

# 예인 선 배열 소나와 선측 배열 소나의 방위각 측정값의 일관성 판별기법의 성능분석

## Performance Analysis of a Criterion to Verify the Consistency of Measured Angles of Towed Array and Frank Array

박 현 우\*      정 태 진\*\*      권 범 수\*\*      이 균 경\*\*  
Hyunwoo Park      Tae-Jin Jung      Bum-Soo Kwon      Kyun Kyung Lee

### Abstract

Unlike using a single sonar platform, using two different sonar platforms can lead to a considerable increase of acoustic aperture in Passive Ranging Sonar(PRS). Values measured from two sonar platforms shall be consistent in order to allow us to rely on such improved aperture. However, obtaining consistent values from a towed array and a frank array is not always simple due to the heading error occurring at towed array. The objective of this paper is to verify a new criterion analyzing the consistency in the measured values of towed array and frank array through computer simulations<sup>[1]</sup>.

Keywords : Towed Array Sonar(예인 선 배열 소나), Frank Array Sonar(선측 배열 소나), Passive Ranging Sonar(수동 측거 소나), Consistency(일관성)

### 1. 서론

잠수함의 운영에서 표적의 위치를 파악하는 것은 상당히 중요한 일이다. 표적의 위치를 추정하는 방법은 잠수함에서 음파를 발생시켜 표적에 반사되어 돌아오는 시간지연을 이용한 방법인 능동소나와 음원이 발생시키는 신호를 이용해 음원의 위치를 추정하는 방법인 수동소나로 크게 나뉜다. 하지만, 은밀성을 강조

하는 잠수함의 특성상 능동소나는 잠수함의 위치가 적에게 노출될 위험이 있기 때문에 수동소나를 이용한 방법이 주로 이용된다.

이러한 수동소나를 이용한 음원의 거리 추정 방법은 오랫동안 연구되었다. 그 중 음원의 위치정보를 비교적 정확히 추정하는 방법으로 TMA(Target Motion Analysis, 표적기동분석) 방법이 있지만, 이 방법은 추정 값을 얻기 위해 긴 시간이 소요되는 문제점이 있다. 이런 TMA와는 달리 음원의 거리를 짧은 시간에 추정하기 위해 DA(Distributed Arrays)를 사용한 방법이 널리 이용되고 있다. 이 방법은 음원에서 두 개 이상의 센서에 도달하는 신호의 시간차이를 이용해 음파면의 곡률을 측정하는 방법이다. 하지만, 이는 수중에

† 2009년 12월 8일 접수~2010년 2월 4일 게재승인

\* LG 전자(LG Electronics)

\*\* 경북대학교(Kyungpook National University)

책임저자 : 이균경(kklee@ee.knu.ac.kr)

서 센서배치의 공간적 제약으로 근거리의 음원에 대해 거리를 추정할 수 있다.

이렇게 하나의 소나 플랫폼을 이용하는 방법과는 달리 잠수함의 두 소나 플랫폼을 함께 이용하는 방법이 있다. 대표적으로 FA(Frank Array, 선측 배열 소나)와 TA(Towed Array, 예인 선 배열 소나)를 이용하는 방법으로<sup>[2,3]</sup>, 이 방법은 FA와 TA를 멀리 떨어져 있는 두 센서로 생각할 수 있으며, 단일 소나 플랫폼을 사용했을 때보다 큰 음향 개구경(acoustic aperture)을 확보할 수 있다. 하지만, 이 경우 고해상도 빔형성의 필요성, 해류나 자함의 기동 등에 의한 TA의 위치, 구부러짐, 진행 방향에 대한 불확실성 등의 문제로 실제 많이 사용되지 않는다.

이러한 문제에 대해 TA의 위치는 잠수함의 직선 운동과 유체에서의 배열센서의 운동모델 등을 통해 어느 정도 추정할 수 있으며, TA의 구부러진 정도는 TA에서 수신된 음향신호를 이용하는 방법<sup>[6-10]</sup>과 선 배열상에 방위센서나 심도센서와 같은 비 음향측정센서를 설치하여 이 정보를 이용하는 방법<sup>[4,5]</sup> 등 여러 가지 방법을 이용해 측정 가능하다. 또한, TA의 진행 방향에 오차가 있을 때는 이 오차에 민감하지 않은 FA와 TA에서의 수신 신호의 시간차를 이용해 음원의 거리를 측정할 수 있다<sup>[2]</sup>. TA의 진행방향에 오차가 있을 때는 시간차와 FA의 측정값을 이용해 거리측정을 하며, TA의 진행방향에 오차가 없을 때는 FA와 TA의 측정값을 이용해 비교적 정확한 거리측정이 가능하다. 이때, FA와 TA를 이용한 음원까지의 거리측정에서 TA의 진행방향에 대한 오차가 있는지 없는지 판단할 필요성이 있다<sup>[1]</sup>.

본 논문에서는 FA와 TA의 방위각과 신호의 시간지연을 이용해 TA의 방위각 일관성을 판단하는 판별방법을 제시하고, 이 판별법을 이용해 TA의 진행방향에 대한 오차를 추정할 수 있는 방법을 제시한다. 이때, TA의 진행방향에 대한 오차 때문에 발생하는 FA와 TA에서의 방위각 일관성을 판단하기 위해 FA와 TA에서의 음원 신호 시간차를 이용한다. 하지만, FA와 TA에서의 신호 시간차와 각각의 방위각은 직접 비교하기 어려우므로 신호의 시간차에 의한 쌍곡선의 점근선을 이용하여 점근선의 각도와 FA와 TA에서 음원의 방위각과의 관계를 확인한다.

본 논문은 2절에서 FA와 TA 신호의 시간차와 FA, TA 측정치 사이에 일정한 관계가 있음을 보이고, 이를 이용해 FA와 TA 측정치의 일관성 판별법을 제시

한다. 3절에서는 수식의 근사화를 통해 제시한 FA와 TA 측정치 사이의 관계에 대해 거리와 방위각에 따른 근사화 오차를 컴퓨터 계산을 통해 확인한다. 그리고 신호의 SNR, 다중경로에 따른 일관성 판별법의 성능을 monte carlo 방법을 이용해 분석한다. 또한, TA의 편향 오차에 의한 판별법의 특징을 분석하고, 제시된 판별법을 이용해 TA의 편향 오차를 추정하는 방법을 제시하고 이를 확인한다.

## 2. TA와 FA 측정값의 일관성 판별법

Fig. 1과 같이 원점을 기준으로 오른쪽으로  $d$ 만큼 떨어진 위치에 FA가 있고, 원점의 왼쪽으로  $d$ 만큼 떨어진 위치에 TA가 있다고 가정한다. FA와 TA의 좌표는 각각  $(d,0)$ ,  $(-d,0)$ 가 되며, 원점은 FA와 TA의 중간에 있게 된다. 음원이 원점과 FA의 거리  $d$ 에 비해 원점에서 멀리 떨어진  $(x,y)$ 에 위치한다고 가정할 때, FA와 TA에서 측정한 음원의 방위각  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 와 FA와 TA에서 수신한 신호의 시간차이  $t_d$ 에는 일정한 관계가 있으며, 이 관계를 이용해  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  사이의 일관성 판별법을 제시한다.

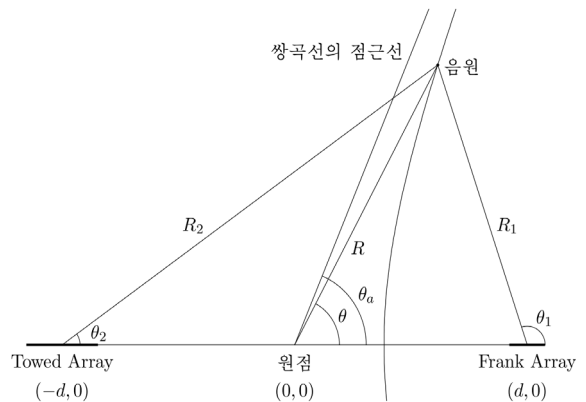


Fig. 1. Positions of FA, TA, and asymptotic curve

### 가. FA와 TA에서 신호의 시간차에 의한 쌍곡선의 방정식

음원과 원점과의 거리, 음원과 FA와의 거리, 음원과 TA와의 거리를 각각  $R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  이라 가정하고, FA와 TA에서 수신한 신호의 시간차이를  $t_d$ , 수중에서 음파의 속도를  $c$ 라 하면  $R_1$ 과  $R_2$ 의 차이,  $R_d$ 는 다음과

같이  $t_d$ 에 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_d = t_d c \tag{1}$$

이때,  $R_d$ 는  $R_d = R_2 - R_1$ 의 관계를 가지므로, 다음의 식과 같다.

$$R_d = t_d c = \sqrt{(x+d)^2 + y^2} - \sqrt{(x-d)^2 + y^2} \tag{2}$$

위 식의 양쪽 변을 제곱하여 정리하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{x^2}{(R_d/2)^2} - \frac{y^2}{d^2 - (R_d/2)^2} = 1 \tag{3}$$

여기서 정리된 식 (3)은  $(-d,0)$ 과  $(d,0)$ 을 초점으로 하고 각각의 초점으로부터 음원  $(x,y)$ 까지의 거리 차이가  $R_d$ 인 쌍곡선의 방정식이 되며, 이 쌍곡선은  $R_d$ 에 의해 결정된 음원의 예상위치가 된다.

나. 쌍곡선의 점근선의 각도  $\theta_a$ 와 실제각도  $\theta$ 의 관계

Fig. 1과 같이 식 (3)의 쌍곡선에서 원점에서의 점근선의 각도를  $\theta_a$ 라 하고 음원의 실제각도를  $\theta$ 라 할 때 점근선의 각도  $\theta_a$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\cos \theta_a = \frac{R_d}{2d} \tag{4}$$

음원의 위치를  $(x,y)$ 라 할 때 음원의  $y$  좌표를 식 (3)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있으므로,

$$y = \sqrt{x^2(4d^2 - R_d^2)/R_d^2 - (d^2 - (R_d/2)^2)}$$

원점에서의 음원의 각도  $\theta$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{(2d/R_d)^2 - (d^2 - (R_d/2)^2)/x^2}} \tag{5}$$

$R^2 = x^2 + y^2$ 이므로,  $y^2 = R^2 - x^2$ 을 식 (3)에 대입하면  $x^2$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$x^2 = \left(\frac{R_d}{2d}\right)^2 \left(R^2 + d^2 - \left(\frac{R_d}{2}\right)^2\right) \tag{6}$$

위 식을 식 (5)에 대입하면 다음과 같이 나타내어 진다.

$$\cos \theta = \frac{R_d/2d}{\sqrt{1 - \frac{d^2 - (R_d/2)^2}{R^2 + (d^2 - (R_d/2)^2)}}} \tag{7}$$

이때,  $d \geq |R_d/2|$  이므로  $d \ll R$  이라는 가정에서  $d^2 - (R_d/2)^2 \ll R^2$  이라고 볼 수 있다. 그러므로 식 (7)의 분모는 1로 근사화될 수 있으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\cos \theta \cong \frac{R_d}{2d} = \cos \theta_a \tag{8}$$

다.  $\theta_a, \theta_1, \theta_2$ 의 각도관계

Fig. 1에서의 FA에서 음원의 각도  $\theta_1$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan \theta_1 = \frac{R \sin \theta}{R \cos \theta - d} \tag{9}$$

$\tan(a-b) = (\tan a - \tan b)/(1 + \tan a \tan b)$ 의 삼각공식을 이용해  $\theta$ 와  $\theta_1, \theta_2$ 의 관계를 살펴보면 먼저  $\tan(\theta_1 - \theta)$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan(\theta_1 - \theta) = \frac{d \sin \theta}{R - d \cos \theta} \tag{10}$$

같은 방법으로  $\tan(\theta - \theta_2)$ 를 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\begin{aligned} \tan(\theta - \theta_2) &= -\tan(\theta_2 - \theta) \\ &= \frac{d \sin \theta}{R + d \cos \theta} \end{aligned} \tag{11}$$

이때  $d \ll R$ 이라는 가정에 의해  $\frac{d}{R - d \cos \theta} \sin \theta$ 와  $\frac{d}{R + d \cos \theta} \sin \theta$ 는  $\frac{d}{R} \sin \theta$ 로 근사화할 수 있으므로

$$\begin{aligned} \tan(\theta_1 - \theta) &\cong \frac{d}{R} \sin \theta \\ &\cong \tan(\theta - \theta_2) \end{aligned} \quad (12)$$

로 나타낼 수 있다. 또한,  $\theta_1 - \theta$ 와  $\theta - \theta_2$ 는  $d \ll R$ 일 경우 0°에 가까운 값을 가지므로 다음과 같은  $\theta$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\theta_1 - \theta \cong \theta - \theta_2, \quad \theta \cong \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad (13)$$

$\theta_1$ 과  $\theta_2$ 는 각각 FA와 TA에서 측정된 방위각이며,  $\theta_a$ 는 FA와 TA의 빔 출력 신호의 시간차를 이용해 식 (1)과 식 (4)를 이용해 구한 추정값이다. 식 (8)에서와 같이  $d \ll R$ 인 경우  $\theta_a$ 는  $\theta$ 로 근사화할 수 있으며, 이 경우 식 (13)에 의해 다음과 같은 세 측정값  $\theta_a$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 의 관계가 정해진다.

$$\theta_1 - \theta_a \cong \theta_a - \theta_2, \quad \theta_a \cong \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad (14)$$

라. 음원의 방위각 측정값의 일관성 판별 방법

Fig. 1의 상황에서 음원이 어떤 위치에 있더라도  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_a$ 의 관계는  $\theta_2 < \theta_a < \theta_1$ 의 관계가 성립함을 알 수 있다. 또한, 식 (8)에서  $\theta_a$ 는  $\theta$ 로 근사화가 가능하므로, 식 (10)은 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\tan(\theta_1 - \theta_a) \cong \frac{d}{R} \sin \theta_a \quad (15)$$

이 식은  $d \ll R$ 이라는 가정에서  $\theta_1 - \theta_a$ 는 0에 가까운 값이 되므로 다음과 같다.

$$\theta_1 - \theta_a \cong \frac{d}{R} \sin \theta_a \quad (16)$$

또한, 식 (14)에 의해  $\theta_1 - \theta_a$ 와  $\theta_a - \theta_2$ 는 유사한 값을 가진다고 볼 수 있으므로 각각의 관계를 정리하면 세 측정값  $\theta_a$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 의 일관성을 판단하는 세 가지 조건을 제시할 수 있다.

1. 항상  $\theta_2 < \theta_a < \theta_1$ 의 관계가 성립해야 한다.

2.  $\theta_1 - \theta_a$ 는 대략 추정하는  $R$ 에 대해  $(d/R)\sin\theta_a$ 의 값과 유사한 값이어야 한다.
3.  $\theta_1 - \theta_a$ 와  $\theta_a - \theta_2$ 가 유사한 값을 가져야 한다.

### 3. 컴퓨터 시뮬레이션

이 절에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 2절에서 제시된 세 측정값  $\theta_a$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 의 일관성 판별법의 특징을 알아본다. 시뮬레이션을 통해 먼저 수식 전개 과정에서 사용한 근사화의 적용 가능 여부에 대해 확인하며, 다양한 신호 SNR과 다중경로 환경, TA의 편향된 오차에 대한 판별법의 특징과 편향된 오차값의 추정방법에 대해 알아본다.

가. 점근선의 각도와 음원의 거리에 따른 판별법의 성능분석

Fig. 1에서와 같이 음원에 대한 쌍곡선은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며,  $a = R_d/2$ ,  $b = \sqrt{d^2 - (R_d/2)^2}$ 라 할 때 식 (3)은 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (17)$$

이때, 이 쌍곡선 점근선의 각도  $\theta_a$ 와 원점에서 음원까지의 거리  $R$ 이 주어졌을 때 음원의 좌표 ( $x(\theta_a, R)$ ,  $y(\theta_a, R)$ )는 다음과 같으며,

$$\begin{aligned} x(\theta_a, R) &= \begin{cases} \sqrt{\frac{a^2 R^2 + a^2 b^2}{a^2 + b^2}} & \text{if } R_d \geq 0 \\ -\sqrt{\frac{a^2 R^2 + a^2 b^2}{a^2 + b^2}} & \text{if } R_d < 0 \end{cases}, \\ y(\theta_a, R) &= \sqrt{\frac{b^2 R^2 - a^2 b^2}{a^2 + b^2}} \end{aligned}$$

이에 따른  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 를 구해보면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{y(\theta_a, R)}{x(\theta_a, R) - d} \quad (18)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{y(\theta_a, R)}{x(\theta_a, R) + d} \quad (19)$$

이를 바탕으로 식 (14)와 (16)에서의 관계를 확인하기 위해  $\theta_1 - \theta_a$ 와  $\theta_a - \theta_2$ ,  $(d/R)\sin\theta_a$ 를 계산해보면 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 이때  $d$ 는 300m이며,  $\theta_a$ 는 40°, 60°, 80°로 하였다. Fig. 2와 Fig. 3에서 보는 것과 같이  $\theta_1 - \theta_a$ 는  $(d/R)\sin\theta_a$ 와 유사한 값을 가지며,  $(\theta_1 - \theta_a) - (\theta_a - \theta_2)$ 의 값은  $R$ 이 커짐에 따라,  $\theta_a$ 가 90°에 가까워짐에 따라 0°에 가까워져  $\theta_1 - \theta_a$ 와  $\theta_a - \theta_2$ 는 서로 근사화되어, 식 (14)와 (16)의 근사화가 가능하다는 것을 볼 수 있다.

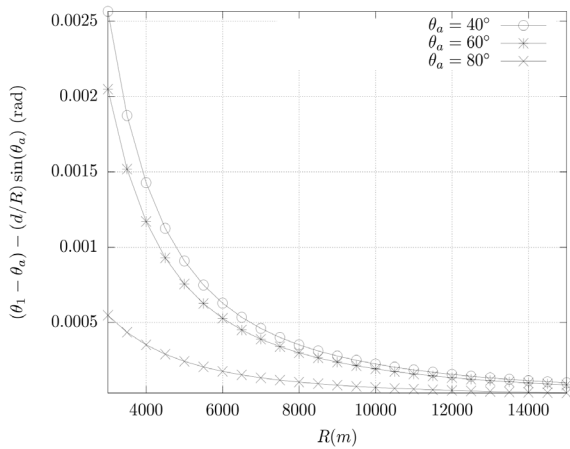


Fig. 2. Similarity of  $\theta_1 - \theta_a$  and  $(d/R)\sin\theta_a$  at  $d=300m$

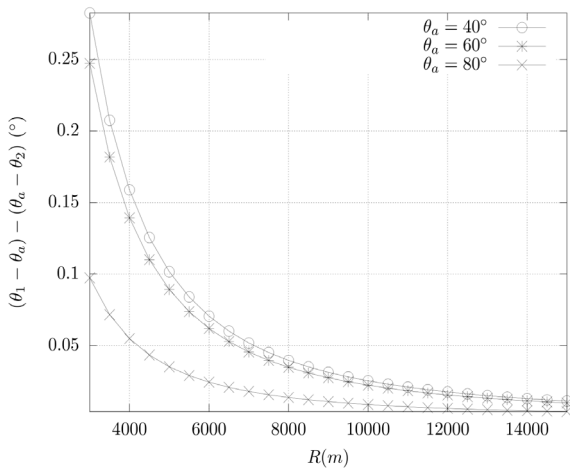


Fig. 3. Similarity of  $\theta_1 - \theta_a$  and  $\theta_a - \theta_2$  at  $d=300m$

나. 신호 SNR에 따른 판별법의 성능 분석

각각의 신호 SNR에 따른 일관성 판별법의 성능을 분석하기 위해 Monte Carlo 방법으로 각각의 시뮬레이션 환경을 100번씩 컴퓨터 시뮬레이션으로 수행하였다. FA와 TA의 센서 개수  $M_{FA}$ ,  $M_{TA}$ 는 각각 32개와 128개로 하였으며, 신호의 표본화 주파수(sampling frequency)  $F_s$ 는 1024Hz, FA와 TA의 센서 간격은  $F_s/2$  주파수 파장의 절반인 약 1.5m로 했다. 음원의 신호는 광대역 신호로 하였으며, 원점에서 10km거리와 60° 방위각에 두었다. FA와 TA까지의 거리에 따른 신호의 전달손실은 무시하였으며, 각각의 센서 잡음은 uncorrelated인 백색잡음을 사용하였다.

시뮬레이션 결과 각각의 SNR에 따른  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ ,  $\theta_a$ 의 RMSE는 Fig. 4에 나타내었다. 또한, 판별법 1의  $\theta_2 < \theta_a < \theta_1$ 의 관계를 만족하는 확률과 판별법 2의  $\theta_1 - \theta_a$ 와  $(d/R)\sin\theta$ 의 유사 정도, 판별법 3의  $\theta_1 - \theta_a$ 와  $\theta_a - \theta_2$ 의 유사한 정도를 다음과 같이 계산하여 그 통계 값을 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

$$D_1 : \frac{\theta_2 < \theta_a < \theta_1 \text{인 경우의 수}}{\text{전체시뮬레이션수}} \quad (20)$$

$$D_2 : \frac{\theta_1 - \theta_a}{\frac{d}{R}\sin\theta_a} \quad (21)$$

$$D_3 : \frac{\theta_a - \theta_2}{\theta_1 - \theta_a} \quad (22)$$

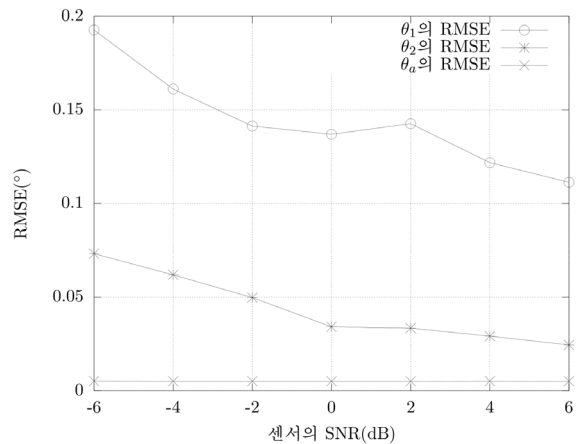


Fig. 4. RMSE of  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ , and  $\theta_a$

이때,  $D_1$ 과  $D_2$ ,  $D_3$ 는 각각 판별법 1, 2, 3에 대한 판별 값을 나타내며, 1에 가까울수록 세 측정값  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_a$ 의 일관성은 높다고 판단할 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6의 결과에서와 같이 시뮬레이션한 SNR에 따라 판별법 1은 모두 만족했으며, 판별법 2와 3은 SNR에 낮아짐에 따라  $D_2$ 와  $D_3$ 의 분포도가 넓어져 그 일관성이 떨어짐을 볼 수 있다. 이것은 Fig 4에서의 결과와 같이 SNR이 감소함에 따라 FA와 TA의 측정값인  $\theta_1$ 와  $\theta_2$ 의 오차가 증가함에 따른 결과라고 볼 수 있다.

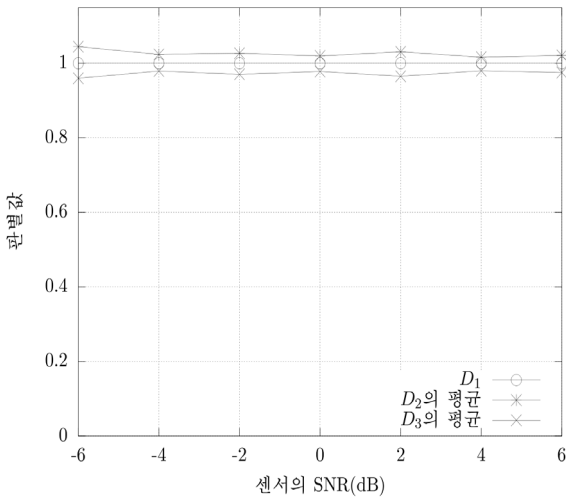


Fig. 5. Decision values of  $D_1$ ,  $D_2$ , and  $D_3$

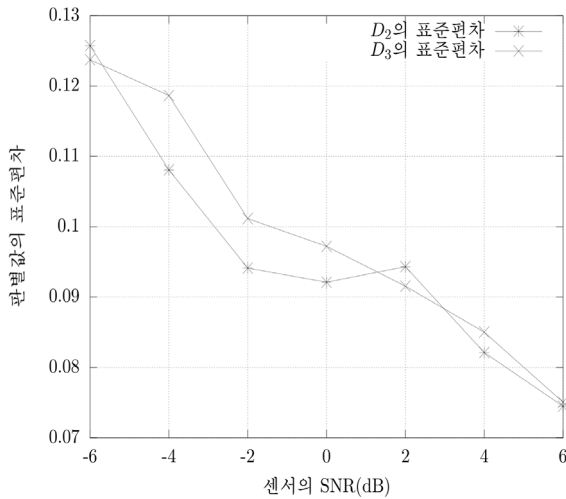


Fig. 6. Standard deviations of  $D_2$  and  $D_3$

다. 다중경로 환경에서의 판별법 성능분석

다중경로 환경에서 음원의 신호를  $u(t)$ 라 하고, 음원과 센서의 직접경로에 따른 신호의 전달시간을  $T$ 라 할 때, 센서가 수신한 신호  $s(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = \sum_{p=1}^P A_p u(t - T - \tau_p) + n(t) \quad (23)$$

이때,  $P$ 는 다중경로에 의한 신호의 전달경로 개수이며,  $A_p$ 와  $\tau_p$ 는 각각의 경로에 따른 신호 감쇄와 신호 지연 값이다. 이번 시뮬레이션에서 신호의 SNR은 0 dB로 하였으며, 각각의 다중경로 환경에 대한 계수는 Table 1과 같이 설정하였다.

Table 1. Simulation coefficients under the multipath environment

신호 경로 개수, $P$	신호 감쇄, $A$	신호 지연 값, $\tau(ms)$
1	{1}	{0}
2	{1, 0.8}	{0, 1.5}
3	{1, 0.8, 0.6}	{0, 1.5, 3}
4	{1, 0.8, 0.6, 0.2}	{0, 1.5, 3, 4.5}

Table 2와 Table 3의 시뮬레이션의 결과와 같이 다중경로가 있을수록  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ ,  $\theta_a$ 의 측정값의 오차가 증가하여  $D_2$ 와  $D_3$ 의 분포도가 넓어져 일관성 판별법의 성능이 크게 저하됨을 확인할 수 있다.

Table 2. RMSE of  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ , and  $\theta_a$  under the multipath environment

신호경로 개수	$\theta_1$ 의 RMSE(°)	$\theta_2$ 의 RMSE(°)	$\theta_a$ 의 RMSE(°)
1	0.1311	0.0387	0.0051
2	0.2402	0.0591	0.0131
3	0.3626	0.0716	0.0101
4	0.4332	0.1034	0.0022

Table 3. Statistics of  $D_1$ ,  $D_2$ , and  $D_3$  under multipath environment

신호경로 개수	$D_1$	$D_2$ 의 평균	$D_2$ 의 표준편차	$D_3$ 의 평균	$D_3$ 의 표준편차
1	1	1.014	0.088	0.977	0.090
2	1	1.005	0.162	1.015	0.176
3	1	1.042	0.241	1.018	0.295
4	1	1.133	0.263	0.937	0.293

라. TA에 편향 오차가 있을 때의 판별법 성능분석  
 해류나 잠수함의 기동 등에 의해 TA의 센서 배열에  $\theta_{2e}$ 만큼의 진행방향 오차가 있을 때 TA에서 측정된 음원의 방위각  $\theta_2$ 는 실제 방위각보다  $-\theta_{2e}$  만큼 편향되어 있으며, 이 편향된 오차에 의해 FA의 측정값  $\theta_1$  과 TA에서의 측정값  $\theta_2$ 는 일관성이 떨어지게 된다. 이것은 Fig. 7에서의 결과와 같이 각각의 다른 TA의 편향 오차에 대한 시뮬레이션 결과로써 확인할 수 있다. 이 그림에서,  $D_3$ 의 결과를 Fig. 5의 SNR에 따른  $D_3$ 의 실험치와 Table 3의 다중경로에서의  $D_3$ 의 실험치와 비교해 보면, TA 측정값의 오차가 편향되었을 때  $D_2$ 에 비해  $D_3$ 의 판별 값이 기준에서 비교적 많이 벗어나 있는 것을 확인할 수 있다. 이는  $D_2$ 는  $\theta_1$ 과  $\theta_a$ 의 값만으로 일관성 정도를 계산하는 반면,  $D_1$ 과  $D_3$ 는  $\theta_2$ 의 값과  $\theta_1$ ,  $\theta_a$ 의 값으로 계산하기 때문이다.

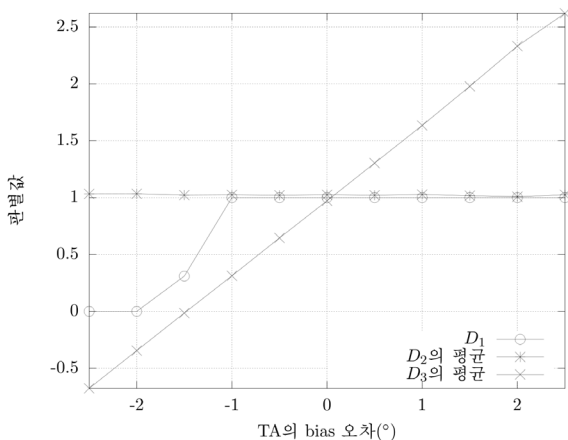


Fig. 7. Statistics of  $D_1$ ,  $D_2$ , and  $D_3$  when TA has biased heading error.

이렇게 TA에 방위각 오차가 있을 때 음원의 방위각 측정값  $\theta_2$ 와 실제 방위각  $\theta_{2t}$ , TA의 편향된 오차  $\theta_{2e}$ 의 사이에는  $\theta_{2t} = \theta_2 + \theta_{2e}$ 와 같은 관계가 있으며, 이 TA 센서 배열의 오차에 관한 관계를 식 (14)에 대입하면  $\theta_1$ 와  $\theta_a$ 를 이용해 TA의 편향된 오차를 추정할 추정값  $\hat{\theta}_{2e}$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_1 - \theta_a &\cong \theta_a - (\theta_2 + \theta_{2e}) \\ \hat{\theta}_{2e} &= (\theta_a - \theta_2) - (\theta_1 - \theta_a) \end{aligned} \quad (24)$$

위 식의 관계를 이용해 TA의 편향오차에 따른 추정값  $\hat{\theta}_{2e}$ 를 Table 4에 나타내었다. 결과에서 보는 것처럼 TA 편향 오차의 추정값을 비교적 정확하게 예측하였음을 확인할 수 있다.

Table 4. Estimated TA heading error  $\hat{\theta}_{2e}$  when TA has biased heading error

TA배열의 편향된 오차, $\theta_{2e}$ (°)	$\hat{\theta}_{2e}$ 의 평균, (°)	$\hat{\theta}_{2e}$ 의 표준편차
-2	-2.07	0.14
-1	-1.05	0.14
0	-0.06	0.15
1	0.95	0.14
2	1.97	0.14

#### 4. 결론

FA와 TA의 방위각 측정값  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ , FA와 TA에서 음원까지의 거리차에 의한 쌍곡선의 점근선의 각도  $\theta_a$ 의 관계를 이용해 세 측정값의 일관성 판별법을 확인하고 컴퓨터 시뮬레이션으로 확인하였다.

신호의 SNR이 낮을 경우는 세 각도  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_a$ 의 측정값에 오차가 증가하게 되어 일관성 판별법의 성능이 떨어지는 결과를 보였으며, 다중경로의 상황 또한 다중경로의 영향으로  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_a$ 의 측정값의 오차가 증가하여 일관성 판별법의 성능이 떨어지는 결과를 보였다. 이러한 다중경로 상황에서는 다중경로의 영향을 감소시키는 방법에 대해 추가적 신호처리

필요하다<sup>[11]</sup>. TA 측정값에 편향 오차가 있는 경우 편향 오차가 TA의 측정값  $\theta_2$ 에 편향된 오차를 주어 FA와 TA의 측정값에서 일관성이 떨어졌다. 하지만, 세 판별 값  $D_1, D_2, D_3$ 에서 TA가 편향 오차가 있는 것을 확인할 수 있었으며, 또한 이러한 TA의 편향 오차를 추정할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 LIG 넥스원(주)의 지원으로 수행되었습니다(연구과제번호 제 Y08-012호)

## Reference

- [1] 박현우, 권범수, 신창홍, 이정훈, 이균경, “에인 선 배열 소나와 선측배열 소나의 방위각 측정값의 일관성 판별기법”, 한국군사과학기술학회 2009년도 종합학술대회 논문초록집, pp. 951~954, Aug. 2009.
- [2] S P Beerens, S P van IJsselmuide and A. C. van Koersel, “Passive Ranging with Flank and Towed Array Sensors”, Proceeding of UDT Europe 2003, Sweeden, June 2003.
- [3] M. J. Hinich, “Passive Range Estimation using Subarray Parallax”, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 65, pp. 1229~1230, May 1979.
- [4] S. Avis, S. Hall, and J. Naden, “Strapdown Heading Sensor for Towed Arrays”, In Heading Sensors for Sonar and Marine Applications, IEE Colloquium on, pp. 2/1~2/5, Jan. 1994.
- [5] B. Newhall, J. Jenkins, and J. Dietz, “Improved Estimation of the Shape of Towed Sonar Arrays”, In Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2004. IMTC 04. Proceedings of the 21st IEEE, Vol. 2, pp. 873~876, May 2004.
- [6] V. Varadarajan and J. Krolik, “Array Shape Estimation Tracking using Active Sonar Reverberation”, Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, Vol. 40, No. 3, pp. 1073~1086, July 2004.
- [7] D. Wahl, “Towed Array Shape Estimation using Frequency Wavenumber Data”, Oceanic Engineering, IEEE Journal of, Vol. 18, No. 4, pp. 582~590, Oct. 1993.
- [8] N. Wyeth, “Methods of Array Element Localization for a Towed Underwater Acoustic Array”, Oceanic Engineering, IEEE Journal of, Vol. 19, No. 1, pp. 128~133, Jan. 1994.
- [9] D. Gray, B. Anderson, and R. Bitmead, “Towed Array Shape Estimation using Kalman Filters Theoretical Models”, Oceanic Engineering, IEEE Journal of, Vol. 18, No. 4, pp. 543~556, Oct. 1993.
- [10] J. Riley and D. Gray, “Towed Array Shape Estimation using Kalman Filters Experimental Investigations”, Oceanic Engineering, IEEE Journal of, Vol. 18, No. 4, pp. 572~581, Oct. 1993.
- [11] P. Ching and H. So, “Two Adaptive Algorithms for Multipath Time Delay Estimation”, Oceanic Engineering, IEEE Journal of, Vol. 19, No. 3, pp. 458~463, July 1994.