악한다. 그리고 도플러 बैं크 내부의 일부 복제신호 구간에서만 수신신호  $y[n]$ 과 상관기가 계산되도록 한다.

### 3. 모의실험 및 결과

제안된 기법의 성능을 확인하기 위해 실제 동해 해상에서 측정된 음속 분포 기반의 벨합(Bellhop) 시뮬레이터로 모의 수중 채널을 생성하여 모의실험을 수행하였다[11]. 모의실험 환경은 Table 1과 같으며 시간지연추정을 위한 설계 신호인 PN (Pseudo Noise) 63의 모호 함수 결과는 Figure 4와 같이 거리 해상도  $0.5\text{m}$ , 도플러 해상도  $\pm 20\text{Hz}$ 로 계산된다.

Table 1: Parameters for simulation environments

Parameter	Value	Unit
Water depth	400	m
Source depth	50	m
Receiver depth	30	m
CPA	45	m
Source position from the CPA	100~0	m
Target speed	10	m/s
Source 1	PN 63	-
Source 1 carrier frequency	28.6	kHz
Source 1 bandwidth	2048	Hz
Source 2	C·W	-
Source 2 carrier frequency	24.5	kHz
Sampling frequency	131072	Hz
SNR(Signal to Noise Ratio)	0	dB

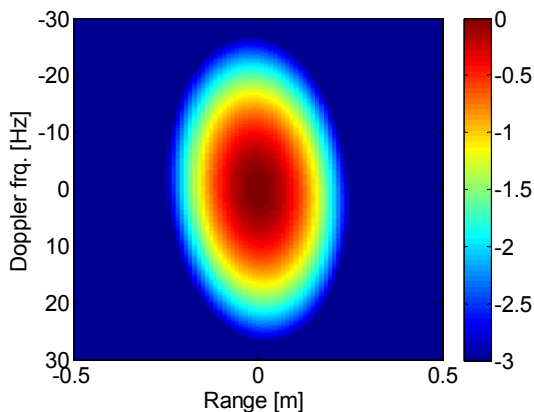


Figure 4: Ambiguity function of PN-63

그리고 표적 수심 50m, 수신기 수심 30m, CPA 거리 45m에서의 송신 신호의 전달경로는 Figure 5와 같다. 그 중 각 선들은 direct, second, third path를 나타내고 일반적으로 direct path가 가장 강하게 수신된다. 이때, 사용된 수중 음속 분포의 구조는 Figure 6과 같으며, 실제 동해상에서 획득한 데이터이다. 그리고 계측 장비의 위치에서의 음속은  $1495\text{m/s}$ 와 같다.

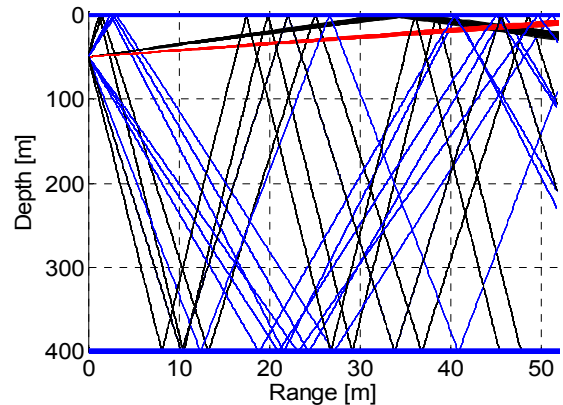


Figure 5: Simulation channel characteristic at 45m from the CPA

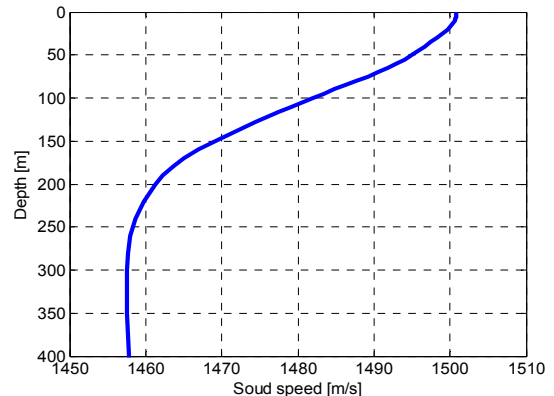


Figure 6: Sound speed profile for simulation

위와 같은 시뮬레이션 환경에서 표적의 상대속도로 발생할 수 있는 최대/최소 도플러 주파수는 식 (4)에 따라  $\pm 182\text{Hz}$ 로 계산 되었으며, Figure 4의 도플러 해상도 정보를 바탕으로 총 10개의 복제신호로 구성된 도플러 बैं크를 설계하였다. 그리고 신호 대 잡음비가  $0\text{dB}$  환경에서 모의 실험을 독립적으로 100회 진행한 결과 거리 추정 오차는 Figure 7과 같다.

Figure 7결과로부터 수신기와 표적간 거리에 따른 거리 추정 오차를 확인할 결과 제안된 기법을 적용하였을 경우 전 구간에서  $1\text{m}$  내외의 오차를 확인할 수 있었다. 하지만 기존의 기법을 이용할 경우 수신기와 표적간 거리가  $10\text{m}$  내외에서는  $2\text{m}$  이내의 거리 추정오차가 발생하였지만,  $20\text{m}$  이상에서부터  $3\sim 48\text{m}$ 의 거리 추정 오차가 발생하였다.

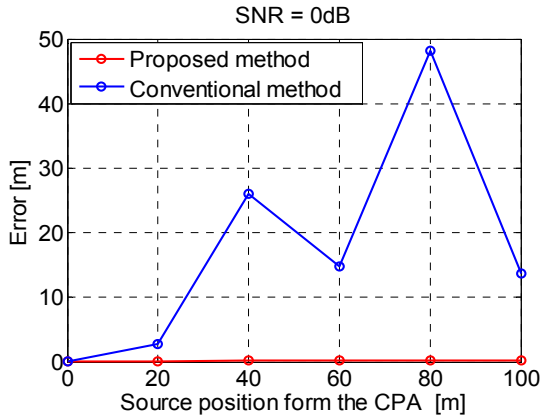


Figure 7: Compare simulation result about proposed ToA method and conventional ToA method

#### 4. 호수실험 및 결과

본 실험은 경상북도 문경시 경천호에서 실제 실험을 수행하였으며, 시험환경은 Table 2 및 Figure 8과 같다. 이때 송신신호는 Table 1과 같고 송신기는 로프를 이용해 예인 보트 갑판에 매달아 2~3노트의 속도로 기동하였다.

Table 2: Parameters for experimental environments

Parameter	Value	Unit
Water depth	30~40	m
Source depth	10	m
Receiver depth	10	m
Receiver	B&K 8106	1
CPA	35	m
Source position from receiver	-100~60	m
GPS error	1	m

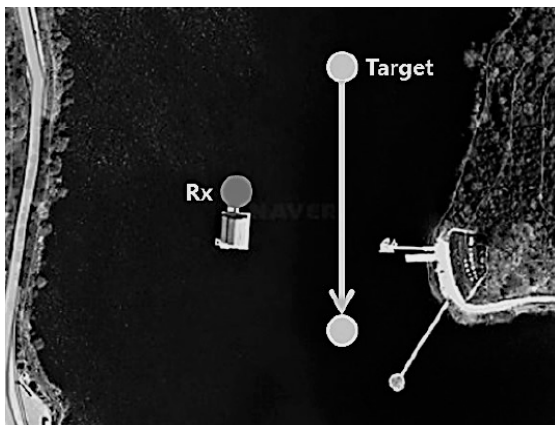


Figure 8: Environmental for lake trial

보트의 실제 기동 정보는 GPS를 이용하여 실시간으로 확인하였다. 위와 같은 환경에서 수신된 신호는 Figure 9와 같으며, 24.5 kHz 대역에서  $c \cdot w$  펄스 신호와 28.6kHz 대역에 PN-63 신호를 확인할 수 있다.

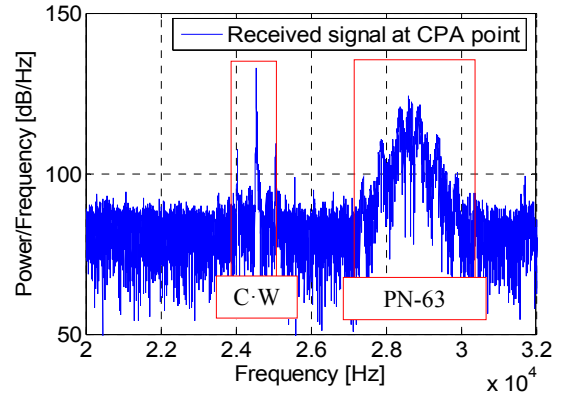


Figure 9: Received signal from B&K 8106

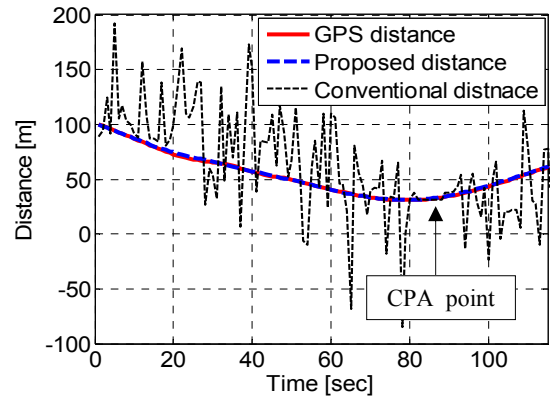


Figure 10: Compare GPS distance, proposed distance and conventional distance

수중 표적의 거리 추정을 위해 수신된 신호를 Figure 3과 같이 대역통과필터를 통해 C·W 펄스 신호를 분리하고 FFT 함으로써 대략적인 도플러를 파악해 최소한의 복제신호와 수신신호가 상관기 계산이 되도록 하였으며, 상관기 결과 값에 ToA 기법을 적용하였다. 거리 추정 결과는 Figure 10과 같으며, 기존의 기법은 CPA 구간에서만 GPS 거리 대비 2m 내의 거리 오차가 발생하였고 나머지 구간에서는 최대 100m 거리 오차가 발생하였다. 반면에 제안된 기법은 전 구간에서 1~2m의 거리 추정 오차를 유지하였다.

#### 5. 결론

본 논문은 도플러 환경에서 단방향 ToA 표적 거리 추정 기법 성능 향상을 위해 표적의 상대속도로 발생할 수 있는 최대/최소 도플러 천이 주파수 구간에 모호 함수 기반의 복제신호를 도플러 बैं크 형태로 배치하였다. 그리고 상관기 계산량 감소를 위해 거리 추정을 위한 PN-63 신호와 다른 대역에 C·W(Continuous Wave) 펄스 신호를 추가하여 대략적인 도플러 천이 주파수를 파악한 후 일부 복제신호 구간에서만 상관기가 계산 되도록 설계 하였다.

제안된 기법 성능 파악을 위해 해양 채널 모델 프로그램

인 벨합을 이용한 모의실험을 수행하였고 모의실험 결과 도플러 बैं크를 사용하였을 때는 전 구간에서 거리 추정 오차가 1m 이내로 계산되었으나 그렇지 않을 경우 표적과 수신기간 거리가 20m 이상에서부터 3~48m의 거리 추정 오차가 발생하였다.

경상북도 문경시 경천호에서 수행된 실제 실험에서도 제안된 기법은 전 구간에서 1.5~2m의 거리 추정 오차를 유지하였으나 기존의 기법은 CPA 구간에서만 GPS 거리 대비 2m 내의 거리 추정 오차를 유지하였고 나머지 구간에서는 최대 100m 이상의 거리 추정 오차가 발생하였다. 본 연구를 통해 수중 표적 거리 추정시 성능 향상을 위해 도플러 बैं크 적용 및 활용 가능성을 제시하였다.

### References

- [1] J. Y. Choi, J. S. Ho, and P. H. Lee, "A calculation method of source level of underwater transient noise by frequency band," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 528-533, 2010 (in Korean).
- [2] M. S. Han, J. Y. Choi, K. Son, and P. H. Lee, "Performance improvement of underwater target distance estimation using blind deconvolution and time of arrival method," *Journal of the Acoustical Society of Korea*, vol. 36, no. 6, pp. 378-386, 2017 (in Korean).
- [3] C. H. Knapp and G. C. Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal processing*, vol. 24, no. 4, pp. 320-327, 1976.
- [4] M. S. Han, J. Y. Choi, D. S. Kang, K. Son, and P. H. Lee, "A study on optimal hydrophone arrangement for the direction finding of high speed moving target in underwater," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 20, no. 3, pp. 369-375, 2017 (in Korean).
- [5] C. H. Hwang and K. M. Kim, "Doppler frequency estimation for time-varying underwater acoustic communication channel," *Journal of the Acoustical Society of Korea*, vol. 40, no. 1, pp. 187-192, 2015 (in Korean).
- [6] W. J. Park, K. M. Kim, M. S. Han, and J. Y. Choi, "Range estimation of underwater acoustic moving source using doppler frequency map," *Journal of the Acoustical Society of Korea*, vol. 36, no. 6, pp. 413-418, 2017 (in Korean).
- [7] M. S. Han, "Velocity and distance estimation of underwater fast moving target using doppler shift/TDoA (Time Difference of Arrival) Hybrid method," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 41, no. 9, pp. 884-889, 2017 (in Korean).
- [8] R. O. Nielson, *Sonar Signal Processing*, Artech House, Inc, Norwood, 1991.
- [9] S. M. Jung, "A simple demonstration of the Wiener-Khinchin theorem using a digital oscilloscope and personal computer," *Korean Journal of Optics and Photonics*, vol. 24, no. 5, pp. 245-250, 2013 (in Korean).
- [10] L. R. Rabiner, R. W. Schafer, and C. M. Rader, "The chirp z-transform algorithm," *IEEE Transaction on Audio and Electroacoustics*, vol. 17, no. 2, pp. 86-92, 1969.
- [11] M. Siderius and M. B. Porter, "Modeling broadband ocean acoustic transmission with time-varying sea surface," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 124, no. 1, pp. 137-150, 2008.