

비균일 음속 다중경로 환경에서 ML 추정기법을 이용한 표적의 3차원 위치추정

최병웅*, 박도현*, 김정수*, 신창홍*, 이정훈**, 이균경*

* 경북대학교 전자전기공학부, ** LG 이노텍

3-D Source Localization using Maximum Likelihood Estimate in Multi-path Environment with Inhomogeneous Sound Speed.

B. W. Choi*, D. H. Park*, J. S. Kim*, C. H. Shin*, J. H. Lee** and K. K. Lee*

* The School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University, ** LG Innotek

e-mail: kkleee@ee.knu.ac.kr

요약

배열센서를 사용한 표적의 위치 추정은 레이다 및 소나에서 잘 알려진 문제이다. 최근에 Lee 등은 1차원 수평 선배열 센서만을 사용하여 다중경로를 통해 들어오는 신호로부터 표적의 3차원 위치를 추정하였다. 그러나 이 알고리즘에서 수중에서의 음속은 수심에 관계없이 일정하다고 가정하였기 때문에 음속이 수심에 따라 다양하게 변화하는 실제 수중환경에서는 그 추정성능이 현저히 저하된다. 따라서 본 논문에서는 표적의 거리, 깊이, 방위각으로 구성되는 3차원 위치 추정을 위해 비균일 음속환경에서의 음파전달모델(ray propagation model)을 이용한 ML 기법(maximum likelihood estimation)을 적용하였으며 일정한 음속을 가정한 Lee 기법의 추정치를 초기값으로 한 탐색을 통해 ML 기법의 연산량을 감소시켰다.

1. 서론

수중소나 환경에서 표적의 위치를 추정하는 일은 매우 중요한 분야이며 많은 연구가 진행되어 왔다. 표적에서 발생한 신호는 다양한 전달 경로를 통하여 공간적으로 떨어져 있는 두 개 이상의 센서에 시간지연을 갖고 도달하며, 이를 이용하여 표적의

위치를 추정한다[1-2]. 낮은 신호 대 잡음 비에서도 우수한 위치추정 성능을 얻기 위하여 여러 개의 센서로 배열을 구성하여 사용하며, 일반적으로 등 간격 배열 센서나 평면배열센서를 사용하여 표적의 위치를 추정한다. 일반적으로, 표적의 3차원 위치추정의 경우에는 기하학적인 제약으로 인해 Y 형 센서 등의 2차원 배열 센서들을 사용한다[3].

최근에 Lee 등은 수중소나 환경에서 수평 선배열 센서만을 사용하여 다중경로를 통하여 도달하는 근거리표적의 3차원 위치를 추정하는 기법을 제안하였다[4]. 기하학적인 제약으로 인하여 2차원 배열센서를 사용하는 기존의 기법들과는 달리 다중경로환경에서 추정한 신호들의 원추각과 시간차를 통하여 표적의 3차원 위치를 간단하게 추정하였다. 그러나 이 기법에서는 수중에서의 음속이 수심에 따라 일정하다고 가정하였기 때문에 수심에 따라 음속이 변하는 실제 수중환경에서는 표적의 위치를 정확하게 추정하지 못하는 단점이 있다.

본 논문에서는 수중소나 환경의 수평 선배열 센서를 이용하여 깊이에 따라 음속이 변하는 음속구조(sound speed profile)를 가지는 비균일 음속 수중환경에서 다중경로를 통하여 도달하는 표적신호를 통해 근거리 표적의 3차원 위치를 추정하는 기법을 제안하였다.

비균일 음속 다중경로 환경에서 ML 기법을 적용하기 위해 음파전달모델을 이용한 위치추정 가격함수를 만들고 이를 이용하여 표적의 거리, 깊이, 방위각의 3 차원 위치를 추정하였다. 또한, 표적의 위치추정을 위한 탐색에서는 계산량 감소를 위해 Lee의 위치추정기법의 결과치를 탐색초기값으로 지정하였다.

2. Lee의 위치추정 기법

그림 1은 표적신호가 다중경로를 통하여 해저면에 고정된 수평 선배열 센서에 도달하는 기하학적 구조를 나타낸 것이다. 등간격으로 배치한 M 개의 선배열 센서의 중심을 표적위치의 기준으로 설정하고, 표적의 위치는 기준에서 바라본 표적의 방위각 β , 기준과 표적과의 수평거리 r , 그리고 표적의 깊이 z 로 설정하였다. 표적에서 발생한 신호가 수면이나 해저면에 반사되는 경우 산란이나 흡수로 인한 신호의 감쇠가 생기며 2 회 이상 반사되는 경우 신호의 감쇠가 매우 크므로 이 기법에서 다중경로 모델은 수면에 한 번 반사되는 경우만을 고려하였다. 또한 수중에서의 음속은 수심에 관계없이 일정하다고 가정하였다. 직접경로와 수면 반사경로 사이의 시간지연 τ 는 그림 1에서의 기하적 관계에 의해 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\tau = \frac{1}{c}(r_s - r_D) \quad (1)$$

여기서 c 는 음속이며 r_D 와 r_S 는 직접경로 및 수면 반사경로에서 표적으로부터 센서기준에 이르는 경로의 길이를 나타낸다.

각 경로의 신호는 원추각 θ_D 와 θ_S 를 가지고 센서에 도달하며 각각의 원추각은 식 (2)와 같은 관계식을 가진다.

$$\cos \theta_D = \cos \alpha_D \cdot \cos \beta \quad (2)$$

$$\cos \theta_S = \cos \alpha_S \cdot \cos \beta \quad (3)$$

위의 다중경로모델에서 각 경로의 시간지연 및 원추각을 통한 관계식을 연립하여 표적의 위치를 추정하며 위치추정 알고리즘은 다음의 3 단계로 이루어져있다.

Step 1: 시간지연($\hat{\tau}$)와 원추각($\hat{\theta}_D, \hat{\theta}_S$)의 추정.

Step 2: 표적의 위치추정.

기하적 관계식으로부터 시간지연 τ 는 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

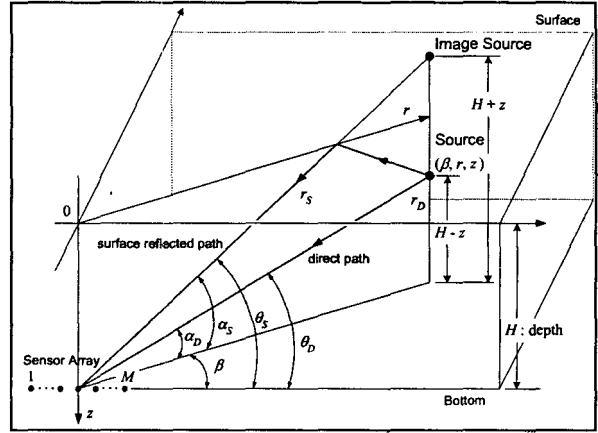


그림 1. 해저고정형 선배열 센서와 근거리표적의 환경

$$\tau = \frac{1}{c} \left(\sqrt{r^2 + (H+z)^2} - \sqrt{r^2 + (H-z)^2} \right) \quad (4)$$

또한 그림 1 및 식 (2), (3) 으로부터 θ_D 와 θ_S 는 (β, r, z) 의 함수로 표현할 수 있다.

$$\cos \theta_D = \frac{r}{\sqrt{r^2 + (H-z)^2}} \cdot \cos \beta \quad (5)$$

$$\cos \theta_S = \frac{r}{\sqrt{r^2 + (H+z)^2}} \cdot \cos \beta \quad (6)$$

여기서 위의 식(4)-(6)을 연립하여 해를 구함으로써 표적의 3 차원 위치를 추정할 수 있다. 그 결과 표적의 3 차원위치 (β, r, z) 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$z = \frac{c^2 \hat{\tau}^2 (\cos \hat{\theta}_D + \cos \hat{\theta}_S)}{4H(\cos \hat{\theta}_D - \cos \hat{\theta}_S)} \quad (7)$$

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{c^2 \hat{\tau}^2 + \frac{16H^2 z^2}{c^2 \hat{\tau}^2} - 4(H^2 + z^2)} \quad (8)$$

$$\cos \beta = \frac{\sqrt{r^2 + (H-z)^2}}{r} \cos \hat{\theta}_D \quad (9)$$

Step 3: 국부탐색.

추정결과의 정확성을 높이기 위해 ML 기법을 통한 국부탐색을 수행한다.

3. 비균일 음속환경에서의 Lee 기법의 추정 오차 분석

실제 수중환경에서는 해수의 온도, 수압 및 여러 가지 요인들로 인해 음파의 전달 속도가 다양하게 변화하며 그림 2에 선형의 음속구조를 가지는 수중환경에서

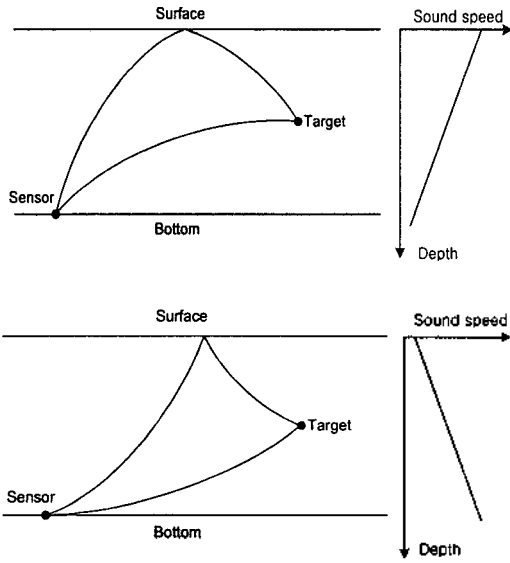


그림 2. 선형의 음속구조를 가질 때의 음파의 전달경로

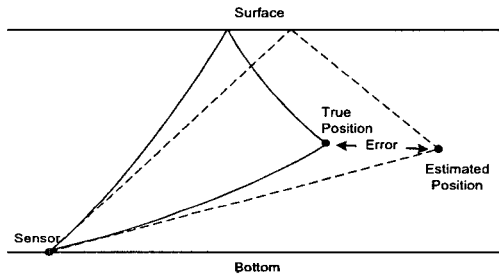


그림 3. 전달 경로의 변화로 인한 기하적 추정오차

음파의 전달경로를 나타내었다[5]. 이것은 수중에서의 음속이 항상 일정하다고 가정하였던 Lee의 위치추정 알고리즘의 가정과는 상반된다. 따라서 음속이 변하는 실제 비균일 음속 환경에서는 그림 3 과 같이 기하적 추정오차로 인해 그 성능이 저하된다.

그림 4 에서 선형의 음속구조를 가지는 환경에서 모의실험을 통한 Lee 기법의 추정결과를 나타내었다. 표적은 $\beta = 45^\circ$, $z = 200\text{m}$, $r = 1200\text{m}$ 에 위치하고 있으며 선배열 센서는 해저면에 설치하고 수면과 해저면까지의 깊이는 400m 로 설정하였다. 음속구조는 음속이 증가하는 경우와 감소하는 경우를 각각 고려하였으며, 각각의 평면에 수직선을 그어서 실제 표적의 위치를 나타내었다.

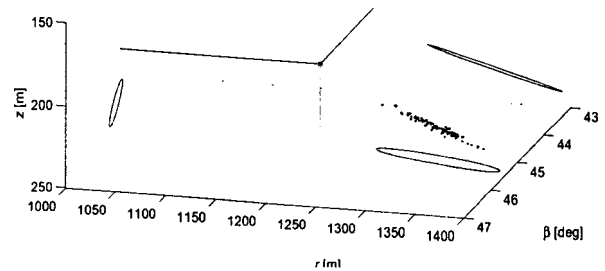
비균일 음속환경에서 Lee 기법의 거리추정오차는 최대 200m , 깊이 추정오차는 최대 50m 이상으로 비균일 음속환경에서 큰 추정오차를 가짐을 확인 할 수 있다.

4. 제안한 알고리즘

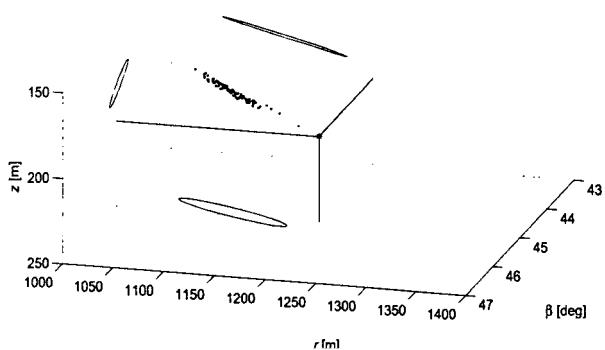
본 절에서는 비균일 음속 다중경로 환경에서 선배열 센서를 이용하여 표적의 3 차원 위치를 효과적으로 추정하는 기법을 제안하였다. 표적의 위치를 추정하기 위해 대표적인 추정 기법인 ML 기법을 적용하여 위치추정 가격함수를 구성하고 음파전달 모델을 통한 3 차원 탐색을 통해 표적의 위치를 추정하였다.

$$\mathbf{x}(t_n) = \sum_{k \in \{D, S\}} s(t_n - \tau_k) b_k \exp(j\varphi_k) \mathbf{a}(\theta_k, r_k, z) + \mathbf{e}(t_n) \quad (10)$$

센서출력신호 $\mathbf{x}(t_n)$ 는 식 (10)과 같이 표현 되며 방향모드벡터 $\mathbf{a}(\cdot)$ 는 센서로 도달하는 신호의 방향 θ_k , 표적과 기준센서 사이의 거리 r_k , 표적의 깊이 z 에



(a) 음속이 증가하는 경우



(b) 음속이 감소하는 경우

그림 4. 비균일 음속환경에서의 Lee 기법의 추정결과

대해서 나타낼 수 있으며 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{a}(\theta_k, r_k, z) = \left[e^{-j2\pi f_d \tau_1(\theta_k, r_k, z)} \dots e^{-j2\pi f_d \tau_M(\theta_k, r_k, z)} \right]^T \quad (11)$$

여기에서 f_d 는 신호의 중심주파수이며 $\tau_m(\theta_k, r_k, z)$ 는 신호의 m 번째 센서와 배열센서 중심간의 시간 지연항으로서 식 (12)와 같이 정의된다.

$$\tau_{k,m} = t_{k,c} - t_{k,m} \quad (12)$$

$t_{k,c}$ 와 $t_{k,m}$ 은 각각 신호가 표적에서 배열센서 중심까지 전달되는 시간과 m 번째 센서까지 전달되는 시간을 나타내며 다음과 같이 표현된다[6].

$$t_{k,c} = \frac{1}{g} \ln \frac{(1 - \sin \alpha_{k,c}(\theta_k, r_{k,c}, z)) c_z}{\left(1 - \sqrt{1 - (c_z/c_B)^2} \cos^2 \alpha_{k,c}(\theta_k, r_{k,c}, z)\right) c_B} \quad (13)$$

$$t_{k,m} = \frac{1}{g} \ln \frac{(1 - \sin \alpha_{k,m}(\theta_k, r_{k,m}, z)) c_z}{\left(1 - \sqrt{1 - (c_z/c_B)^2} \cos^2 \alpha_{k,m}(\theta_k, r_{k,m}, z)\right) c_B} \quad (14)$$

여기에서 $\alpha_{k,c}$ 와 $\alpha_{k,m}$ 는 각각 배열센서 중심에서와 m 번째 센서에서의 고각이며 c_B 와 c_z 는 각각 해저면에서의 음속과 표적이 존재하는 깊이 z 에서의 음속을 나타낸다. 신호가 수면에 한 번 반사되어 도달하는 경우에는 표적에서 수면까지의 경로에 대한 신호의 전달 시간과 수면에서 배열센서까지의 경로에 대한 신호의 전달시간을 각각 고려해야 하기 때문에 신호의 전달시간은 위의 식 (13), (14)와는 다르며 이 경우 전달시간은 다음의 식 (15), (16)으로 나타낼 수 있다.

$$t_{k,c} = \frac{1}{g} \ln \frac{(1 - \sin \alpha_{k,c}) \left(1 - \sqrt{1 - (c_z/c_B)^2} \cos^2 \alpha_{k,c}\right) c_{surf}^2}{\left(1 - \sqrt{1 - (c_{surf}/c_B)^2} \cos^2 \alpha_{k,c}\right)^2 c_B c_z} \quad (15)$$

$$t_{k,m} = \frac{1}{g} \ln \frac{(1 - \sin \alpha_{k,m}) \left(1 - \sqrt{1 - (c_z/c_B)^2} \cos^2 \alpha_{k,m}\right) c_{surf}^2}{\left(1 - \sqrt{1 - (c_{surf}/c_B)^2} \cos^2 \alpha_{k,m}\right)^2 c_B c_z} \quad (16)$$

여기서 c_{surf} 는 수면에서의 음속을 나타낸다.

위의 식 (13)-(16)은 센서사이의 시간지연에 관한 정보를 가지고 있으며, 이 식 (13)-(16) 을 통해 비균일 음속

다중경로 신호의 방향모드벡터를 구성할 수 있다. 이 방향모드 벡터와 식 (10)과 식 (11)의 신호모델로부터 식 (17)과 같은 음의 로그-우도 함수(negative log-likelihood function)를 얻을 수 있다[7].

$$F_{ML} = \text{tr} \left[(\mathbf{I} - \mathbf{A}(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H) \hat{\mathbf{R}}_{xx} \right] \quad (17)$$

여기서 \mathbf{A} 는 식 (11)-(16)을 통한 다중경로 신호의 방향모드 벡터이며 다음과 같이 나타난다.

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_D, r_D, z) \mathbf{a}(\theta_S, r_S, z)] \quad (18)$$

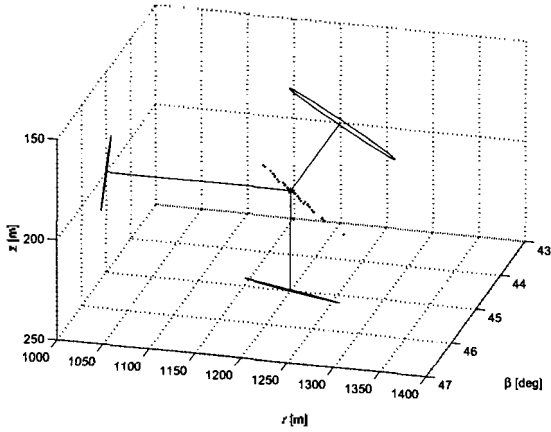
위의 방향모드 벡터 \mathbf{A} 에는 식 (12)-(16)에서 구한 센서사이의 시간차에 대한 정보를 가지고 있으며 이는 표적의 3 차원 위치 파라미터인 (β, r, z) 에 의해서 결정된다. 이를 센서신호로부터 구한 신호의 공분산 행렬 $\hat{\mathbf{R}}_{xx}$ 와 비교하여 (β, r, z) 를 변수로 하는 3 차원 탐색을 통해 식 (17)의 우도 함수를 최소화하는 표적의 위치 파라미터 $(\hat{\beta}, \hat{r}, \hat{z})$ 를 추정한다.

ML 탐색은 비교적 많은 연산량을 요구하며 효율적인 탐색을 위해 적합한 탐색 초기값의 지정이 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 앞의 2 절에서 설명한 일정한 음속을 가정한 Lee 기법의 위치추정결과값을 3 차원 탐색의 초기값으로 설정하여 식 (17)을 통한 ML 탐색의 연산량을 감소시켰다.

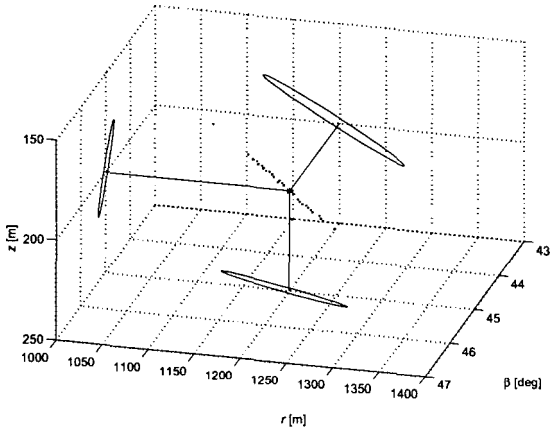
5. 모의실험

모의실험에서는 비균일 음속환경에서 Lee 기법과 제안한 기법의 위치추정 성능을 비교 분석하였다. 선배열 센서는 등 간격으로 배치된 32개의 무지향성센서를 수심 400m 해저에 배치하였다. 표적신호의 중심주파수 f_d 는 200Hz로 설정하였으며, 표본주파수 f_s 는 512Hz 로 하였다. 신호대 잡음비는 0dB로 고정하였으며 음속 구조는 수심이 깊어짐에 따라 음속이 1500m/sec에서 1480m/sec로 감소하는 경우와 1480m/sec에서 1500m/sec 으로 증가하는 경우를 고려하였다. 위와 같은 환경에서 표적의 방위각은 45°, 표적과의 거리 r 은 1200m, 그리고 표적의 깊이 z 는 200m로 설정하여 100회의 몬테카를로(Monte-Carlo) 모의실험을 수행하였다.

그림 5에 음속이 증가하는 경우 및 음속이 감소하는 비균일 음속 환경에서 제안한 알고리즘의 위치추정결과를 나타내었다. 세 평면에 수직선을 그어 실제표적의 위치를 나타내었으며, 각 평면에는 그 평면을 이루는 두 파라미터에 대한 추정결과와 분산을 타원으로 표시하였다.



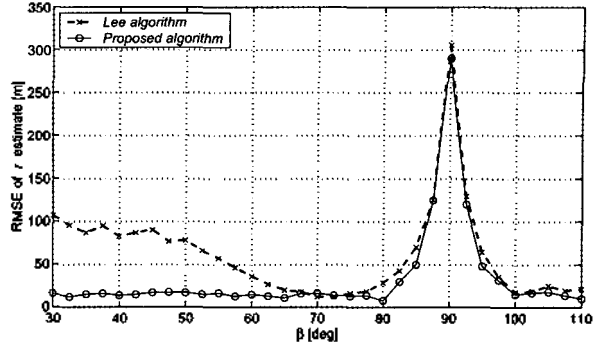
(a) 음속이 증가하는 경우



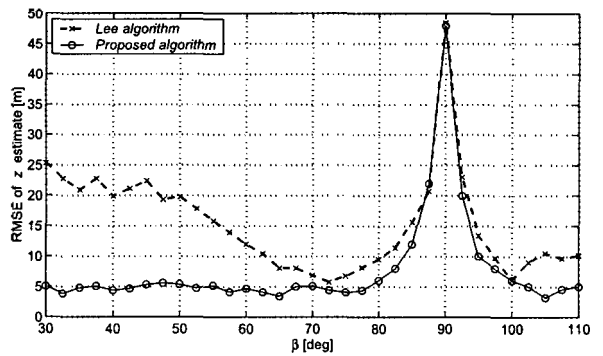
(b) 음속이 감소하는 경우

그림 5. 제안한 기법의 위치추정 결과

그림 4의 Lee 기법을 통한 결과값에서 나타난 추정치의 바이어스가 그림 5에서는 현저히 감소한 것을 볼 수 있다. 방위각의 추정오차는 0.5° 이내이며, 거리추정의 오차는 최대 약 70m, 깊이 추정오차도 최대 30m 이내임을 알 수 있다. 그림 6은 표적의 방위각을 30°에서 110°까지 변화시키면서 추정오차를 분석한 것이다. 그림 1에서 센서 및 표적이 이루는 다중경로 환경은 β 가 90°인 곳을 기준으로 기하적인 대칭을 이루므로 추정결과 또한 90°를 기준으로 유사한 양상을 띠게 된다. 그림 6의 (a), (b)는 Lee 기법 및 제안한 기법의 거리추정치의 오차와 깊이 추정치의 오차를 각각 나타내고 있으며 추정오차는 제곱근평균제곱오차(root mean square error, RMSE)로서 나타내었다.



(a) 거리추정치의 제곱근평균제곱오차



(b) 깊이 추정치의 제곱근평균제곱오차

그림 6. 표적 위치의 변화에 따른 추정오차의 비교

그림 6에 나타난 추정결과를 통해 다중경로 효과가 사라지는 80°~100°에서는 두 기법이 전체적으로 큰 오차를 가지고 있음을 볼 수 있다. 그러나 그 이외의 방위각에서는 거리와 깊이의 추정오차가 각각 50m와 10m 이내로서 Lee 기법에 비해서 제안한 기법의 성능이 크게 향상된 것을 볼 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 비균일 음속구조를 가지는 다중경로 환경에서 ML 기법을 이용하여 표적의 3 차원 위치를 추정하였다. 기존의 다중경로 환경에서의 Lee 기법은 고정된 음속을 가정하여 음속이 다양하게 변하는 실제 수중환경에 적용하는데 한계가 있었다. 따라서 본 논문에서는 비균일 음속 다중경로 환경에서 Lee 기법의 추정오차를 정량적으로 분석하였다. 또한 음파의 전달 모델을 이용한 3 차원 ML 탐색에서는 Lee 기법을 탐색 초기값으로 지정하여 표적의 위치를 효율적으로 추정하였다. 다양한 환경에서의 모의실험을 통해 제안한

기법의 추정성능 및 적용가능 범위를 분석하였다. 그 결과 다중경로의 효과가 사라지는 90° 근처를 제외하고는 비균일 음속환경에서 일정한 음속을 가정한 Lee 기법에 비해 표적의 위치추정성능이 향상되었음을 확인하였다.

감사의 글: 이 논문은 수중음향특성센터와 2004 년 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

1. D. H. Johnson and D. E. Dudgeon, *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
2. R. O. Nielson, *Sonar Signal Processing*, Artech House, Inc., Norwood, 1991.
3. C. M. Lee, K. S. Yoon, J. H. Lee and K. K. Lee, "Efficient algorithm for localizing 3-D narrowband multiple sources," *IEE Proc. Radar Sonar and Nav.*, 148, (1), pp.23-26, 2001.
4. S. H. Lee, C. S. Ryu and K. K. Lee, "Near-field source localisation using bottom-mounted linear sensor array in multipath environment," *IEE Proc. Radar, Sonar and Nav.*, 149, (4), pp.202-206, 2002.
5. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*. 3rd Ed., McGraw-Hill, 1983.
6. L. J. Ziomek, *Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space-Time Signal Processing*. CRC Press, 1994.
7. Y. Bresler and A. Macovski, "Exact maximum likelihood parameter estimation of superimposed exponential signals in noise," *IEEE Trans. Acoustic and Speech Signal Process.*, 34, (5), pp.1081-1089, 1986.