

비선형 선배열 형상 추정을 위한 반복 다항 근사화 기법

Iterative Polynomial Fitting Technique for the Nonlinear Array Shape Estimation

조요한*, 조치영*, 서희선*
(Yo Han Cho*, Chee Young Joh*, Hee Seon Seo*)

*국방과학연구소

(접수일자: 2001년 7월 9일; 수정일자: 2001년 8월 16일; 채택일자: 2001년 9월 2일)

가늘고 유연한 선배열을 해상에서 운용할 때 비선형 형상이 유도되므로 음원에 대한 정확한 탐지를 위하여 배열형상 추정이 필요하다. 방위센서를 이용한 배열형상 추정을 위하여 배열의 휨 정도가 작은 경우에만 적용 가능한 다항 근사화 방법의 제한점을 극복하기 위하여 반복법을 제안하고, 수치 시뮬레이션을 통하여 반복회수에 따른 배열형상 추정결과를 분석하였으며, 제안한 방법의 실제 시스템에 대한 적용성을 검토하였다.

핵심용어: 선배열, 형상 추정, 방위센서, 반복 다항 근사법

투고분야: 수중음향 분야 (5.7)

Because of ocean waves, swell, steering corrections, etc, the hydrophones of a towed array will not live along a straight line. However the degradation of bearing estimation performance occurs when beamforming is carried out on the hydrophone outputs of an acoustic towed array which is not straight. So it is required to estimate the shape of the array for the improved beamformer output. 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 estimation error and the influence of deformations on the performance of the conventional beamformer output are investigated. Finally, the suggested method is applied to the real system in order to investigate the applicability.

Keywords: Array, Shape estimation, Heading sensor, Iterative polynomial fitting technique

ASK subject classification: Underwater acoustics (5,7)

I. 서론

매우 낮은 신호 대 잡음비를 갖는 수중음원을 탐지하기 위하여 길이가 매우 긴 예인 선배열 시스템을 운용하여야 한다. 가늘고 긴 선배열을 해상에서 운용할 때, 예인함의 운동, 조류 등의 유체력에 의해 선배열이 선형을 유지하지 못하는 경우가 발생한다. 이러한 비선형 선배열 형상에 대해 선형배열로 가정하여 빔형성기를 통해 획득한 표적정보는 오차를 초래하여 전체 소나시스템의

탐지성능을 저하시킨다. 따라서 목표물의 탐지오차 최소화를 위해서는 비선형 거동에 대한 정확한 배열형상 추정이 필요하다.

배열형상을 추정하는 방법에는 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 하나는 방위센서, 수심센서와 같은 보조센서를 이용하는 방법이고[1-3], 다른 하나는 단순히 배열로부터 받아들인 음향센서 출력신호를 분석하는 기법으로 나눌 수 있다[4-6]. 음향센서 신호를 이용하는 방법은 한 개 또는 여러 개의 음원으로부터 발생하는 음파를 음향센서간의 시간지연정보로 변환하는 방법으로 배열의 형상을 추정하기 위하여 많은 시간이 필요하고 때때로 원거리 (far-field)에 위치한 음원이 필요하다.

책임저자: 조요한 (isack@hanmir.com)
645-600 경남 진해시 진해우체국 사서함 18호
국방과학연구소 2체계-1-8팀
(전화: 055-540-6186; 팩스: 055-542-3737)

Owsley[1]는 방위센서를 이용하여 다항 근사화 기법으로 배열형상을 추정하였다. 이 방법은 배열의 비선형성이 작은 경우에 한하여 적용가능하였다.

본 연구에서는 음향모듈 내에 장착된 방위센서를 이용하여 배열의 비선형성이 매우 큰 경우에도 배열형상 추정이 가능한 반복 다항 근사화 기법을 제안하고, 배열형상의 예제모델을 구하여 시뮬레이션을 통하여 반복회수의 영향을 분석하고 형상추정오차를 구하였으며, 그 적용성을 검토하기 위하여 배열의 운동 시뮬레이션 결과에 대하여 비반복 다항근사화방법으로 형상을 추정하였다.

II. 배열 형상 추정 기법

2.1. 다항 근사화 기법

비선형 선배열을 다음과 같이 좌표계의 원점을 통과하는 C차의 다항식으로 표현할 수 있다고 가정한다.

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

x : 배열의 길이방향 좌표, y : 배열의 횡방향 좌표

i : 배열형상 다항식의 차수에 대한 인덱스

a_i : 배열형상 다항식의 계수

C : 배열형상 다항식의 최고차수

일반적으로 선배열은 가늘고 긴 케이블로 이루어지며 유연성을 가지므로 조류의 영향이나 예인함의 선회운동으로 만들어지는 선배열의 형상은 이러한 가정이 성립된다고 볼 수 있다. 식 (1)로부터 배열 상의 임의의 위치에서의 방위값은 다음과 같은 곡선 기술기가 된다. 방위센서 출력은 자북을 기준으로 표시되며, 이것은 배열형상의 기울기를 나타낸다.

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

여기서 B개의 방위센서로부터 측정된 방위 값을 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.

$$[H] a = h \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 2x_1 & 3x_1^2 & \dots & Cx_1^{C-1} \\ 1 & 2x_2 & 3x_2^2 & \dots & Cx_2^{C-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 2x_B & 3x_B^2 & \dots & Cx_B^{C-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \dots \\ h_B \end{bmatrix}$$

2.2. 반복 다항 근사화 기법

식 (3)을 풀기 위해서는 우변에 있는 방위센서의 측정값 (h_i)뿐만 아니라 좌변의 첫 번째 항렬에 있는 방위센서 좌표 x_i 가 주어져야 한다. 배열 상에 있는 방위센서의 x 좌표를 등간격 d 로 배치되어 있다고 가정하면, 비선형 정도가 적을 경우에는 오차가 작으나 비선형성이 큰 경우에는 실제 곡선과 추정곡선 사이의 차이가 커지게 된다.

방위센서 6개가 등간격으로 배치된 배열에서 형상을 추정한다고 가정하자. 처음에 방위센서의 x 좌표를 모르기 때문에 등간격 d 로 배치되어 있다고 가정하여 센서의 첫 번째 추정위치 $x_i^{(1)} = (i-1)d$ 라 하고 배열형상을 구하면 그림 1과 같다. 추정한 곡선 $y^{(1)}$ 은 실제 배열형상과 오차를 가지며, 이 곡선의 전체길이는 배열의 길이보다 더 길다.

여기서 위의 추정곡선에서 곡선을 따라 길이 d 인 방위센서 좌표 $x_i^{(2)}$ 를 구하여, 다음 계산에 사용하면 방위센서

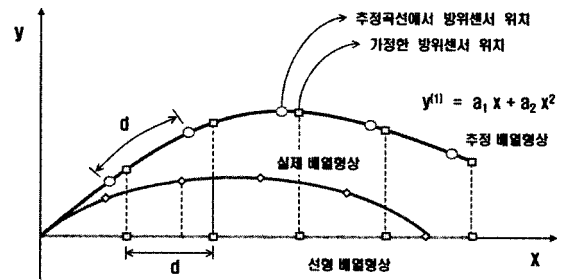


그림 1. 추정한 배열형상에서의 방위센서 위치
Fig. 1. The heading sensors position in the estimated array shape.

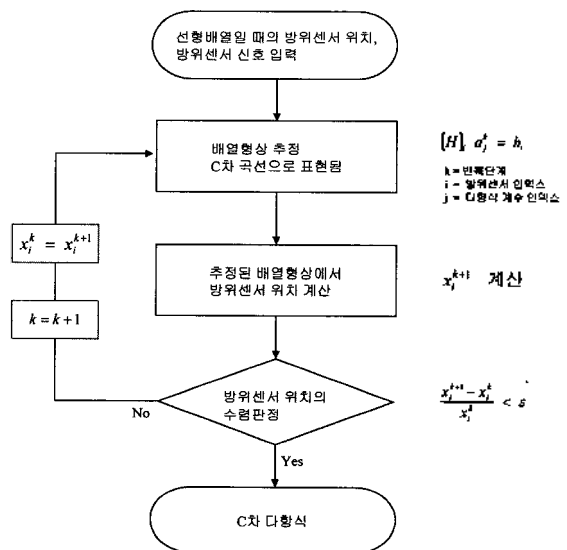


그림 2. 반복계산의 개요
Fig. 2. The flowchart of the iterative calculation.

서 x 좌표의 차이에 의한 형상 추정 오차를 줄일 수 있다. 그림 2와 같은 알고리즘을 통하여 배열형상추정을 반복하면 정확한 값을 얻을 수 있다. 이것은 측정된 방위값 (h_i)과 추정된 곡선의 방위와의 오차의 제곱의 합 (E)을 식 (4)와 같이 정의할 때, 이 값이 최소가 되려면 방위센서 x 좌표가 정확해져야 측정된 방위값에 근사하는 곡선을 얻을 수 있기 때문이다.

$$E = \sum_{i=1}^N \left[\frac{dy(x_i)}{dx} - h_i \right]^2 \quad (4)$$

III. 시뮬레이션

3.1. 시뮬레이션 모델

본 논문에서 제시한 반복 다항 근사화 방법에 의한 배열형상 추정 기법의 타당성을 검토하기 위하여 예인 케이블의 길이가 1500 m이며, 음향모듈이 700 m인 예인 선배열 시스템을 예제 모델로 선정하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 6개의 방위센서가 등간격 140 m로 배열 내에 위치하고 있으며 음향센서가 등간격으로 배열된 선배열을 고려하였다.

배열형상 모델을 만들기 위해 배열이 기준 좌표축으로부터 벗어난 정도를 나타내는 비선형성 δ 를 배열의 횡방향 최대변위를 배열 전체길이로 나눈 값으로 정의하였고, 비선형성이 5~30%인 2차곡선 및 3차곡선을 고려하였다. 그리고 배열형상 추정결과가 빔형성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 표 1과 같이 방위각이 서로 다른 4개의 다중음원을 고려하였다.

3.2. 반복의 영향

반복 다항 근사화 방법에 의한 배열형상 추정에서 반복 회수에 따른 영향을 알아보기 위하여 2차곡선 $\delta = 30\%$ 에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 3에 나타내었다. 반복단계 1의 형상 추정 결과는 기존의 다항 근사화 방법의 결과를

표 1. 시뮬레이션에 사용된 음원
Table 1. Source power and bearings of sources used in the simulation.

Source	Power (dB)	Bearing (deg)
S_1	10	-30
S_2	8	-15
S_3	6	15
S_4	4	30

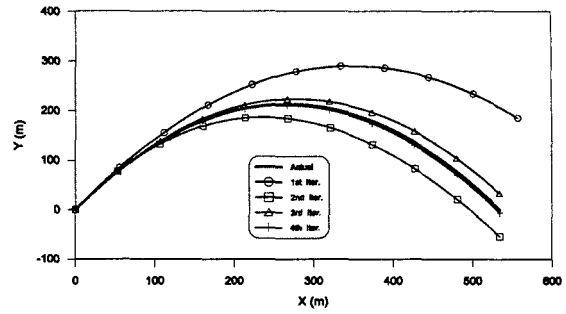


그림 3. 2차곡선 $\delta = 30\%$ 모델의 반복회수에 따른 형상추정
Fig. 3. Estimated array shape with the iteration number (2nd order polynomial curve with $\delta = 30\%$).

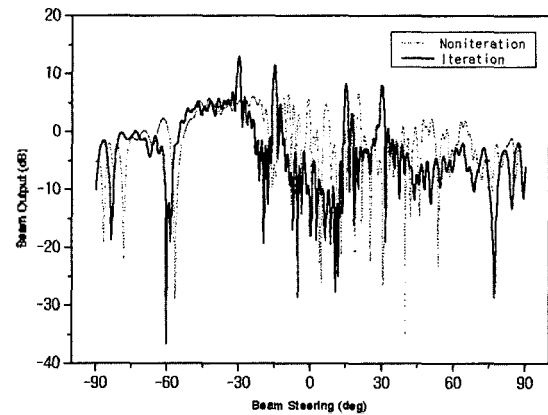


그림 4. 2차곡선 $\delta = 30\%$ 일때의 반복법에 의한 빔형성
Fig. 4. Beamformer output using the estimated array shape (2nd order polynomial curve with $\delta = 30\%$).

나타내며, 반복회수 4회 이상으로 실제형상과 유사해짐을 보여주었다.

그림 4는 빔형성 결과를 보여주는데, 비반복에 의한 빔출력에서는 4개의 음원에 대한 탐지성능이 저하되어 있으나, 반복법에 의한 형상 추정 결과를 이용한 빔형성에서는 정확한 음원 탐지가 이루어짐을 보여주었다.

그림 5와 6은 3차곡선 형상에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주는데 3차곡선의 경우에는 1회의 반복으로도 상당히 형상추정 결과가 양호해짐을 보여 주었다.

그림 7과 8은 비선형성이 큰 경우의 2차곡선 및 3차곡선 형상의 추정결과를 보여주고 있으며, 반복법에 의하여 실제형상과 거의 유사하게 추정함을 보여주었다.

마지막으로 형상추정의 정확성을 알아보기 위하여 실제 배열 형상에서의 방위센서 위치와 추정 배열 형상에서의 방위센서 위치차이를 나타내는 위치오차 값을 구한 결과를 그림 9에 나타내었다. 비반복에 의한 형상 추정에서는 배열형상의 비선형성이 증가할수록 위치오차가 증가하나, 반복법에서는 비선형성의 크기에 상관없이 일정한 값을 보였다.

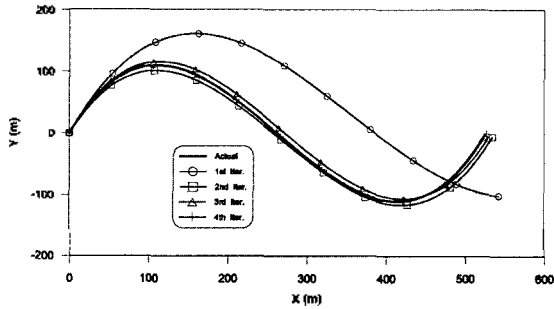


그림 5. 3차곡선 $\delta = 30\%$ 모델의 반복최수에 따른 형상추정
Fig. 5. Estimated array shape with the iteration number (3rd order polynomial curve with $\delta = 30\%$).

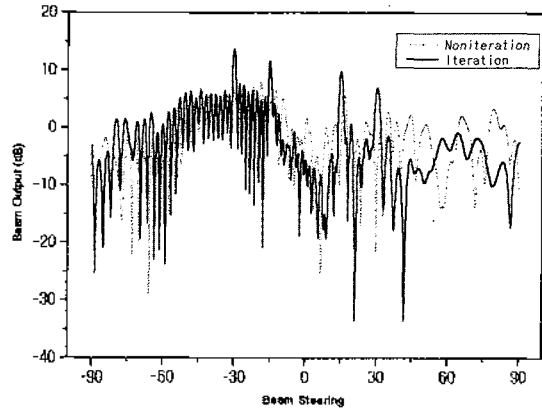


그림 6. 3차곡선 $\delta = 30\%$ 일때의 반복법에 의한 빔형성
Fig. 6. Beamformer output using the estimated array shape (3rd order polynomial curve with $\delta = 30\%$).

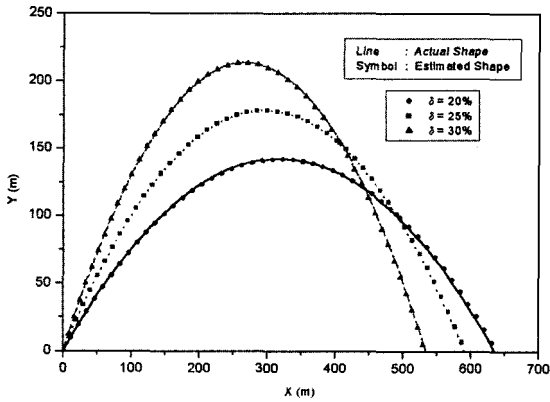


그림 7. 반복 다항 근사화 방법에 의한 2차곡선 추정결과
Fig. 7. The result of the estimation to the 2nd order polynomial curve by the iterative polynomial fitting technique.

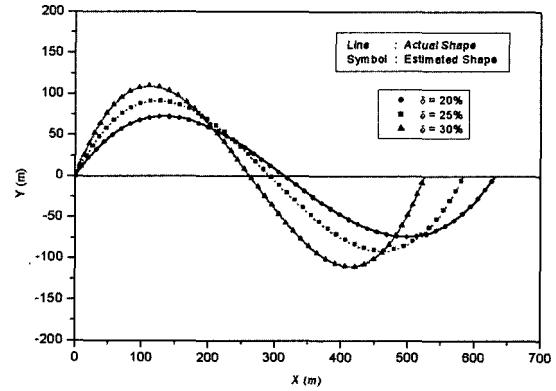


그림 8. 반복 다항 근사화 방법에 의한 3차곡선 추정결과
Fig. 8. The result of the estimation to the 3rd order polynomial curve by the iterative polynomial fitting technique.

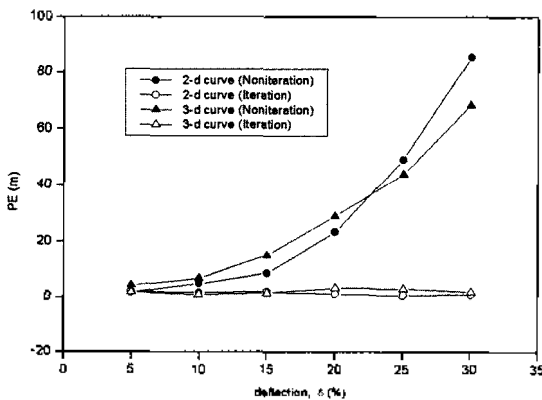


그림 9. 반복의 유무에 따른 위치오차의 비교
Fig. 9. The comparison of the position error between the iterative calculation and non-iterative calculation.

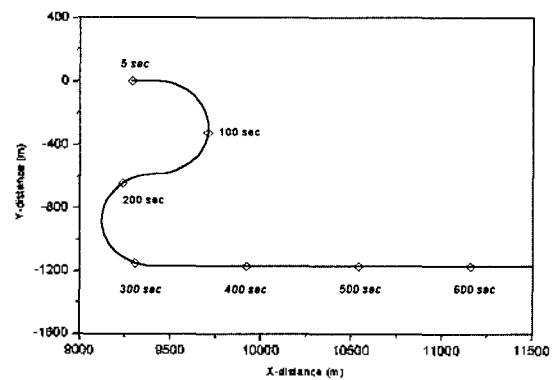


그림 10. 예인함의 운동 궤적 (S형)
Fig. 10. The trajectory of the tow vessel (S-shape).

IV. 적용성 검토

4.1. 예인함의 선회기동

제안한 반복 다항 근사화 방법에 의한 배열형상 추정기

법을 검증하기 위하여 실제의 배열운동을 고려한 운동 시뮬레이션 결과를 구하여 배열형상 추정을 적용해 보았다. 그림 10은 예인함이 S자형으로 12 kts의 속도로 진행하는 궤적을 보여주고 있다. 이때 관심있는 선배열은 예

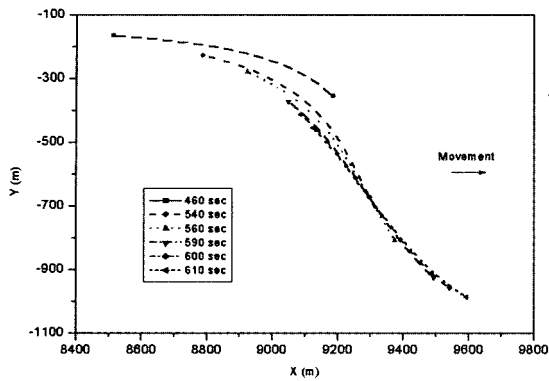


그림 11. 관심있는 시간상에서 센서부의 형상
Fig. 11. The shape of the array in the concerning time.

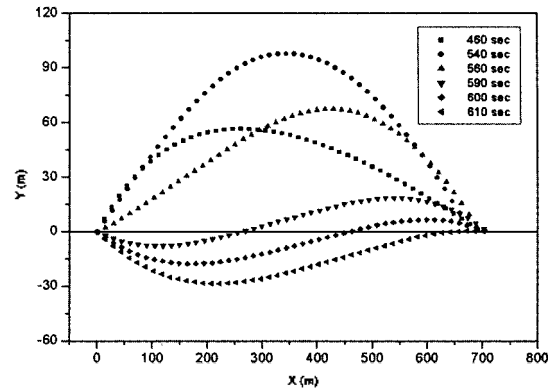


그림 12. 변환후 센서부의 형상
Fig. 12. The shape of the array after the rotation.

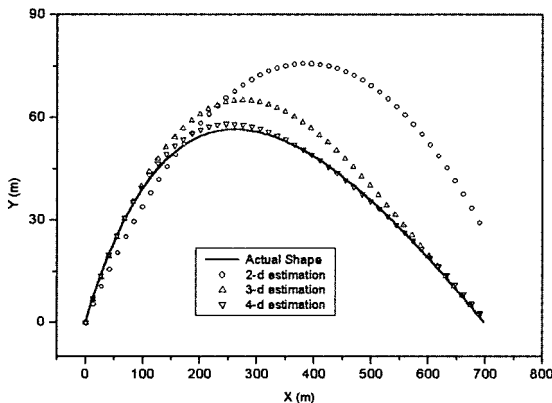


그림 13. 추정하는 곡선차수에 따른 배열형상 (t=460sec)
Fig. 13. The shape of the array according to the dimension of the estimation curve (t=460sec).

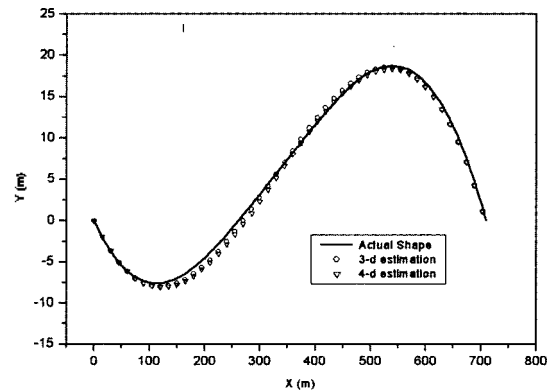


그림 14. 추정하는 곡선차수에 따른 배열형상 (t=590sec)
Fig. 14. The shape of the array according to the dimension of the estimation curve (t=590sec).

인함에서 약 1.5 km의 예인케이블에 의해 예인되고 있다.

위와 같은 예인함의 운동에 대하여 비선형 배열형상이 유도되는 구간은 시간 40초에서 610초 사이이다. 이 구간에 대하여 센서부의 형상을 구해보면 그림 11과 같다.

배열형상을 추정할 때 방위센서의 좌표표를 편리하게 잡기 위하여 배열형상을 평행, 회전, 대칭이동하여 센서부의 선단이 좌표 원점으로 이동하고 센서부 끝단이 x축상에 오도록 변환한다. 변환후 센서부 형상을 그림 12에 나타내었다. 그림에서 보면 y축 방향 최대변위가 약 100 m를 보이는데 이것은 2차곡선 변형량 $\delta = 14\%$ 가 되므로 비반복 다항 근사화 기법으로 배열형상 추정시에는 정확성이 떨어질 수 있음을 보여준다.

4.2. 배열형상의 곡선차수

실제 배열의 운동에서 생기는 비선형 형상을 표현하기 위한 곡선의 차수를 구하기 위해 시간 460초와 590초일 때의 형상에 대하여 배열형상 추정기법을 적용한다. 그

림 13, 14에서는 2차~4차 다항식을 적용하면서 배열형상을 추정한 결과를 나타낸 것으로 실제 운동에서 유도되는 배열형상의 곡선차수는 4차 이상의 다항식 적용이 필요함을 보여준다.

4.3. 배열형상 추정결과

앞에서의 실제 시스템에 필요한 곡선차수 결과를 이용하여 4차 다항식으로 배열형상을 추정한 결과를 그림 15~18에 나타내었다. 반복 다항 근사화 기법으로 실제의 형상과 거의 유사하게 추정할 수 있음을 보여주었다. 빔형성 결과를 나타내는 그림 16, 18에서도 4개의 음원에 대하여 정확한 탐지가 이루어짐을 보여준다. 따라서 제안한 반복 다항 근사화 기법을 실제 시스템 적용시 4차 다항식을 사용하고 약 4회 이상의 반복 계산으로 배열의 회전도가 매우 큰 경우에도 만족스런 결과를 유도할 수 있음을 보여주었다.

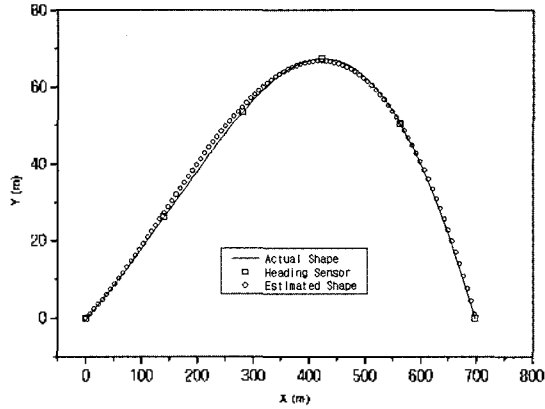


그림 15. 배열형상 추정결과 (t=560sec)
Fig. 15. The result of the array shape estimation (t=560sec).

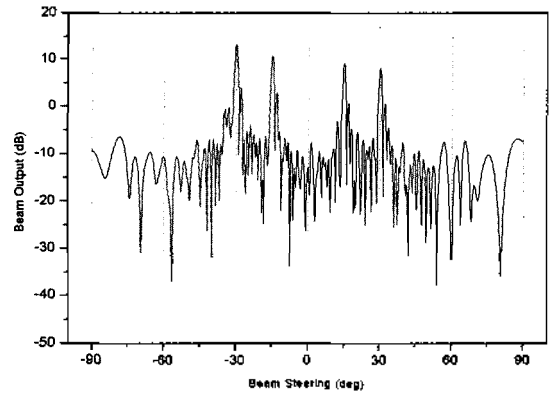


그림 16. 배열형상 추정결과를 이용한 빔형성 (t=560sec)
Fig. 16. The beamformer output using the estimated array shape (t=560sec).

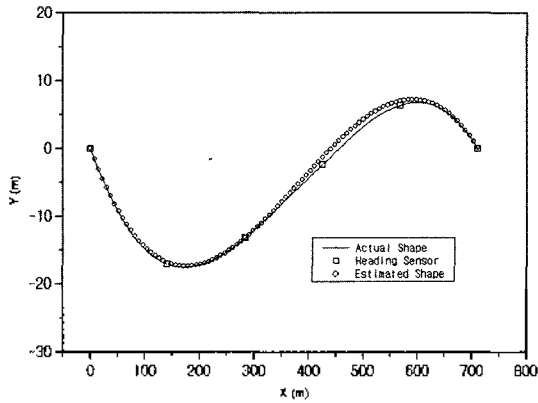


그림 17. 배열형상 추정결과 (t=600sec)
Fig. 17. The result of the array shape estimation (t=600sec).

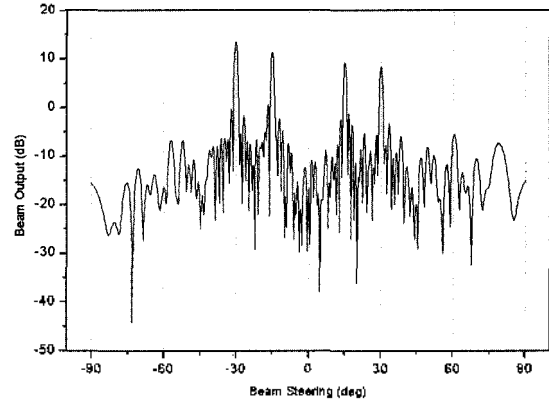


그림 18. 배열형상 추정결과를 이용한 빔형성 (t=600sec)
Fig. 18. The beamformer output using the estimated array shape (t=600sec).

V. 결론

본 논문에서는 비선형 배열 형상을 추정하기 위하여 방위센서 신호를 이용한 다항 근사화 기법을 활용하여 배열의 비선형성이 매우 큰 경우에도 적용 가능한 반복법을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 이를 검증하였다.

배열형상의 비선형성이 5~30%인 2차곡선 및 3차곡선 모델에 대하여 반복법에 의한 시뮬레이션 결과, 배열형상의 비선형성이 매우 큰 경우에도 적용 가능한 반복 다항 근사화 기법을 개발하였으며 제안한 반복법에 의한 배열형상 추정시 필요한 반복회수는 4회 정도가 요구되었다. 그리고 반복 다항 근사화 기법을 실제시스템 적용시 필요한 다항식의 차수는 4차 이상이 요구되었다. 향후, 본 연구는 해상시험 결과를 이용한 검증이 필요하다.

참고 문헌

1. L. N. Owsley, "Shape estimation for a flexible underwater cable", *Proc. IEEE EASCON*, pp. 20-23, Nov. 1981.
2. B. E. Howard, and J. M. Syck, "Calculation of the shape of a towed underwater acoustic array", *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. 17, no. 2, pp. 193-203, Apr. 1992.
3. D. A. Gray, B. D. O. Anderson and R. R. Bitmead, "Towed array shape estimation using Kalman filters-theoretical models," *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. 18, no. 4, pp. 543-556, Oct. 1993.
4. H. Bucker, "Beamforming a towed line array of unknown shape", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 67, pp. 1451-1454, May, 1978.
5. A. Weiss, and B. Friedlander, "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, 1989.
6. D. E. Wahl, "Towed array shape estimation using frequency-wavenumber data," *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. 18, no. 4, pp. 582-590, Oct. 1993.
7. 조치영, 서희선, 조요한, "방위센서를 이용한 비선형 선배열 형상 추정 기법", 한국음향학회 학술발표대회 논문집, Vol. 19, No. 2(s), pp. 85-88, 2000.

저자 약력

● 조 치 영 (Chee Young Joh)



한국음향학회지 제14권 제5호 참조

● 서 희 선 (Hee Seon Seo)



한국음향학회지 제14권 제5호 참조

● 조 요 한 (Yo Han Cho)



1968년 3월 30일생
1992년 3월: 경남대학교 기계공학과 (석사)
1994년 3월: 국방과학연구소 수중음향센서팀 연구원