

〈논 문〉

방위센서를 이용한 배열 형상 추정 기법

Array Shape Estimation Method Using Heading Sensors

조요한* · 서희선* · 조치영**

Yo Han Cho, Hee Seon Seo and Chee Young Joh

(2000년 7월 12일 접수 ; 2000년 8월 31일 심사완료)

Key Words : Array Shape (배열 형상), Least Square Method (최소자승법), Heading Sensor (방위센서), Non-linear Array (비선형 배열), Beamforming(빔형성)

ABSTRACT

In this paper, an iterative array shape estimation technique is presented, which is based on the use of the least squares polynomial fitting to the data from heading sensors. The estimated polynomial shape model is then used for calculating the hydrophone positions on the assumption that the arc distances between sensors are constant. In order to verify the applicability of the proposed algorithm, numerical simulations are performed using two types of non-linear array shapes. In addition the noise effects of heading sensors on the array shape estimation results and the performance of beamformer are also investigated.

1. 서 론

매우 낮은 신호 대 잡음비를 가지는 수중음원을 탐지하기 위하여 예인 배열 시스템이 광범위하게 운용된다.⁽¹⁾ 예인 배열 시스템의 경우에는 길이가 긴 배열을 예인선이 끌고 다닐 때 기동형태와 해수면의 움직임, 조류 등에 따라 선형을 유지하기 힘들 때가 있다.⁽²⁾ 이러한 비선형 배열 형상에 대해 선형배열로 가정하여 빔형성기를 통해 획득한 표적정보는 오차를 초래하여 전체 소나시스템의 탐지 성능을 저하시킨다. 따라서 비선형 배열 형상에 의한 탐지 오차를 최소화하기 위해서는 운용시 수중에서의 정확한 배열 형상의 추정이 필요하다.

배열의 형상과 음향센서의 위치를 파악하는 방법에는 방위센서와 수심센서 등과 같은 보조센서를 이용하는 것^(3, 7) 과 단순히 배열로부터 받아들이는 신호를 분석하는 기법^(8, 13) 으로 크게 나눌 수 있다. 배열의 특정 위치에 보조센서를 배치하는 방법은 보조센서로부터 위치 또는 방위정보를 얻어 직접적인 배열 형상 추정이 가능하지만 보조센서의 가

격이 비싸므로 비용의 측면에서 단점이 있다. 한편 배열 수신신호를 이용하는 방법은 보조센서를 사용하지 않으므로 비용 측면에서는 유리하지만 모델링 오차에 민감하다는 단점이 있다. 또한, 보조센서를 이용한 배열 형상 추정은 보조센서 위치정보를 이용하여 보간하는 방법, 배열 형상을 하나의 함수로 보고 근사화하는 다항 근사화 방법, 그리고 적은 수의 보조센서를 사용하여 칼만 필터 기법으로 배열 형상을 추정하는 방법 등이 있다.

본 연구에서는 선배열 센서부에 설치된 방위 센서의 방위값으로부터, 다항식 근사화 방법을 이용한 배열 형상 추정기법을 제시하였다. 그리고 다수의 음원에 대해서 빔형성기의 출력을 시뮬레이션하여 제안된 추정기법의 적응성을 검토하였다. 동시에 그 성능을 확인하였다. 그리고 이러한 기법을 이용하여 방위센서의 측정오차에 의한 영향을 분석하였다.

2. 배열형상추정 및 빔형성 기법

2.1 배열형상추정

일반적으로 예인 선배열시스템은 수중에서 음원으로부터 방사되는 음향신호를 수신하기 위해 일정한 간격의 음

* 국방과학연구소

** 정회원, 국방과학연구소

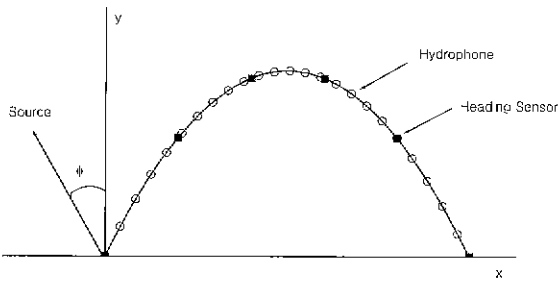


Fig. 1 Non-linearized line array

향센서로 배열하고 동시에 운용중의 배열 정보를 측정하기 위한 보조센서(방위센서, 수심센서 등)를 장착한다. 본 연구에서 고려하는 선배열은 M개의 음향센서가 일정간격 \tilde{d} 로 배열되어 있고, B개의 방위센서가 일정간격 \tilde{d} 로 배열되어 있다고 가정한다. 그런데 예인 선배열 시스템은 중성부력 설계가 되어 있어서 수직으로는 거의 일정 수심을 유지하지만, 수평면상에서는 해수면의 움직임, 조류 등에 의해 Fig. 1에 있는 것처럼 비선형 형상으로 예인된다. 좌표계는 첫 번째 배열센서와 마지막 센서를 연결하는 직선을 x축으로 잡고, 직교 좌표계를 구성한다.

임의의 시간 구간에서 배열 형상이 일정하게 유지되며, Fig. 1과 같은 비선형 선배열은 다음과 같이 좌표계의 원점을 통과하는 C차의 다항식으로 표현할 수 있다고 가정한다.

$$y(x) = \sum_{i=1}^C a_i x^i, \quad i=1,2,\dots,C \quad (1)$$

식 (1)로부터 임의 위치에서의 방위값은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$h(x) = \frac{dy(x)}{dx} = a_1 + 2a_2x + \dots + Ca_Cx^{C-1} \quad (2)$$

따라서 B개의 방위센서로부터 측정된 방위 값을 \tilde{h}_i , ($i=1,2,\dots,B$)이라고 하면 배열형상추정은 다음 식을 만족하는 다항식의 계수 a_i , ($i=1,2,\dots,C$)을 결정하는 문제가 된다.

$$[H] \{A\} = \{\tilde{h}\} \quad (3)$$

여기서

$$[H]_{B \times C} = \begin{bmatrix} 1 & 2\tilde{x}_1 & 3\tilde{x}_1^2 & \dots & C\tilde{x}_1^{C-1} \\ 1 & 2\tilde{x}_2 & 3\tilde{x}_2^2 & \dots & C\tilde{x}_2^{C-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 2\tilde{x}_B & 3\tilde{x}_B^2 & \dots & C\tilde{x}_B^{C-1} \end{bmatrix}$$

$$\{A\}_{C \times 1} = [a_1, a_2, \dots, a_C]^T$$

$$\{\tilde{h}\}_{B \times 1} = [\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_B]^T$$

여기서 \tilde{x}_i , \tilde{h}_i ($i=1,2,\dots,B$)는 각각 i번째 방위센서의 위치와 측정된 방위값을 나타낸다.

일반적으로 방위센서의 개수가 비선형의 최고차수보다 크므로 식 (3)으로부터 형상추정은 다음과 같이 최소자승법을 이용하여 계수를 추정할 수 있다.

$$\{A\} = [[H]^T [H]]^{-1} [H]^T \{\tilde{h}\} \quad (4)$$

다항식 계수 벡터를 추정하고 나면 상응하는 배열 형상은 다음과 같이 최종적으로 구해진다.

$$y(x) = \{A\}^T \{P(x)\}, \quad (5)$$

$$\{P(x)\} = [x \ x^2 \ \dots \ x^C]^T$$

그런데 식 (4)를 이용하여 배열 형상을 추정하기 위해서는 방위센서의 방위값 뿐만아니라, 정확한 방위센서의 좌표 \tilde{x}_i 가 주어져야 한다. 비선형 정도가 비교적 작을 경우는 선형 배열로 가정하고 그 좌표를 사용할 수도 있지만 비선형성이 증가할수록 방위센서 좌표값도 동시에 추정하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같이 반복과정을 통한 비선형 형상 추정 기법을 제안하였다.

Step 1 : 방위센서의 초기 위치가 선형배열에서 일정간격 \tilde{d} 로 배열되어 있다고 가정한다.

$$\tilde{x}_i^0 = (i-1)\tilde{d}, \quad \tilde{y}_i^0 = 0, \quad i=1,2,\dots,B \quad (6)$$

Step 2 : B개의 방위센서로부터 측정된 방위값 \tilde{h}_i , ($i=1,2,\dots,B$)를 이용하여 식 (4)으로부터 형상을 추정한다.

$$y^0(x) = a^0_1 x + a^0_2 x^2 + \dots + a^0_C x^C \quad (7)$$

Step 3 : 추정된 배열 형상 함수로부터 k번째 반복단계에서의 각 방위센서의 위치 \tilde{x}_i^k ($i=1,2,\dots,B$)를 추정한다. 그런데 배열형상이 변하더라도 배열상의 간격은 일정하게 유지된다고 가정하면, 방위센서 좌표는 다음과 같이 호의 길이를 이용하여 추정할 수 있다.

$$\int_0^{\tilde{x}_i^k} \sqrt{1 + (y^{(k)}(x))^2} dx \approx (i-1)\tilde{d}; \quad \tilde{x}_i^k, \quad i=1,2,\dots,B \quad (8)$$

Step 4 : Step 3에서 계산한 방위센서 위치 \tilde{x}_i^k 를 이

용하여 식 (4)로부터 (k+1) 단계에서의 배열 형상 $\{A^{(k+1)}\}$ 을 추정한다.

$$y^{(k+1)}(x) = a_1^{(k+1)}x + a_2^{(k+1)}x^2 + \dots + a_C^{(k+1)}x^C \quad (9)$$

Step 5 : 위의 step 3과 step 4를 방위센서 위치가 수렴할 때까지 반복한다.

$$\left| \frac{\hat{x}_i^{k+1} - \hat{x}_i^k}{\hat{x}_i^k} \right| < \varepsilon, \quad i=1, 2, \dots, B \quad (10)$$

여기서 k는 반복단계를 나타내며, ε은 수렴 허용 기준치이다.

배열 형상에 대한 다항 근사식이 구해지면 음향센서의 위치 \hat{x} 는 방위센서 위치 결정 방법과 마찬가지로 호의 길이를 이용하여 구할 수 있다.

$$\int_0^{\hat{x}} \sqrt{1+(y'(x))^2} dx \approx (i-1) \hat{d}, \quad i=1, 2, \dots, M \quad (11)$$

마지막으로 음향센서의 y좌표 \hat{y} 는 식 (5)와 같이 다항 근사식으로 구해진다.

$$\hat{y}_i = \{A\}^T [\hat{x} \ \hat{x}^2 \ \dots \ \hat{x}^C]^T, \quad i=1, 2, \dots, M \quad (12)$$

2.2 빔형성 기법

Fig. 1에 있는 것과 같이 음원이 배열 시스템으로부터 먼 거리에 존재한다고 가정하면 예인 배열로 들어오는 신호는 평면파로 가정할 수 있다. M개의 음향센서에 대하여 N개의 샘플링된 음향신호는 다음과 같다.

$$v_i(n) = s_i(n) + g_i(n), \quad i=1, 2, \dots, M, \quad n=1, 2, \dots, N \quad (13)$$

여기서 $v_i(n)$ 와 $g_i(n)$ 는 각각 i번째 센서의 출력과 잡음 성분을 나타내고, N은 샘플링 개수를 나타낸다.

입력의 조향방향 u_0 에 대한 빔형성기의 출력은 다음과 같다

$$w(n) = \sum_{i=1}^M v_i(n - f_s \hat{r}_i \cdot u_0 / c) \quad (14)$$

f_s : 샘플링 주파수, c : 음속

\hat{r}_i : i번째 센서의 위치벡터

u_0 : 조향벡터

빔형성기 출력을 주파수 영역에서 묘사하면 다음 식과 같다.

$$W(k) = \sum_{l=1}^M e^{-j2\pi k l / N} V_l(k) \quad (15)$$

여기서 $a_l = f_s r_l \cdot u_0 / c$, $V_l(k) = \sum_{m=0}^{N-1} v_l(m) e^{-j2\pi k m / N}$ 이다.

3. 시뮬레이션

본 연구에서 제안한 보조센서를 이용한 배열형상추정 기법의 적응성을 검증하기 위하여, 배열의 전체 길이가 720 m인 선배열에, 음향센서 96개가 등간격 7.5 m로 배치되어 있으며, 6개의 헤딩센서가 등간격 144 m로 배열 내에 위치하고 있는 예제 모델을 선정하였다. 이 경우 다음의 2가지 형태의 비선형 형상(2차 및 3차 곡선 형상)을 고려하였다.

$$\text{Type I } y_I = a_1x + a_2x^2, \quad a_1 = 5.927304E-01,$$

$$a_2 = -8.783230E-04$$

$$\text{Type II } y_{II} = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3, \quad a_1 = 7.929118E-01,$$

$$a_2 = -3.536488E-03,$$

$$a_3 = 3.505000E-06$$

이러한 배열 시스템에 대하여 먼저 배열 형상 추정시 반복 횟수에 따른 배열형상 추정의 오차를 알아보았으며, 다음으로 방위센서의 잡음에 의한 배열형상추정의 특성을 고찰하기 위하여 평균이 0이고 분산이 1.0인 가우시안 분포를 가지는 잡음을 고려하여 배열형상을 추정하고 빔형성 결과를 알아 보았다. 이때 빔형성 시뮬레이션 데이터는 Table 1과 같이 4개의 음원을 고려하였다.

마지막으로 방위센서의 측정오차에 의한 영향을 알아보기 위하여 방위센서 측정오차의 분산값을 변화시키면서 배열형상추정 및 빔형성을 시뮬레이션 하였다.

Table 1 Source power and bearings of sources

음원	SNR (dB)	방위각 (deg)
S1	10	-15
S2	9	30
S3	4	-60
S4	4	-10

3.1 배열형상추정

배열형상 추정 계산에서 반복단계의 효과를 검토하기 위하여 시뮬레이션한 결과 반복단계별 추정된 곡선의 계수는 Table 2와 같으며 최소한 3단계 이내에 실제 형상의 곡선 계수와 거의 일치함을 알 수 있었다.

Fig. 2와 3은 비선형 곡선 형상 배열에 대한 추정 결과를 그린 것이다. 1차 반복계산에서 실제형상과 불일치를 보이는 것은 최대 근사 정리에 사용되는 방위센서 위치의 x 좌표값의 오차와 방위센서 측정신호의 오차성분으로 생긴다. 방위센서의 x 좌표는 선형배열의 값을 사용하여 배열

Table 2 Estimated coefficients of curves with iterations

형상	반복 단계	추정계수		
		a1	a2	a3
Type I	1	6.058096E-01	-8.480372E-04	-
	2	5.973485E-01	-8.841795E-04	-
	3	5.994214E-01	-8.865614E-04	-
Type II	1	8.104888E-01	-3.372527E-03	3.148134E-06
	2	7.996171E-01	-3.537066E-03	3.485467E-06
	3	8.053789E-01	-3.576802E-03	3.536859E-06

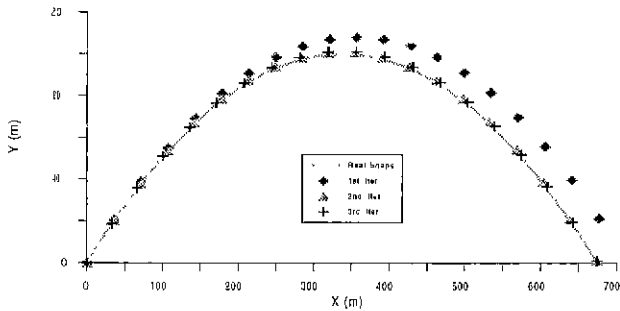


Fig. 2 Estimated array shape with iteration(2nd order polynomial)

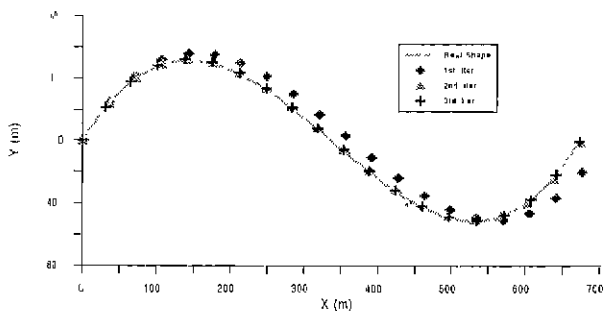


Fig. 3 Estimated array shape with iteration(3rd order polynomial)

형상을 추정하고, 다시 추정된 값에서 x 값을 도출하여 사용함으로써 오차를 줄일 수 있었으며, 2차 반복 계산에서는 거의 실제 형상과 일치함을 보였다.

3.2 빔형성

앞의 비선형 예제모델에 대하여 배열형상 추정에 의한 빔형성 성능을 확인하기 위하여 음향센서 위치를 선배열 등간격 선형배열로 가정한 경우와 제안된 배열형상 추정기법을 통해 얻어진 곡선 형상으로 가정한 경우, 두가지 경우에 대하여 빔형성을 하였다. Fig. 4와 5는 각각 선형 배열 형상으로 가정한 경우와 추정된 형상을 이용하여 빔형성한 결과를 보여준다. 선형 배열 형상으로 가정한 경우에는 근접한 소스 1번과 4번의 구분이 모호해져, 전체로 3개의 음원 있는 것처럼 보인다. 그러나 변형된 형상을 추정하여 빔형성한 경우에는 근접한 음원을 구분할 수 있음을 보여준다.

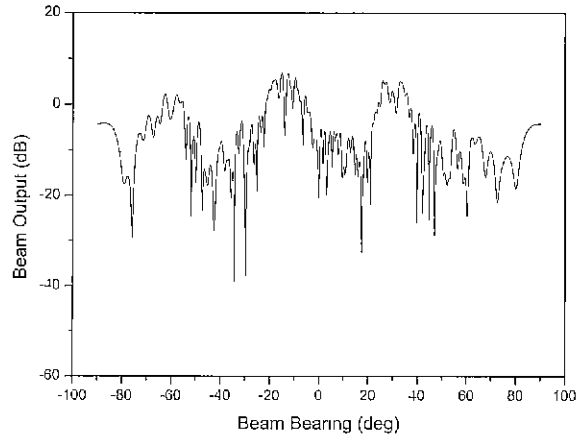


Fig. 4 Beamformer output assuming a linear array (2nd order polynomial)

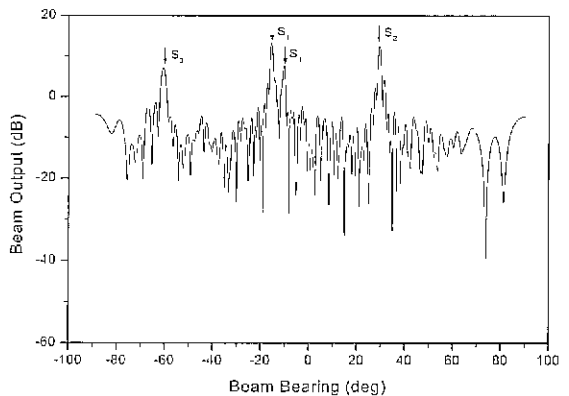


Fig. 5 Beamformer output using estimated array shape(2nd order polynomial)

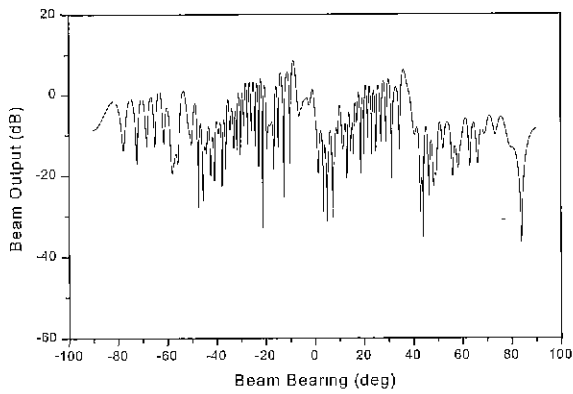


Fig. 6 Beamformer output assuming a linear array (3rd order polynomial)

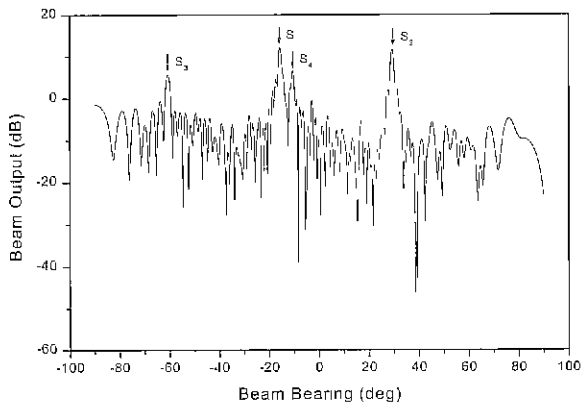


Fig. 7 Beamformer output using estimated array shape (3rd order polynomial)

Fig. 6과 7은 3차원 형상에 대한 빔형성 결과를 보여준다. Fig. 6과 같이 선형배열로 가정하여 빔형성하면 음원의 방향과 개수에 대하여 정확한 정보를 얻을 수 없음을 알 수 있다.

3.3 방위센서의 측정오차 영향

앞의 빔형성 시뮬레이션에 사용한 조건과 동일한 조건에서 방위센서의 측정오차의 영향을 분석하였다. Fig. 8은 시뮬레이션에 사용된 6개의 방위센서에 대하여 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 가우시안 분포를 가지는 측정오차를 추가한 경우의 실제신호와 크기 차이를 나타낸 것이다. 방위센서 2번의 경우 $\sigma^2 = 4.0$ 일 때 약 4.5° 의 오차를 가지는데 실제 방위센서의 성능에 비하면 매우 큰 값이다.

위와 같은 방위센서 신호에 대하여 Fig. 9는 형상 추정 결과를 보여준다. 시뮬레이션에 사용된 잡음의 분산이 증가할수록 형상추정 오차가 증가한 것을 알 수 있으나, 실제 형상에서 크게 벗어나지는 않음을 보여준다. $\sigma^2 = 4.0$ 일 때 빔형성 결과인 Fig. 10에서도 음원 1번과 4번의 구

분이 뚜렷함을 보여준다. Fig. 11과 12는 3차원 형상에 대한 결과를 나타낸다.

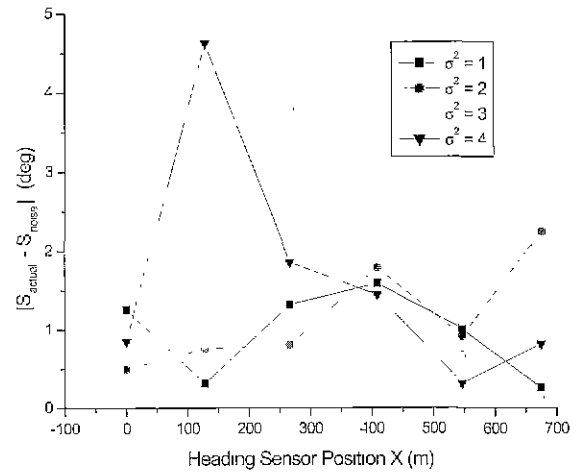


Fig. 8 Heading sensor signal and position

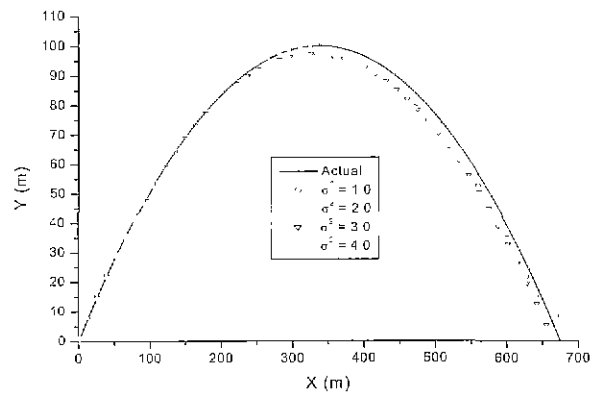


Fig. 9 Estimated array shape with the additive noise (2nd order polynomial)

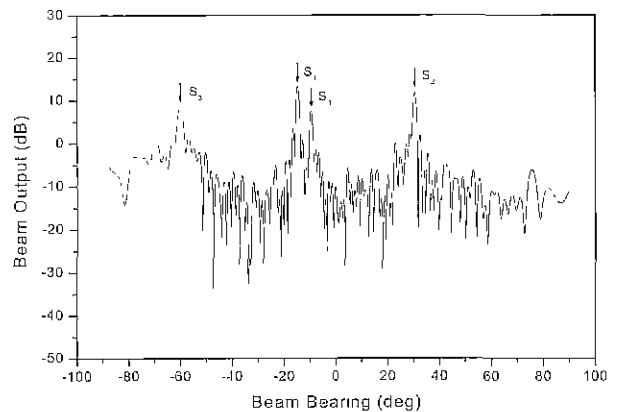


Fig. 10 Beamformer output in the case of the additive noise (2nd order polynomial)

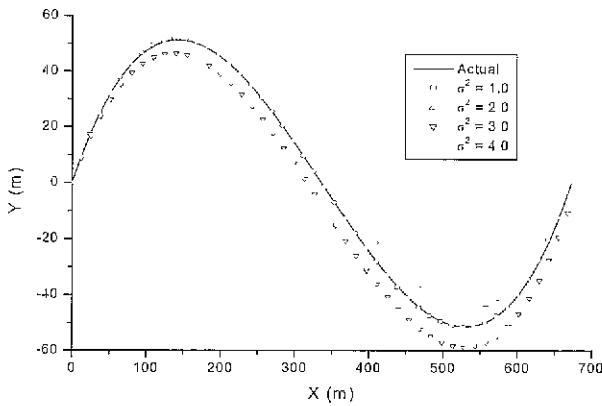


Fig. 11 Estimated array shape with the additive noise(3rd order polynomial)

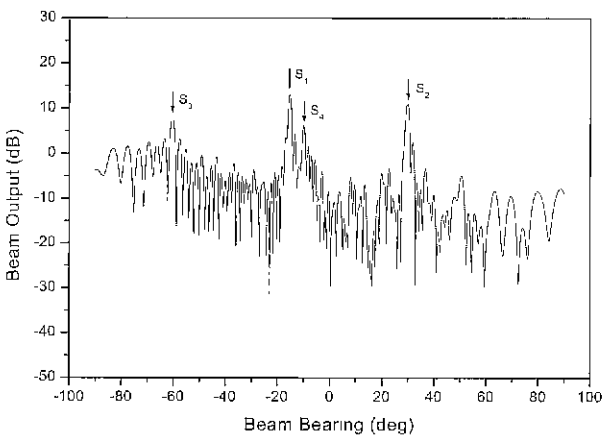


Fig. 12 Beamformer output in the case of the additive noise(3rd order polynomial)

4. 결 론

본 논문에서는 예인 배열 형상을 추정하기 위하여 간단하지만 비교적 정확도가 높은 다항 근사화 방법을 활용하여 방위센서 신호로부터 배열 형상을 추정하는 방법을 개발하고 이러한 방법에 의한 추정된 형상과 선형배열로 가정한 형상에 대한 빔형성기의 출력을 비교하여 그 성능을 확인하였다. 선형배열로 가정한 경우에는 서로 근접한 신호를 분리하지 못하였으나 추정된 형상을 이용한 빔출력에서는 이러한 신호들을 구분하였다. 그리고 이러한 기법을 이용하여 방위센서의 허용오차를 분석한 결과에서는 오차 분산이 어느 정도 증가하여도 빔형성 성능에는 영향을 주지 않음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) 김세수. 1998, "수중음향학에 대한 소개", 한국소음진동공학회, 제 8권, 제 2호, pp. 223~226.

(2) 함일배, 배수룡, 정의봉. 1997, "유한요소법을 이용한 수중 예인 선배열의 모델링 및 VIM 진동 해석", 한국소음진동공학회, 제 8권, 제 6호, pp. 993~1000.

(3) Owsley, N. L.. 1981, "Shape Estimation for a Flexible Underwater Cable". in Proc. IEEE EASCON, pp. 20~23.

(4) Gray, D. A., Anderson B. D. O. and Bitmead, R. R.. 1993, "Towed Array Shape Estimation Using Kalman Filters-theoretical Models". IEEE J. Oceanic Eng. Vol. 18, No 4, pp. 543~556.

(5) Riley, J.L. and Gray, D. A., 1993, "Towed Array Shape Estimation Using Kalman Filters-experimental investigations", IEEE J. Oceanic Eng. Vol. 18, No. 4, pp. 572~581.

(6) N. Convers Wyeth, 1994, "Methods of Array Element Localization for a Towed Underwater Acoustic Array". IEEE J. Oceanic Eng. Vol. 19, No. 1, pp. 128~133.

(7) P. Fehsberto and S. M. Jesus. 1996, "Towed-array Beamforming During Ship's Manoeuvring". IEEE Proc.-Radar, Sonar Navig., Vol. 143, No. 3, pp. 210~215.

(8) Owsley, N., and Swope, G., 1980, "Array Shape Determation Using Time Delay Estimation Procedures", in Proc. IEEE EASCON, pp. 158~165.

(9) Y. Rockah, and P. Schultheiss. 1987, "Array Shape Calibration Using Sources in Unknown Locations". IEEE Trans. Acoust. Speech. Signal Processing, Vol. 35, No. 3, pp. 286~299.

(10) A. Weiss. and B. Friedlander. 1989. "Array Shape Calibration Using Sources in Unknown Locations - a Maximum Likelihood Approach", IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing, Vol. 37, No. 12, pp. 1958~1966.

(11) Howard, B. E, and Syck, J. M., 1992. "Calculation of the Shape of a Towed Underwater Acoustic Array". IEEE J. Oceanic Eng. Vol. 17, No. 2, pp. 193~203.

(12) Quunn, B. G., Barrett, R. F. and Kootsookos, P. J., 1993, "The Estimation of the Shape of an Array Using a Hidden Markov Model", IEEE J. Oceanic Eng., Vol. 18, No. 4, pp. 557~564.

(13) Searle, S. J. and Daniel E. Wahl, 1993, "Towed Array Shape Estimation Using Frequency-Wavenumber Data", IEEE J. Oceanic Eng., Vol. 18, No. 4, pp. 582~590.