

능동 소나 위치 추정 성능 비교 및 최적 수신망 배치

Comparison of Active Sonar Target Positioning Performance and Optimal Sensor Arrangement

박치현*, 홍우영**, 고한석***, 김인익****
(Chee-Hyun Park*, Wooyoung Hong**, Hanseok Ko***, In-Ig Kim****)

*LG 이노텍, **해군사관학교, ***고려대학교 전자컴퓨터공학과, ****국방과학연구소
(접수일자: 2002년 10월 17일; 수정일자: 2003년 2월 5일; 채택일자: 2003년 2월 26일)

본 논문에서는 능동 소나의 구성 방법 및 관측 오차에 따른 위치 추정 성능에 대해서 다룬다. 능동 소나는 구성 방법에 따라서 크게 단상태 (Monostatic) 소나, 양상태 (Bistatic) 소나, 다중상태 (Multistatic) 소나로 분류될 수 있으며, 각각의 오차에 대한 특성이 서로 다르다. 각 수신기가 거리 정보와 방위 정보를 얻을 수 있다는 가정하에 단상태, 양상태 소나와 다중상태 소나의 위치 추정 성능에 대해 비교해 보고 기존의 정보 융합 방법인 최소 자승법 (LS: Least square)에 가중치를 주는 가중치 최소 자승법 (WLS: Weighted least square)을 제안하였다. 또한, 제안된 방법을 이용하여 수신기의 수, 송수신기 간 거리와 위치 추정 성능과의 연관성에 대하여 알아보고 효과적인 다중상태 소나 배치에 대한 연구를 수행하였다. 모의 실험 결과 다중상태 소나의 위치 추정 제공된 오차평균이 단상태 소나에 비해 약 35.98%, 양상태 소나에 비해 약 37.45% 우수한 것을 볼 수 있었으며 WLS가 LS에 비해 평균 7.4% 우수한 성능을 나타내었고 각 센서에 입력되는 정보의 분산 차가 클수록 성능 향상율이 증가하는 경향을 보였다.

핵심용어: 단상태 소나, 양상태 소나, 다중상태 소나, 거리정보, 방위정보, 정보융합, 수신망 배치, 최소 자승법, 가중치 최소 자승법, 제공된 오차평균

주요분류: 수중음향 분야 (5.8)

In this paper, efficient deployment method of sensors and target positioning performance with respect to measurement error are dealt with. Active sonar can be categorized into Monostatic, Bistatic, Multistatic sonar, and characteristics of respective sonar are different. Assuming that each sensor can receive range and angular information, we compare the performance of Monostatic, Bistatic, and Multistatic systems. And we suggest Weighted least square (WLS) which gives the weight to former case, LS. In particular, adopting suggested method we investigate the target positioning performance according to number of sensor, distance from transmitter to receiver, and propose efficient arrangement rule for Multistatic sonar configurations. According to the experimental results, RMSE of Multistatic sonar is found to be superior to Monostatic and Bistatic by 35.98%, 37.45% respectively, and WLS is superior to LS approximately by 7.4% in average. Furthermore, as the difference of respective sensor's variance is large, it is observed that the improvement ratio of target positioning performance is increased.

Keywords: Monostatic, Bistatic, Multistatic sonar, Range information, Angular information, Data fusion, Receiver net deployment, Least square, Weighted least square, RMSE average

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.8)

I. 서론

수중 탐지 시스템에서 사용되는 소나는 크게 능동 소나와 수동 소나로 분류될 수 있으며 탐지 성능 및 신호

처리 기술의 발전으로 능동 소나가 많은 주목을 받고 있다.

능동 소나는 수신기와 송신기의 구성 방법에 따라서 일체형 송/수신기로 구성된 단상태 (Monostatic) 소나, 각각 하나의 송/수신기로 구성된 양상태 (Bistatic) 소나, 한 개 이상의 송신기와 다중 수신기로 구성된 다중상태 (Multistatic) 소나로 구분될 수 있고 표적의 소음이 감소 되는 추세에 힘입어 최근 들어 다중상태 소나에 대한

1. *저자: 박치현 (chparka@lginnotek.com)
2. *9-910 경기도 용인시 구성면 마북리 148-1
3. * LG 이노텍 시스템연구소
4. * 전화: 02-926-2909; 팩스: 02-3291-2450

관심이 높아지고 있다. 다중상태 소나에서의 융합 방법으로는 Don[1]이 ML (Maximum Likelihood)에 거리, 방위 정보를 이용하였고, Wade[2]는 반복 최소자승법 (ILS: Iterative Least Square)을 적용하였는데 두 방법 모두 Talyor 급수와 반복법으로 위치를 추정했다. 또한 Manolakis[3]는 LS를 이용하여 표적의 위치를 추정하였고 Farina[4]는 가중치 합을 이용하여 각 양상태 소나의 추정값을 융합하였다.

본 논문에서는 최근 많이 이용되고 있는 단상태 소나, 양상태 소나와 LS를 이용한 다중상태 소나에 대하여 다양한 잡음 환경하에 비교 실험을 수행하였다. 기존의 LS는 관측값의 분산이 증가함에 따라 위치 추정 성능이 급격히 저하되는 경향이 있다[9]. 이러한 단점을 해결하고자 관측값의 분산과 수신기, 표적간 거리 관측값을 이용하여 가중치를 부여하는 WLS를 이용한 다중 수신기 정보 융합 방법을 제안하였고 기존의 LS와 비교 실험을 수행하였다. 효율적인 망배치에 관한 연구로서 센서 수, 송수신기간 거리에 따른 RMSE 평균 변화에 대하여 WLS를 이용하여 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 세가지 능동 소나 모델링에 대하여 설명하며, 3장에서는 제안된 다중상태 소나 정보 융합 기법에 대하여 기술한다. 4장에서 실험 결과를 언급하고 5장에서 결론과 앞으로의 연구 방향을 제시한다.

II. 능동 소나 모델링

능동 소나의 위치 추정 문제는 거리 정보와 방위 정보를 이용한다. 그러나 일반적으로 입력된 정보들은 센서의 잡음이 섞이게 되고 본 논문에서는 센서에 입력되는 관측값을 식 (1)과 같이 모델링한다. 방위 정보에는 n_θ 인 가우시안 잡음, 거리 정보에는 n_R 인 Rayleigh 잡음이 첨가된다고 가정한다.

$$\begin{aligned} \theta_R &= \theta_t + n_{\theta_r} \\ R_R &= R_t + n_{R_r} \end{aligned} \quad (1)$$

θ_t : 실제 방위각, R_R : 관측 거리
 R_t : 실제 거리, θ_R : 관측 방위

그러므로 이러한 잡음 성분을 감소시켜 정확한 표적의 위치를 추정해야 한다. 본 논문에서는 몇 가지 가정 아래

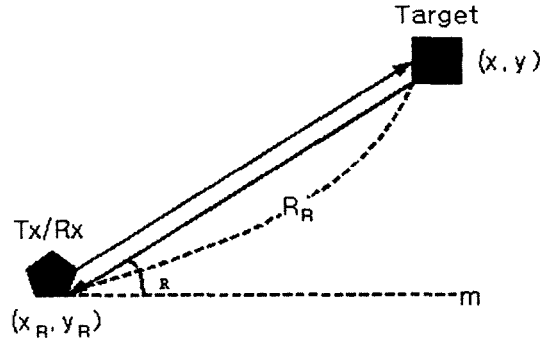


그림 1. 단상태 소나 모델링
 Fig. 1. Monostatic sonar modeling.

위치 추정 알고리즘을 전개하였다. 첫째, 송, 수신기의 좌표는 이미 알고 있다. 둘째, 소나의 관측 방위는 전방향성을 가정하여 0~360° 성분을 갖는다. 셋째, 각 소나에 입력되는 관측값 잡음의 분산은 알고 있다.

2.1. 단상태 소나

단상태 소나는 그림 1과 같이 송신기와 수신기가 일체형이며 송신된 음파가 표적에 의해 반사되어 돌아오기까지 시간을 측정하여 표적에서 송/수신기까지의 거리 정보를 얻고 표적의 방위 정보와 융합하여 위치를 추정하는 시스템이다. 단상태 소나의 위치 추정 방정식을 송/수신기의 위치와 거리 정보(R_R)와 방위 정보(θ_R)로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{x} &= x_R + R_R \cos \theta_R \\ \hat{y} &= y_R + R_R \sin \theta_R \end{aligned} \quad (2)$$

$$R_R \sqrt{(x - x_R)^2 + (y - y_R)^2} + n_{R_r} \quad (3)$$

$$\theta_R = \tan^{-1} \left(\frac{y - y_R}{x - x_R} \right) + n_{\theta_r} \quad (4)$$

여기서, x_R, y_R 은 송/수신기의 x, y 좌표이다. R_R 은 수신기와 표적간의 거리이고 θ_R 은 표적과 송/수신기와 직선 m 이 이루는 각이고 식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

2.2. 양상태 소나

양상태 소나는 그림 2와 같이 송신기와 수신기가 떨어져 존재하고 송신기와 표적, 표적과 수신기간 거리 합 (R_t)과 표적, 수신기, 송신기가 이루는 각 (θ_R)을 측정하여 입력정보로 사용한다.

양상태 소나의 위치 추정 방정식은 식 (5)와 같다

$$\hat{x} = x_R - R_R \cos(\theta_R - \theta')$$

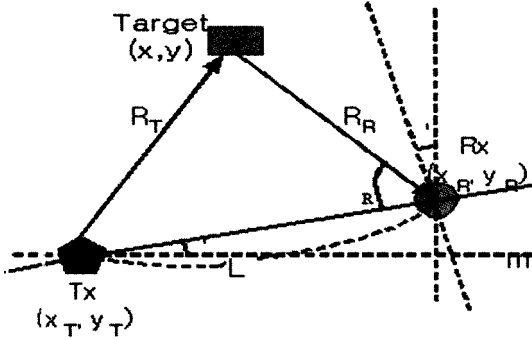


그림 2. 양상태 소나 모델링
Fig. 2. Bistatic sonar modeling.

$$y = y_R + R_R \sin(\theta_R - \theta') \quad (5)$$

$$R_R = \frac{R_S^2 - L^2}{2(R_S - L \cos \theta)}, \quad R_S = R_T + R_R + n_R \quad (6)$$

$$\theta' = \tan^{-1} \left(\frac{y_R - y_T}{x_R - x_T} \right) \quad (7)$$

$$\theta_R = \tan^{-1} \left(\frac{y_T - y_R}{x_T - x_R} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{y - y_R}{x - x_R} \right) + n_{\theta_R} \quad (8)$$

$$L = \sqrt{(x_T - x_R)^2 + (y_T - y_R)^2} \quad (9)$$

여기서, R_R 은 수신기, 표적간 거리이고 R_S 는 송신기와 표적, 표적과 수신기간 거리의 합이고 θ' 는 작선 m 과 송신기, 수신기가 이루는 각이다. L 은 송신기와 수신기간 거리이다.

양상태 소나를 이용하면 수신기 우편에서 단상태 소나보다 위치 추정 성능향상을 기대할 수 있다. 이것은 그림 3에 의하여 설명되어질 수 있다. 그림에서 단상태 소나의 송신기는 T_x 에 위치하고 양상태 소나의 송신기는 T_x , 수신기는 R_x 에 위치하고 있다. 여기서, dR_B 는 양상태 소나의 거리 관측 오차이고 dR_M 은 단상태 소나 거리 관측 오차이며 $d\theta$ 는 방위 관측 오차를 나타낸다. 단상태 소나에서는 T_x 로부터 표적의 거리, 방위정보를 이용하고 양상태 소나에서는 R_x 로부터 표적의 거리, 방위정보를 이용한다. 표적 A에서는 양상태 소나의 오차 타원 (error ellipse)이 단상태 소나보다 더 크지만 표적 B에서는 더 작아지게 된다. 이러한 현상은 오차 타원의 곡률과 센서로부터 거리에 의존하여 발생한다. 먼저 표적 A의 경우 양상태 소나의 오차 타원 곡률이 단상태 소나보다 더 작고 센서로부터 더 멀리 떨어져 있으므로 방위오차에 의한 오차 타원 면적이 그만큼 커져서 단상태 소나의 오차 타원 면적보다 더 크게 된다. 한편, 표적 B에서는 양상태 소나의 오차 타원 곡률이 단상태 소나보다 더 크고 센서로부터 거리가 더 작으므로 오차 타원의 면적이 더 작게 된다.

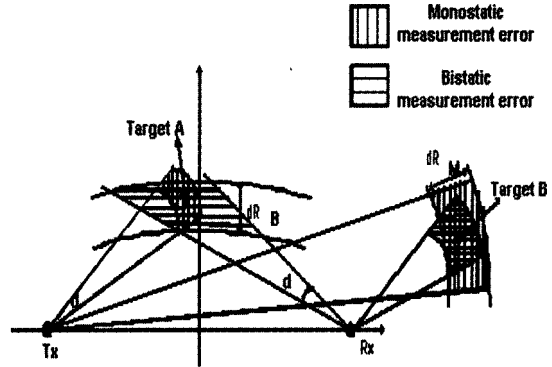


그림 3. 단상태, 양상태 소나의 표적 위치에 따른 오차 타원
Fig. 3. Error ellipse to position of target of Monostatic, Bistatic sonar.

수신기 우편에서 이러한 오차 타원 면적 감소로 인해 단상태 소나보다 위치 추정 성능을 향상시킬 수 있다.

2.3. 다중상태 소나

다중상태 소나는 송신기와 수신기가 분리된 상태로 위치 추정을 수행하고 앞에서의 양상태 소나가 확장된 시스템으로써 2.2절에서 언급된 바와 같이 수신기 우편에서 성능 향상을 기대할 수 있고 2개 이상의 양상태 쌍 (pair)을 이용하면 보다 중복적인 정보를 얻을 수 있게 되어 오차 타원 면적을 더욱 줄일 수 있으므로 위치 추정 오차를 감소시킬 수 있다.

다중상태 소나는 크게 다음과 같이 분류되어질 수 있다.

- ① 송신기 2개 이상, 수신기 1개
- ② 송신기 1개, 수신기 2개 이상
- ③ 송신기 2개 이상, 수신기 2개 이상

본 논문에서는 송신기 1개, 수신기 2개 이상인 경우에 대해 다루고 그림 4는 제안된 Multistatic 소나 모델의 구성도이다.

III. 정보 융합 기법

3.1. 최소 자승법 (Least square)

그림 4에서 임의의 i 번째 수신기 R_{x_i} 에서 추정된 위치를 수신기 위치와 표적과 수신기간 거리 (R_{R_i})와 표적과 수신기가 이루는 각 θ_i 를 이용하여 나타내면 식 (10), (11)과 같다.

$$\hat{x} = x_i + R_{R_i} \cos \theta_i$$

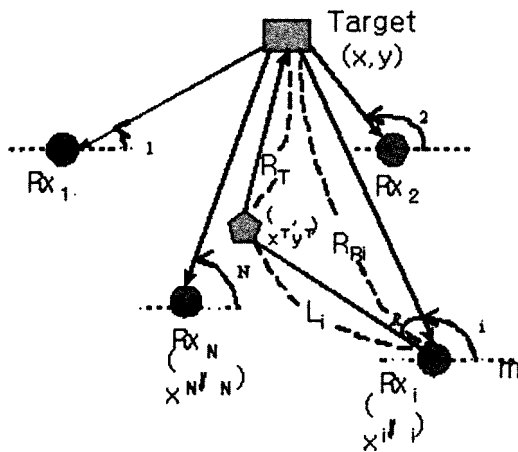


그림 4. 다중상태 소나 모델링
Fig. 4. Multistatic sonar modeling.

$$\hat{y} = y_i + R_{Ri} \sin \theta_i \quad (10)$$

$$(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2 = R_{Ri}^2 \quad (11)$$

각 수신기와 기준 센서의 위치 추정식을 차례로 벡터 형태로 나타내면 식 (12)와 같다. 본 논문에서는 송신기를 기준 센서로 선택했다.

$$\begin{bmatrix} x - x_T & y - y_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \left[\frac{x^2 - x_T^2 + y^2 - y_T^2 + R_T^2 - R_R^2}{2} \right] \quad (12)$$

- x, y : 수신기의 x, y 좌표 ($N \times 1$)
- x_T, y_T : 송신기 x, y 좌표 ($N \times 1$)
- R_T : 송신기와 표적간 거리 ($N \times 1$)
- R_R : 수신기와 표적간 거리 ($N \times 1$)

식 (12)에서 다중상태 소나의 위치추정은 $Ax_p = b$ 의 해를 구하는 문제이고 A 가 비정방 행렬이므로 의사역행렬 (pseudo inverse)을 이용하여 근사해를 구한다. 해는 식 (13)과 같다.

$$x_p = (A^T A)^{-1} A^T b, \quad x_p = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.2. 가중치를 이용한 최소 자승법 (Weighted least square)

LS는 각 센서의 정보를 동일한 정도로 반영하여 최종 위치를 추정하는 데 반하여 본 논문에서 제안된 WLS는 각 센서에 입력되는 관측값의 분산이나 관측정보를 이용

하여 가중치를 부여함으로써 최종 위치를 추정하는 방법이다. 이는 각 센서의 정보 중 신뢰도가 작은 정보일수록 위치 추정에 덜 반영하기 위함이다. 제안된 방법에서는 다음과 같은 성질을 이용하여 가중치를 구하였다. 첫째, 각 센서의 관측 잡음의 분산과 가중치는 반비례 관계이다. 이것은 식 (6)에서 관측 잡음의 분산이 증가할수록 표적과 수신기간 거리 (R_R)의 분산이 증가하므로 위치 추정 에러가 커지기 때문이다. 둘째, 표적, 수신기간 거리와 가중치는 반비례한다. 이는 i 번째 센서의 R_{Ri} 와 j 번째 센서의 R_{Rj} 가 관측잡음에 대한 분산은 같고 $R_{Ri} > R_{Rj}$ 라면 R_{Ri} 가 R_{Rj} 보다 위치 추정식 (12)의 R_R^2 에 미치는 오차 영향이 더 크기 때문이다. 위치 추정 해는 식 (13)에 W 행렬이 곱해진 형태로 나타나고 식 (15)와 같다. W 행렬은 대각행렬로 표현되어지고 $i(i \geq 2)$ 번째 센서의 관측잡음분산은 1번째 센서의 관측잡음분산의 s_i 배라고 하면 i 번째 센서의 관측 잡음은 식 (14)와 같이 표현된다. 여기서, Rayleigh 난수와 가우시안 난수는 평균 0, 분산 1의 분포를 갖는다. W 행렬의 i 번째 대각성분은 첫번째 센서와 i 번째 센서의 관측잡음분산비의 역수와 표적과 수신기간 거리의 역수의 곱으로 나타내어진다.

$$\begin{aligned} n_{Ri}(\text{i번째 센서 거리관측잡음}) &= s_i \times v_{Ri} \times \text{Rayleigh 난수} \\ n_{\theta i}(\text{i번째 센서 방위관측잡음}) &= s_i \times v_{\theta i} \times \text{가우시안 난수} \end{aligned} \quad (14)$$

v_{Ri} : 1번째 센서의 거리 관측잡음분산

$v_{\theta i}$: 1번째 센서의 방위 관측잡음분산

s_i : i 번째 센서의 관측잡음분산/1번째 센서의 관측잡음분산

$$x_p = (A^T W A)^{-1} A^T W b \quad (15)$$

$$W_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{s_i} \times \frac{1}{R_{Ri}} & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

IV. 모의 실험 및 결과

이 장에서는 단일 표적 환경 내에서 제시된 각 능동 소나의 위치 추정 알고리즘을 이용하여 성능을 비교하였다. 본 실험에서는 표 1과 같은 시나리오를 가정했으며 몬테카를로 실험 (Monte carlo simulation)을 100회 수행하였다. 성능 평가 척도로 RMSE 평균 (단위: m)을 사용하였다.

표 1 모의 실험 시나리오

Table 1. Experimental scenario.

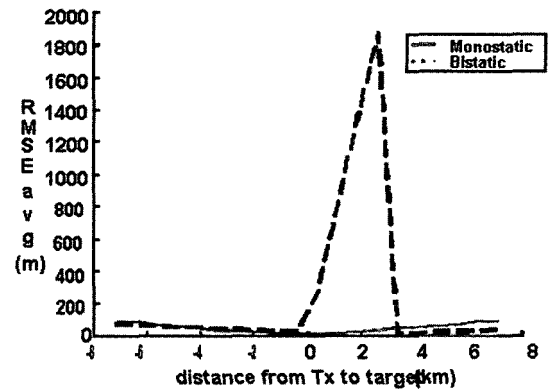
position		Tx	Rx
	Mono	(0,0)	(0,0)
	Bi	(0,0)	(2 km,0)
Multi	(0,0)	원형 형태, 동일 간격으로 배치 (3~10개) 송수신기 간 거리 (2~4.5 km, 0.5 km 간격)	
		distance	angle
std. of measurement	Rayleigh (30 m)	가우시안 (0.6°)	
	target	1개, 반경 5 km내 166 m 간격, 정지상태	
Tx	전방향 빔		

4.1. 단상태, 양상태, 다중상태 소나의 RMSE 성능 비교

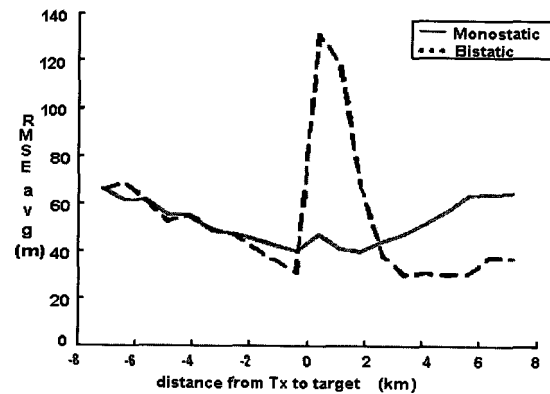
그림 5(a)~(c)는 단상태, 양상태 소나의 RMSE를 표적이 송신기로부터 0°, 30°, 60° 방향으로 존재하는 경우에 대하여 나타낸 결과이다. 그림 5(a)를 통해 송수신기 간 사이에서 RMSE가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있고 그림 5(b)에서는 표적이 양상태 소나의 수신기(2 km) 오른쪽에 근접해 있을 때 양상태 소나의 RMSE가 단상태 소나보다 작은 것을 볼 수 있다. 그림 5(c)에서 표적이 수신기로부터 그림 5(b)의 경우보다 멀어지면 RMSE 차가 3~4배 감소하지만 여전히 수신기 우편에서 양상태 소나가 우수한 것을 볼 수 있다. 이러한 수신기 양편에서 장점으로 인하여 표적이 자주 출현하는 영역에 수신기를 배치함으로써 단상태 소나보다 성능 향상을 기대할 수 있다.

또한, 표 2에서 보듯이 양상태 소나는 송수신기 간 거리가 증가함에 따라 위치 추정 성능이 저하된다. 이는 식 (3)의 R_R (표적과 수신기 간 거리)이 R_s (송신기와 표적, R_T 와 수신기 간 거리의 합)와 같게 되어 송수신기를 갖는 직선 상에서는 추정 결과가 항상 송신기 위치와 같아 나올 수밖에 없기 때문이다. 따라서 이 영역에서는 수신기에 가까운 표적일수록 오차가 커지고 이는 그림 5(a)의 결과로부터 확인할 수 있다. 또한 송수신기 간 거리가 증가할수록 오차는 더욱 증가하게 되고 이러한 현상이 막에 언급되는 다중상태 소나의 위치 추정 에러가 송수신기 간 거리가 커질수록 송수신망 내부에서 증가하는 원인이 된다.

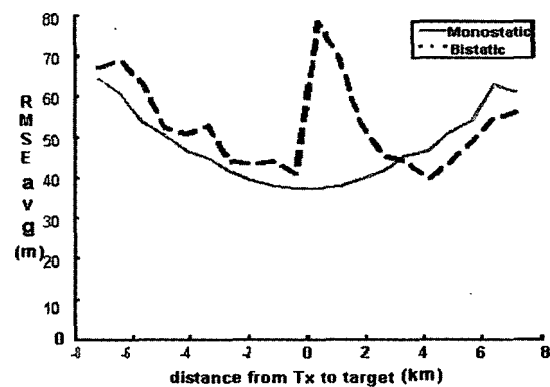
그림 6(a), (b), (c), (d)는 거리 잡음 30 m, 방위 잡음 0.6도. 환경 하에 단상태, 양상태, 다중상태 소나의 위치



(a) 0 도
(a) 0 deg



(b) 30 도
(b) 30 deg



(c) 60 도
(c) 60 deg

그림 5. 방향에 따른 단상태, 양상태 소나의 RMSE 비교
Fig. 5. Comparison of Monostatic, Bistatic sonar to direction.

표 2. 송수신기 간 거리에 따른 양상태 소나의 제곱근 오차 평균
Table 2. RMSE average of Bistatic sonar to distance between transmitter and receiver. (unit: m)

distance	1 km	2 km	3 km	4 km
RMSE average (m)	52.14	56.75	64.59	76.78

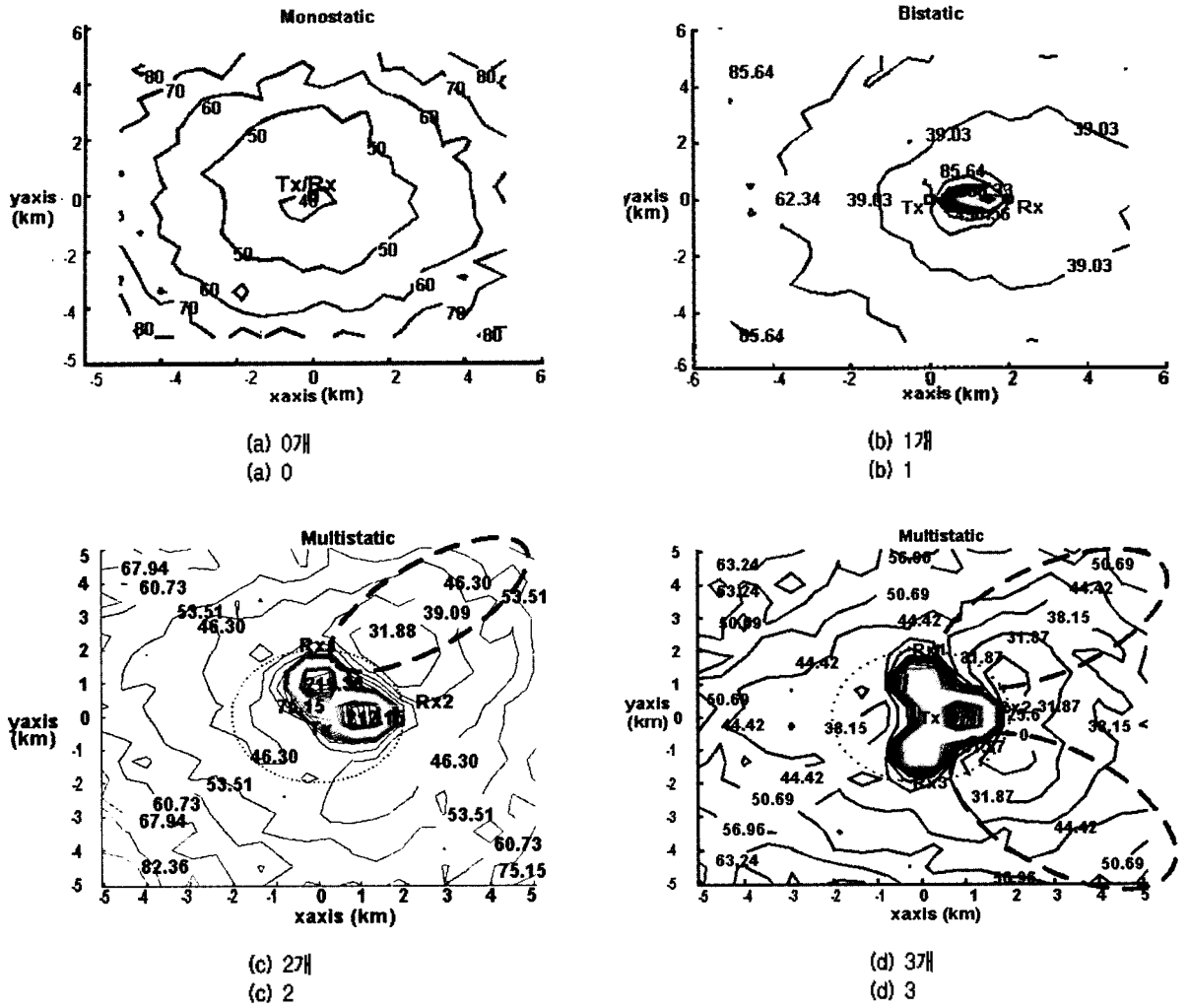


그림 6. 수신기 센서 수에 따른 능동 소나의 RMSE 분포
 Fig. 6. RMSE of active sonar to number of receiver sensor.

추정 실험 결과이다. 여기서 Tx는 송신기, Rx는 수신기를 나타낸다. 그림 6(a)를 보면 RMSE 등고선이 송/수신기를 중심으로 원형으로 분포하는 것을 볼 수 있고 따라서 단 상태 소나는 송/수신기로부터 거리가 RMSE에 영향을 미치는 주요 인자임을 알 수 있다. 그림 6(b)에서 양상태 소나는 송수신기 사이에서 RMSE가 크고 수신기의 오른쪽 영역에서 RMSE가 다른 영역보다 상대적으로 작은 것을 볼 수 있다. 그림 6(c), (d)와 같이 수신기 수가 증가할수록 RMSE가 작아지고 특히 각각의 수신기 오른편의 위치 추정 성능이 향상되는 영역이 중복되는 부분(점선으로 된 타원 영역)에서 작아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 성질에 기인하여 다중상태 소나를 이용하면 단상태, 양상태 소나에 비하여 위치 추정 성능을 향상시킬 수 있다.

표 3은 다양한 크기의 거리, 방위 잡음에 대한 단상태, 양상태, 다중상태 (LS) 소나의 RMSE 평균을 비교한 것이다. 여기서 다중상태 소나는 수신기 3개를 원형 동일간격

표 3. 다양한 크기의 잡음에 대한 단상태, 양상태, 다중상태 (최소자승법) 소나의 제곱근오차 성능 비교

Table 3. Comparison of RMSE of Monostatic, Bistatic, Multistatic (LS) sonar to various noise.

(a) 거리 잡음: 10 m, 방위 잡음: 0.2, 0.6, 1° (unit: m)

distance noise	10 m		
angle noise	0.2°	0.6°	1.0°
Mono	19.90	43.47	71.83
Bi	18.64	45.06	78.39
Multi (LS)	14.20	23.88	36.73

(b) 거리 잡음: 20 m, 방위 잡음: 0.2, 0.6, 1° (unit: m)

distance noise	20 m		
angle noise	0.2°	0.6°	1.0°
Mono	30.47	50.22	74.24
Bi	29.29	49.47	81.13
Multi (LS)	25.70	32.74	42.19

으로 배치하였다. 양상태 소나의 RMSE 평균이 단상태 소나보다 방위 잡음이 증가할수록 더 커지는 것을 볼 수 있다. 따라서 양상태 소나의 성능은 거리 잡음에 비해 방위 잡음에 더 민감하다고 추측할 수 있다. 또한 다중상태 소나가 단상태, 양상태 소나에 비하여 각각 약 35.98%, 37.45%의 성능 향상을 나타내는 것을 볼 수 있었다.

4.2 다중상태 소나 배치 실험

수신기 오른편의 특정 영역에서 양상태 소나의 성능이 단상태 소나보다 우수한 것에 착안하여 센서의 수를 더 증가시킴으로써 보다 넓은 영역에서 단상태 소나보다 성능을 향상시킬 수 있는 소나 시스템이 다중상태 소나이고 이러한 다중상태 소나의 성능은 송수신기의 기하학적 배치에 의해 영향을 많이 받는다.

또한 LS는 관측값의 분산이 증가할수록 추정 에러가 급격히 커지는 경향이 있다. 이러한 LS의 단점을 보완하고자 관측값의 분산과 표적과 수신기간 거리를 이용하여 가중치를 주는 WLS를 제안하였고 이를 이용하여 다양한 크기의 관측 잡음에 따라 다중상태 소나의 RMSE 성능이 어떻게 영향을 받는지 알아보고 효과적인 망배치에 대하여 수신기 수와 송수신기간 거리 관점에서 분석해 본다.

표 4. 방위 잡음에 따른 융합 방법 성능 비교
Table 4. Comparison of fusion performance to angle noise.

a) 30 m × (1 1 1) (unit: m)

distance noise	30 m (1 1 1)		
angle noise	0.2° (1 1 1)	0.6° (1 1 1)	1.0° (1 1 1)
LS	38.58	43.26	51.47
WLS	37.07	42.05	50.79

b) 30 m × (1 √2 2) (unit: m)

distance noise	30 m (1 √2 2)		
angle noise	0.2° (1 √2 2)	0.6° (1 √2 2)	1.0° (1 √2 2)
LS	67.47	74.08	84.83
WLS	60.35	67.00	79.30

c) 30 m × (1 √3 3) (unit: m)

distance noise	30 m (1 √3 3)		
angle noise	0.2°	0.6°	1.0°
LS	102.78	112.65	124.00
WLS	88.35	96.48	109.83

4.2.1. 제안된 융합 방법을 이용한 성능 개선

다양한 거리, 방위 잡음에 대하여 각 융합 방법의 RMSE 분포 변화를 알아본다. 표 4는 센서 3개가 원형 등간격으로 배치되어 있을 때 방위 잡음에 따른 RMSE 변화 경향이고 표 5는 거리 잡음에 따른 결과이다. 표 4의 (b)에서 30 m × (1 √2 2)는 관측 잡음의 표준 편차이고 괄호안의 숫자는 각 센서의 첫 번째 센서에 대한 표준편차 비를 의미한다. 즉, 첫 번째 센서의 거리 잡음 표준 편차는 30 m, 두번째 센서는 30√2 m, 세번째 센서는 60 m임을 의미한다. 다양한 방위 잡음하에서 WLS가 LS에 비해 평균 8.28%의 성능 향상을 보였으며 거리 잡음에 대하여는 평균 6.47%의 성능 향상을 보였다. 각 센서의 관측 잡음 표준 편차의 차가 클수록 성능 향상율도 커지는 것을 볼 수 있었다.

이것은 3.2절에서 언급된 바와 같이 표준 편차가 큰 관측값을 위치 추정에 덜 반영하여 신뢰도가 높은 관측값에 의한 위치 추정이 이루어지도록 하고 동일한 크기의 관측 잡음 표준편차에 대하여 수신기와 표적간 거리가 클수록 위치 추정에 덜 반영하여 식 (12)의 우변에서 R₀이 비선형 함수임으로 생기는 오차를 줄임으로써 얻어진

표 5. 거리 잡음에 따른 각 융합 방법의 성능 비교
Table 5. Comparison of fusion performance to distance measurement noise.

(a) 0.6° × (1 1 1) (unit: m)

distance noise	10 m (1 1 1)	20 m (1 1 1)	30 m (1 1 1)
angle noise	0.6° (1 1 1)		
LS	24.32	32.87	43.26
WLS	23.87	32.37	42.05

(b) 0.6° × (1 √2 2) (unit: m)

distance noise	10 m (1 √3 3)	20 m (1 √3 3)	30 m (1 √3 3)
angle noise	0.6° (1 √3 3)		
LS	53.98	80.24	111.26
WLS	49.87	70.72	96.29

(c) 0.6° × (1 √3 3) (unit: m)

distance noise	10 m (1 √2 2)	20 m (1 √2 2)	30 m (1 √2 2)
angle noise	0.6° (1 √2 2)		
LS	37.79	53.21	72.49
WLS	35.68	50.31	66.20

결과이다.

4.2.2. 망배치 실험

수신망 형태는 원형으로 하고 수신기 3개부터 10개까지 동일 각도로 배치하고 송수신기간 거리는 0.5~4.5 km까지 0.5 km간격으로 변화시켜가면서 융합 방법으로 WLS를 이용하여 송수신망 배치가 RMSE 성능에 대해 미치는 영향을 알아보았다. 각 센서의 관측 잡음 표준편차는 동일하다고 가정한다.

아래 그림 7에서 볼 수 있듯이 방위 잡음 0.6°, 거리 잡음 30 m 환경에서 센서의 수가 증가함에 따라 RMSE 평균이 감소하는 것을 볼 수 있었고 센서 1개당 평균 5.67%의 성능 향상을 보였다. 센서 수가 3개에서 4개, 5개에서 6개로 증가할 때 성능이 크게 향상되었으나 9개 이상인 경우에는 대체로 거의 변화가 없었고 6개 이상인 경우 송수신기간 거리가 증가함에 따라 오히려 센서 수가 많은 것이 적은 것보다 성능이 저하되는 현상도 관측되었다.

한편, 송수신기간 거리가 2~2.5 km까지 증가하기까지 RMSE 평균이 감소하다가 송수신기간 거리가 더 증가하면 다시 증가하는 경향을 보였다. 이는 다음과 같은 이유에 기인한다. 4.1절의 양상태 소나 성능 분석에서 언급된 바와 같이 송수신기를 잇는 직선 부근에 표적이 존재하는 경우 위치 추정 성능이 급격히 저하되고 이러한 경향은 송수신기간 거리가 증가할수록 더욱 두드러졌다. 따라서 송수신망 내부에서는 송수신기간 거리가 증가함에 따라 RMSE가 증가한다. 반면, 관측 범위 내에 존재하는 송수신망 외부 영역에서는 송수신기간 거리가 증가함에 따라 RMSE가 감소하게 된다. 이는 수신기 우편 부근

에서 RMSE가 작기 때문이다. 이러한 송수신기간 거리가 증가함에 따른 송수신망 내부와 외부의 상반되는 위치 추정 성능 변화에 따라 약 2~2.5 km까지는 외부의 영향이 우세하여 RMSE 평균이 감소하다가 그 이후로 내부의 영향이 우세하게 되어 RMSE 평균이 다시 증가하는 것으로 사료된다.

V. 결론

본 논문에서는 다중상태 소나와 단상태 소나, 양상태 소나를 비교 분석하였다. 양상태 소나는 송,수신기 사이의 직선 구간에서 성능이 매우 저하되나 수신기 근방에서는 단상태 소나보다 더 우수하였다. 동일 환경 하에서 다중상태 소나 (LS)는 위치 추정 오차가 단상태 소나에 비해 평균 35.98%, 양상태 소나에 비해 평균 37.45% 감소하였으며 센서의 관측 잡음에 강인한 위치 추정 성능을 보였다. 또한 다중상태 소나의 융합 방법에 대한 연구로 기존의 방법인 LS와 가중치를 이용한 방법인 WLS를 비교하였다. 결과적으로 제안된 방법이 LS에 비해 평균 7.4%의 성능 향상을 보였으며 각 센서에 입력되는 관측값의 분산 차이가 클수록 성능 향상율이 커지는 것을 볼 수 있었다. 망배치에 관한 연구로써 수신기 수 및 송수신기간 거리가 위치 추정 성능에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 실험을 수행하였다. 송수신기간 거리가 관측범위의 약 절반이 되기까지는 센서수가 증가함에 따라 성능이 향상되었으나 센서수가 어느 이상이 되면 RMSE 평균이 수렴하는 것을 볼 수 있었고 송수신기간 거리가 더 증가하면 성능이 저하되었다. 이러한 성능 평가 결과를 표로 작성해 두면 실제 현장에서 정해진 관측 범위내의 최적 센서 수와 송수신기간 거리를 쉽게 찾아 볼 수 있으므로 수신망 배치에 유용한 성능 평가 자료가 될 것으로 기대된다. 향후 계획으로는 실제 수중 환경 (PL, TS)에 대한 인자를 고려하여 탐지 반경을 구하는 실험을 수행하여 보다 실제적인 위치 추정 모델링을 구현해 나갈 계획이다.

감사의 글

본 연구는 수중음향특화센터 21과제 지원에 의하여 수행되었습니다.

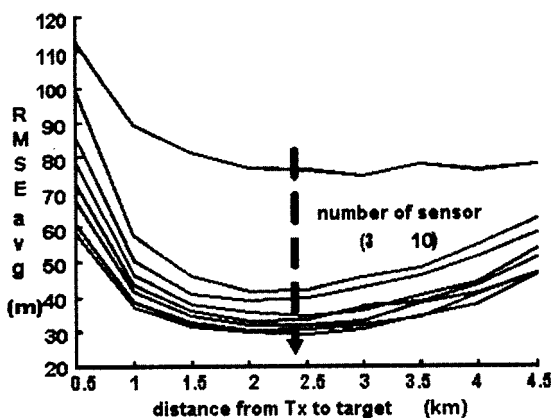


그림 7. 센서수와 송수신기간 거리에 따른 RMSE 평균
Fig. 7. RMSE average to number of sensor and distance from transmitter to receiver.

참고 문헌

1. J. T. Don, "Statistical theory of passive location systems," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 20 (2), 83-198, June, 1983.
2. H. F. Wade, "Position-location solutions by Taylor-series estimation," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 12 (2), 187-194, 1976.
3. J. E. Manolakis, "Efficient solution and performance analysis of 3-D position estimation by trilateration," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 32 (4), 1239-1248, 1996.
4. A. Farina, "Multistatic tracking and comparison with netted monostatic systems," *International Conf. Radar*, 183-187, Oct, 1982.
5. J. Kadar, "Optimum geometry selection for sensor fusion," *SPIE Conf. on Signal Proc.*, 3374, 97-107, Apr, 1998.
6. Y. Wenlin and W. Chongyu, "Target location and speed estimation by multistatic radar system using maximum likelihood approach," *ICSP Proc.*, 1964-1967, 2000.
7. A. Farina and F. A. Studer, *Radar Data Processing*, 1, John Wiley and Sons Inc, 1985.
8. M. I. Skolnik, *Intro. to Radar Systems*, McGraw-Hill Book Comp, New York, 1962.
9. S. M. Ross, *Intro. to Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, Academic Press, 2000.

저자 약력

● 박 치 현 (Chee-Hyun Park)

2002년 8월: 고려대학교 공과대학 전기전자전파공학부 (공학사)
 2003년 2월: 고려대학교 공과대학 전자컴퓨터공학과 (공학석사)
 2003년 2월~ 현재: LG 이노텍 시스템 연구소 연구원
 * 주관심분야: 신호 감파 및 추정 이론, 수중음향 신호처리

● 홍 우 영 (Wooyoung Hong)

1982년 3월: 해군사관학교 전기공학 (공학사)
 1985년 2월: 연세대학교 공과대학 전기공학 (공학석사)
 1991년 10월: University of Minnesota 전기공학 (공학박사)
 1997년 12월~2001년 1월: 미국 해군사관학교 교환교수
 1995년 3월~ 현재: 해군사관학교 부교수
 * 주관심분야: 수중음향 신호처리

● 고 한 석 (Hanseok Ko)

1982년 5월: Carnegie-Mellon University 전기공학 (공학사)
 1986년 5월: University of Maryland 시스템공학 (공학석사)
 1988년 5월: Johns Hopkins University 전기공학 (공학석사)
 1992년 5월: Catholic University of America 전기공학 (공학박사)
 1995년 3월~ 현재: 고려대학교 전자컴퓨터공학과 교수
 * 주관심분야: 신호처리

● 김 인 익 (In-Ig Kim)

1990년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1992년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 1996년 8월: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
 1996년 11월~ 현재: 국방과학연구소 선임연구원
 * 주관심분야: 소나 신호처리