

적응 카디오이드 빔 형성을 이용한 좌/우 방위 분리 기법

Left/Right Bearing Discrimination with Adaptive Cardioid Beamforming

손 윤 준*, 천 승 용**, 김 기 만*
(Yoon-Jun Son*, Seung-Yong Chun**, Ki-Man Kim*)

*한국해양대학교 전파공학과, **국방과학연구소

(접수일자: 2003년 6월 5일; 수정일자: 2003년 7월 21일; 채택일자: 2003년 7월 30일)

예인형 선 배열 소나는 구조적인 특성상 배열 축을 중심으로 대칭적인 빔을 형성하기 때문에 탐지된 표적에 대하여 좌/우 방위 구분에 있어 모호성을 드러낸다. 이러한 예인형 선 배열의 좌/우 구분이 모호한 문제점을 해결하기 위하여 고정형 카디오이드 빔을 적용한 방법이 사용되었다. 하지만 고정형 카디오이드 빔을 사용할 경우 약 11° 이내의 영역에서 카디오이드 빔의 후면 이득에 대한 영향을 줄일 수가 없기 때문에 좌/우 분리 성능이 저하된다. 이 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 적응형 카디오이드 빔을 사용하여 후면 빔의 이득을 줄임으로써 예인형 선 배열의 성능을 향상시켰다.

핵심용어: 선 배열, 카디오이드 빔, 좌/우 분리

투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

Single towed line array receiver contains an ambiguity on conjugate bearings because of lacking aperture in transverse direction. To solve the left/right bearing ambiguity of line array receiver this paper proposed using single line array with fixed cardioid beam. Fixed cardioid beam has problem about back beam gain exists for steering beam inherent. Back beam is makes form on direction that is different from actually source so that reduced the performance of left/right bearing discrimination. In this paper, line array with adaptive cardioid beam for resolve problem of back beam gain is proposed. So the proposed method has more improved left/right bearing discrimination than fixed cardioid beam. Simulation results show the performance of the proposed method.

Keywords: Line array, Cardioid beam, Left/right discrimination

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.6)

1. 서론

수중에서 음파 전달 환경은 그 특성이 매우 복잡한 패턴을 갖고 있고 아울러 시시각각 변화한다. 이러한 수중 환경에서 목표물을 찾기 위한 방법으로는 합정 탐재 소나, 예인형 선 배열 등이 있다. 예인형 선 배열은 자함의 소음 영향을 적게 받고 배열 이득 (Array gain), 즉 방위 별로 수신되는 음향 신호 대 잡음비 (SNR)를 향상시켜 원거리 표적 탐지가 가능하다[1,2]. 하지만 예인형 선 배열 역시 몇 가지 문제점을 갖고 있다. 그 가운데 예인형 선 배열 소나는 구조적인 특성상 배열 축을 중심으로 대칭적인 빔을 형성하기 때문에 탐지된 표적에 대하여 수신

단에서는 좌/우 방위 구분에 있어 모호성을 드러낸다. 이러한 예인형 선 배열 문제점, 특히 좌/우 방위 구분을 해결하기 위한 방안으로 최근에는 다중 예인형 선 배열, 카디오이드 (Cardioid) 빔 형성 이론에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[3-5].

선 배열에서 좌/우 구분을 위한 빔 형성 기법은 먼저 선 배열 빔 형성을 한 후 2개의 선 배열 빔 출력에 대해 카디오이드 빔 형성을 하면 좌/우 구분을 위한 빔 패턴을 얻을 수 있다. 카디오이드 빔을 형성하기 위해서는 기본적으로는 2개의 독립된 센서가 수평면에 배열되어야 하지만 예인형 선 배열처럼 축을 중심으로 회전할 가능성이 높은 운용환경에서는 이를 보상할 수 있는 방안도 고려되어야 한다. 이를 위해 3개의 센서를 삼각형 형태로 배치하고 각 센서의 가중상수 값을 조정하는 방법으로 센서 기울어짐을 보상함으로써 수평면에 2개의 센서

책임저자: 김기만 (kimkim@hanara.kmaritime.ac.kr)
E06-791 부산광역시 영도구 동삼동 1번지
한국해양대학교 전파공학과
(전화: 051-410-4423; 팩스: 051-404-3986)

가 존재하는 것과 동일한 효과를 얻도록 하는 방법이 연구되었다[6].

본 논문에서는 현재까지 좌/우 분리 빔 형성을 위한 최적의 방법으로 여겨지는 Woollett이 제안한 카디오이드 빔 형성 이론을 선 배열 빔 형성 기법에 적용하여 표적의 좌/우 방위 구분 문제를 해결하는 것을 대상으로 하였다. 하지만 Woollett이 제안한 카디오이드 빔 형성 이론은 고정형 카디오이드 빔으로써 선 배열 적용에 있어 몇 가지 문제점을 드러낸다. 첫째, 선 배열이 지향하는 방향으로 카디오이드 빔을 지향하지 않기 때문에 선 배열이 가장자리 영역 (End-fire)으로 지향할 경우에는 이득 감소가 발생한다. 일반적으로 좌/우 신호를 분리하기 위해서는 3 dB의 이득 차이가 있어야 가능한데, 가장자리 영역에서는 이득 감소로 인하여 이 조건을 충족시킬 수 없게 된다. 둘째, 카디오이드 빔의 특성상 지향하는 반대 방향, 즉 후면 빔의 이득이 존재한다. 이것은 실제 음원과는 다른 방향에 빔을 형성하므로 좌/우 분리 성능을 저하시키는 원인이 된다. 이에 본 논문에서는 적응형 카디오이드 방법을 이용하여 좌/우 분리 성능을 향상시켰다[7-9]. 시뮬레이션 결과 후면 빔에서 고정형 카디오이드 빔과 비교해서 약 20 dB 정도의 성능 향상이 이루어졌다.

II. 선 배열에서의 좌/우 분리

선 배열 빔 형성 기법은 일정한 간격으로 배열된 센서에 음파가 전달될 때 음원의 방위와 센서의 위치에 따라 발생하는 전달 시간의 지연을 보상하고, 그 신호들에 가중치를 곱한 뒤 모두 합함으로써 최종 출력 값을 얻는다.

선 배열에서 나타나는 좌/우 구분의 모호성은 축과 평행한 평면에 대해서는 배열 개구면에 의한 지향 이득을 얻을 수가 있으나 배열 축과 수직인 평면에 대해서는 배열 개구면이 없기 때문에 발생하게 된다. 이러한 문제점은 두 센서간의 쌍극자 (Dipole) 특성을 이용한 카디오이드 빔을 형성하여 해결할 수 있다. 파장에 비해 간격이 작은 2개의 센서를 이용하여 지향성을 가지는 빔 형성 기법은 그림 1과 같이 센서 간격 d 와, 시간지연 τ 를 변화 시킴에 따라 여러 가지 형태의 빔을 형성할 수가 있다.

그림 1과 같이 센서에 입사하는 평면파에 대한 수식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$E_1(\omega, \theta) = P_0 [1 - \exp\{-j\omega(\tau + d\cos\theta/c)\}] \quad (1)$$

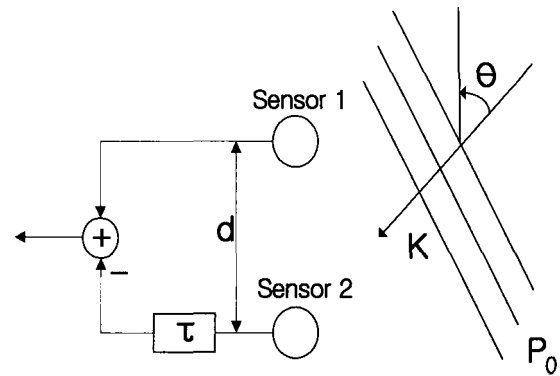


그림 1. 카디오이드 빔 형성 원리
Fig. 1. Principle of cardioid beamforming.

여기서 P_0 는 입사하는 평면파의 진폭을 나타내고, ω 는 각 주파수, c 는 평면파의 속도를 나타낸다. $e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$ 이므로, 만약 여기서 두 센서간의 간격이 아주 작다면, 식 (1)은 다음과 같이 다시 단순화된다.

$$E_1(\omega, \theta) \approx j P_0 \omega (\tau + \frac{d}{c} \cos \theta) \quad (2)$$

선 배열 특성상 나타나는 좌/우 분리의 모호성 문제를 이 카디오이드 빔 형성 기법을 적용하여 해결할 수 있다. 그림 2는 기존의 선 배열 빔 형성 기법에 카디오이드 빔을 적용하여 좌/우 신호를 분리하는 과정을 나타내고 있다.

먼저 특정 지향 방향에 대한 선 배열 빔 출력은 $E(f, \theta)$ 이고, 카디오이드 빔 출력 $E(f, \theta)$ 을 서로 상관시키면 지향 방향과 같은 크기를 갖는 대칭 방향의 이득을 줄일 수가 있게 된다. 여기서 사용한 카디오이드 빔은 고정된 두 빔을 사용하였는데 그것은 90°로 지향하는 빔과 270°로 지향하는 빔이다. 선 배열 빔이 0°~180° 사이로 지향할 경우에는 90°로 지향하는 카디오이드 빔을 적용하여 좌/우 분리하였고, 181°~360°로 지향하는 선 배열 빔에서는 270°로 지향하는 카디오이드 빔을 적용하여 좌/우 분리를 해결한다. 0°의 기준은 어레이 축 평면이다.

III. 적응형 카디오이드 빔을 이용한 좌/우 분리 성능 향상

선 배열 특성에 의해 발생하는 좌/우 구분의 모호성 문제를 앞에서 카디오이드 빔을 적용하여 해결 가능하다는 것을 알았다. 하지만 카디오이드 빔을 적용한다고 모든 방위각에서 좌/우 분리가 가능한 것은 아니다. 그림

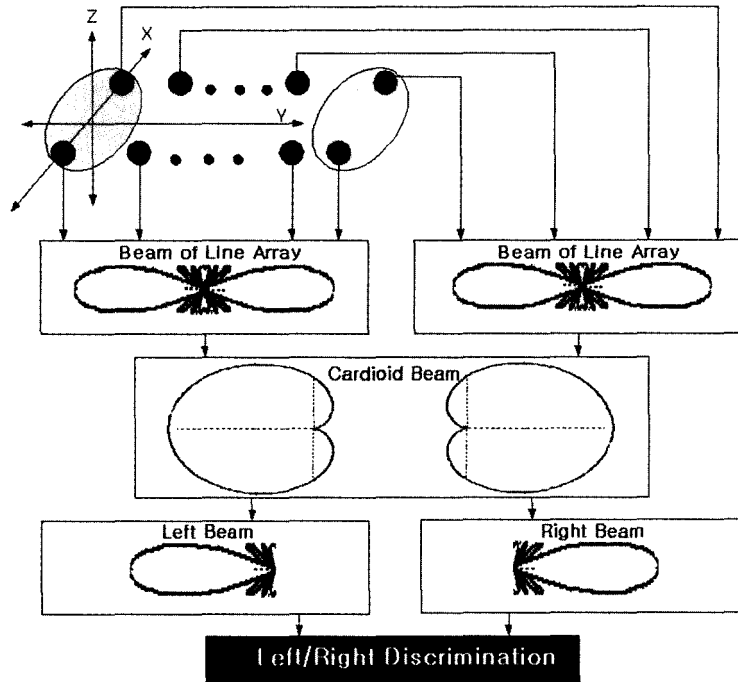
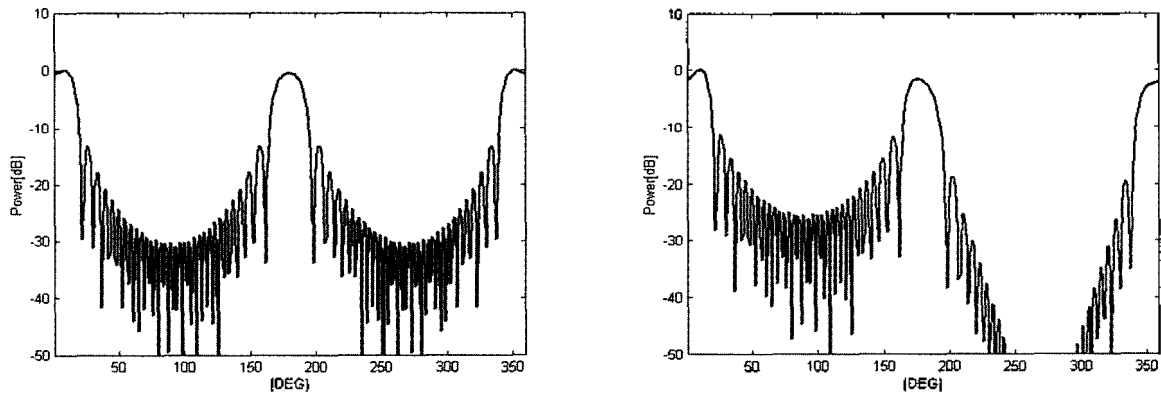


그림 2. 선 배열에서의 좌/우 빔 형성 기법
 Fig. 2. Left/Right beamforming in line array.



(a) 단일 선 배열
 (a) Single line array without cardioid

(b) 고정형 카디오이드를 적용한 선 배열
 (b) Line array with fixed cardioid

그림 3. 9°로 지향한 경우의 빔 패턴
 Fig. 3. Beam pattern for 9° steering.

은 선 배열이 9° 방향으로 지향했을 때 고정형 카디오이드 빔을 적용한 경우로서 (a)는 단일 선 배열의 이득을 나타내고, (b)는 선 배열에 카디오이드 빔을 적용한 후의 빔 패턴을 나타낸다.

일반적인 단일 선 배열의 주파수 영역 빔 출력식은 다음과 같다.

$$B(f, \theta) = \sum_{n=0}^{N-1} X_n(f) \cdot \exp\{-j\omega\tau(\theta)\} \quad (3)$$

여기에서 $X_n(f)$ 는 n 번째 센서의 출력 신호에 대한 주파수 특성을 나타내고, ω 는 각 주파수, $\tau(\theta)$ 는 θ 방향으로의 빔 형성을 위한 시간 지연을 의미한다. 그림 3과 같이 가장자리 영역으로 지향할 경우에는 270° 전후 영역에서 이득은 감소하지만 9° 방향의 대칭 방향인 351° 방향에서의 이득은 카디오이드 빔을 적용한 전과 후의 이득 차이가 거의 나지 않아 좌/우 분리를 하기 위한 조건인 3 dB 차를 만족시키지 않는다. 이와 같은 결과가 나타나는 이유는 지향 방향을 중심으로 카디오이드 빔 폭이 매우 넓

으므로 카디오이드 빔을 적용하더라도 대칭 방향의 이득이 남아 있기 때문이다. 또한 카디오이드 빔 특성상 9° 방향의 후면 방향 빔인 189°에서의 이득이 크게 나타나 이 방향으로 신호가 들어올 경우에는 좌/우 분리 성능을 저하시키는 원인이 된다.

그림 4는 좌/우 분리 가능 영역을 고찰하기 위하여 선배열에 고정형 카디오이드 빔을 각각의 지향 방향에 따라 적용했을 때 주 빔과 대칭 빔과의 이득 차를 나타내고 있다. 그림 4에서 좌/우 분리가 가능한 영역을 가로 실선으로 표시하였는데, 주 빔과 대칭 빔과의 이득 차이가 3 dB 이상이 되어야 하므로 그 범위에 속하는 영역은 약 17°~163°와 197°~343°에서만 가능하게 된다. 이 범위를 벗어난 영역에 대해서는 카디오이드 빔 특성상 좌/우 분리가 불가능한 영역이 된다. 이에 이 범위를 벗어난 영역에 대해서는 좌/우 분리가 불가능하므로 카디오이드 빔 적용의 제한 영역으로 두었다. 그러나 그림 4에서 보여지듯이 카디오이드 빔의 지향 방향에 대한 후면 빔 역시 카디오이드 빔 성능에 크게 영향을 준다.

앞에서 기술한 바와 같이 선배열에 고정형 카디오이드 빔을 적용할 경우, 고정형 카디오이드 빔 특성상 지향 방향에 대한 후면 방향의 빔이 존재한다. 물론 고정형 카디오이드 빔에 사용되는 두 빔 즉, 90°와 270°에서는 후면 방향의 이득이 없기 때문에 후면 빔이 존재하지는 않지만 그 외 영역에서는 이득이 남아 있기 때문에 후면 방향 빔이 존재한다. 이 후면 방향의 빔 역시 실제 음원과 다른 방향에 빔을 형성하게 되므로 신호를 처리하는 수신측에서는 음원 위치 추정과 좌/우 구분에 있어 문제점을 드러내게 된다. 이 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는

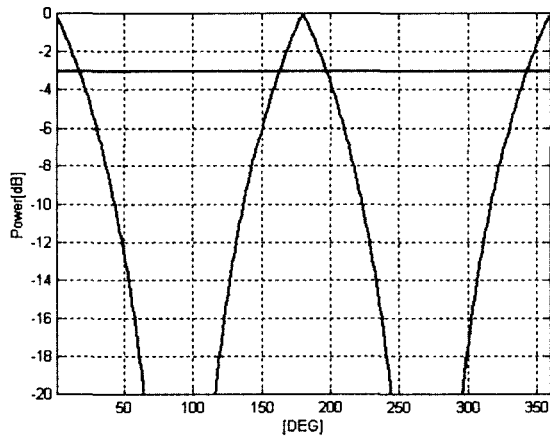


그림 4. 고정형 카디오이드 빔에서의 주 빔과 대칭 빔 사이의 이득 차
Fig. 4. Gain difference between mainbeam and conjugate beam in fixed cardioid.

적응형 카디오이드 빔을 사용하여 후면 방향 빔의 이득을 낮추었다.

그림 5는 본 논문에서 제안한 적응형 카디오이드 빔의 구현 방법을 나타내고 있다. 여기서 $s(t)$ 는 θ 방향의 원거리로부터 센서에 들어오는 입사 신호이고, d 는 두 센서 간의 간격을 나타낸다. k 는 파수, $T(d/c)$ 는 시간 지연을 의미한다. 적응형 카디오이드 빔은 두 센서간의 간격이 $kd \ll \pi$, $wT \ll \pi$ 의 조건을 만족한다면 두 센서간의 간격이 아주 작기 때문에 두 센서에 있는 시간 지연은 동일하다고 볼 수 있다. C_F 는 지향 방향의 카디오이드 빔 출력을 의미하고, C_B 는 지향 방향의 후면 빔에 대한 카디오이드 빔 출력을 뜻한다. β 는 센서 출력의 평균 자승 값을 최적화 하기 위한 상수이다. 그림 5에 있는 저역 통과 필터는 적응형 카디오이드 빔의 출력 값이 미분된 값으로, 이 값은 고역 필터를 통과한 성질을 갖기 때문에 이 부분에 대한 보상을 위해서 사용되는 것이다. 식 (1)을 Euler 공식과 삼각함수 공식을 이용하여 변환하면 주파수 영역에서의 적응형 카디오이드 빔인 C_F 와 C_B 의 출력 식을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$C_F(w, \theta) = 2jS(w) e^{-jwT/2} \sin \frac{kd(1 + \cos \theta)}{2} \quad (4)$$

$$C_B(w, \theta) = 2jS(w) e^{-jwT/2} \sin \frac{kd(1 - \cos \theta)}{2} \quad (5)$$

따라서 입력 스펙트럼 신호 $S(w)$ 에 의한 적응형 카디오이드 빔의 정규화된 출력식은 아래와 같이 정리된다.

$$\left| \frac{Y(w, \theta)}{S(w)} \right| = 2 \left| \sin \frac{kd(1 + \cos \theta)}{2} - \beta \sin \frac{kd(1 - \cos \theta)}{2} \right| \quad (6)$$

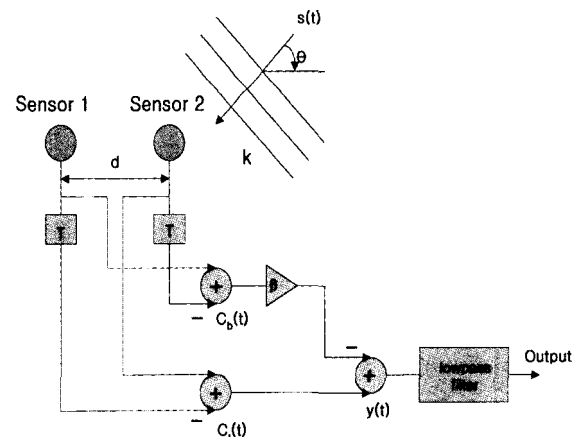


그림 5. 적응형 카디오이드 빔 형성
Fig. 5. Adaptive cardioid beamformer.

식 (6)에서 β 의 값은 적응형 카디오이드 빔의 성능 향상을 좌우하는 중요한 요소이다. 최적화된 β 의 값을 구하기 위한 것으로 최소자승평균 (Least Mean Square) 알고리즘 등이 있다. 2차 방정식의 해를 찾는 방법으로 최적의 β 값을 구하였다. 시간 영역에서의 적응형 카디오이드 빔의 출력 식은 아래와 같다.

$$X(t) = c_f(t) - \beta c_b(t) \tag{7}$$

출력의 파워를 최소로 하는 값을 구하기 위하여 식 (7)을 양변을 제곱하고, 기대치를 취하면 아래와 같다.

$$E[y^2(t)] = \beta^2 R_{cbcb}(0) - 2\beta R_{cfcb}(0) + R_{cfcf}(0) \tag{8}$$

위식에서 $E[\cdot]$ 는 기대치를 뜻한다. 여기에서 $R_{cbcb}(0)$ 은 후면 방향 카디오이드 빔의 자기 상관함수를 의미하고, $R_{cfcf}(0)$ 은 카디오이드 빔의 지향 방향에 대한 자기 상관함수를 나타낸다. 그리고 $R_{cfcb}(0)$ 은 지향 방향과 후면 방향에 대한 상호 상관함수를 의미한다. 따라서 식 (3)의 최소값은 β 가 다음의 값을 가질 때 나타난다.

$$\beta = \frac{R_{cfcb}(0)}{R_{cbcb}(0)} \tag{9}$$

식 (9)의 값은 2차 방정식의 해로서 최소값을 나타내고 항상 양의 값을 가지게 된다.

본 논문에서는 위의 내용들을 선 배열에 적용하여 앞에서 언급한 후면 방향에 대한 빔 이득을 낮추었다. 그림 6의 블럭도는 본 논문에서 제안한 적응형 카디오이드 빔 형성기를 나타낸다.

여기에서 $B(f, \theta)$ 는 단일 선 배열의 출력을 나타내고, $DF(f, \theta)$ 는 지향 방향에 대한 카디오이드 빔 출력, $DB(f, \theta)$ 는 후면 방향의 카디오이드 빔 출력, β 는 최적 계수 값을 의미한다.

본 논문에서는 지향 방향의 카디오이드 빔 출력인 $DF(f, \theta)$ 를 90° 와 270° 의 고정형 카디오이드 빔을 사용하여 선 배열이 $1^\circ \sim 180^\circ$ 의 범위각으로 지향하게 되면 90° 의 카디오이드 빔을 사용하고, $181^\circ \sim 360^\circ$ 로 지향하게 되면 270° 의 카디오이드 빔을 선 배열의 출력 값과 서로 상관시켰다. 후면 방향에 대한 카디오이드 빔 출력인 $DB(f, \theta)$ 는 0° 와 180° 의 고정형 카디오이드 빔을 사용하여 선 배열이 $270^\circ \sim 90^\circ$ 로 지향하게 되면 180° 의 카디오이드 빔을 택하고, $90^\circ \sim 270^\circ$ 로 선 배열이 지향하게 되면 0° 의 카디오이드 빔을 사용하여 서로 상관시켰다.

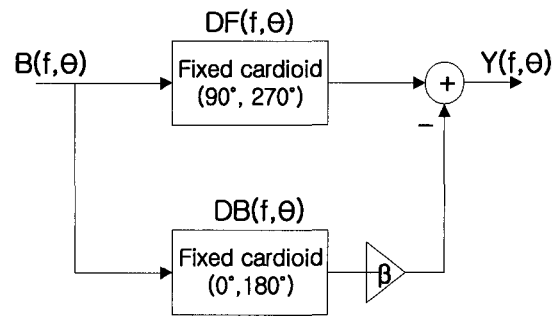


그림 6. 제안된 방법의 적응형 카디오이드 빔 형성
Fig. 6. Adaptive cardioid beamformer of proposed method.

그림 6을 수식으로 나타내면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$Y(f, \theta) = [B(f, \theta) * DF(f, \theta)] - \beta [B(f, \theta) * DB(f, \theta)] \tag{10}$$

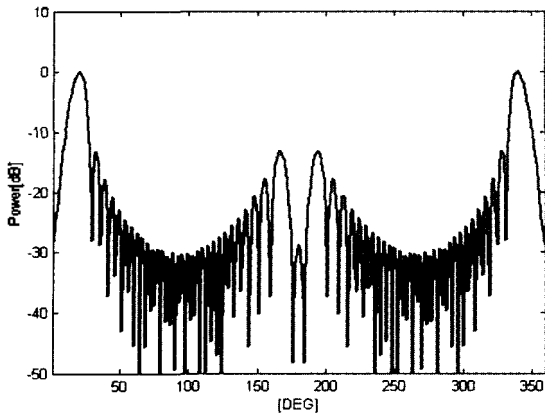
여기에서 $B(f, \theta)$ 는 단일 선 배열의 출력을 나타내고, *는 상호 상관 (Correlation)을 의미한다.

IV. 시뮬레이션 및 결과 고찰

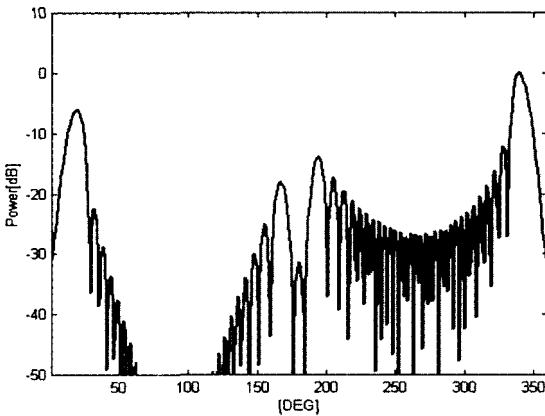
제안된 적응형 카디오이드 빔을 갖는 선 배열의 성능을 고찰하기 위해 시뮬레이션을 통해 그 적용성을 검증하였다. 시뮬레이션은 고정형 카디오이드 빔을 선 배열에 사용한 경우와 적응형 카디오이드 빔을 선 배열에 적용한 경우로 나타내었다. 전체적인 시뮬레이션 환경은 다음과 같다. 신호 주파수는 400 Hz, 선 배열의 센서 수는 32×2 개, 선 배열의 센서 간격은 반파장으로 두었고, 카디오이드 빔을 형성하기 위해 2개의 센서를 사용하였고, 두 센서의 간격은 50 mm로 두었다.

그림 7은 선 배열이 340° 로 지향했을 때, 고정형 카디오이드 빔을 적용한 경우의 시뮬레이션 결과이다. (a)는 340° 로 지향하는 단일 선 배열을 나타내고, (b)는 270° 로 지향하는 고정형 카디오이드 빔을, (c)는 적응형 카디오이드 빔을 적용한 결과로써 270° 로 지향하는 카디오이드 빔을 사용하여 지향 방향의 이득을 유지하고, 180° 방향의 카디오이드 빔을 적용하여 후면 방향의 빔 이득을 줄였다. 340° 로 지향할 경우에는 고정형 카디오이드 빔과 적응형 카디오이드 빔 모두 지향 방향의 이득과 대칭 방향 빔의 이득 차가 3 dB 이상 차이를 보이므로 좌/우 분리가 가능하다. 또한 후면 방향의 이득 역시 크게 나타나지 않는 것을 볼 수가 있다.

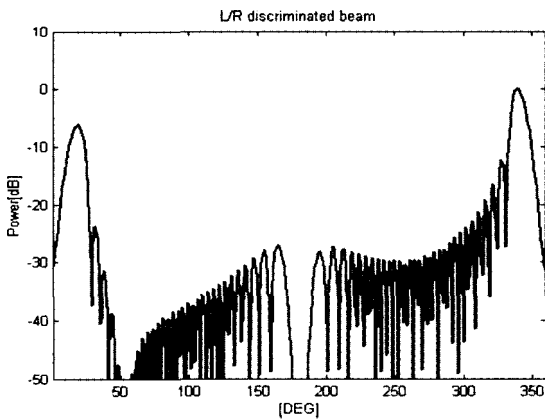
그림 8은 본 논문에서 제한 영역으로 두었던 방향으로



(a) 단일 선 배열
(a) Single line array



(b) 고정형 카디오이드 빔을 적용한 단일 선 배열
(b) Single line array with fixed cardioid beam



(c) 적응형 카디오이드 빔을 적용한 단일 선 배열
(c) Single line array with adaptive cardioid beam

그림 7. 340° 지향의 카디오이드 빔
Fig. 7. Cardioid beam of 340° steering.

선 배열이 지향할 경우, 고정형 카디오이드 빔의 후면 빔 이득과 적응형 카디오이드 빔의 후면 빔에 대한 이득을 나타내고 있다. 선 배열이 1°로 지향하게 되면 그에 해당되는 후면 빔은 181°가 되고 10°로 지향하게 되면 후면

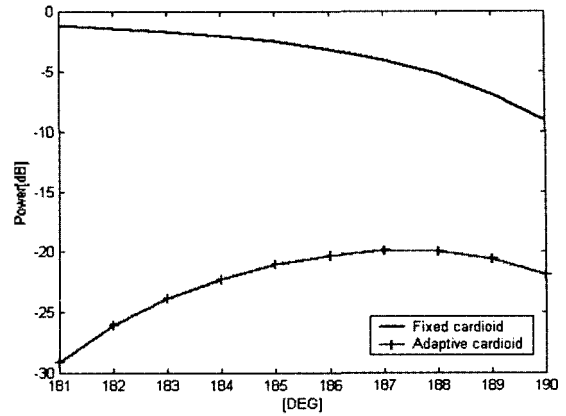


그림 8. 1° ~ 10°로 지향했을 때, 후면 빔에 대한 성능 비교
Fig. 8. Performance comparison for back beam when is steering from 1° to 10°.

빔은 190°가 된다. 선 배열의 지향 방향이 1°일 때가 이득 차이가 가장 크고, 10°방향으로 갈수록 이득 차이가 줄어드는 것을 볼 수가 있다. 이것은 좌/우 분리가 가능한 영역으로 선 배열이 지향함으로 해서 고정형 카디오이드 빔이나 적응형 카디오이드 빔이 후면 방향에서의 이득이 줄어들음을 보인다. 고정형 카디오이드 빔과 제안된 적응형 카디오이드 빔의 이득차는 약 20 dB 정도의 차이를 보였다.

V. 결론

본 논문에서는 예인형 선 배열 소나가 갖고 있는 구조적인 특징인, 배열 축을 중심으로 대칭적인 빔을 형성하기 때문에 탐지된 표적에 대하여 수신측에서는 좌/우 방위 구분에 있어 모호성을 드러내는 문제점을 다루었다. 이러한 선 배열의 좌/우 구분 문제를 해결하기 위하여 기존에는 고정형 카디오이드 빔을 적용함으로써 문제를 해결하였다. 하지만 선 배열이 가장자리 영역으로 지향할 경우에는 카디오이드 빔을 적용하더라도 지향 방향의 빔 이득과 대칭 방향의 빔 이득 차이가 좌/우 구분의 가능치인 3 dB를 넘지 않기 때문에 분리가 가능하지 않았다. 이러한 이유는 카디오이드 빔의 특성상 지향하는 방향에 대하여 빔 폭이 아주 넓기 때문에 가장자리 영역으로 선 배열이 지향하는 경우에는 이득 차이가 거의 없으므로 발생하는 문제이다. 또한, 대칭 방향의 이득 문제뿐만 아니라 지향 방향에 대한 후면 빔의 이득이 가장자리 영역에서는 높게 나타나기 때문에 좌/우를 구분하는 성능이 많이 저하된다. 본 논문에서는 이 후면 방향의 이득 문제를 고정형 카디오이드 빔이 아닌 적응형 카디오이드 빔을 사용함으

로써 해결하였다. 후면 빔의 이득에 대한 성능 문제를 비교하기 위하여 본 논문에서는 고정형 카디오이드 빔과 적응형 카디오이드 빔을 사용하여 분석하였으며, 적응형 카디오이드 빔을 선 배열에 적용한 경우에는 이득의 변화를 보이지 않았던 고정형 카디오이드 빔과는 달리 후면 빔의 이득이 15 dB~20 dB 정도로 낮아져 성능 향상을 나타내었다.

추후 연구 과제로 본 논문에서 제한한 좌/우 구분 영역에 대한 해결 방법과 카디오이드 빔의 또 다른 방법인 3중 배열에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다. 또한 실제 해양 환경에서 적용하여 그 결과를 검토하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 수중음향 특화연구센터의 연구비 지원으로 이루어졌습니다 (과제번호: UA-22).

참고 문헌

1. R. O. Nilsen, *Sonar Signal Processing*, Boston, MA: Artech House, 51-94, 1991.
2. G. C. Carter, "Time delay estimation for passive sonar signal processing," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal processing*, 29 (3), 463-470, 1981.

3. 김윤수, 홍우영, 오원천, "비선형 배열 빔형성에 의한 예인 선 배열 센서의 표적 좌우 분리 기법," *13th Underwater Acoustics Symposium Proceedings*, 42-48 1998.
4. R. A. Wagstaff, "Horizontal directionality estimation considering array tilt and noise field vertical-arrival structure," *J. Acoust. Soc. Am.*, 67 (4), 1287-1294, 1980.
5. 양인식, 김기만, 윤대희, 오원천, 도경철, "이중 선 배열을 이용한 빔 영역 합성 처리," *한국음향학회지*, 20 (6), 82-86, 2001.
6. S. P. Beerens, R. Been, J. Grone, E. Noutary and Doisy, "Adaptive port-starboard beamforming of triplet arrays," *UDT Pacific 2000*, Sydney, Australia, 63-68, 2000.
7. B. Widrow, S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*, Prentice Hall, 1985.
8. R. A. Monzingo, and T. W. Miller, *Introduction to Adaptive Arrays*, Wiley, New York, 1980.
9. G. W. Elko and A. T. N. Pong, "A steerable and variable first-order differential microphone array," *IEEE ICASSP*, 223-226, 1997.

저자 약력

● 손 윤 준 (Yoon-Jun Son)

2000년 8월: 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업 (학사)
 2000년 5월~2001년 6월: 대우정밀(주) 연구원 근무
 2001년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
 ※ 주관심분야: 소나 신호처리

● 천 승 용 (Seung-Yong Chun)

1988년 2월: 경북대학교 전자공학과 졸업 (학사)
 1990년 2월: 경북대학교 전자공학과 졸업 (석사)
 1990년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

● 김 기 만 (Ki-Man Kim)

한국음향학회지 제22권 제5호 참조