

# 어레이 형상 추정을 위한 근거리 고유벡터 기법

## Nearfield Eigenvector Method for Array Shape Estimation

신 원 민, 박 회 영, 도 경 철\*, 강 현 우\*\*, 윤 대 희, 이 충 용  
(Won-Min Shin, Hee-Young Park, Kyeong-Cheol Dho\*, Hyun Woo Kang\*\*,  
Dae-Hee Youn, Chungyong Lee)

연세대학교 전기전자공학과, \*국방과학연구소, \*\*강남대학교 컴퓨터미디어공학부  
(접수일자: 2004년 3월 5일; 채택일자: 2004년 4월 14일)

본 논문에서는 참조 신호에 대한 근거리 신호 모델링 기반의 어레이 형상 추정 기법인 근거리 고유벡터 기법을 제안한다. 수중 음원의 방향을 탐지하기 위한 기법들은 일반적으로 참조 신호를 평면파로 가정하고 있다. 그러나 참조 신호가 근거리 존재하는 경우 평면파 가정으로는 어레이 형상 추정이 불가능하다. 본 논문에서는 참조 신호가 근거리 존재하는 경우를 위하여 근거리 신호를 모델링하고 이를 기반으로 근거리 고유벡터 기법을 제안하였다. 또한 모의실험을 통해 제안된 기법이 참조 신호의 거리에 관계없이 우수한 형상 추정 성능을 보임을 확인하였다.

**핵심용어:** 어레이 형상 추정, 고유벡터 기법, 원거리 참조신호, 근거리 참조신호

**투고분야:** 수중음향 분야 (5.6)

This paper proposes the nearfield eigenvector method for array shape estimation using reference signals based on the nearfield signal modeling. Generally, direction finding methods assume the reference signals to be plainwave. However, in case of the reference signals in nearfield, this assumption is inadequate for array shape estimation. In this paper, the nearfield reference signals are modeled, and we propose the nearfield eigenvector method. The numerical experiments indicated that the proposed method shows good performance for array shape estimation regardless of the ranges of the reference signals.

**Keywords:** Array shape estimation, Eigenvector method, Farfield reference signal, Nearfield reference signal

**ASK subject classification:** Underwater Acoustic (5.6)

### I. 서론

해양 환경에서 표적의 방향을 탐지하기 위한 어레이 신호 처리 기법은 대부분 어레이 형태가 일정하게 유지된다고 가정한다. 그러나 실제 환경에서는 조류나 해저 지형 등 불규칙한 여러 가지 환경 요인들로 인하여 어레이 형태는 일정하게 유지되지 않는다. 또한 예인선에 의해 견인되는 선형 견인 어레이나 해저에 설치되는 매물 어레이의 경우, 어레이 자체의 유동성으로 인하여 형상 왜곡이 발생하게 되며, 이는 수십~수백m 길이의 어레이를 이용하는 경우 방향 탐지 성능에 적지 않은 영향을 미치게 된다. 따라서 정확한 표적의 방향 탐지를

위해서는 어레이 형상 추정 (array shape estimation) 기법이 반드시 필요하다. 기존의 어레이 형상 추정 기법은 보조 센서를 이용하는 기법[1], 블라인드 기법[2], 참조 신호 (reference signal)를 이용한 형상 추정 기법 [3-6] 등이 있다. 이 중 어레이와의 상대적인 위치 정보를 알고 있는 참조 신호를 이용하는 기법으로는, 센서에 도달하는 참조 신호의 시간 지연 성분을 이용하여 하이드로폰 위치를 추정해 내는 기법[3], 참조 신호의 신호 부공간 (signal subspace)과 잡음 부공간 (noise subspace)의 직교성을 이용하는 부공간 근사 기법 (subspace fitting method)[4], 조향 벡터 (steering vector)를 근사화해 하이드로폰의 위치를 추정하는 기법[5], 참조 신호의 고유벡터를 이용하는 고유벡터 기법[6] 등이 있다. 이 중 고유벡터 기법은 1개의 참조 신호를 이용하는 기법으로 수신 신호의 공간 공분산 행렬 (spatial covariance matrix)을 구하고 이에 대한 고유

치 분해 (eigen decomposition) 후 최대 고유치에 해당하는 고유벡터가 참조 신호의 조향 벡터와 이론적으로 동일하다는 것을 이용하여 어레이 형상을 추정하는 방법이다. 이러한 기법들에서는 참조 신호가 어레이에서 충분히 먼 거리에 존재하여 평면파의 형태로 어레이에 도달한다고 가정하고 있다. 그러나 실제 참조 신호를 전송하는 함정은 일반적으로 근거리에서 존재하게 되고 이 경우 참조 신호는 각 하이드로폰마다 서로 다른 입사각으로 입사되어 기존의 평면파 가정이 성립하지 않는다. 따라서 기존의 원거리 참조 신호를 기반으로 하는 고유벡터 기법은 어레이의 형상을 정확히 추정할 수 없게 된다.

본 논문에서는 기존의 고유벡터 기법을 근거리 신호 모델링을 기반으로 재구성하여 어레이 형상 추정을 위한 근거리 고유벡터 기법을 제안하였고, 제안된 기법의 성능을 다양한 환경 변수에 따라 분석하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 참조 신호를 근거리 신호로 모델링 하고, III장에서는 이를 기반으로 한 근거리 고유벡터 기법을 제안하였다. IV장에서는 모의 실험을 통하여 기존의 기법과 제안된 기법에 대하여 참조 신호의 신호 대 잡음비, 입사 방향, 송신 거리와 같은 환경 변수의 영향을 분석하였으며, V장에서는 결론을 도출하였다.

## II. 근거리 참조 신호 모델링

그림 1에서와 같이  $M$ 개의 하이드로폰으로 구성된 임의의 형상 어레이에 1개의 근거리 신호  $s(t)$ 가 입사하는 경우, 하이드로폰에 수신되는 신호  $x(t)$ 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$x(t) = \mathbf{A}(x, y)s(t) + \mathbf{n}(t). \quad (1)$$

이 때,  $s(t)$ 는 하이드로폰에 입사하는 근거리 참조 신호이고,  $\mathbf{n}(t)$ 는 평균이 0이고 분산이  $\sigma^2$ 인 AWGN (additive white gaussian noise) 신호이고,

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [x_2, \dots, x_M]^T, \\ \mathbf{y} &= [y_2, \dots, y_M]^T \end{aligned} \quad (2)$$

는 각 하이드로폰의 수평, 수직 좌표 벡터이다(단,

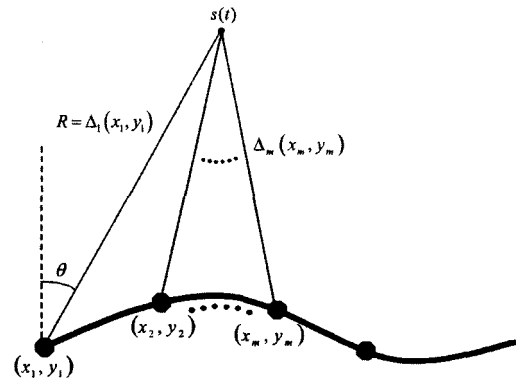


그림 1. 근거리 참조 신호  
Fig. 1. Nearfield reference signal.

$x_1 = y_1 = 0$ ). 신호의 조향 벡터  $\mathbf{A}(x, y)$ 는

$$\mathbf{A}(x, y) = [1, e^{j\phi_2(x_2, y_2)}, \dots, e^{j\phi_M(x_M, y_M)}]^T \quad (3)$$

이고, 이 때 각 하이드로폰에 입사하는 신호원은 그림 1과 같이 평행하지 않게 나타난다. 이 때  $m$ 번째 하이드로폰에 해당하는 조향 벡터의 위상값  $\phi_m(x_m, y_m)$ 은

$$\begin{aligned} \phi_m(x_m, y_m) &= -2\pi f \frac{\Delta_m(x_m, y_m) - R}{c}, \\ m &= 2, 3, \dots, M \end{aligned} \quad (4)$$

로 표현할 수 있고,  $\Delta_m(x_m, y_m)$ 은  $m$ 번째 하이드로폰과 신호원 사이의 거리로 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\Delta_m(x_m, y_m) = \sqrt{(R \sin \theta - x_m)^2 + (R \cos \theta - y_m)^2}. \quad (5)$$

여기서  $\theta$ 는 참조 신호의 입사각이며,  $R$ 은 기준 하이드로폰인 첫 번째 하이드로폰과 신호원 사이의 거리이다. 수신 신호  $x(t)$ 의 공분산 행렬을 구하면 식 (6)과 같다.

$$\mathbf{R} = E[x(t)x(t)^H] = \mathbf{A}(x, y) \mathbf{S} \mathbf{A}(x, y)^H + \sigma^2 \mathbf{I}. \quad (6)$$

여기서  $\mathbf{S} = E[s(t)s(t)^H]$ 이고, 식 (6)을 고유치 분해하면

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}^H = \mathbf{U}_s \mathbf{\Lambda}_s \mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_n \mathbf{\Lambda}_n \mathbf{U}_n^H, \\ \mathbf{\Lambda} &= \text{diag}[\mathbf{\Lambda}_s, \mathbf{\Lambda}_n], \\ \mathbf{\Lambda}_s &= \lambda_1, \\ \mathbf{\Lambda}_n &= \sigma^2 \mathbf{I}_{M-1} \end{aligned} \quad (7)$$

이 된다. 식 (7)에서  $I_{M-1}$  은  $(M-1) \times (M-1)$ 의 단위행렬 (identity matrix)을 나타내며, 신호 부공간의  $A_s$ 는 신호 부공간에서의 신호와 잡음의 파워로 구성된 값을 대각 원소로 갖는 고유치 행렬이며, 잡음 부공간의  $A_n$ 은 크기가  $\sigma^2$ 인 잡음의 고유치를 대각 원소로 갖는 행렬이고,  $U_s$ ,  $U_n$ 은 각각 신호 부공간과 잡음 부공간을 나타낸다.

### III. 근거리 고유벡터 기법

참조 신호를 이용하여 아레이의 형상을 추정하는 기법인 고유벡터 기법[6]은 원거리에 존재하는 한 개의 참조 신호만을 이용하는 기법으로 송신한 참조 신호를 수신하여 구한 공간 공분산 행렬을 고유치 분해하여 최대 고유치에 해당하는 고유벡터를 구해 보면 이 고유벡터는 이론적으로 모델링한 참조 신호의 조향 벡터와 동일하다는 이론을 이용하여 수신된 공간 공분산 행렬로부터 구한 고유 벡터의 위상값과 인접 하이드로폰 사이의 간격으로 구성된 이차 방정식의 해를 구하여 각 하이드로폰의 좌표를 추정하는 기법이다. 이러한 기존의 고유벡터 기법을 바탕으로 II장에서 구한 근거리 신호 모델링을 기반으로 조향 벡터의 이론적인 위상 성분  $\phi_m(x_m, y_m)$ 과 고유치 분해를 통해 구한 최대 고유치에 해당하는 고유벡터의 위상값은 잡음 성분의 영향을 제외하면 이론적으로 일치하게 된다. 잡음 성분에 의한 위상 변화가 없다고 가정하면, 참조 신호의 m번째 하이드로폰에서의 위상 성분은 식 (8)을 만족하게 된다.

$$2\pi f \left[ \frac{R - \sqrt{(R \sin \theta - x_m)^2 + (R \cos \theta - y_m)^2}}{c} \right] = \sum_{i=2}^m \hat{\phi}_{i-1,i} \quad (8)$$

여기에서  $\hat{\phi}_{i-1,i} = \hat{\phi}_i - \hat{\phi}_{i-1}$ 은 i번째 하이드로폰과 i-1번째 하이드로폰 사이의 상대적인 위상차가 되며, 고유벡터로부터 얻은 위상값이다. 다음으로 각 하이드로폰 간의 간격은 모두  $d$ 로 고정되어 있고 이 값은 이미 알고 있다고 가정하면, 식 (9)가 성립되게 된다.

$$(x_m - x_{m-1})^2 + (y_m - y_{m-1})^2 = d^2 \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)를 이용하여 하이드로폰의 위치를 추정하는 과정은 다음과 같다. 식 (8)을 다시 정리하면,

$$\begin{aligned} [R - \sqrt{(R \sin \theta - x_m)^2 + (R \cos \theta - y_m)^2}] &= \frac{c}{2\pi f} \sum_{i=2}^m \hat{\phi}_{i-1,i} \\ &= \sum_{i=2}^m \hat{\lambda}_{i-1,i} \end{aligned} \quad (10)$$

가 된다. 식 (10)을 정리하여 m번째 하이드로폰의 위치와 m-1번째 하이드로폰 위치를 표현해 보면

$$\begin{aligned} (R \sin \theta - x_m)^2 + (R \cos \theta - y_m)^2 &= R^2 - 2R \sum_{i=2}^m \hat{\lambda}_{i-1,i} + \left( \sum_{i=2}^m \hat{\lambda}_{i-1,i} \right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (R \sin \theta - x_{m-1})^2 + (R \cos \theta - y_{m-1})^2 &= R^2 - 2R \sum_{i=2}^{m-1} \hat{\lambda}_{i-1,i} + \left( \sum_{i=2}^{m-1} \hat{\lambda}_{i-1,i} \right)^2 \end{aligned} \quad (12)$$

이 된다. 이 때 식 (11)과 (12)를 이용하여 인접한 하이드로폰 사이의 좌표 차이를 나타내는  $X = x_m - x_{m-1}$ ,  $Y = y_m - y_{m-1}$ 에 대해 식 (9)를 전개하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} 4(\alpha^2 + \beta^2) X^2 - 4(L - d^2) \beta X + (L - d^2)^2 - 4d^2 \alpha &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} 4(\alpha^2 + \beta^2) Y^2 - 4(L - d^2) \alpha Y + (L - d^2)^2 - 4d^2 \beta &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\alpha = (R \sin \theta - x_{m-1}), \quad \beta = (R \cos \theta - y_{m-1}),$$

$$L = \left( \sum_{i=2}^m \hat{\lambda}_{i-1,i} \right)^2 - \left( \sum_{i=2}^{m-1} \hat{\lambda}_{i-1,i} \right)^2 - 2R \hat{\lambda}_{m-1,m}$$

식 (13)과 식 (14)에서 보는 바와 같이, 추정하려는 m번째 하이드로폰의 위치를 나타내는  $x_m, y_m$ 은 인접한 m-1번째 하이드로폰의 위치 정보  $x_{m-1}, y_{m-1}$ 에 의해 값이 정해지는  $\alpha, \beta, L$  등의 치환 변수에 따라 결정된다. 따라서 식 (13), 식 (14)를 풀면 m번째 하이드로폰의 위치는

$$x_m = x_{m-1} + \frac{\beta \sqrt{4d^2(\alpha^2 + \beta^2) - (L-d^2)^2} - \alpha(L-d^2)}{2(\alpha^2 + \beta^2)}, \quad (15)$$

$$y_m = y_{m-1} + \frac{\alpha \sqrt{4d^2(\alpha^2 + \beta^2) - (L-d^2)^2} - \beta(L-d^2)}{2(\alpha^2 + \beta^2)} \quad (16)$$

과 같이 표현될 수 있다. 식 (15)와 (16)에 치환 변수  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 대입하여 다시 정리하면

$$x_m = x_{m-1} + \frac{(R \cos \theta - y_{m-1}) \sqrt{4d^2 F_{x_{m-1}, y_{m-1}} - (L-d^2)^2} - (R \sin \theta - x_{m-1})(L-d^2)}{2F_{x_{m-1}, y_{m-1}}}, \quad (17)$$

$$y_m = y_{m-1} + \frac{(R \sin \theta - x_{m-1}) \sqrt{4d^2 F_{x_{m-1}, y_{m-1}} - (L-d^2)^2} - (R \cos \theta - y_{m-1})(L-d^2)}{2F_{x_{m-1}, y_{m-1}}}, \quad (18)$$

$$F_{x_{m-1}, y_{m-1}} = x_{m-1}^2 + y_{m-1}^2 - 2R(\sin \theta x_{m-1} + \cos \theta y_{m-1}) + R^2$$

로 나타낼 수 있다. 식 (17)과 (18)은 m번째 하이드로폰의 좌표를 인접한 m-1번째 하이드로폰에서의 위치 정보로써 표현한 것이다. 즉, 하이드로폰의 위치는 기준 하이드로폰과 가까운 하이드로폰부터 순차적으로 구할 수 있게 된다. 각 하이드로폰의 좌표를 독립적으로 찾는 기존의 고유벡터 기법과는 달리 제안된 근거리 고유벡터 기법의 경우 찾으려는 하이드로폰의 좌표는 인접한 하이드로폰의 위치 정보를 이용하여 순차적으로 구할 수 있다. 그리고 제안된 기법은 참조 신호가 원거리에 있던 근거리에 있던 거리에 관계없이 좌표 추정 가능성이 가능하다.

### VI. 모의실험

모의실험에서는 5m 간격으로 10개의 하이드로폰이 나열된 어레이를 이용하였다. 참조 신호의 주파수는 150Hz로 하였으며 기준 하이드로폰과 50°방향으로 100m 떨어진 위치에서 10dB의 신호 대 잡음비 (SNR)를 가지고 입사한다고 가정하였다. 어레이 형상은 진폭이 약 5m인 sinusoidal 형태이고, 추정된 배열 형상을 이용하여 입사 방향을 탐지할 표적 신호는 0dB의 신호

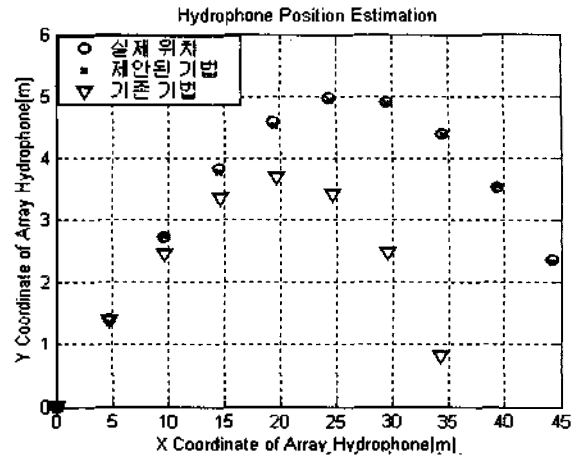


그림 2. 제안된 기법과 기존의 기법으로 추정된 하이드로폰 좌표. Fig. 2. Estimated hydrophone positions using the proposed method and the conventional method.

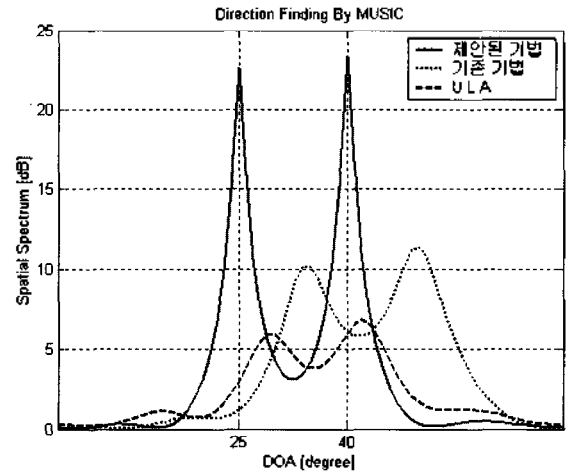


그림 3. MUSIC기법을 이용한 빔형성 결과. Fig. 3. Beamforming results using MUSIC method.

대 잡음비로 25°와 40°의 방향으로 입사한다고 가정하였다. 이 때 사용된 표본의 수는 200개이다.

그림 2는 제안된 근거리 고유벡터 기법과 기존의 고유벡터 기법을 통해 추정된 하이드로폰 좌표를 나타낸다. 제안된 기법을 이용하여 하이드로폰의 좌표를 추정하면 실제 하이드로폰 좌표와 거의 동일한 좌표를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 3은 등간격 선형 어레이 (uniform linear array)를 가정한 경우의 방향 탐지 결과와 기존의 기법과 제안된 기법을 통해 추정된 좌표를 이용한 방향 탐지 결과를 비교하였다. 각각의 경우에 MUSIC (Multiple Signal Classification) 기법을 이용하여 표적 신호의 방향을 탐지하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 어레이를 등간격 선형 어레이로 가정할 때와 기존의 기법으로 구해진 하이드로폰 좌표를 이용할 때 모두 표적 신호의 방향과

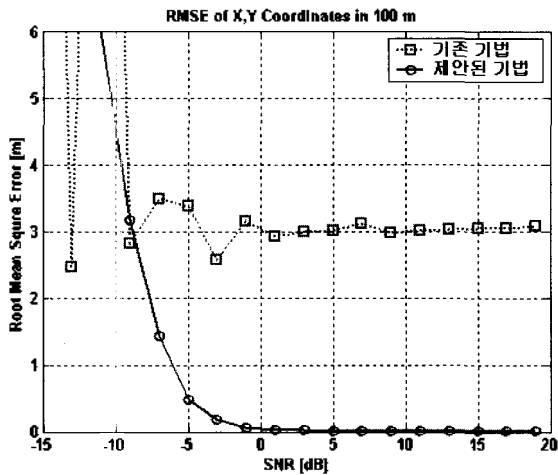


그림 4. 신호 대 잡음비에 따른 추정 오차.  
Fig. 4. Estimated error of the shape vs. signal to noise ratios.

많은 오차를 보임을 알 수 있다. 하지만 제안된 기법을 이용하는 경우에는 표적 신호의 방향을 정확하게 탐지할 수 있다.

그림 4에서는 100m 거리에 존재하는 참조 신호의 신호 대 잡음비가 -15dB에서 20dB까지 변화할 때, 1,000 회 독립 수행을 통해 각 하이드로폰의 좌표와 추정된 좌표간의 RMSE (root mean square error)를 나타내었다. 기존의 기법에서는 신호 대 잡음비에 무관하게 RMSE가 3m 정도로 크게 나타나 하이드로폰 좌표 추정에 실패하는데 반해, 제안된 기법은 5dB 이상의 신호 대 잡음비에서 RMSE가 0.5m 이하로 매우 뛰어난 성능을 보임을 알 수 있다.

그림 5는 100m 거리에 존재하는 참조 신호의 입사 방향이 -70°에서 70°까지 변경되어 입사될 때의 RMSE를 나타낸다. 그림 5에서 참조 신호가 기준 하이드로폰에 대하여 end-fire 영역에 존재하는 경우 기존의 기법과 제안된 기법 모두 RMSE가 크게 나타나지만, 참조 신호가 -60°에서 60°사이로 입사될 때에는 기존의 기법은 RMSE가 크게 발생하는 반면 제안된 기법은 RMSE가 매우 작게 나타남을 알 수 있다.

그림 6에서는 참조 신호의 송신 거리가 근거리인 50m부터 원거리인 2,500m까지 변화할 때의 RMSE를 나타낸다. 이 때 참조 신호의 신호 대 잡음비는 10dB로 가정하였다. 참조 신호가 약 1,000m 미만의 근거리에서 입사시 기존의 기법은 RMSE가 크게 발생하는 반면 제안된 기법은 RMSE가 매우 작게 발생함을 알 수 있다. 또한 참조 신호의 거리가 멀어지는 경우에는 제안된 기법의 형상 추정 성능이 더 우수함을 알 수 있다. 참조 신호가 원거리에 존재하는 경우에도 원거리 신호

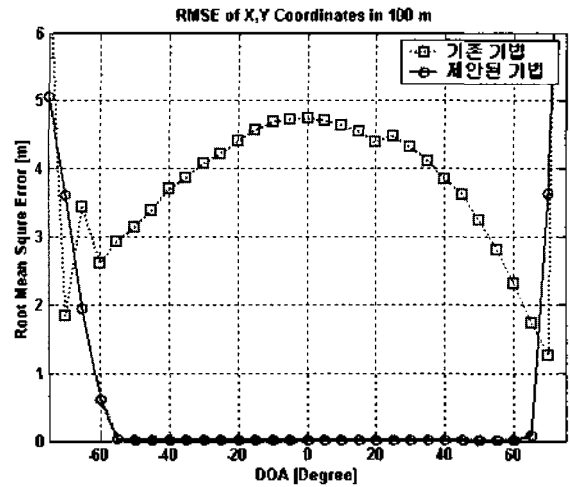


그림 5. 참조 신호의 입사 방향에 따른 추정 오차.  
Fig. 5. Estimated error of the shape vs. DOA of the reference signal.

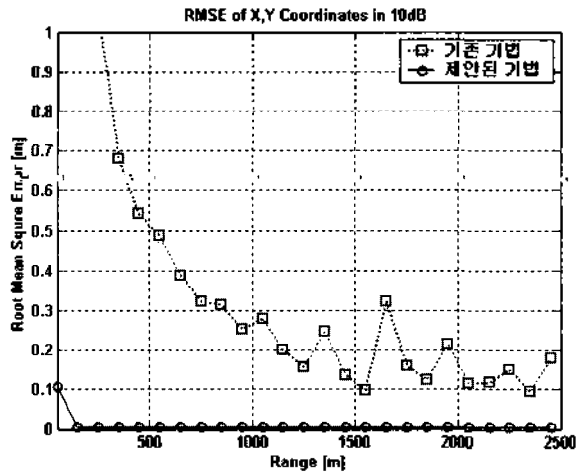


그림 6. 참조 신호의 거리에 따른 추정 오차.  
Fig. 6. Estimated error of the shape vs. range of the reference signal.

모델링에서의 근사 없이 정확한 신호 모델링을 이용하였으므로 제안된 기법의 형상 추정 성능이 더 우수하게 나타난다.

### V. 결 론

본 논문에서는 참조 신호에 대한 근거리 신호 모델링을 기반으로 하는 어레이 형상 추정 기법으로서, 기존의 원거리 고유벡터 기법을 확장한 근거리 고유벡터 기법을 제안하였다. 기존의 기법은 각 하이드로폰의 좌표는 독립적으로 추정이 가능하지만 참조 신호가 어레이에서 충분히 멀리 떨어져 있어야 한다는 단점이 있다. 제안된 기법은 기준 하이드로폰으로부터 가까운 하이드

로폰의 좌표를 순차적으로 추정해 인접 하이드로폰 좌표의 추정에 이용해야 하기 때문에 먼저 추정된 하이드로폰의 좌표 오차가 누적된다는 단점이 있지만, 참조 신호의 거리에 관계없이 정확한 어레이 형상 추정이 가능하다. 모의실험을 통해 기존의 원거리 고유벡터 기법과 제안된 근거리 고유벡터 기법의 어레이 형상 추정 성능을 비교해 본 결과 제안된 기법이 기존의 기법보다 우수한 형상 추정 성능을 보이는 것을 확인하였다. 또한 근거리 고유벡터 기법을 이용하여 우수한 형상 추정을 하기 위해서는 신호 대 잡음비가 5dB 이상이고 50m 이상의 거리에서 입사각이  $-60^\circ$ 에서  $60^\circ$ 이내에 있는 참조 신호를 이용해야 함을 확인하였다.

### 감사의 글

본 논문은 수중음향특화센터의 연구비 지원으로 이루어졌습니다. (과제번호: UA-00)

### 참고 문헌

1. N. L. Owsley, "Shape Estimation for a Flexible Underwater Cable," IEEE EASCON, 20-23, 1981.
2. Anthony J. Weiss and Benjamin Friedlander, "Array Shape Calibration Using Sources in Unknown Locations-A Maximum Likelihood Approach," IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing, 37(12), Dec. 1989.
3. N. L. Owsley, G. R. Swope., "Array Shape Determination using Time Delay Estimation Procedures," Proc. IEEE EASCON, 158-164, Oct. 1980.
4. Boon C. Ng and Wee Ser, "Array Shape Calibration Using Sources in Known Locations," Singapore ICCS/ISITA '92., 2, 836-840, 1990.
5. Ming Zhang, Zhao-Da Zhu, "Array Shape Calibration Using Sources in Known Directions," Proceedings of the IEEE Aerospace and Electronics Conference, NAECON, 1, 70-73., 1993.
6. B. G. Ferguson, D. A. Gray and J. L. Riley, "Comparison of Sharpness and Eigenvector Methods for Towed Array Shape Estimation," J. Acoust. Soc. Am. 91(3), 1565-1570, March 1992.
17. Hamid Krim, Mats Viberg, "Two Decades of Array Signal Processing Research," IEEE Signal Processing Magazine, 67-94, July 1996.

### 저자 약력

• **신 원 민 (Won-Min Shin)**



1994년 2월: 해군사관학교 해양화전공 (학사)  
 2003년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (석사)  
 2003년 3월~현재 : 해군 군수사령부 특수무기정비과장 (현역 대위)  
 \*주관심분야: 어레이 신호처리, 소나 신호처리

• **박 회 영 (Hee-Young Park)**

한국음향학회지 제 23권 제 2호 참조

• **도 경 철 (Kyeong-Cheol Dh)**

한국음향학회지 제 21권 제 5호 참조

• **강 현 우 (Hyun Woo Kang)**

한국음향학회지 제 23권 제 2호 참조

• **윤 대 회 (Dae-Hee Youn)**

한국음향학회지 제 23권 제 2호 참조

• **이 충 용 (Chungyong Lee)**

한국음향학회지 제 23권 제 2호 참조