

# 수중에서 고속 기동하는 표적의 방위 탐지를 위한 최적의 청음기 배치 연구

한민수<sup>\*,1)</sup> · 최재용<sup>1)</sup> · 강동석<sup>1)</sup> · 손 권<sup>1)</sup> · 이필호<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제6기술연구본부

## A Study on Optimal Hydrophone Arrangement for The Direction Finding of High Speed Moving Target in Underwater

Min-Su Han<sup>\*,1)</sup> · Jae-Yong Choi<sup>1)</sup> · Dong-Seok Kang<sup>1)</sup> · Kweon Son<sup>1)</sup> · Phil-ho Lee<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> The 6th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 29 August 2016 / Revised 18 December 2016 / Accepted 14 April 2017)

### ABSTRACT

One of good DF(Direction Finding) methods is based on TDOA(Time Difference of Arrival) estimation when finding underwater moving target. For small DF error, high time resolution A/D(Analog-to-digital) conversion board and long baseline are needed. But the result of sea trial about close-range and high speed moving target, spatial correlation coefficient and appeared poor properties below 0.3 when hydrophone arrangement are separated over  $6\lambda$  because of underwater fading channel. And we also find out that the distance between hydrophone should be under  $4\lambda$  apart to take advantage of spatial correlation coefficient gain and performance of DF in underwater moving channel environments.

Key Words : Underwater Channel(수중 채널), TDOA(도달시간차), Spatial Correlation Coefficient(공간 상관계수), Direction Finding(방위 추적), Closest Point of Approach(CPA : 최단 근접거리)

### 1. 서론

수중에서 기동하는 표적의 방위와 위치를 측정하는 기술은 민간이나 군사적으로 매우 많이 활용되고 있으며, 정확도를 향상시키기 위한 다양한 방위 탐지 기술이 연구되어 왔다<sup>1,2)</sup>.

대표적인 방위 추적(DF) 기술은 능동 방식과 수동 방식이 있는데 1990년대 이후에는 시간측정정확도가 향상되어 다중 센서에 도달한 신호의 도달시간차(TDOA)를 이용하여 음원의 위치를 추정하는 수동 방식이 많이 연구되었다<sup>3)</sup>. TDOA 방식은 음속이 균일한 2차원 평면에서, 2개의 센서에 도달한 신호의 시간차를 만족하는 쌍곡선의 교점에서 음원의 위치를 결정 짓는다<sup>4)</sup>.

이때, TDOA를 이용한 신호원의 위치 추정은 청음

\* Corresponding author, E-mail: hansonhan@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

기로 수신되는 신호들의 정밀한 상관관계가 있어야 가능하며, 일반적으로 육상에서의 TDOA 기술은 청음기 배열의 기준선이 길고 시간측정분해능이 높아야 수신되는 표적 신호의 상관관계가 높아져 DF 오차가 낮아진다고 알려져 있다. 하지만 수중에서의 음파전달 채널 환경은 수심 및 수온이나 염분 등에 의하여 신호 전달속도가 다르고 산란 및 해면이나 해저 반사파 등에 의한 다중경로 페이딩 영향으로 청음기 배열로 수신되는 소음의 상관관계가 낮아져 육상보다 정확한 위치추정을 계산하기 어렵다.

따라서 수중에서 TDOA 기법을 적용하기 위하여 수중 채널 환경의 다이버시티<sup>[5]</sup>에 대한 연구가 진행되고 있으며, 천해의 다중경로 수중 채널 환경에서 송신기와 수신기 거리를 바꿔가며 측정된 데이터를 바탕으로 채널 상관 계수를 분석한 연구도 진행되었다<sup>[6]</sup>. 하지만 위 연구들은 송신기와 수신기가 고정되어 있거나 송신기에서 특정 음파를 송신하여 수중 채널 정보를 추출한 것으로 청음기로부터 근접 고속 기동하는 표적의 수중방사소음에 대한 채널 연구 및 DF 오차 분석은 아직 미비하다.

본 연구에서는 공간 상관 계수 기법을 사용하여 표적이 청음기 배열로부터 근접 고속 기동하는 상황에서 청음기 배열 간격에 따라 시변하는 수중 채널 특성을 측정하고 분석함으로써 표적의 DF를 위한 최적의 청음기 배치 간격을 제시하였으며, 그에 따른 DF 오차를 비교 분석하였다.

## 2. 분석방법

### 2.1 TDOA 추정 기반 방위 탐지

Fig. 1은 배열 청음기와 시간차 측정 장치로 구성된 TDOA 추정 기반 방위 탐지 개념이다.

두 청음기 간격을  $d$  m, 표적 소음이 수신되는 입사각을  $\theta$  rad 그리고 수중 음속을  $c$  m/s라 한다면, 청음기 간격과 소음이 수신되는 입사각에 따라 각 청음기에 수신되는 소음의 시간차가 발생하게 된다. 이때 발생하는 시간차  $t_1 - t_2$ 는 식 (1)과 같이 표현 한다<sup>[7]</sup>.

$$t_1 - t_2 = t_d = \frac{d \sin \theta}{c} \quad (1)$$

DF 오차를 구하기 위해 식 (1)을 시간차( $t_d$ )에 대하여 미분하면 식 (2)와 같다.

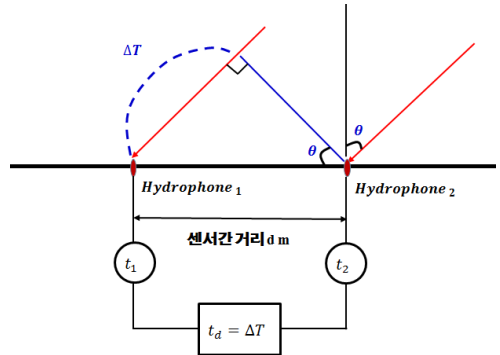


Fig. 1. Principle of TDOA estimation for direction finding

$$\Delta t_d = \left( \frac{d \cos \theta}{c} \right) \Delta \theta + \frac{\sin \theta}{c} \Delta d \quad (2)$$

$\Delta t_d$ 는 시간측정 오차이며,  $\Delta d$ 는 기준선 길이의 오차이다. 식 (2)에서 기준선 길이  $d$  m는 정확하게 측정될 수 있으므로  $\Delta d$ 를 0으로 가정하고 DF 오차 각  $\theta$ 에 대하여 정리하면 식 (3)과 같으며, 배열 기준선의 길이와 코사인 값에 반비례하고 시간측정 오차에 비례한다.

$$\Delta \theta = \left( \frac{c}{d \cos \theta} \right) \Delta t_d \quad (3)$$

### 2.2 공간 상관 계수

DF 오차는 식 (3)과 같은 이론이지만 측정 청음기로부터 근접 고속 기동하는 표적의 수중방사소음이 시변 하는 수중채널 환경을 통해 청음기로 수신된 신호는 다중경로 페이딩 영향을 받아 신호의 포락선이 변화된다. 따라서 본 연구에서는 각 청음기에서 수신된 신호의 포락선을 이용하여 신호의 페이딩 특성 분석하고자  $k$ 번째 청음기에서 수신된 신호의 순시 전력을 식 (4)와 같이 추정하였다.

$$IP_k(n) = \frac{1}{N} \sum_{p=(n-1)N+1}^{M_n} r_k^2(p) \quad (4)$$

식 (4)의  $r_k(t)$ 는  $k$ 번째 청음기에서 수신한 정규화된 신호이고  $N$ 은 순시전력을 측정하는 구간으로  $n$ 값에 따라 측정 구간이 이동하며,  $N_n$ 의 최대치는 분석하고자 하는 수신 신호의 길이와 같다. 본 연구에서의

$N$ 값은 측정 장비의 시간측정분해능과 표적 속도를 고려하여 3200 샘플로 하였으며, 이는 매 25 ms 마다 순시 전력을 구한 것과 같다. 그리고 순시 전력의 제공 근은 포락선과 같으며, 포락선은 신호의 페이딩 특성을 나타낸다. 따라서 수신 신호의 페이딩 특성을 파악하고자 식 (5)와 같이 수신 신호의 포락선을 계산한다.

$$f_k(n) = \sqrt{IP_k(n)} \quad (5)$$

본 연구에서는 수신한 신호의 포락선을 이용하여 각 청음기에서 수신한 신호의 페이딩 특성을 추정한 후 수중채널 환경에서 청음기 간의 간격에 의한 DF 추정 기법의 사용 가능성을 분석하였으며, 이를 위해 첫 번째 청음기에서 수신한 신호와 공간상으로  $d$  m 이격된 청음기에서 수신한 신호에 대한 공간 상관 계수(spatial correlation coefficient)를 식 (6)과 같이 추정하였다<sup>18)</sup>.

$$\alpha = \frac{E[f_1 f_k] - E[f_1]E[f_k]}{\sqrt{(E[f_1^2] - E[f_1]^2)(E[f_k^2] - E[f_k]^2)}} \quad (6)$$

여기서  $E[\cdot]$ 는 기댓값을 나타내고,  $f_1$ 은 첫 번째 청음기에서 수신된 신호의 추정된 페이딩이다.  $f_k$ 는  $k$  번째 청음기에서 수신된 신호의 추정된 페이딩이다. 일반적으로 식 (6)에서 계산된 공간상관계수가 0.3 이하면 정밀한 DF 계산이 어렵다<sup>19)</sup>.

### 3. 해상실험 환경 및 결과

#### 3.1 해상실험 환경

본 실험은 남형제도 근방에서 수행하였으며, 해역의 수심은 약 80 m의 천해이다. 시험환경은 풍속 7 노트, 파고 1 m 이하였고 수심에 따른 수중음속은 Fig. 2와 같다.

Fig. 3은 표적의 관성항법장치 데이터를 기초로 SIMDIS를 이용하여 실제 해상실험 진행을 도식화 한 것이다. 표적은 시험선을 기준으로 타원 운동을 하며, 시험선 CPA 기준으로 최대 x축 200 m, y축(수심) 80 m, z축 500 m 이하로 왕복 기동 하였다.

표적의 방사소음 수신을 위하여 시험선 우현 측에 5개의 청음기를 수평으로 배열 하였고 간격은 최대 분석 주파수 대비 1~6  $\lambda$ 로 하였다. 수심은 수중음속

및 표적의 기동 수심에 따라 30~45 m에 설치하였으며, 측정 및 분석을 수행한 장비는 Fig. 4와 같다.

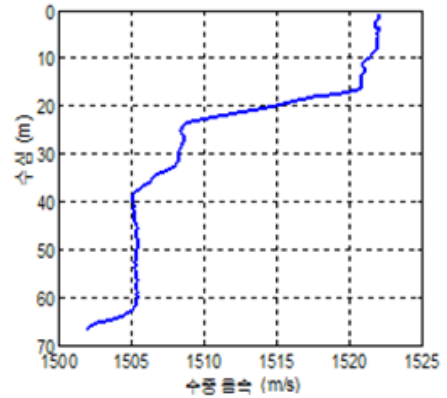


Fig. 2. Sound velocity profile

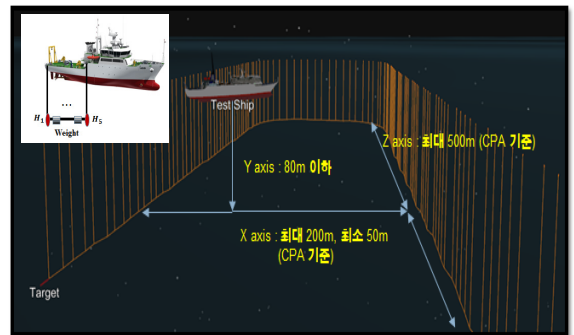


Fig. 3. Geometrical view of target tracks in sea trial



Fig. 4. Experimental equipment for the measurement of underwater radiated noise on target

Fig. 5는 실제 해상실험을 위해 설치된 청음기 배열을 나타내며, 5조의 유선 케이블이 설치 치구에 고정된 것이다. 그리고 수중에서 청음기 움직임을 최소화하기 위해 치구 양쪽 끝에 10 kg의 추를 설치하였다. 이때 장비 사양 및 청음기 배열 정보는 Table 1과 같다. 최대 분석 주파수를 3,000 Hz로 정한 이유는 표적 수중방사소음의 기계류 소음이 3,000 Hz내에 존재하기 때문이다.



Fig. 5. Hydrophone arrangement for DF

Table 1. Parameters for experimental equipments

Parameter	Value	Unit
Hydrophone Sensitivity	-173.5	dB
Sampling Rate	131072	Hz
Amplifier	-40~+40	dB
Band-Pass Filter	10~3000	Hz
Hydrophone Arrangement	1, 2, 4, 6	$\lambda$
Hydrophone Number	5	-
Hydrophone Depth	30~45	m

3.2 해상시험 결과

Fig. 3과 같은 환경에서 해상실험을 수행한 후 5개의 청음기에 수신된 데이터는 Fig. 6과 같다. 데이터 분석은 CPA 기준  $\pm 10$ 초 구간이며, CPA 지점인 7~10초 부근에 수신 음압의 Voltage 값이 가장 높게 나타났다.

수신된 신호의 포락선 계산을 위해 Fig. 6과 같이 수신된 신호에 식 (4)와 (5)를 적용하여 Fig. 7과 같이 각 청음기의 포락선 값을 계산하였다. 계산되어진 포

락선 신호는 각 채널의 페이딩 특성을 나타내고 있으며, 청음기 간격에 따른 채널 페이딩 특성을 명확히 확인하고자 포락선 신호를 식 (6) 대입 후 Fig. 8과 같이 청음기 간격에 따른 공간 상관 계수를 나타내었다.

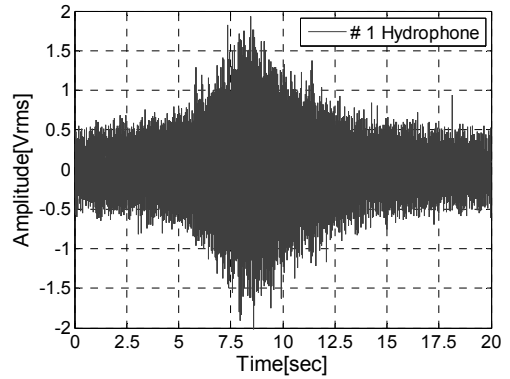
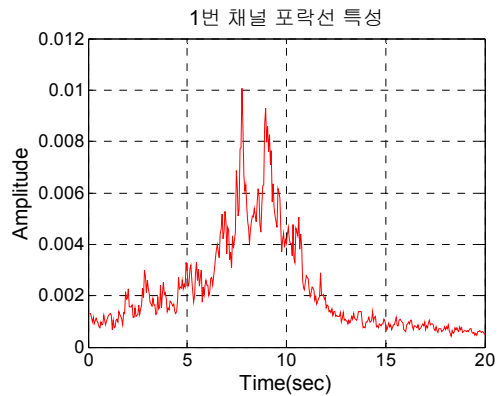
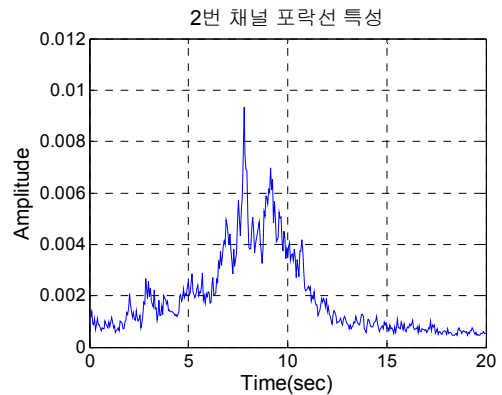


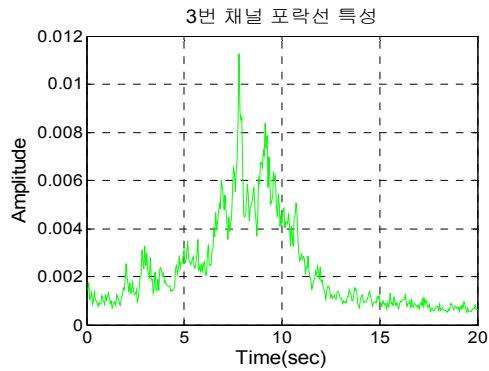
Fig. 6. Received signal from #1 hydrophone



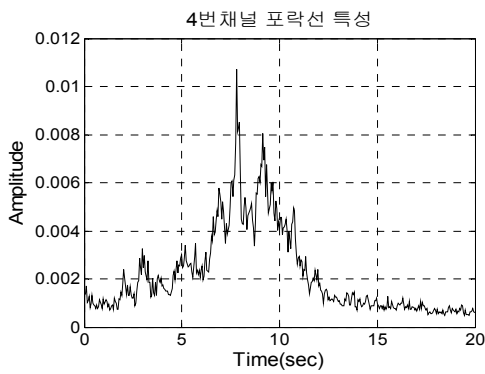
(a)



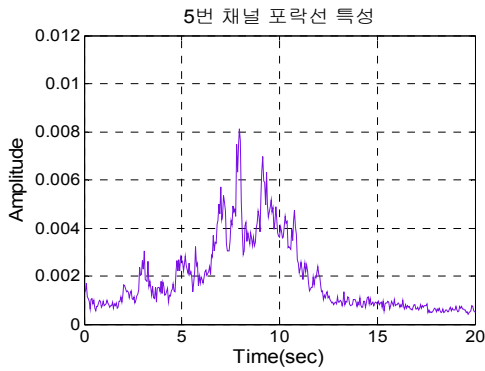
(b)



(c)



(d)

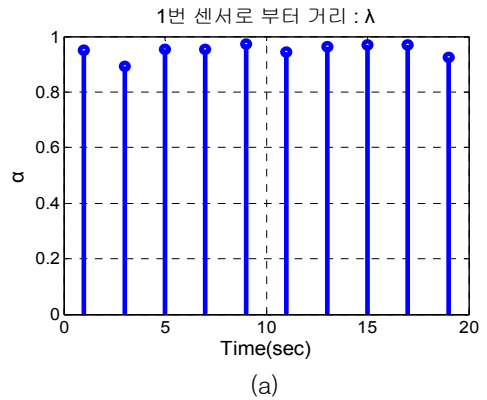


(e)

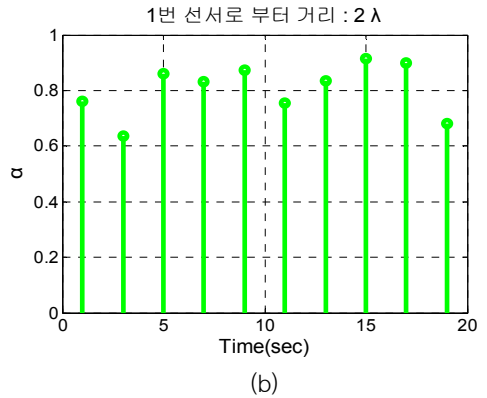
Fig. 7. Fading characteristics that are estimated from (a) #1 hydrophone (b) #2 hydrophone (c) #3 hydrophone (d) #4 hydrophone (e) #5 hydrophone

Fig. 8은 시변 채널에 대응하여 Analysis Freq : 3000 Hz, Frequency Bin : 3000 Hz, Overlap 50 %, Average

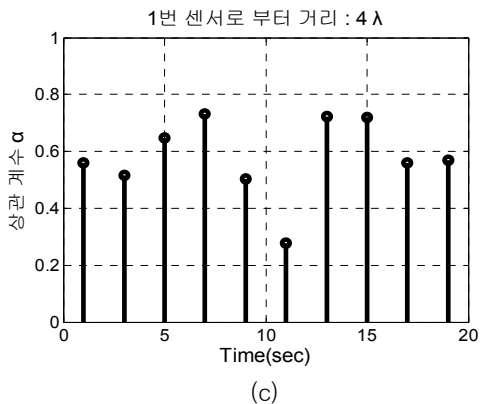
Length : 4로 분석하여 2초마다 공간 상관 계수 값을 나타내었다. Fig. 8을 확인한 결과 공간 상관 계수 값은 청음기 거리가  $6\lambda$ 에서  $1\lambda$ 로 가까울수록 좋아지며, 표적이 청음기로 근접할수록 나빠지는 경향을 확인할 수 있다. 또한, 시간에 따라 공간 상관 계수 값이 달라지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 고속 근접 기동하는 표적이 시변 채널을 가지는 것을 의미한다.



(a)



(b)



(c)

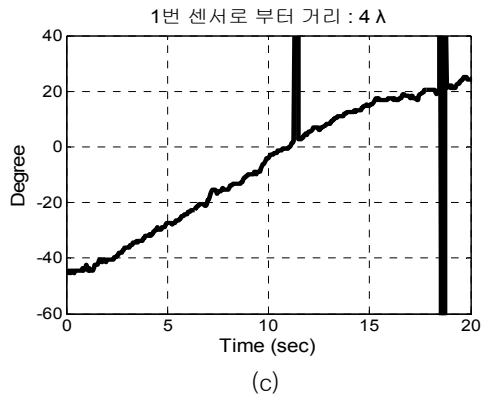
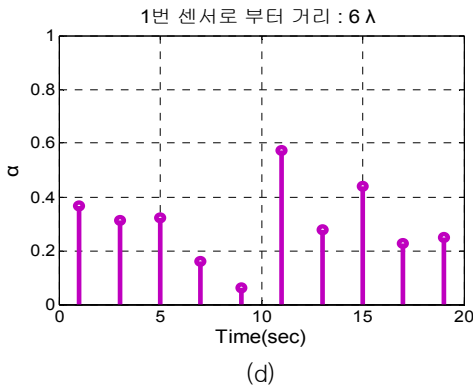


Fig. 8. Correlations of fading characteristics when the distance between receivers are (a)  $1 \lambda$  (b)  $2 \lambda$  (c)  $4 \lambda$  (d)  $6 \lambda$

공간 상관 계수와 DF의 상관성을 확인하기 위해 Fig. 6의 신호에 TDOA 기법을 적용한 후 청음기 배열 간격에 따른 표적에 대한 DF 값을 Fig. 9와 같이 계산하였다.

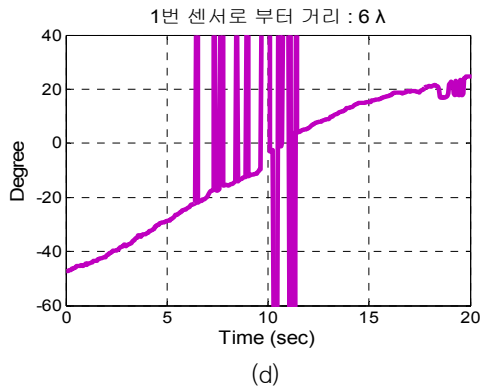
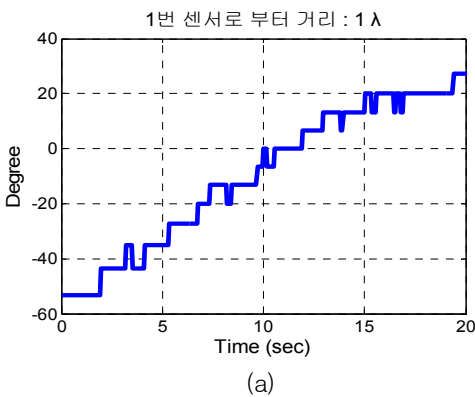


Fig. 9. DF value the distance between receivers are (a)  $1 \lambda$  (b)  $2 \lambda$  (c)  $4 \lambda$  (d)  $6 \lambda$

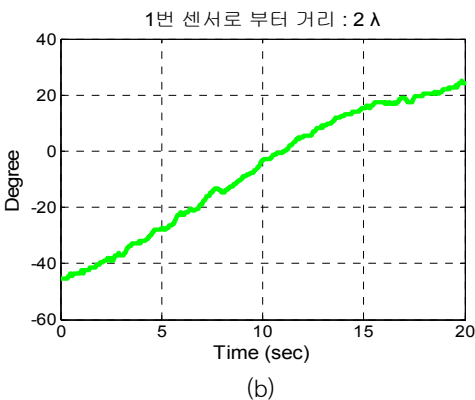


Fig. 9를 확인하면 청음기 배열 간격이  $2 \lambda$ 일 때 DF 성능이 가장 좋은 것으로 확인되었으며,  $6 \lambda$ 에서 다른 청음기 간격보다 DF 오차가 높은 것을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 8의 공간 상관 계수 결과와 달리 청음기 배열 간격이  $1 \lambda$ 에서 DF 성능이 좋지 못한 특성이 확인된다. 그 이유는 표적이 청음기로부터  $100 \text{ m}$  이내로 근접 기동하고 있으며, 청음기 간격이  $1 \lambda$ 로 근접 배치되어 있기 때문에  $F_s : 131072 \text{ Hz}$  분해능으로는 수신되는 표적 수중방사소음 신호의 시간차를 정확히 분해하지 못해 발생하는 현상이다. 이를 해결하기 위해서는 하드웨어의 분해능을 높이는 것이지만 가격상승과 데이터량 증가에 따른 실시간 처리에 취약점이 나타난다.

위 결과를 종합하면 수중에서 청음기로부터 근접 고속 기동하는 표적의 방위를 추정할 때 일반적인 TDOA 이론과 달리 청음기 배열 간격이 너무 크면 수신 신호가 수중환경 페이딩 영향을 받아 좋지 못한 DF

성능을 나타내었다. 그리고 청음기 배열 간격이 너무 근접하면, 수신 장비의 하드웨어적인 제약사항으로 인하여 DF 성능이 좋지 못하였다.

#### 4. 결 론

본 논문은 수중이라는 제한된 환경에서 청음기 배열로 근접 고속 기동하는 표적의 DF 오차를 최소화할 수 있는 최적의 청음기 간격을 계산하기 위하여 청음기로 수신되는 표적 방사소음 신호의 포락선을 계산하고 포락선에 공간 상관 계수를 적용시켜 채널 페이딩 영향을 관측하였다. 측정 결과 배열 간격이 상대적으로 넓은 6 λ에서 공간 상관 계수 값이 평균 0.3 이하로 가장 낮게 나타났으며, 청음기 간격이 1 λ 일 때 공간 상관 계수 값이 평균 0.9 이상으로 높게 나타났다. 위 결과를 토대로 근접 고속 기동하는 표적의 DF를 실시한 결과, 시변동 채널을 극복하고 최적의 DF 성능을 가지기 위해서는 최대 4 λ 이하의 청음기 간격이 필요한 것으로 분석되었다.

수중 채널 환경은 측정 지역, 년도, 계절 및 날짜와 시간에 의해 그 특성이 일정하지 않은 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서 수행한 측정은 이와 같이 변화가 큰 수중환경의 일부의 경우에 지나지 않는다. 또한 본 측정의 경우를 분석한 결과로는 청음기 간격이 1 λ가 아닌 2 λ일 때 최적의 DF 성능을 나타내었으며, 이는 하드웨어적인 제약 때문이다. 그리고 본 연구를 바탕으로 속도 및 거리 계산에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

#### References

[1] 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, pp. 320-327, 1976.

[2] S. E. Lee, S. Y. Chun, S. B. Hwang, and H. U. Lee, "Implementation of The Omnidirectional Target Bearing Detector Utilizing Towed Linear Array", Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 5, No. 1, pp. 59-64, 2002.

[3] Y. T. Lim and T L. Song, "A Study of Maneuvering Target Motion Analysis for a Passive Sonar System with the IMM," Proceedings of UARC 2000, pp. 91-95, 2000.

[4] J. Chen, J. Benesty, and Y. Huang, "Time Delay Estimation in Room Acoustic Environments : An Overview," EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Vol. 2006, No. 1, pp. 1-19, 2006.

[5] T. C. Yang, "Measurements of Temporal Coherence of Sound Transmissions Through Shallow Water," Journal of the Acoustic Society of America, Vol. 120, No. 5, pp. 2595-2614, 2006.

[6] B. Tomasi, G. Zappa, Kim McCoy, P. Casari, and M. Zorzi, "Experimental Study of Space-Time Properties of Acoustic Channels for Underwater Communications," in Proc. of OCEANS'2010, 2010.

[7] A. Dresan and Y. Tanik, "Passive Radar Location by Time Difference of Arrival", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, pp. 1251-1257, 2002.

[8] M. S. Han, "Performance Analysis of the Spatial Correlation about High Speed Target For Underwater Channel Environments," Korea Institute of Military science and Technology Annual Conference Proceedings, pp. 636-637. 2016.

[9] J. P Kermoal, L Schunmacher, and K. I Pedersen, "A Stochastic MIMO Radio Channel Model with Experimental Validation," IEEE Transaction on Communication, Vol. 20, No. 6, pp. 1211-1226, 2002.