

높은 방향성 소음환경에서 DIFAR 수신센서 신호의 적응 빔형성에 의한 방위추정

Adaptive Beamforming Applied to Bearing Estimation of DIFAR Signal with Highly Directional Noise

신 기 철, 김 재 수*
(Keecheol Shin, Jeasoo Kim*)

(주)LIG넥스원 Maritime연구소, *한국해양대학교, 해양공학과
(접수일자: 2011년 8월 31일; 수정일자: 2011년 10월 21일; 채택일자: 2011년 10월 24일)

높은 방향성 소음환경하에서 DIFAR (Directional Frequency Analysis and Recording) 소노부이 (sonobuoy)와 같이 채널의 자유도가 낮은 시스템에서 넓은 빔폭과 낮은 신호 대 잡음비를 갖는 일반 빔형성 기법을 이용하여 음원의 방위 정보를 획득하는 것은 비효율적이다. 본 논문에서는 높은 방향성 소음환경에서 DIFAR 수신센서와 같이 센서의 수가 극히 제한된 경우에 적응 빔형성 기법을 응용하여 적용성을 검증하였다. 일반 빔형성 기법과 적응 빔형성 기법들은 모의된 방향성 신호에 의해 비교 평가되었으며, 최종적으로 실 신호를 적용하여 성능을 검증하였다.

핵심용어: DIFAR, 적응 빔형성, 방위추정

투고분야: 수중음향 분야 (5.8)

Conventional beamforming is ineffective in producing directional information in system with sparse degree of the freedom such as DIFAR (DIRectional Frequency Analysis and Recording) sonobuoy and in the presence of high directional noise. In this paper, Adaptive beamforming techniques are applied to produce directional spectra from a small number of sensors in highly directional noise environment. Conventional method as well as minimum variance and eigenvectors as adaptive method are evaluated via numerical test and real data.

Keywords: DIFAR, Adaptive beamforming, Bearing estimation

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.8)

I. 서론

수중음향 환경에는 수동 음원의 탐지에서 음원 방위추정의 불확실성을 증가시키는 많은 협대역과 광대역 음원들이 존재한다. 수중 소음이 항상 존재하는 환경에서 관심 음원을 탐지, 식별 그리고 추적하는 것은 군사적 목적에서 필수적인 요소라 할 수 있으며, 특히 넓은 탐색영역을 신속히 탐색할 수 있는 DIFAR (Directional Frequency Analysis and Recording) 소노부이 (sonobuoy)는 이러한 목적을 달성하기 위한 효과적인 도구라 할 수 있다. 또한, 학술적인 용도로 DIFAR 수신센서를 응용한 시스템이 고래와 같은 수중 포유동물의 이동 경로를 관찰하기 위해서

사용되기도 한다 [1].

일반적인 DIFAR 소노부이는 항공기에서 수중에 투하된 후 수중 표적의 음향 신호를 획득하여 항공기로 송신하면 항공기에서 수신 신호처리를 알고리즘을 이용하여 수중 표적의 방위각을 추정하는 시스템이다.

DIFAR 소노부이는 수신된 음향신호로부터 방향성 스펙트럼 정보를 추출하기 위해 3개의 수신 채널을 사용하며, 이 세 채널은 무지향성 채널 (OMNI)과 두 개의 방향성 채널 (NS, EW)로 구성된다. 그림 1은 세 채널 신호를 빔패턴의 관점에서 예시한 것으로, 각각의 신호는 균일한 가중을 갖는 무지향성 신호와 방위에 따라 cosine과 sine의 가중을 갖는 방향성 신호이다. 방향성 채널들은 북남 (north/south)과 동서 (east/west) 방향에 각각 두 개의 하이드로폰을 이용하여 그림 2의 쌍극자 (dipole) 형 빔을 형성하여 얻어진다 [2].

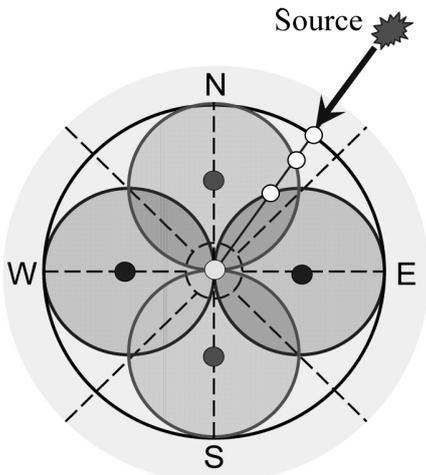


그림 1. DIFAR 센서의 방향성 패턴
Fig. 1. DIFAR sensor directional patterns.

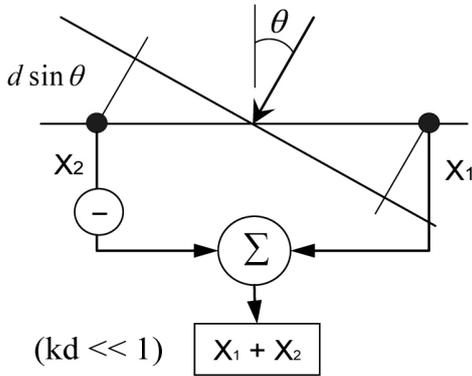


그림 2. 쌍극자형 빔형성
Fig. 2. Dipole beamforming.

높은 방향성 소음을 갖는 수중음향 환경에서 수동 음향 DIFAR 소노부이와 같이 채널의 자유도가 낮은 시스템에서 음원의 방위를 정확하게 추정하는 것은 대단히 어려운 문제이다. DIFAR 방향성 스펙트럼 신호의 방위추정에 이용되는 일반적인 빔형성 방법은 넓은 빔폭으로 인한 낮은 분해능으로 방위추정에서 많은 모호함을 가진다. 본 논문에서는 높은 방향성 소음과 채널의 자유도가 낮은 시스템의 음원 방위추정의 문제에 적응 빔형성 기법을 적용하여 음원 방위추정의 분해능을 높이고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 DIFAR 수신센서 채널신호를 이용한 방위추정을 위한 빔형성 기법의 이론에 대해서 설명한다. III 장에서는 수치시뮬레이션을 통해 각 빔형성 기법의 성능을 평가하며, IV 장에서는 실 해상 데이터를 이용하여 음원의 방위를 추정한 결과를 분석하였다.

II. 방향성 스펙트럼 채널신호를 위한 빔형성 기법

주파수 영역의 스펙트럼 추정과 마찬가지로 공간 영역에서는 방향/방위 추정을 위해서 빔형성이 사용된다. 주파수 영역에서의 빔형성은 각 주파수 성분에 해당하는 방향성 스펙트럼 신호를 이용하여 수행된다. 주파수 영역에서 빔형성 기법을 이용하여 신호가 도래한 방위를 추정하기 위해서는 우선 채널들에 수신된 신호들의 주파수 분석을 통해 관심 주파수에서의 CSDM (Cross Spectral Density Matrix)을 구성하여야 한다. 세 채널 신호를 사용하는 DIFAR 소노부이의 CSDM은 식 (1)과 같이 구성할 수 있다.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \Phi_{om} \Phi_{om}^* & \Phi_{om} \Phi_{ew}^* & \Phi_{om} \Phi_{ns}^* \\ \Phi_{ew} \Phi_{om}^* & \Phi_{ew} \Phi_{ew}^* & \Phi_{ew} \Phi_{ns}^* \\ \Phi_{ns} \Phi_{om}^* & \Phi_{ns} \Phi_{ew}^* & \Phi_{ns} \Phi_{ns}^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기에서 Φ_{om} , Φ_{ew} 와 Φ_{ns} 는 각각 OMNI, EW와 NS 채널 신호를 주파수 분석하여 얻어진 관심 주파수 성분에서의 복소수 값이다. (*)는 복소공액 (complex conjugate) 을 의미한다.

2.1. 일반 (conventional) 빔형성 기법

일반 빔형성 기법은 미지의 음원으로부터 방사된 신호를 DIFAR 채널들 (OMNI, EW와 NW)에서 수신한 신호벡터 $\mathbf{d}(\theta_{true})$ 와 조향벡터 (direction of look vector) $\mathbf{w}(\theta)$ 를 상관시킴으로써 음원 신호가 도래한 방향을 추정한다 [3]. 일반적으로 각 수신 센서에 신호의 도달시간 차이를 이용한 배열센서 시스템과 다르게 DIFAR 센서 수신 시스템은 그림 1과 같은 센서의 방향성 패턴을 가지기 때문에 조향벡터는 식 (2)와 같다. 여기에서 (*)는 Hermitian transpose이다.

$$\mathbf{w}^\dagger(\theta) = [1, \sin(\theta), \cos(\theta)] \quad (2)$$

신호벡터에 대한 CSDM $\mathbf{K}(\theta_{true}) = \mathbf{d}(\theta_{true})\mathbf{d}^\dagger(\theta_{true})$ 을 이용하여 일반 빔형성기의 출력을 표현하면 식 (3)과 같다.

$$P_{CB}(\theta) = \mathbf{w}^\dagger(\theta)\mathbf{K}(\theta_{true})\mathbf{w}(\theta) \quad (3)$$

여기에서 $\mathbf{d}(\theta_{true})$ 와 $\mathbf{w}(\theta)$ 는 각각 $[1 \times 3]$ 크기의 벡터이고, $\mathbf{K}(\theta_{true})$ 은 $[3 \times 3]$ 크기의 행렬이다.

일반 빔형성 기법의 주요 단점은 낮은 공간 분해능을 가지는 것이며, 특히 DIFAR 수신센서 신호와 같이 적은 수의 센서로 구성된 배열에서는 더욱 낮은 공간 분해능을 갖는다. 이상적인 경우 일반 빔형성 출력의 3 dB 유효 빔폭은 대략 131도이다.

2.2. 최소분산 빔형성 기법

최소분산 빔형성 기법은 가장 잘 알려진 적응처리 기법으로 조향 방향의 신호는 단위 이득으로 통과시키면서 다른 방향에서의 신호들과 소음의 응답은 최소화시키는 적응 가중벡터 \mathbf{w}_{MV} 를 찾는다 [4,6]. 이를 최적화 문제로 표현하면 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\min_{\mathbf{w}_{MV}} \mathbf{w}_{MV}^\dagger \mathbf{K} \mathbf{w}_{MV} \quad \text{subject to } \mathbf{w}_{MV}^\dagger \mathbf{d} = 1 \quad (4)$$

식 (4)의 최적화 문제의 해는 여러 문헌을 통해 잘 알려져 있다. 결국 최소분산 빔형성 기법의 가중벡터 \mathbf{w}_{MV} 와 최소분산 빔형성기의 출력은 식 (5)와 식 (6)과 같다.

$$\mathbf{w}_{MV}(\theta) = \frac{\mathbf{K}^{-1}(\theta_{true})\mathbf{w}(\theta)}{\mathbf{w}^\dagger(\theta)\mathbf{K}^{-1}(\theta_{true})\mathbf{w}(\theta)} \quad (5)$$

$$P_{MV}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{w}^\dagger(\theta)\mathbf{K}^{-1}(\theta_{true})\mathbf{w}(\theta)} \quad (6)$$

최소분산 빔형성 기법의 가중벡터 \mathbf{w}_{MV} 는 센서들에서 관측된 음장 (sound field)의 특성과 조향하는 방향에 따라 달라지는 가중치들로서 데이터 적응적이라 할 수 있다. 따라서 신호의 관측 후에 적용될 수 있으며, 적응처리의 개념에서 신호에 대한 적응필터로 간주할 수 있다.

2.3. 고유벡터 빔형성 기법

고유벡터 빔형성 기법은 CSDM \mathbf{K} 를 고유치-고유벡터 분해를 통해 신호와 소음의 성분으로 나누어 표현한 후 소음 성분에 대한 고유치와 고유벡터를 이용하는 빔형성 기법으로 행렬 \mathbf{K} 를 신호성분과 소음성분으로 나누는 것을 제외하고는 최소분산 기법과 유사하다 [5]. M 개의 센서들로 구성된 배열에 대해 행렬 \mathbf{K} 의 고유치 λ 와 그에 상응하는 고유벡터 \mathbf{v} 를 결정한 후 임의로 신호성분으로 간주되는 p 개의 큰 고유치/고유벡터의 쌍을 분리하

여 행렬 \mathbf{K} 를 다시 쓸 수 있다.

$$\mathbf{K} = \sum_{l=1}^p \lambda_l \mathbf{v}_l \mathbf{v}_l^\dagger + \sum_{m=p+1}^M \lambda_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m^\dagger \quad (7)$$

따라서 소음성분에 해당하는 CSDM은 식 (7)의 두 번째 항에 해당하는 $M-p$ 개의 고유치/고유벡터 쌍으로 구성되는 행렬 \mathbf{N} 이 된다.

$$\mathbf{N} = \sum_{m=p+1}^M \lambda_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m^\dagger \quad (8)$$

DIFAR 소노부이와 같이 3개의 채널로 구성된 특별한 경우에 대해 새로운 CSDM과 고유벡터 빔형성기의 출력은 각각 식 (9)과 (10)으로 표현된다.

$$\mathbf{K}_{EV} = \sum_{m=2}^3 \lambda_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m^\dagger \quad (9)$$

$$P_{EV}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{w}^\dagger \mathbf{K}_{EV}^{-1} \mathbf{w}} \quad (10)$$

III. 수치실험 및 성능분석

3.1. 방향성 스펙트럼 모의신호 생성

방향성 스펙트럼 신호는 식 (11)을 사용하여 N 개의 방향으로 분리된 음원에 의한 값들을 합하여 계산하였다 [7].

$$S(\theta) = \sum_{i=1}^N P_i \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) + S_N(\theta) \quad (11)$$

여기에서 θ_i 는 음원의 방위각, P_i 는 신호의 크기이고, 표준편차 σ_i 는 공간에서의 신호의 각 퍼짐 (angular spread) 정도를 나타내는 값이다. S_N 은 등방성 배경소음으로, 신호 대 잡음비 (SNR)에 의해 소음의 크기는 다음의 관계에 의해서 주어진다.

$$SNR = \frac{\int_0^{2\pi} \sum_{i=1}^N P_i \exp(-(\theta - \theta_i)^2 / 2\sigma_i^2) d\theta}{2\pi S_N} \quad (12)$$

CSDM \mathbf{K} 은 모사된 방향성 스펙트럼 신호 $S(\theta)$ 을 이용하여 (13)과 같이 계산된다 [8].

$$\mathbf{K}(i, j) = \int_0^{2\pi} w_i w_j^* S(\theta) d\theta \quad (13)$$

여기에서 w_i 는 식 (2)의 조향벡터 \mathbf{w} 의 i 번째 성분을 나타낸다. DIFAR 수신 채널 신호는 $[3 \times 3]$ 행렬의 CSDM으로 구성되며, 모사된 CSDM을 사용하여 빔형성 기법들의 음원 방위추정 시험을 수행한다.

3.2. 음원 방위추정의 정확도 및 공간 분해능 수치실험

음원 방위추정의 정확도 및 공간 분해능을 분석하기 위해 수치실험은 모의로 생성된 방향성 스펙트럼의 CSDM을 이용하여 두 항목으로 수행되었다. 첫 번째는 SNR 변화에 따른 빔형성 기법의 방위추정의 정확도 및 분해능, 두 번째는 음원의 세기가 다른 두 음원에 대한 방위 구별 성능 분석이다.

SNR에 대한 단일 음원의 방위추정의 정확도 및 분해능을 분석하기 위해 방위 135도에 $\sigma = 4^\circ$ 의 모의 신호를 발생시켜 수치실험을 수행하였다. 수행 결과는 그림 3과

같다. 방위 정확도 측면에서 사용된 빔형성 기법 모두 정확한 음원 방위를 가리키고 있으나 SNR이 떨어질수록 전체적인 부엽이 증가하여 방위의 추정의 모호함을 증가시키고 있다. 또한 방위 분해능 측면에서 고유벡터 기법, 최소분산 기법, 백색소음을 이용한 기법 순으로 분해능이 우수하였다.

두 음원 간의 방위 분리/구별 성능을 분석하기 위해서 다른 방위에 있는 두 음원에 대해 $\sigma = 4^\circ$ 와 음원의 세기가 각각 0 dB와 -3 dB를 가지는 모의 신호를 발생시켜 수치실험을 수행하였으며, 두 음원이 방위 분리 간격은 180도, 135도 및 90도의 세 경우에 대해서 수행하였다 (그림 4). 빔형성 기법에 따라 정도의 차이는 있으나 방위 분리 간격 180도와 135도에서는 두 음원을 구별하고 있다. 그러나 고유치에 의한 빔형성 기법은 강한 음원의 방향에서는 상대적으로 좋은 분해능으로 음원을 지시하고 있으나, 약한 음원에서는 방위추정에 실패하였으며, 이것은 신호들이 높은 상관성을 가지고 발생하였기 때문으로 추정된다.

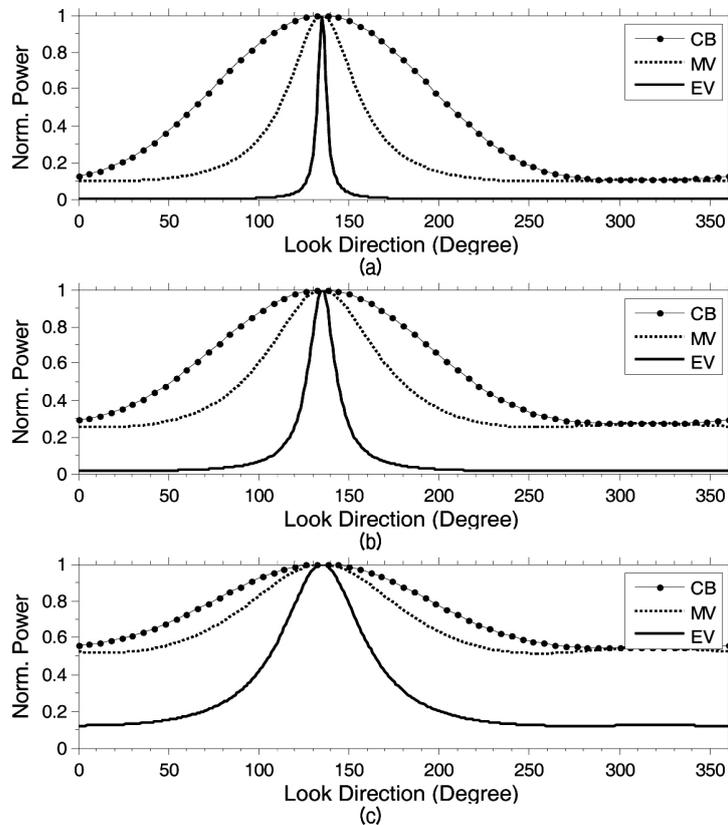


그림 3. 단일 음원에 대한 방위추정 결과

(a) SNR: 10 dB, (b) SNR: 0 dB, (c) SNR: -10 dB

Fig. 3. According to SNR, the results of bearing estimation for a single source.

(a) SNR: 10 dB, (b) SNR: 0 dB, and (c) SNR: -10 dB, respectively

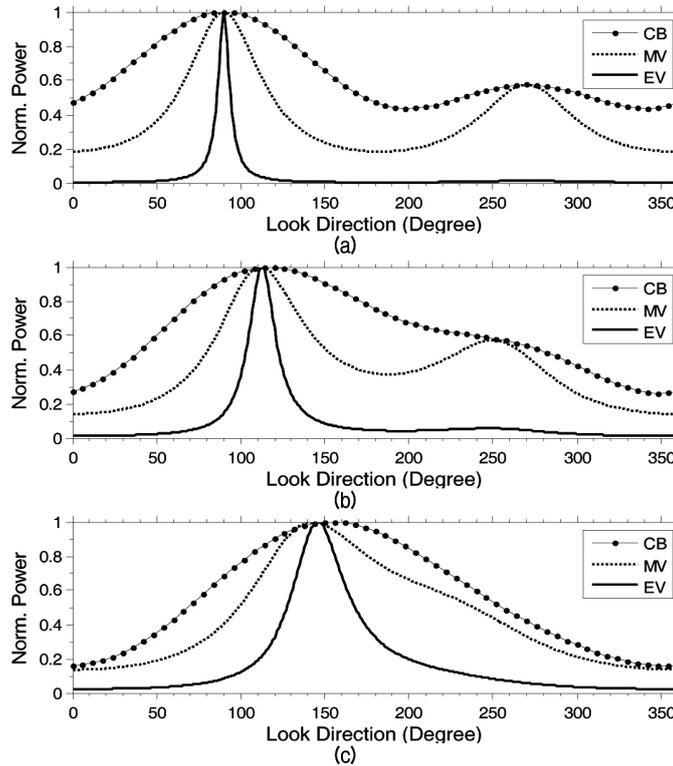


그림 4. 두 음원에 대한 방위 분석 결과

(a) 간격 180도 (b) 간격 135도 (c) 간격 90도

Fig. 4. The results of bearing estimation for two sources. Source separating space is (a) 180 degree, (b) 135 degree and (c) 90 degree, respectively.

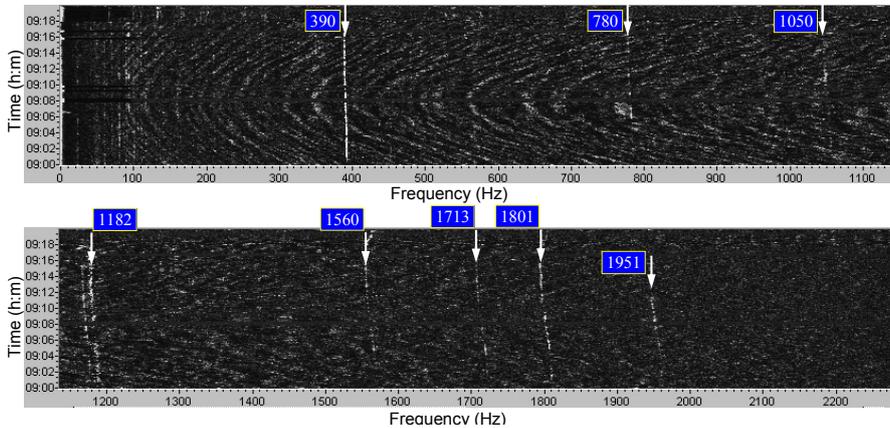


그림 5. 로파그램

Fig. 5. LOFAR gram.

IV. 실 시험 데이터 분석

방위추정을 위해 사용된 소노부이 신호는 17분 정도로, 음원은 어선으로 추정되며 DIFAR 소노부이를 기점으로 가로질러 이동하는 상황이다. 그림 5는 OMNI 채널에 대한 로파그램 (LOFAR gram)을 도시한 것으로, 토널 주파수들은 390, 780, 1050, 1182, 1160, 1713, 1801 및

1951 Hz 근처에서 관측되고 있다. 실 측정에서 음원의 이동 궤적 정보가 획득되지 않음으로 인해 방위추정의 결과와는 비교하지 않았다.

4.1. 빔 패턴 분석

그림 6은 임의의 시간에서 관측된 토널 주파수에 해당하는 CSDM을 구성 후 각 빔형성 기법에 의한 출력을 도

시한 것이다. 각 토널 주파수에 따라 차이는 있으나 대략적인 음원의 방위는 100도에 있는 것으로 추정된다.

공간 분해능 측면에서 수치실험의 결과와 유사하게 고유벡터 빔형성 기법 (EV), 최소분산 빔형성 기법 (MV), 일반 빔형성 기법 (CB) 순으로 우수하다. DIFAR 수신센서 신호의 일반 빔형성 기법의 결과는 이상적인 경우의 심장형 (Cardioid) 빔패턴을 갖게 되는데, 실 데이터에서

도 심장형 빔패턴 형태가 나타남을 확인할 수 있다.

4.2. BFI (Bearing Frequency Indicator) 분석

방위추정의 결과를 평가하는 방법인 BFI (Bearing Frequency Indicator) 분석은 일정시간에서 주파수에 따른 방위추정의 분포를 나타낸다. 따라서 BFI 결과는 임의

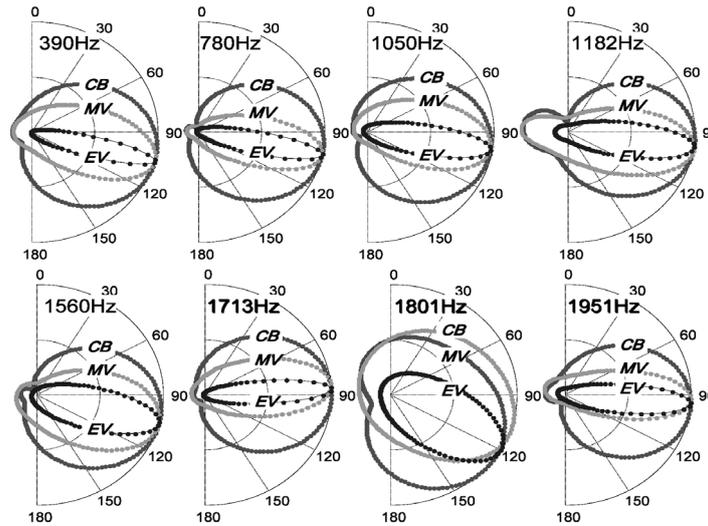


그림 6. 실 시험 데이터의 빔 패턴 분석
Fig. 6. Beampattern analysis of real data.

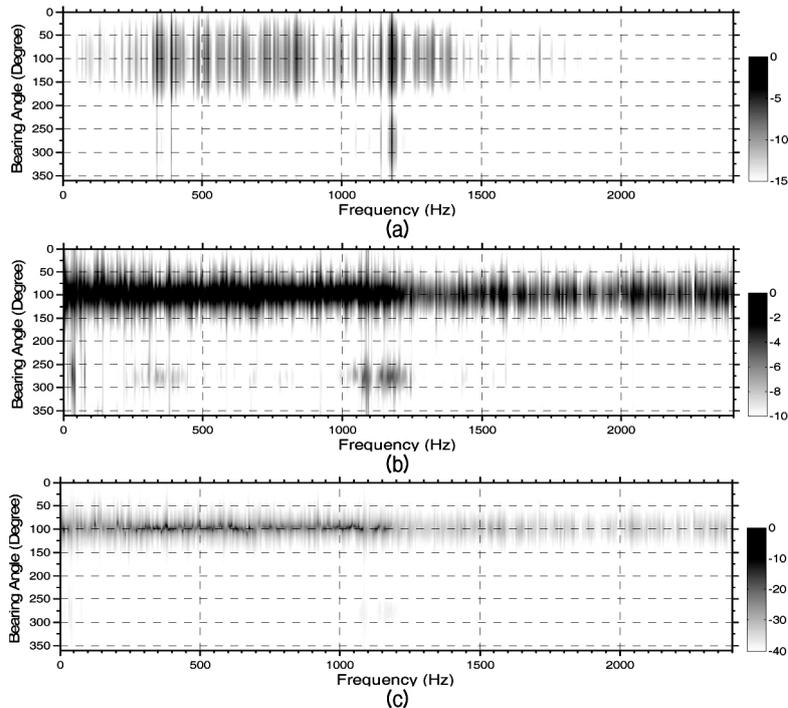


그림 7. 실 시험 데이터의 BFI 분석
(a) 일반 빔형성 기법 (b) 최소분산 빔형성 기법 (c) 고유벡터 빔형성 기법
Fig. 7. BFI analysis of real data.
(a) Conventional method (b) Minimum variance method (c) Eigen vector method

의 시간대에서 DIFAR 수신센서의 3채널 신호를 이용하여, 관심 주파수 대역의 각 주파수 bin에서 CSDM을 구성 후 빔형성 출력을 계산함으로써 얻을 수 있다. 그림 7은 임의의 시간에서 BFI를 각 빔형성 기법에 따라 방위추정의 결과를 도시한 것이다.

4.3. BTI (Bearing Time Indicator) 분석

BTI (Bearing Time Indicator)는 시간에 따른 방위추정의 분포를 나타낸 것이다. 따라서 일정 시간과 일정 방위에서의 BTI 값은 BFI에서 일정 방위에서의 주파수에 따른 빔형성 출력을 더해서 얻어진다. Fig. 8은 각 빔형성 기법에 따라 BTI 분석의 결과를 도시한 것이다. 시간 100, 500 및 600 sec 부근에서 전 방위에 에너지가 높은 현상은 소나부이와 데이터 획득시스템 사이의 통신두절에 의해 잘못된 데이터가 획득되었기 때문이다. 세 결과 모두 단일 음원의 방위추정에 대한 궤적을 잘 보여주고 있으나, 부엽의 폭을 비교해 보면 적응 빔형성 기법인 최소분산 기법과 고유벡터 기법이 우수함을 확인할 수 있다. 그

림 8의 BTI 결과들이 단일 음원에 대한 시간에 따른 방위추정의 결과임을 고려할 때, 다중 음원의 BTI 결과는 앞서 수치시험에 보듯이 음원 방위 분리 성능에서 최소분산 빔형성 기법이 우수할 것을 예상된다.

V. 결론

채널의 자유도가 낮은 시스템에서 음원의 방위추정에 이용되는 일반 빔형성 기법은 낮은 분해능으로 인해 방위추정에서 모호함을 갖는다. 본 논문에서는 높은 방향성 소음 환경에서 채널수가 낮은 시스템에 적응 빔형성 기법을 응용하여 적용하였으며, 음원 방위의 구별 성능 및 분해능을 분석하기 위해 방향성 모의 신호를 적응 빔형성 기법에 인가하여 일반 빔형성 기법과 적응 빔형성 기법들을 적용한 결과들을 비교 평가하였다. 수치실험과 실험 데이터 분석에서 적용된 적응 빔형성 기법들은 일반 빔형성 기법보다 음원 간 방위 구별 성능과 분해능에서 우수한 것으로 평가되었다.

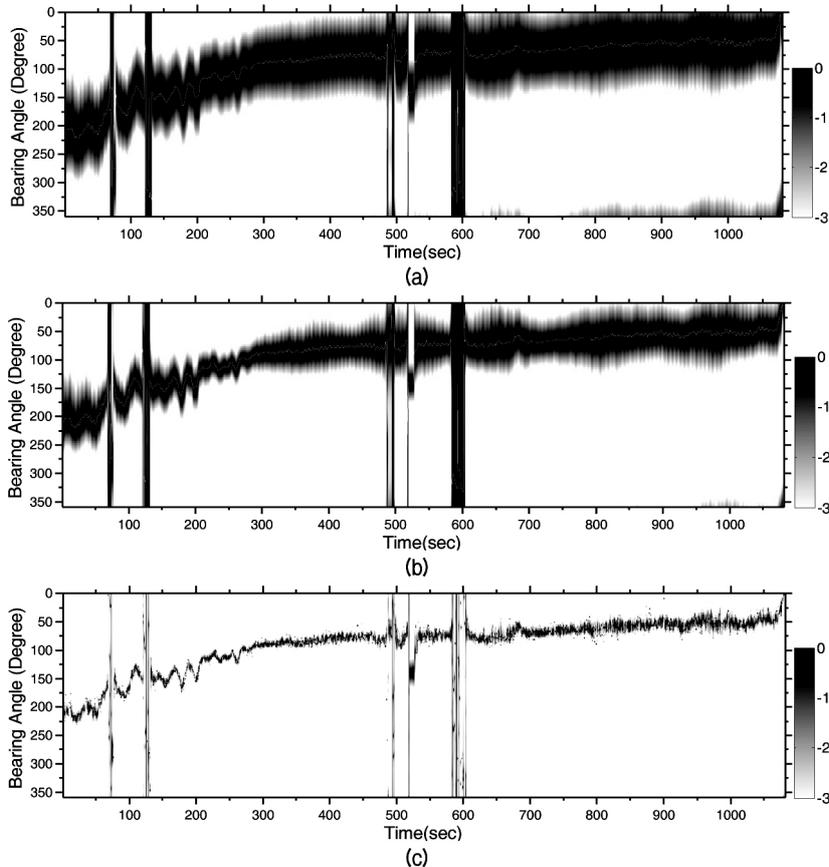


그림 8. 실 시험 데이터의 BTI 분석

(a) 일반 빔형성 기법 (b) 최소분산 빔형성 기법 (c) 고유벡터 빔형성 기법

Fig. 8. BTI analysis of real data.

(a) Conventional method, (b) Minimum variance method, and (c) Eigen vector method

참고 문헌

1. C. R. Greene, Jr., M. W. McLennan, R. G. Norman, T. L. McDonald, R. S. Jakubczak and W. J. Richardson, "Directional frequency and recording (DIFAR) sensors in seafloor recorders to locate calling bowhead whales during their fall migration," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 116, no. 2, pp. 799–813, 2004.
2. D. H. Chang, H. B. Park, Y. N. Na, and J. H. Ryu, "Bearing Estimation of Narrow Band Acoustic Signals Using Cardioid Beamforming Algorithm in Shallow Water," *J. Acoust. Soc. Kor.*, vol. 21(2E), pp. 71–78, 2002.
3. A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman, and P. N. Michalevsky, "An Overview of Matched Field Methods in Ocean Acoustics," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 18, pp. 401–424, 1993.
4. J. Capon, "High resolution frequency wavenumber spectrum analysis," *Proc. of the IEEE*, vol. 57, pp. 1408–1418, 1969.
5. G. Bienvu and L. Kopp, "Optimality of high resolution array processing using the eigensystem approach," *IEEE Trans Acoust. Speech Sig. Proc.*, vol. 31, pp. 1235–1247, 1983.
6. H. Cox, R. M. Zeskind, and M. M. Owen, "Robust Adaptive Beamforming," *IEEE Trans. of Acoust., Speech Signal Processing*, vol. 35, pp. 1365–1376, 1987.
7. J. Oltman-Shay and R. T. Guza, "A Data-Adaptive Ocean Wave Directional Spectrum Estimator for Pitch and Roll Type Measurements," *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 14, pp. 1800–1810, 1984.
8. R. F. Marsden and B.-A. Juszko, "An Eigenvector Method for the Calculation of Directional Spectra from Heave, Pitch and Roll Data," *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 17, pp. 2157–2167, 1987.

저자 약력

•신 기 철 (Keecheol Shin)



1996년 2월: 한국해양대학교 해양공학과 (공학사)
 1998년 2월: 한국해양대학교 해양공학과 (공학석사)
 2003년 8월: 한국해양대학교 해양개발공학과 (공학박사)
 2003년 ~ 2004년: 한국과학재단 신진연구원, BB21 박사후 과정
 2005년 ~ 현재: LIG넥스원(주) Maritime연구소 수석 연구원
 ※ 주관심 분야: 소나시스템, 소나신호처리, TRM/MFP

•김 재 수 (Jeasoo Kim)

한국음향학회 제23권 제4호 참조
 1991년 ~ 현재: 한국해양대학교 해양공학과 교수