

# 좌우분리 역빔형성 기법에 의한 센서 축방향의 방위탐지 성능 향상

## Enhancement of Bearing Estimation Performance at Endfire Using Cardioid Inverse Beamforming

강 성 현\*, 김 의 준\*, 윤 원 식\*\*  
(Sung-Hyoun Kang\*, Eui-Jun Kim\*, Won-Sik Yoon\*\*)

\*LG 이노텍 연구소, \*\*아주대학교 전자공학부

(접수일자: 2000년 7월 13일; 수정일자: 2000년 11월 25일; 채택일자: 2000년 11월 25일)

실제 해양에서 선배열 센서에 수신되는 표적신호의 좌·우 구분된 도래방위를 정확히 예측하기 위해 역빔형성 (Inverse beamforming) 알고리즘을 도입하여 이론적 고찰 및 모사에 의한 방위탐지 성능분석을 수행하고, 고전적인 좌우분리 빔형성 (Cardioid beamforming) 기법에 역빔형성 알고리즘을 적용한 좌우분리 역빔형성 기법을 고안하여 성능분석을 수행하였다. 이상적인 조건하에서 선배열 역빔형성기는 고전 빔형성기에 비해 배열이득이 3dB 이상 향상되고, 빔폭도 고전빔형성기에 의한 빔폭의 0.68배 정도로 성능이 향상됨을 입증하였다. 좌우분리 역빔형성 기법은 고전 알고리즘에 의한 탐지성능에 비해 탐지의 정확도, 분해능의 탐지성능이 우수함을 모사에 의해 입증하였고, 특히, 표적 기동시 센서 축방향에 대한 탐지성능이 고전 알고리즘에 비해 우수함을 입증하였다.

핵심용어: 좌우분리, 심장형 곡선 (Cardioid), 좌우현 (Port/Starboard), 방향성, 역변환 (Inverse)

투고분야: 음향 신호처리 분야 (1.2)

In order to detect the precise port/starboard direction of arrival of target signal in real noisy ocean environments, Inverse beamforming (IBF) algorithm is surveyed theoretically and the detection performances of IBF are analyzed with simulations. Cardioid Inverse beamforming algorithm was proposed for port/starboard discrimination and the performance was studied with simulations. It is shown that IBF has a 3dB array gain advantage over Conventional beamforming (CBF) under ideal conditions. This 3 dB advantage is proven theoretically and illustrated with simulations. The fact that the IBF beamwidth is narrower than the CBF beamwidth by a factor of 0.68 proves the performance of detection and spatial resolution improvement. Comparing the simulation results of Cardioid Inverse beamforming and Conventional Cardioid beamforming, it is shown that Cardioid Inverse beamformer has enhanced performance in minimum detection level, detection accuracy and resolution. Due to the results of moving target bearing detection test in endfire, it is shown that Cardioid Inverse beamformer has better performance, comparing the Conventional Cardioid beamformer.

Key words: Cardioid, Port/starboard, Directionality, Inverse beamforming

Subject classification: Acoustic signal processing (1.2)

### I. 서 론

선배열 센서에 수신된 신호의 도래방위와 신호들간의 상관관계를 나타내는 식 (1)로 기술된 적분방정식은 1970년대 초반에 역빔형성에 대한 해석을 시작으로 많은 연구가 진행되고 있다.

$$C(j, k, f_i) = \int_0^\pi N(f_i, \theta, \phi) \cdot e^{i k \cdot (\vec{r}_j - \vec{r}_k)} d\theta \quad (1)$$

$C(j, k, f_i)$  : 주파수 bin  $i$ 에서 선배열 센서  $j$ 와  $k$ 간의 공분산 행렬 요소

$N(f_i, \theta, \phi)$  : 도래방위  $\theta$ 와 주파수 bin  $i$ 의 함수로써 평면파 신호의 밀도

$\vec{r}_j$  : 선배열 센서  $j$ 의 위치 벡터

$\vec{r}_k$  : 선배열 센서  $k$ 의 위치 벡터

책임저자: 강성현 (shkanga@mail.lginmotk.com)  
LG 이노텍 연구소 연구 6그룹  
449-910 경기도 용인시 구성면 박북리 148-1  
(전화: 031-288-9342; 팩스: 031-285-0199)

$\mathbf{k}$ : 입사신호 벡터

역빔형성 알고리즘은 선배열 센서에 수신된 신호들로 구성된 공분산 행렬로부터 식 (1)의 역변환 (inverse)을 수행하여 신호들의 도래방위를 예측하는 알고리즘으로, 1970년대 초반에 수행된 초기연구에서는 적분방정식의 역변환에 의해 식 (1)의 해를 구하는 과정에 있어서, 신호공간에서 불연속적으로 관측된 공간적 상관 (spatial correlation)에 관련된 최소자승 방정식의 해가 음수로 발생하는 ill-conditioning의 문제에 의해, 식 (1)의 해를 구하는 것은 수학적으로 부적합한 것으로 연구되어 실제 선배열 시스템에 역빔형성 알고리즘을 적용하기에는 많은 제약이 수반되었다. 그후로도 역빔형성의 처리과정에서 발생하는 ill-conditioning 문제를 해결하기 위한 많은 연구가 진행되었으며, 선배열 센서 쌍들의 separation에 대해 공간적 상관이 연속인 것으로 가정하고 역빔형성 적분방정식을 역변환하여 연속해를 구하고, 이 연속적인 해를 불연속적으로 근사화하여, 실제 선배열 시스템에 적용할 수 있는 근사적인 해[1]를 구하였다. 이 과정으로부터 구해진 해에 대해서는 ill-conditioning 문제가 해결되고, 서로 상관된 다중경로 신호의 영향을 배제하기 위해 다른 방향으로부터 도래하는 신호들은 상관되지 않는다는 가정 이외에는 신호공간에 대한 선행 정보가 요구되지 않으며, 퓨리에 급수가 의미하는 것처럼 평면파 신호 밀도의 예측에 대해 최소자승오차를 최소화[2,3]하게 된다. 역빔형성의 해는 신호 대 잡음비가 상대적으로 높은 신호로부터 신호의 도래방위 분해능의 개선을 목적으로, 에너지가 낮은 주파수방위 cell의 에너지를 왜곡시키는 고분해능 (high-resolution) 알고리즘이나 적응 (adaptive) 알고리즘 [4,5]을 사용하지 않고 신호공간의 공간적 상관도로부터 직접 평면파 신호 밀도를 예측한다.

고전적 방법에 의한 좌우분리 (port/starboard) 빔형성 [6,7] 기법은 3중 선배열 센서를 이용하여 빔형성을 수행하므로써 1차원 선배열 빔형성시 발생하는 신호 도래방위의 좌·우 ambiguity 문제를 해결하도록 제안된 알고리즘으로 표적의 좌우의 구분은 가능하나 좌우분리 기중상수와 고전 선배열 빔형성 알고리즘의 한계적 성능에 의해 센서 축방향의 빔형성에 탐지성능이 저하되는 결과를 보인다.

본 연구에서는 역빔형성 알고리즘이 고전빔형성 알고리즘에 비해 3 dB의 배열이득 향상과 탐지 분해능이 향상됨을 이론적으로 고찰하였고, 시뮬레이션을 통해 성능을 검증 및 분석[5]하였다. 빔형성의 후처리 과정으로 센서 축방향의 표적 탐지 성능을 향상시키기 위하여 좌우분리 역빔형성 기법을 제안하고, 그 성능을 고전적 방법에 의한 결과와 비교 분석하여 탐지성능이 개선됨을 입증하였다.

## II. 이론적 배경

### 2.1. 역빔형성

방위각  $\theta$ 와 고각  $\phi$ 로부터 소음이 포함된 신호가 도래

하는 신호공간내에 놓여진  $M$ 개의 센서로 구성된 선배열 센서의 출력으로부터 많은 2차 정보가 구해질 수 있다. 그러나 신호공간의 방향성  $N(f, \theta, \phi)$ 의 예측을 위한 각 센서 쌍의 cross-spectral function  $G_{kj}(f)$ ,  $1 < k, j < M$ 의 matrix 외에 각 센서의 출력에 대한 다른 정보들은 불필요하다. 신호공간의 directionality  $N(f, \theta, \phi)$ 와 cross-spectral function  $G_{kj}(f)$ 의 관계를 기술하기 위해,  $(\theta, \phi)$ 에 중심을 둔 solid angle  $d\phi d\theta \sin \theta$ 에 대한 전력 밀도 스펙트럼을 구하면

$$d\theta d\phi \sin \theta N(f, \theta, \phi) \quad (2)$$

으로 기술된다.  $k$ 번째 선배열 센서에 평면파 신호가 도달하기까지의 소요시간이  $\tau_k(\theta, \phi)$ 이면, 이 센서에 신호가 도달되는데 적용되는 전달함수는

$$\exp\{-i2\pi f \tau_k(\theta, \phi)\} \equiv H_k(f, \theta, \phi) \quad (3)$$

이 된다. 이때, 식 (2)에 의해 전방향성의 특성을 갖는  $k$ 와  $j$ 번째 센서 출력에 대한 cross spectrum은

$$\begin{aligned} d\theta d\phi \sin \theta N(f, \theta, \phi) H_k(f, \theta, \phi) H_j^*(f, \theta, \phi) \\ = d\theta d\phi \sin \theta N(f, \theta, \phi) \\ \times \exp\{-i2\pi f [\tau_k(\theta, \phi) - \tau_j(\theta, \phi)]\} \end{aligned} \quad (4)$$

으로 주어진다. 다른 방향으로부터 도래되는 소음들은 상관성이 없는 것으로 가정하면,  $k$ 와  $j$ 번째 센서 출력에 대한 cross spectrum  $G_{kj}(f)$ 은 모든 angular space에 대한 성분 (4)의 합으로 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} G_{kj}(f) = \int_0^\pi d\theta \int_{-\pi}^\pi d\phi \sin \theta N(f, \theta, \phi) \\ \times \exp\{-i2\pi f [\tau_k(\theta, \phi) - \tau_j(\theta, \phi)]\} \\ \text{for } 1 < k, j < M \end{aligned} \quad (5)$$

$\sin \theta N(f, \theta, \phi)$ 는 단위 solid angle당 전력으로, 평면파 신호 밀도이다. 즉,  $\theta$ 와  $\phi$ 에 대한  $\sin \theta N(f, \theta, \phi)$ 의 이중적분은 주파수  $f$ 에서 총 수신된 전력밀도이다.

모든  $k, j$ 에 대해, 식 (5)는 선배열의 각 센서로부터  $N(f, \theta, \phi)$ 에 대한 총 정보를 내포한다. 문제는  $[G_{kj}(f)]$ 의 측정으로부터  $N(f, \theta, \phi)$ 를 예측하는 것이다. 모든  $k$ 에 대해  $G_{kk}(f) = G_{11}(f)$ 이고,  $G_{kk}(f) = G_{kk}^*(f)$ 이며, 성분  $i, j$ 와  $i', j'$ 이 모든  $\theta, \phi$ 에 대해  $\tau_i - \tau_j = \tau_{i'} - \tau_{j'}$ 인 관계를 만족하면 식 (5)는 신호공간이 공간적으로 균일한 것으로 가정될 경우,  $G_{ij}(f) = G_{i'j'}(f)$ 이 성립하므로 모든  $[G_{kj}(f)]$ 가 독립된 정보를 갖지는 않는다. 최적의 예

측방법은 입력으로 행렬  $[G_k(f)]$ 를 받아들이고, 그 출력으로  $N(f, \theta, \phi)$ 을 예측해야 한다. 이런 과정으로부터 해를 구하는 것이 역방향성이다.

2.2. 역방향성 Integral Equation의 해

모든 가능한 선배열 센서 쌍의 separation과 방향에 대해 신호공간의 공간적 상관도를 알고있는 경우, 식 (5)로 주어진 적분방정식을 역변환하여 해를 구한다. 먼저,

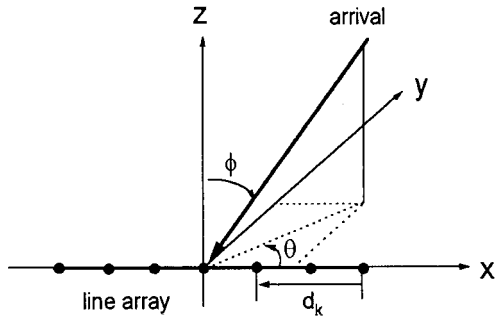


그림 1. 수평 선배열 센서 시스템의 구조  
Fig. 1. Schematic diagram of horizontal line array system.

연속적으로 분포된 선배열 센서 쌍들에 대한 이론적인 해를 구한 후, 실제 선배열을 구성하는 센서 쌍들로부터의 spatial correlation을 사용하여 불연속적인 근사해를 구할 수 있다. 이 장에서는 수평 선배열 센서 시스템에 대한 해를 구한다. 선배열 센서는 그림 1과 같이  $\theta = 0$ 인 축에 놓인 것으로 가정한다.  $d_k$ 가 임의의 기준센서로부터  $k$  번째 선배열 센서까지의 길이라면, 신호의 도달시간은

$$\tau_k(\theta, \phi) = (d_k/c)\cos \theta \quad \text{for } 1 < k < M \quad (6)$$

로 기술된다.  $\theta = 0$ 과  $\pi$ 는 선배열의 endfire이고,  $c$ 는 음속이다. 식 (5)와 (6)으로부터

$$\begin{aligned} G_k(f) &= \int_0^\pi d\theta \int_{-\pi}^\pi d\phi \sin \theta N(f, \theta, \phi) \times \exp\left\{-i2\pi f \frac{d_k - d_1}{c} \cos \theta\right\} \\ &= \int_0^\pi d\theta \sin \theta \exp\left\{-i2\pi f \frac{d_k - d_1}{c} \cos \theta\right\} \times \bar{N}(f, \theta) \end{aligned} \quad \text{for } 1 < k, j < M \quad (7)$$

인 관계가 구해지고, 적분된 신호공간의 방향성은 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{N}(\theta, f) = \int_{-\pi}^\pi d\phi N(f, \theta, \phi) \quad (8)$$

그림 1에서 균일하게 분포된 선배열에 대해  $d_k = kd$ ,

for  $1 < k < M$  로 기술될 수 있다. 여기서  $d$ 는 선배열 센서간의 간격이다. 이때 (7)식은

$$\begin{aligned} G_k(f) &= \int_0^\pi d\theta \sin \theta \times \exp[-i\alpha(k-j)\cos \theta] \bar{N}(f, \theta) \quad (9) \\ &= \int_{-1}^1 du \exp[-i\alpha(k-j)u] \times \bar{N}[f, \cos^{-1}(u)] \end{aligned}$$

로 기술되며, 여기서  $\alpha = \pi(ff_0)$ ,  $f_0 = c/2d$ ,  $u = \cos \theta$  이고,  $f_0$ 는 선배열의 임계 주파수 (design frequency) 이다. 여기서, 편의상 다음과 같이 표기를 변환한다.

$$G(k-j) = \int_{-1}^1 du \exp[-i\alpha(k-j)u] B(u) \quad (10)$$

$$B(u) = \begin{cases} \bar{N}[f, \cos^{-1}(u)], & \text{for } -1 < u < 1 \\ 0, & \text{for } -1 < u < 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$C(p) = \int_{-1}^1 du \exp(-iapu) B(u) \quad (12)$$

식 (12)에서 주어진 공간적 상관도  $C(p)$ 는  $|k| < M$ 인 정수에서 뿐 아니라 모든 연속적인  $p$ 에 대해 성립하는 것으로 생각하자. (12)식의 양변에  $\exp(iapu')$ 를 곱하고, 모든  $p$ 에 대해 적분을 취하면

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^\infty dp \exp(iapu') C(p) &= \int_{-\infty}^\infty dp \exp(iapu') \int_{-1}^1 du \exp(-iapu) B(u) \\ &= \int_{-1}^1 du B(u) \int_{-\infty}^\infty dp \exp(iap(u-u')) \\ &= \begin{cases} \frac{2f_0}{f} B(u), & \text{if } -1 < u < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

이 구해지며, 방향성은 다음 식으로 기술된다.

$$\begin{aligned} B(u) &= \frac{f}{2f_0} \int_{-\infty}^\infty dp \exp(iaup) C(p) \quad (14) \\ &\text{for } -1 < u < 1 \end{aligned}$$

선배열에서 각 센서의 separation이 연속적으로 주어진 경우의 방향성을 나타내는 식 (14)을 일정한 간격으로 배열된  $M$ 개의 센서로 구성된 수평선배열에 대해 불연속화하면 실제 선배열 시스템에 적용할 수 있는 해가 구해진다.

$$B_{in}(\theta, f) = \frac{1}{2M-1} \sum_{p=-M}^{M-1} C(p, f) e^{i2\pi d \cos \theta / c} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} C(p, f) &= \frac{1}{M-|p|} \sum_{n=0}^{M-1-p} C(n, n+p, f), \quad (16) \\ &0 < p < M-1 \end{aligned}$$

여기서

- $f$  : 주파수 (Hz),
- $c$  : 음속,
- $d$  : 청음기간의 간격,
- $b$  : 청음기 쌍의 separation,  
 $j-k, j, k=1, 2, \dots, M,$
- $\theta$  : 방위각,
- $C(b, f)$  : Toeplitz 공분산 행렬 이다.

### III. 이론적 성능분석

#### 3.1. 배열 이득

$M$ 개의 등간격으로 배열된 선배열 센서에 대해 고전 빔형성기에 의한 신호공간의 방향성[5]은

$$B_{cbf}(\theta, f) = \frac{1}{M} \sum_{p=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \left(1 - \frac{|p|}{M}\right) C(p, f) e^{2\pi f d \cos \theta / c} \quad (17)$$

로 기술되며, 공분산 행렬은 식 (16)에 의해 주어진다. 식 (15)와 식 (17)로부터, 이상적인 경우에서의 고전빔형성기의 배열이득 (AG)은

$$AG_{cbf} = 10 \log M \quad (18)$$

으로 주어지고, 역빔형성기에 대한 배열이득은

$$AG_{inv} = 10 \log (2M - 1) \quad (19)$$

으로 주어지므로, 역빔형성기는 고전빔형성기에 비해 3dB 성능이 향상됨을 알 수 있다.

$$\frac{AG_{inv}}{AG_{cbf}} = 10 \log \left( \frac{2M-1}{M} \right) \approx 3dB \quad (20)$$

따라서 소음과 신호에 대한 역빔형성기의 배열이득과 최소 탐지 준위는 고전빔형성기에 대해 3dB 향상된다.

#### 3.2. Beamwidth

그림 2는 두 방법에 의해 예측된 주파수 3600Hz인 신호에 대한 broadside 빔 패턴이다. 빔 패턴은 신호의 도래방향에 대해 규격화되었고, 실제로 배열이득의 성능향상은 역빔형성기의 빔 패턴 곡선의 아래 면적이 고전빔형성기에 의한 빔 패턴 곡선의 아래면적보다 대략 3dB 정도 적음을 볼 수 있다. 이것은 배열 소음이득 (array noise gain)에 의한 배열이득의 성능향상으로써, 소음이 적음을 의미한다. 그림 2는 linear scale로 도시하였는데, 그 이유는 역빔형성기에 의한 빔 패턴의 일부가 음의 값을 갖기 때문이다. 역빔형성 빔 패턴의 빔폭은 고전빔형성기에 의한 빔폭의 대략 68% 정도로 좁으며, 빔 패턴의 main lobe 외부의 일부영역에서 음의 값을 보이는데, 이

것은 intensity가 음임을 의미한다. 음값의 intensity가 초래되는 원인은 푸리에 급수의 기본 특성에 기인하는

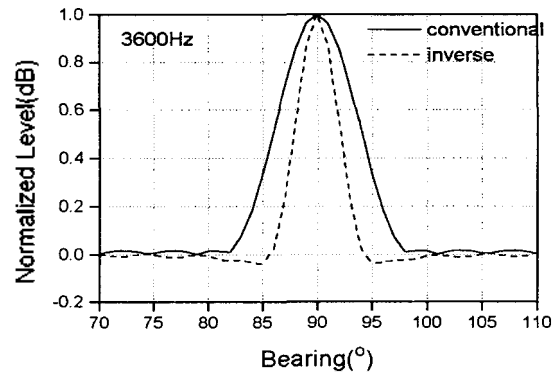


그림 2. 역빔형성기와 고전빔형성기에 의한 Broadside 빔패턴 (도래신호의 주파수 : 3600Hz)

Fig. 2. Normalized beam pattern of signal at broadside arrival signal formed by Inverse beamformer and Conventional beamformer (frequency of signal : 3600Hz).

현상이다. 임의의 연속함수가 주어졌을 때, 푸리에 급수는 임의의 연속함수와 직교특성을 갖는 sine와 cosine 함수들의 한정된 급수간의 최소자승에 의해 오차를 최소화하려는 특성을 갖는다. 일반적으로 한정된 수의 푸리에 급수항을 사용한 Dirac delta function의 푸리에 급수의 예측은 음이 될 수 있다는 사실이 잘 알려져있다. 즉, 평면파 신호 밀도는 모든 방위각과 고각에서 양의 값이지만 최소자승의 견지에서 오차를 최소화하는 푸리에 급수의 예측에 근거한 역빔형성기에 의해 예측된 평면파 신호 밀도는 음이 될 수 있다.

### IV. Simulation에 의한 성능분석

그림 3은 선배열의 좌·우 도래방위를 구분하기 위해 Thomson사에서 고안된 좌·우 방위구분을 위한 선배열 센서 시스템의 개략도이다.

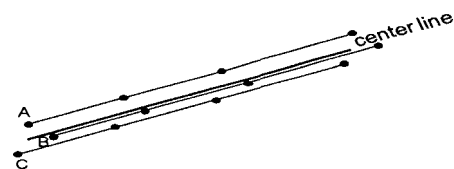


그림 3. 표적도래방위의 좌우 구분을 위해 도입된 3중 선배열 SONAR의 구조도

Fig. 3. Schematic diagram of triplet line array system for port/starboard discrimination.

역빔형성의 성능을 분석하기 위해 그림 3에 도시된 형태의 센서로 구성된 3중 선배열 시스템에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4와 그림 5는 각각 Cardioid 역빔

형성과 고전 좌우분리빔형성에 의한 빔 패턴을 보여준다. 앞에서 언급된 것처럼 역빔형성에 의한 빔 패턴은 고전 빔형성에 대한 것보다 대략 3.5dB 이상의 탐지 성능 향상을 보임을 알 수 있고, 특히 역빔형성의 결과에서는 정확한 방위 탐지 결과를 보이는 데 반해, 고전빔형성의 결과는 0°에서 30° 부근까지 방위탐지가 정확하지 않음을 보인다. 특히 센서의 축방향 근처에서는 상당히 큰 방위 탐지 오차 결과를 보인다. 그림 6은 신호대 잡음비가 -9dB인 경우의 broadside에 대한 두 결과의 intensity level을 보여준다. Cardioid 역빔형성의 결과는 음의 intensity를 갖기 때문에 편의상 intensity가 0보다 큰 경우에 대한 결과를 도시하였다. 식 (20)에서 언급된 것처럼, 주 탐지

방위에 대해서는 역빔형성기에 의한 결과가 고전빔형성기에 의한 결과에 비해 대략 3.5dB 이상의 성능향상을 보이며, 대칭 방위에 대해서는 고전적 빔형성기의 경우에는 -40dB를 나타내나 역빔형성기에 의한 결과는 음의 intensity를 나타낸다. 그림 7은 신호 대 잡음비의 변화에 따른 두 빔형성기에 의한 성능을 비교한 결과이다. 시뮬레이션은 3600Hz인 신호가 60°로 도래하는 경우에 대해 수행하였으며 신호대 잡음비는 0dB에서 -10dB까지의 Gaussian noise를 변화시켜 방위탐지 성능을 분석하였다. 두 경우 모두 신호 대 잡음비의 감소에 따라 intensity가 다소 감소되나, 역빔형성기에 의한 방위탐지 성능이 상당히 우수함을 볼 수 있다.

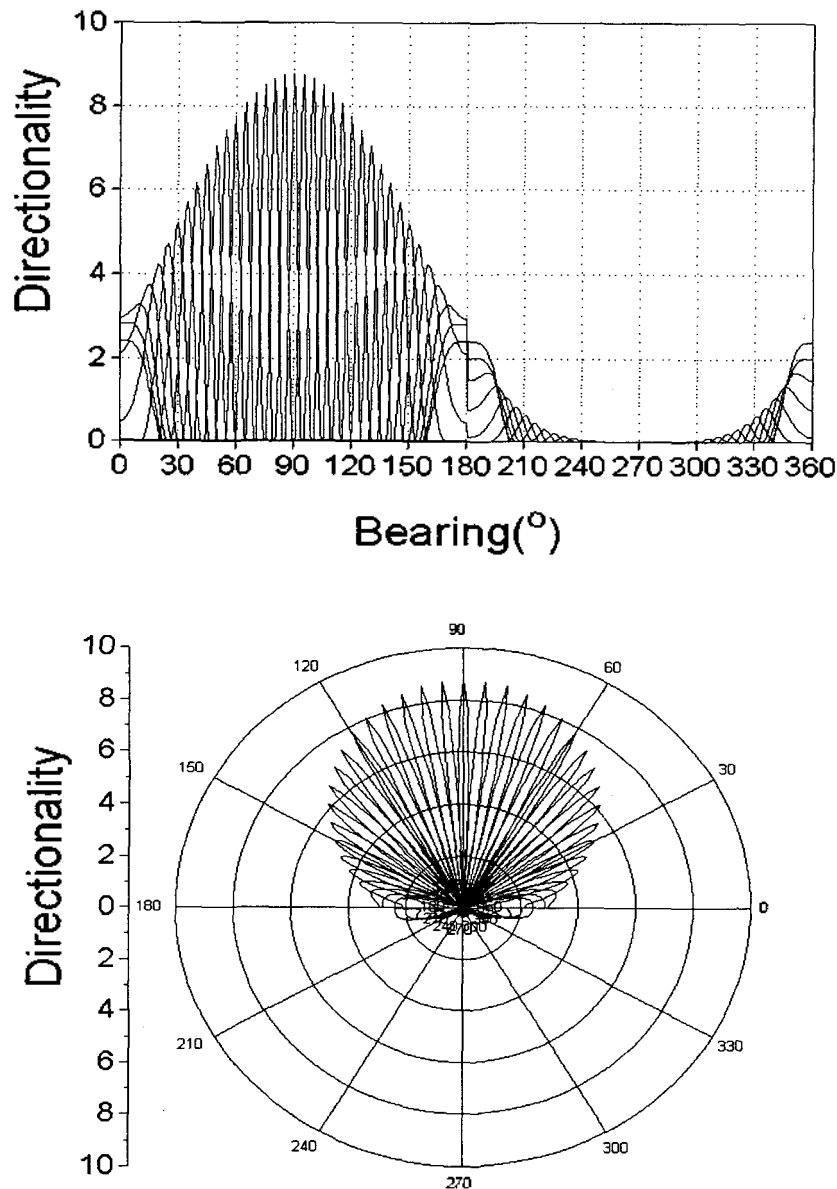


그림 4. 역빔형성에 의한 빔패턴  
Fig. 4. Beam pattern due to Inverse beamformer.

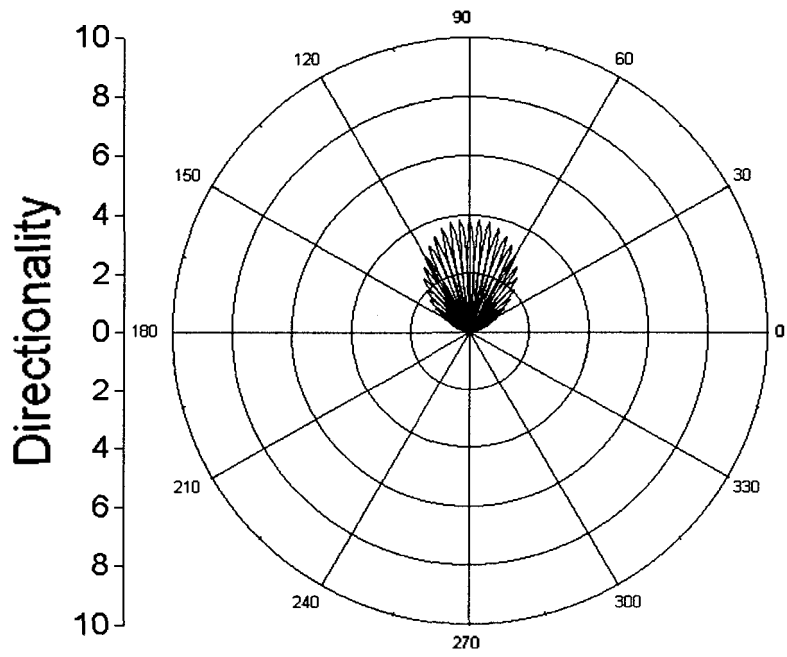
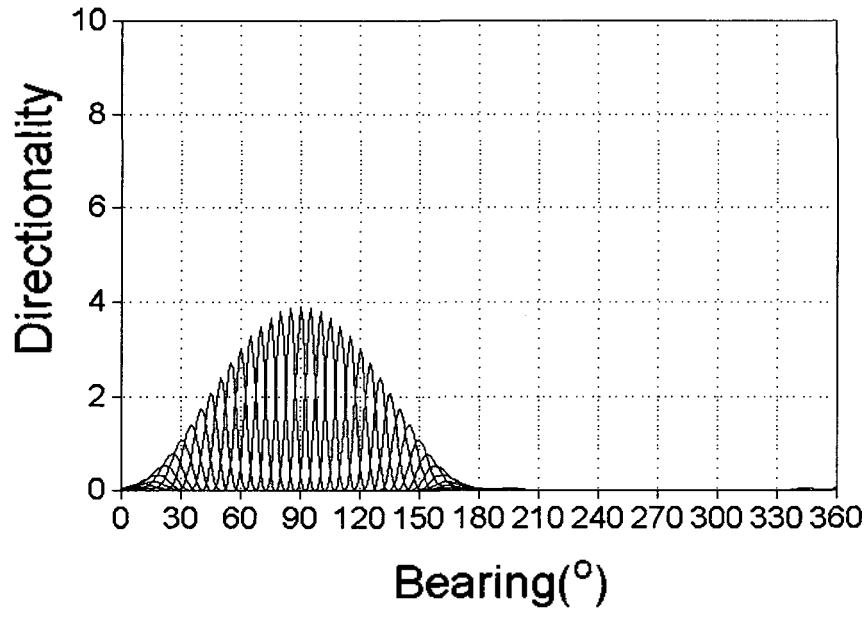


그림 5. 고전빔형성에 의한 빔패턴  
 Fig. 5. Beam pattern due to Conventional beamformer.

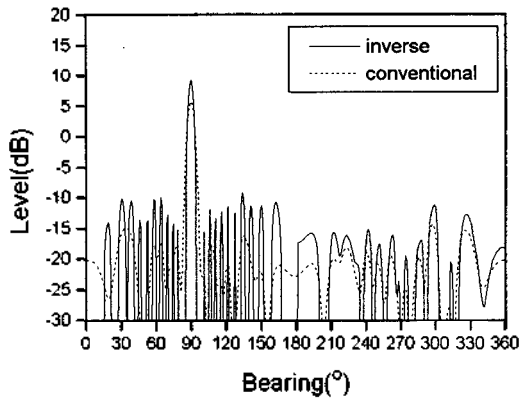


그림 6. 역빔형성과 고전빔형성에 의한 broadside 방위 탐지 결과의 Intensity Level (신호대 잡음비 :  $-9dB$ )  
 Fig. 6. Intensity level of broadside bearing estimated by Inverse beamformer and Conventional beamformer (signal to noise ratio :  $-9dB$ ).

도래하는 신호의 주파수가 주파수 bin의 중심주파수와 일치하지 않음으로써 발생하는 오차를 분석하기 위해, 주파수 bin에 대해 신호 대 잡음비가  $-9dB$ 인 경우에 임의의 주파수 bin의 중심주파수와  $1Hz$  간격으로  $4Hz$ 까지 중심주파수로부터 벗어난 신호를  $60^\circ$  방위로 발생하여 두 빔형성기에 의한 탐지성능을 비교하였다. 그림 8에 도시된 결과에서 볼 수 있는 것처럼 주파수의 부정확도에 따라 두 빔형성기 모두 탐지성능이 감소함을 보이나 고전빔형성기에 의한 결과보다는 역빔형성기에 의한 성능이 우수함을 볼 수 있다.

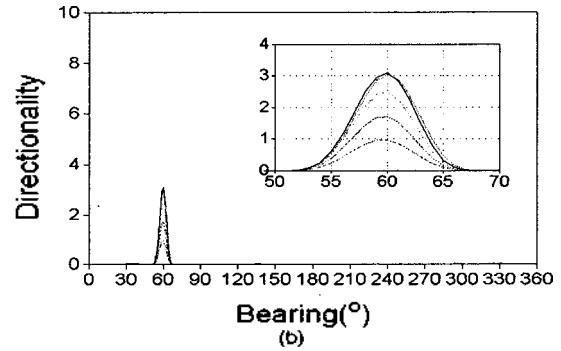
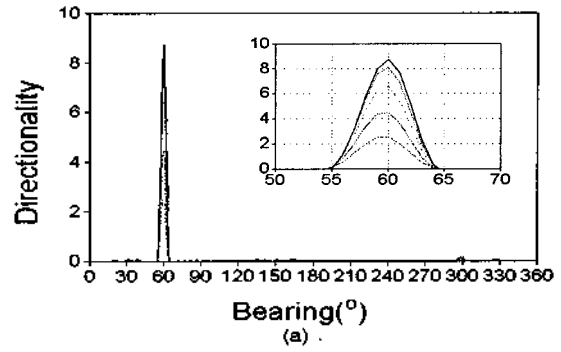


그림 8. 도래신호의 주파수가 빔형성기의 bin의 중심주파수와 일치하지 않는 경우의 빔형성 성능 (신호대 잡음비:  $-9dB$ , 주파수:  $3600Hz$ , 도래방위 :  $60^\circ$ )  
 Fig. 8. Beamforming performance due to variation of beamforming frequency for incoming signal (SNR :  $-9dB$ , DOA :  $60^\circ$ , frequency :  $3600Hz$ ).

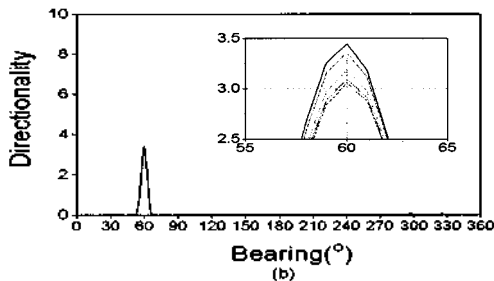
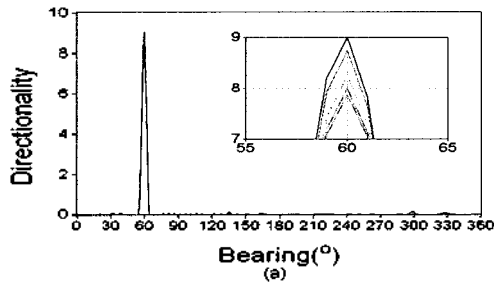


그림 7. 신호대 잡음비의 변화에 따른 빔형성 성능비교 (신호의 주파수 :  $3600Hz$ ) (a) 역빔형성 결과 (b) 고전빔형성 결과  
 Fig. 7. Variation of beamforming performance due to signal to noise ratio (frequency of signal :  $3600Hz$ ), (a) Beampattern of Inverse beamforming, (b) Beampattern of Conventional beamforming.

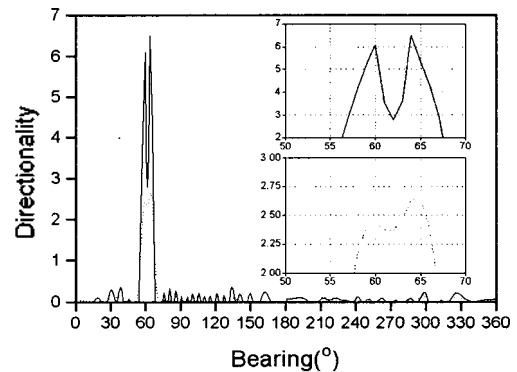


그림 9. 역빔형성과 고전빔형성 알고리즘에 의한 도래하는 신호의 인접방위 분해성능 (신호대 잡음비 :  $-9dB$ , 주파수 :  $3600Hz$ , 도래방위 :  $60^\circ, 64^\circ$ )  
 Fig. 9. Discrimination performance of multiple incoming signals due to Inverse beamforming and Conventional beamforming (SNR :  $-9dB$ , DOA :  $60^\circ, 64^\circ$ , frequency :  $3600Hz$ )

그림 9는 여러개의 표적이 인접하여 도래하는 경우의 두 방법에 의한 인접방위 분해성능을 분석하기 위하여 신호 대 잡음비가  $-9dB$ 로 주어진 경우에 대해  $60^\circ$ 와  $64^\circ$

로 신호가 도래하는 경우의 탐지방위 분리성능 분석결과를 보여준다. 분석결과 역빔형성기는 명확히 좌·우 방위가 구분되는데 반해 고전빔형성기는 방위 분리뿐 아니라 정확한 방위 탐지도 되지 않음을 명백히 보여준다. 두 빔형성기 모두 주파수와 신호 대 잡음비 및 센서의 수에 따라 방위분해 성능이 결정되나, 고전빔형성기에 비해 역빔형성기에 의한 성능이 상당히 우수함을 알 수 있다.

그림 10은 수동 소나 (SONAR) 시스템에 의한 방위탐지에서의 중요한 성능인 센서 축방향 부근으로 표적이 도래하는 경우에 대한 빔형성 기법의 성능을 비교하기 위해, 신호대 잡음비가  $-10dB$ 이고,  $0^\circ$  에서부터  $50^\circ$  까지  $1^\circ$  간격으로 표적이 이동하도록 신호를 발생하여 빔형성을 수행한 결과로써, 광대역 에너지에 의한 방위 탐지 결

과의 Histogram을 보여준다. 일반적으로 수동 소나 시스템에서 사용되어지는 고전적인 좌우분리 빔형성 기법에 의한 방위탐지 성능은 다른 빔형성 결과에 비해 비효율적인 특성을 보이고, 특히 센서 축 방향에 대해서는 거의 탐지가 되지 않는 결과를 보인다. Cardioid 빔형성의 결과에서는 좌·우 구분을 목적으로 적용된 가중상수의 효과에 의해 선배열의 broad side에 비해 센서 축방향에 대한 빔형성 성능이 떨어지므로 방위탐지를 위한 빔형성의 후처리 과정의 성능을 저하시킨다. 본 연구에서 제시한 좌우분리 역빔형성기법은 Cardioid 역빔형성의 결과에서 구해진 좌우분리 정보를 선배열 역빔형성 결과에 적용하여 전 방위의 빔형성 준위를 높히므로써 표적탐지의 후처리 과정의 성능을 향상시킴을 결과에서 알 수 있다.

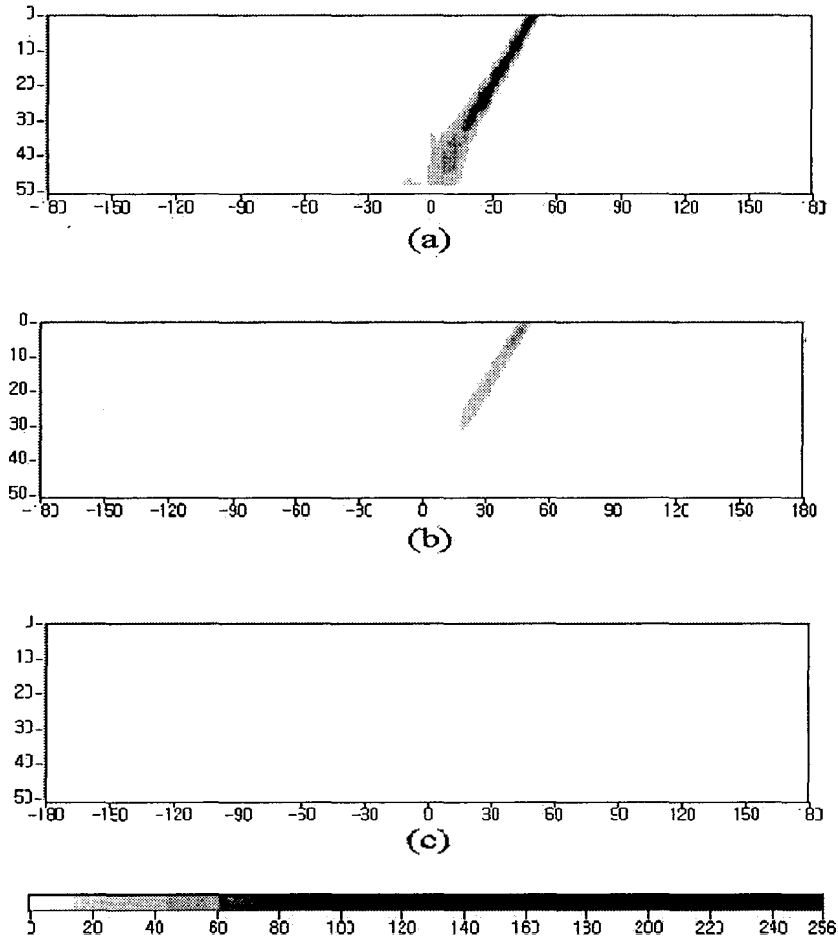


그림 10.  $-10dB$ 의 신호대 잡음비로  $0^\circ$ 에서  $50^\circ$  까지  $1^\circ$  간격으로 표적이 이동하는 경우 (a) 좌우분리 역빔형성 기법 (b) Cardioid 역빔형성 기법 (c) 고전 Cardioid 빔형성 기법에 의한 광대역 에너지에 의한 방위 탐지 결과의 Histogram

Fig. 10. Histograms of bearing estimated by broadband energy for moving target due to (a) IBF-Cardioid beamformer, (b) Cardioid Inverse Beamformer, (c) Conventional Cardioid beamformer (Start angle :  $0^\circ$ , Stop angle :  $50^\circ$ , Step angle :  $1^\circ$ , and SNR :  $-10dB$ ).



## V. 결 론

복잡한 소음구조로 구성된 해양 환경에서 표적으로부터 발생하는 신호의 도래방위를 탐지하고, 선배열 센서에 대한 표적의 좌·우 도래방위를 구분하기 위한 기법으로써 역빔형성 알고리즘을 도입하여 이론적 고찰 및 시뮬레이션을 통한 성능을 분석하였고, 그 결과를 선배열 센서 시스템에 가장 보편적으로 사용하는 알고리즘인 고전 빔형성에 의한 시뮬레이션 결과와 비교 분석하였다. 또한 선배열 알고리즘을 3중 선배열 센서 시스템에 적용하여 표적신호 도래방위의 좌·우 구분을 위한 Cardioid 빔형성 알고리즘에 역빔형성 알고리즘을 적용한 Cardioid 빔형성 결과로부터 좌·우분리 가중상수를 구하고, 그 결과를 선배열 역빔형성 결과에 적용하여 좌·우 표적 방위를 구분하는 좌우분리 역빔형성 알고리즘을 제안하고, 그 탐지성능을 고전적인 방법에 의한 결과와 비교 분석하였다. 선배열 빔형성의 분석결과 역빔형성기에 의한 성능은 고전빔형성기에 의한 결과에 비해 최소 탐지 준위가 신호의 도래방향에서 3dB 이상 향상됨을 입증하였고, 표적 신호의 도래방위를 정확하게 탐지 할 수 있는 빔폭이 고전빔형성기에 의한 빔폭의 68% 정도로서 정확한 방위 분해능을 가짐을 입증하였다. 본 연구에서 제안한 좌우분리 역빔형성기에 의한 탐지 성능은 고전 좌우분리 빔형성기에 의한 성능과 비교하여 최소탐지준위, 탐지분해능, 탐지방위의 정확도의 성능이 향상됨을 입증하였고, 특히 시뮬레이션에 의한 표적기동 시험으로부터 선배열의 센서 측방향에서 정확하게 빔이 형성되어 정확한 방위탐지가 수행되므로써 빔형성의 후처리 과정인 표적 탐지의 성능이 향상됨을 증명하였다.

## 참 고 문 헌

1. J. H. Wilson, "Signal Detection and Localization Using the Fourier Series Method and Cross-Sensor Data," *J. Acoust. Soc. Am.*, **73**, pp. 1648-1656, 1983.
2. C. W. Helstrom, *Statistical Theory of a Signal Detection*, Pergamon, Oxford, pp. 37-44, 1960.
3. W. S. Burdic, *Underwater Acoustic System Analysis*, Prentice Hall, New Jersey, pp. 390-417, 1991.
4. J. Carpon, "High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis," *IEEE Proc.*, **57**, pp. 1408-1418, 1969.
5. 심재과, 강성현, 윤원식, "어레이 센서 위치보정 알고리즘을 적용한 광대역 다중 신호원 빔형성에서 새로운 신호원의 도래방향 추정", *한국음향학회지*, **18**권, 3호, pp. 49-54, 1999.
6. R. O. Nielsen, *Sonar Signal Processing*, Artech House, Boston & London, pp. 51-94, 1991.
7. G. W. M. Van Mierlo, S. P. Beerens, R. Been, Y. Doisy, and E. Trouve', "Port/Starboard discrimination by hydrophone tripiets in active and passive towed arrays," *UDT Proc.*, pp.176-181, 1997.

▲ 강 성 현 (Sung-Huoun Kang)  
한국 음향학회지 제19권 8호 참조

▲ 김 의 준 (Eui-Jun Kim)  
한국 음향학회지 제19권 8호 참조

▲ 윤 원 식 (Won-Sik Yoon)  
한국 음향학회지 제19권 8호 참조