

# 음향 벡터 센서 배열의 뒤틀림 보상을 통한 좌현-우현 구분 성능분석

## An analysis of port-starboard discrimination performance for roll compensation at acoustic vector sensor arrays

이호진, 류창수,\* 배은현,\*\* 이균경†

(Ho Jin Lee, Chang-Soo Ryu,\* Eun Hyon Bae,\*\* and Kyun Kyung Lee†)

경북대학교 IT대학 전자공학부, \*영남이공대학교 전자정보계열, \*\*한화탈레스 해양연구소  
(Received August 12, 2016; revised September 1, 2016; accepted September 8, 2016)

**초 록:** 전방향 센서를 이용하는 선배열 센서의 경우, 음원의 방향이 원추각의 형태로 결정되어지므로 좌 우 구분 모호성이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 운용적인 방법과 센서 배열의 구조적인 방법에 대한 연구가 진행되었다. 최근에는 음향 벡터 센서 기반의 연구가 이루어지고 있으며, 본 논문에서는 음향 벡터 센서 기반의 빔형성 기법에서 발생하는 센서 배열의 뒤틀림에 따른 좌 우 구분 성능에 대하여 분석하였다. 음향 벡터 센서는 하나의 전방향 센서와 세 개의 지향성 센서로 구성되며, 세 개의 지향성 센서는 서로 수직 방향의 속도성분을 측정한다. 이때 센서 배열의 뒤틀림에 따른 지향성 센서 축의 정보가 정확하지 않으면 잘못된 방향의 신호를 인가하여 빔형성 기법의 성능저하가 나타난다. 따라서 센서 배열의 뒤틀림에 따른 좌 우 구분 성능저하를 분석하고 보상을 통한 빔형성 기법의 성능향상을 확인하였다.

**핵심용어:** 음향 벡터 센서 배열 빔형성, 뒤틀림 보상, 좌현-우현 구분

**ABSTRACT:** Traditional towed line arrays using omni-directional sensor suffer from the well known port-starboard ambiguity, because the direction of arrival is determined by conic angle. The operational method and structure of the sensor arrays method have been proposed to solve this problem. Recently, a lot of research relating to the acoustic vector sensor are studied. In this paper, we study port-starboard discrimination for roll of acoustic vector sensor array. With one omni-directional sensor and three orthogonally-placed directional sensors, an acoustic vector sensor is able to measure both the acoustic pressure and the three directional velocities at the point of the sensor. The wrong axis due to the roll at directional sensors can degrade performance of beamforming. We investigate port-starboard discrimination for roll of sensor array and confirm the validity of performance of beamforming with compensated the roll.

**Keywords:** Acoustic vector sensor arrays beamforming, Roll compensation, Port-Starboard discrimination

**PACS numbers:** 43.60.Fg, 43.60.Ac, 43.60.Uv

### 1. 서 론

음원의 방향을 추정하기 위해서 일반적으로 센서 배열에 도달하는 음원의 시간지연 차이를 이용한다. 이때 선배열 센서의 경우, 음원의 방향이 방위각과

고각으로 구분되지 않고 원추각의 형태로 결정되어 지므로 좌 우 구분 모호성이 발생한다.<sup>[1]</sup> 이러한 문제를 해결하기 위한 다양한 방법들이 제안되었으며, 운용적인 방법으로 TMA(Target Motion Analysis)가 있다.<sup>[2]</sup> 하지만 TMA는 긴 관측시간이 필요로 하는 단점이 있기 때문에 단시간 내에 좌 우 구분 모호성을 해결할 수 있는 방법에 대한 연구가 진행되었다.

†Corresponding author: Kyun Kyung Lee (kklee@knu.ac.kr)  
School of Electronics Engineering, Kyungpook National University,  
80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Republic of Korea  
(Tel: 82-53-950-5546, Fax: 82-53-950-7922)

이러한 연구로써 센서 배열의 구조적 특성을 이용하는 이중배열(twin arrays)<sup>[3,4]</sup>과 삼중배열(triplet arrays)<sup>[5,6]</sup> 방법이 제안되었다. 이중배열은 선배열센서 두 개가 나란히 배치된 구조를 가지며, 삼중배열센서는 세 개의 전방향 센서가 근접한 삼각형의 구조를 가지며 이러한 형태가 배열화 되어있는 센서 배열이다. 이때 근접한 센서사이의 거리 때문에 수신된 잡음신호들이 강한 일관성이 발생한다. 이는 삼중배열센서를 이용한 카디오이드 빔형성의 성능 저하에 영향을 미치며, 이를 해결하기 위하여 센서간격을 넓힐 필요가 있다. 이는 센서 배열의 직경이 증가하게 되며, 플랫폼에서 긴 센서 배열을 운용함에 있어 어려움을 발생시킨다. 따라서 음향 벡터 센서를 이용한 단일 배열센서를 이용하는 방법이 제안되었다.

벡터 센서<sup>[7,8]</sup>는 하나의 전방향 센서와 세 개의 지향성 센서로 구성되며, 세 개의 지향성 센서는 서로 수직( $x, y, z$ )방향의 속도 성분을 측정하도록 배치되어 있다. 이러한 지향성 센서의 추가적인 정보는 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)의 성능향상 뿐만 아니라 음원의 방향성분을 통해 정확한 음원의 방향추정에 유리하다. 정확한 신호의 방향추정은 정확한 축의 정보를 알고 있을 때 가능하다. 하지만 배열화된 음향 벡터 센서들은 운용중에 쉽게 뒤틀림(roll)이 발생할 수 있으며, 이것은 음향 벡터 센서의 축을 틀어지게 하는데 영향을 끼친다. 이러한 축의 뒤틀림은 잘못된 방향의 신호정보를 인가하여 빔형성 기법의 성능저하를 나타낸다. 따라서 본 논문에서는 음향 벡터 센서 축의 뒤틀림에 따른 좌우 구분의 성능저하를 분석하고 보상을 통한 빔형성 기법의 성능향상을 확인하였다.

I장의 서론에 이어 II장에서는 음향 벡터 센서의 신호모델을 설명하고 III장에서는 센서 배열의 뒤틀림에 따른 성능분석과 보상방법을 제안하였다. IV장에서 시뮬레이션을 통하여 보상에 대한 성능향상을 확인하였으며 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 음향 벡터 센서 신호모델

Fig. 1은  $M$ 개의 음향 벡터 센서가 등간격으로 배치되었을 때 원거리 음원으로부터 신호를 수신하는

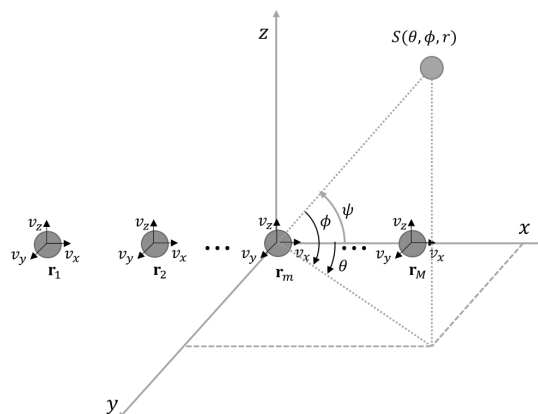


Fig. 1. Configuration of acoustic vector sensor array with source.

상황을 나타낸 것이다. 음원의 위치는  $x$  축 기준으로 반시계방향으로 방위  $\theta \in [-\pi, \pi]$ ,  $z$  축 기준으로 고각  $\phi \in [-\pi/2, \pi/2]$ 에 위치하며, 배열의 중심에서부터 측정된다. 선 배열 센서의 특성상 방위각과 고각의 성분을 분리할 수 없기 때문에 표적의 방위는 원추각( $\psi$ )으로 나타난다.  $m$  번째 센서에 수신되는 신호  $\mathbf{y}_m(t)$ 은 Eq.(1)과 같다.

$$\mathbf{y}_m(t) = \begin{bmatrix} y_{mp} \\ \mathbf{y}_{mv} \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{u}_n \end{bmatrix} p_n(t - \tau_{mn}) + \begin{bmatrix} e_p(t) \\ \mathbf{e}_v(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

여기서  $m = 1, \dots, M$ 이며,  $M$ 은 센서 개수이다.  $n = 1, \dots, N$ 이며,  $N$ 은 음원의 개수이다.  $y_{mp}$ 는 전방향 센서신호의 출력이며,  $\mathbf{y}_{mv}$ 는 지향성 센서신호의 출력이다. 표적의 방향벡터  $\mathbf{u}_n$ 은 Eq.(2)와 같이 나타난다.  $\tau_{mn} = -\mathbf{r}_m^T \mathbf{u}_n / c$ 은  $m$  번째 센서에서  $n$  번째 표적신호의 시간지연을 의미한다. 이때  $\mathbf{r}_m$ 은  $m$  번째 센서의 위치벡터이며,  $c$ 는 수중에서 음속을 의미한다.  $p_n(t)$ 은  $n$  번째 표적신호이며,  $e_p(t)$ ,  $\mathbf{e}_v(t)$ 는 전방향 센서와 지향성 센서에 수신되는 백색 가우시안 잡음(white Gaussian noise)이다.

$$\mathbf{u}_n = [\cos\theta_n \cos\phi_n \quad \sin\theta_n \cos\phi_n \quad \sin\phi_n]^T, \quad (2)$$

여기서  $\theta_n$ 는  $n$  번째 표적의 방위각이며,  $\phi_n$ 은  $n$  번째 표적의 고각을 나타낸다.  $T$ 는 전치행렬(transpose)를 의미한다.

### III. 음향 벡터 센서 배열의 뒤틀림 보상기법

#### 3.1 음향 벡터 센서를 이용한 지연합 빔형성

음향 벡터 센서를 이용한 지연합 빔형성(delay-sum beamforming) 기법은 Fig. 2와 같이 2단계로 나누어 수행한다. 블록도에서와 같이 첫 번째로 각각의 음향 벡터 센서에서 카디오이드 빔형성을 통해 특정방위의 신호를 얻는다. 두 번째로 첫 번째에서 얻은 신호를 이용하여 지연합 빔형성을 통해 최종 빔출력을 얻는다.

Step. 1 각각의 음향 벡터 센서에서 카디오이드 빔형성을 통해 특정방위의 신호를 얻는다.

Step. 2 Step.1에서 얻은 신호를 지연합 빔형성을 통해 최종 빔출력을 얻는다.

각각의 음향 벡터 센서에서 카디오이드 빔형성 기법을 통한 빔출력신호는 Eq.(3)과 같다.<sup>[4,5]</sup>

$$x_m(t) = \mathbf{w}_0 \mathbf{y}_m(t), \tag{3}$$

여기서  $m = 1, \dots, M$ 이며  $M$ 은 센서 개수이다.  $\mathbf{w}_0$ 는 카디오이드 빔형성 기법에서 가중벡터를 의미하며, 관측하는 방향의 방위각이  $\theta_0$ , 고각이  $\phi_0$ 인 경우 Eq.(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{w}_0 = [1 \ \cos\theta_0 \cos\phi_0 \ \sin\theta_0 \cos\phi_0 \ \sin\phi_0]. \tag{4}$$

각각의 음향 벡터 센서에서 카디오이드 빔출력신호를 이용하여 지연합빔형성 기법을 적용하여 얻은 최종 빔출력 신호는 Eq.(5)와 같이 나타낼 수 있다.<sup>[9]</sup>

$$b(t) = \sum_{m=1}^M v_m^*(\psi) x_m(t) = \mathbf{v}^H \mathbf{x}, \tag{5}$$

여기서  $\psi$ 는 선배열센서에서 표적의 방위각을 의미한다.  $\mathbf{x} = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_M(t)]^T$ 는 카디오이드 빔출력신호로 구성된 벡터이며,  $\mathbf{v}$ 는 선배열 지연합 빔형성에서 가중벡터를 나타내고 Eq.(6)과 같이 표현된다.

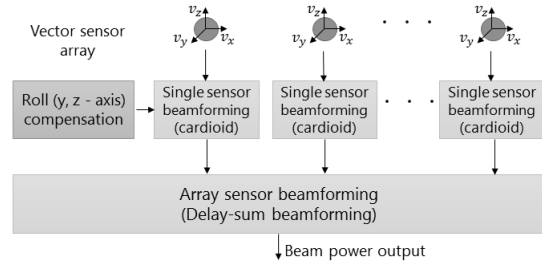


Fig. 2 Block-diagram of acoustic vector sensor arrays beamforming.

$$\mathbf{v} = [1 \ e^{j\omega\tau_1} \ \dots \ e^{j\omega\tau_{M-1}}], \tag{6}$$

여기서  $\tau_m = \frac{d(m-1)\sin\psi_0}{c}$ 이며,  $d$ 는 센서사이의 거리,  $\psi_0$ 는 조향각이다.

빔형성기의 빔출력 에너지  $P(\psi)$ 는 다음과 같다.

$$P(\psi) = E[|b(t)|^2] = \mathbf{v}^H \mathbf{R} \mathbf{v}, \tag{7}$$

여기서  $\mathbf{R} = E[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)]$ 은 크기가  $M \times M$ 인 센서 출력의 공분산행렬이다.

#### 3.2 음향 벡터 센서 배열의 뒤틀림 보상

음향 벡터 센서에서 정확한 신호의 방향추정은 축의 정보를 정확히 알고 있다는 가정하에 이루어진다. 배열화된 음향 벡터 센서들은 운용중에 뒤틀림이 쉽게 발생할 수 있으며, 이로 인하여 빔형성 기법의 성능저하를 발생시킨다. 따라서 적절한 보상을 통하여 성능복원이 필요하다. 보상은 배열센서 사이에 뒤틀림의 정도를 확인할 수 있는 롤 센서의 정보를 이용한다. 센서 배열의 구조상 튜브안에 센서를 고정시키기 때문에  $x$  축의 변화는 센서 배열의 형태에 주로 영향을 받으며, 뒤틀림은  $y, z$  축의 변화가 크게 작용한다. 따라서 Fig. 1에서 음향 벡터 센서 배열의  $x$  축은 고정되어 있고  $y, z$  축의 변화를 뒤틀림이라 가정한다.  $y, z$  축의 변화에 따른 보상은 음향 벡터 센서의 가중벡터에 롤 센서에서 얻은 뒤틀림정도를 이용하여 이루어지며, 보상된 가중벡터  $\mathbf{w}'_0$ 는 Eq.(8)과 같다.

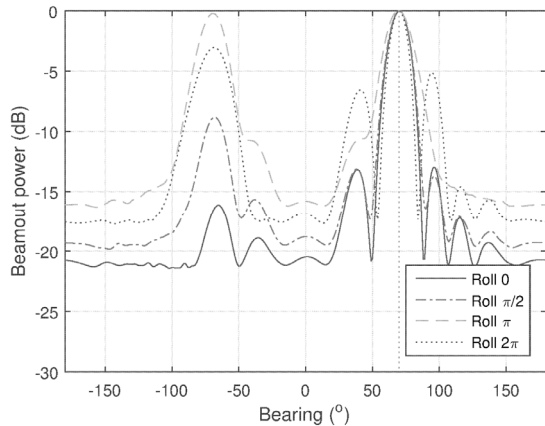


Fig. 3. Beam power without roll compensation.

$$\mathbf{w}_0' = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos\theta_0 \cos\phi_0 \\ \sin\theta_0 \cos\phi_0 \cos(\xi + e_\xi) + \sin\phi_0 \sin(\xi + e_\xi) \\ \sin\phi_0 \cos(\xi + e_\xi) - \sin\theta_0 \cos\phi_0 \sin(\xi + e_\xi) \end{bmatrix}^T, \quad (8)$$

여기서  $\xi$ 는 롤 센서에서 얻은 뒤틀림 각도정보이며,  $e_\xi$ 는 롤 센서의 오차를 의미한다.

Fig. 3은 센서 배열의 뒤틀림 정도에 따른 빔출력 에너지 결과를 나타낸 것이다. 실선은 뒤틀림이 발생하지 않은 경우의 결과이며, 70°에 위치한 표적이 좌 우 구분되어 나타나는 결과를 확인할 수 있다. 대시-닷 선은 뒤틀림이  $\pi/2$ , 대시 선은 뒤틀림이  $\pi$ , 점 선은 뒤틀림이  $2\pi$ 만큼 발생했을 때의 결과이다. 뒤틀림은 첫 번째 센서부터 마지막 센서까지 선형적으로 뒤틀림이 발생했다고 가정하였다. 즉, 뒤틀림이  $\pi/2$ 만큼 발생하면 센서사이의 뒤틀림 각도 차이는  $\pi/2M$ 만큼 변화하게 되고 마지막 센서는 첫 번째 센서와 비교하여  $\pi/2$ 만큼 회전하게 된다. 따라서  $y$ 축과  $z$ 축이 바뀐 신호가 수신되게 되며, 뒤틀림이 더 크게 발생할수록 좌 우 구분 성능이 저하되는 것을 알 수 있다. 실제 센서 배열에서 뒤틀림은 선형적으로 발생하지 않는다. 따라서 롤 센서가 음향 벡터 센서마다 위치하게 되어 정확한 뒤틀림 보상이 된다면 가장 효과적이지만 롤 센서의 사용이 제한적이라면 보상효과가 제한적으로 나타날 수 있다. 따라서 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 뒤틀림 보상에 따른 성능분석을 통해 좌 우 구분성능을 확인한다.

## IV. 모의실험

본 장에서는 음향 벡터 센서 배열의 뒤틀림에 따른 빔형성 성능분석과 뒤틀림 보상에 따른 성능 복원에 대한 분석을 수행하였다. 실험에서 음향 벡터 센서의 개수는 32개의 채널을 이용하였으며, 센서간 거리는  $\lambda/2$ 이며, 설계주파수는 1000 Hz로 설정하였다. Fig. 1과 같이 ULA(Uniform Line Array)를 가정하였으며, 뒤틀림은 3.2절에서 언급한 바와 같이  $y, z$ 축에 회전으로 발생한다고 가정한다.

Fig. 4는 Fig. 3의 결과와 동일한 조건에서 뒤틀림 보상을 시행한 빔출력 결과이다. 보상을 위한 롤 센서는 음향 벡터 센서의 개수와 동일하게 32개를 이용하였으며, 음향 벡터 센서와 동일한 위치에 있다고 가정하였다. 또한 롤 센서 오차( $e_\xi$ )는 가우시안 분포를 가정하였으며, 표준편차는  $\sigma_\xi = 5^\circ$ 로 설정하였다. 롤 센서를 음향 벡터 센서와 동일한 위치에서 동일한 개수만큼 사용하였기 때문에 뒤틀림 보상이 잘 수행되며, Fig. 4에서 보여 주는 것과 같이 우수한 보상 성능 나타낸다. 그러나 실제 상황에서 보상은 이보다 더 열악한 환경에서 이루어진다. 본 모의실험에서 롤 센서의 측정 오차 및 사용되는 개수에 따른 성능 차이를 분석한다. 그리고 음향 벡터 센서 배열의 뒤틀림이 임의적으로 발생한다고 가정하였을 때 사용되는 롤 센서의 개수에 따른 성능 차이를 분석한다.

Fig. 5는 음원이 위치한 방위각의 좌 우 대칭점의

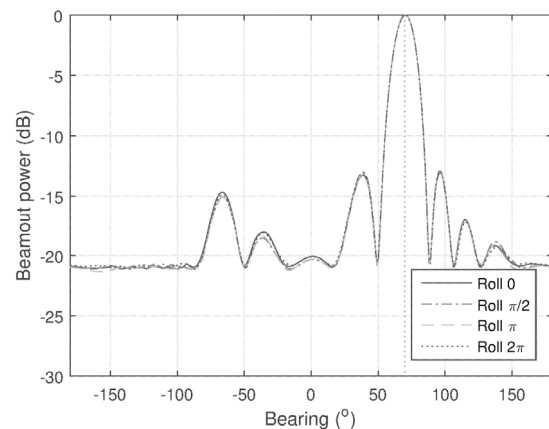


Fig. 4. Beam power with roll compensation.

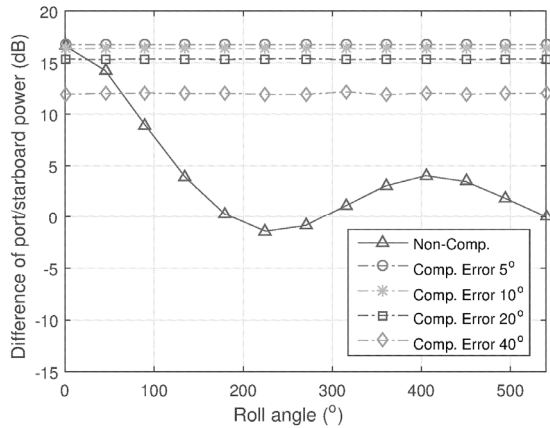


Fig. 5. Difference of port/starboard power for compensation error.

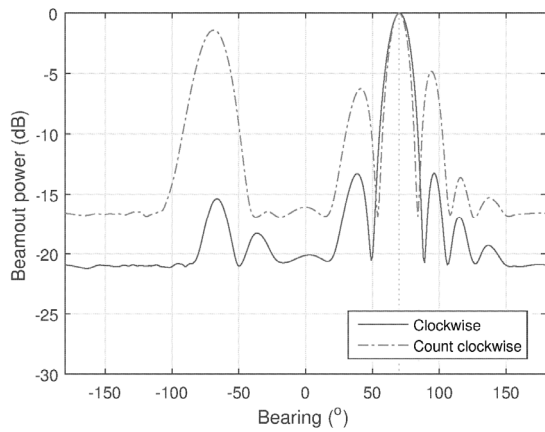


Fig. 6. Beam power for roll-direction.

빔 출력차이를 롤 센서의 오차에 따라 나타낸 결과이다. 롤 센서의 개수나 위치 조건은 앞의 Fig. 4와 동일하다. x축의 롤각도는 앞의 Fig. 3에서 설명된 센서 배열의 처음과 끝의 롤각도 전체변화량을 의미하며, 이번 실험에서도 센서 배열에서 롤이 선형적으로 변화한다고 가정한다. y축의 좌우 빔출력 차이 값은 표적이 70°에 위치할 때 -70°의 빔출력 값과의 차이를 의미한다. 삼각형으로 마킹된 실선은 뒤틀림 보상이 없을 때의 결과를 나타내며, 비틀림이 점점 많이 발생할수록 좌우 구분성능 저하가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 롤각도가 270°를 넘어갈 때 좌우 구분성능이 올라가는 형태는 전체 배열에서 음원 방향을 조향하는 벡터 센서의 수가 증가하여 나타나는 현상이다. 즉, 롤각도가 270°이면 전체배열의 1/3은 음원 방향을 나머지 2/3은 반대방향을 조향하게되며,

롤각도가 360°이면 다시 전체배열의 1/2는 음원 방향을 나머지 1/2는 반대방향을 조향하게 되어서 나타나는 현상이다. 대시-닷선(원형, 별표, 사각형, 다이아몬드형)은 뒤틀림 보상이 이루어진 결과를 나타내며, 보상 시에 롤 센서의 측정 오차에 대한 표준편차 5°, 10°, 20°, 40°일 경우를 나타낸 것이다. 각각의 경우에 대해서 몬테카를로 시뮬레이션 200회의 수행결과를 나타낸 것이다. 롤 센서의 측정 오차가 클수록 좌우 구분 성능이 저하됨을 확인할 수 있으나, 성능 저하의 정도가 크지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 센서 배열의 양 끝에 두 개의 롤 센서가 위치해있다고 가정하고 센서 배열의 뒤틀림에 따른 빔출력을 나타낸 것이다. 실험조건은 Fig. 4와 동일하다. 단 센서 배열의 뒤틀림은 0°~270° 만큼 선형적으로 발생시켰다. 따라서 양끝의 롤 센서에는 0°와 270°의 값이 입력되게 된다. 하지만 센서 배열의 변화가 시계방향인지 반시계방향인지는 롤 센서만의 정보로 확인이 불가능하다. 실선은 센서 배열의 뒤틀림 방향과 롤 센서정보를 이용한 뒤틀림 보상방향이 일치하는 경우 적절한 보상으로 인하여 좌우 구분이 잘 되었으며, 대시-닷선은 뒤틀림 방향과 보상방향이 일치하지 않아서 보상이 이루어지지 않는 결과를 나타내었다. 따라서 잘못된 방향으로 보상이 되었을 때 Fig. 6과 같이 보상의 성능이 심각하게 저하된다. 따라서 적절한 개수의 롤 센서를 센서 배열에 배치해야 보상성능을 만족시킬 수 있다.

Fig. 7은 실제 음향 벡터 센서 배열의 뒤틀림의 방향을 예측할 수 없기 때문에 음향 벡터 센서 배열의 뒤틀림 변화가 임의적으로 발생하였 때 롤 센서의 개수에 따른 보상성능을 확인한 결과이다. 음향 벡터 센서 배열의 뒤틀림을 다음과 같이 정의하였다. 각각의 음향 벡터 센서 사이의 뒤틀림 변화량을 가우시안분포로 가정하였으며, 표준편차가 10°, 30°, 50°에 대하여 실험하였다. 롤 센서의 배치는 음향 벡터 센서 배열의 전체길이에 등간격으로 배치하는 것을 가정하였다. 나머지 조건은 Fig. 3과 동일하다. y축의 좌우 빔출력 차이는 앞의 Fig. 5에서 설명한 내용과 동일하게 수행되었다. 실선은 음향 벡터 센서 배열에서 음향 벡터 센서 사이의 뒤틀림 변화량이 표준편차가 10°인 경우에 대한 결과이다. 음향 벡터

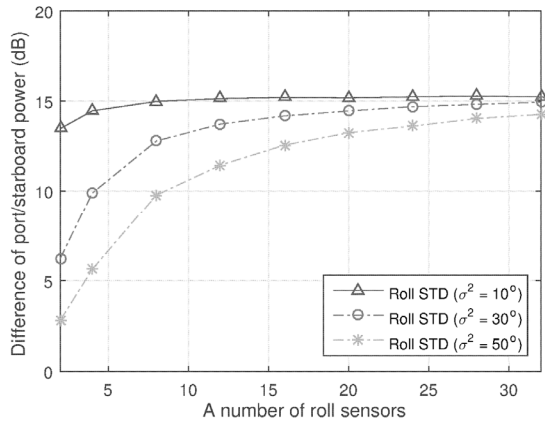


Fig. 7. Difference of port/starboard power for a number of roll sensors.

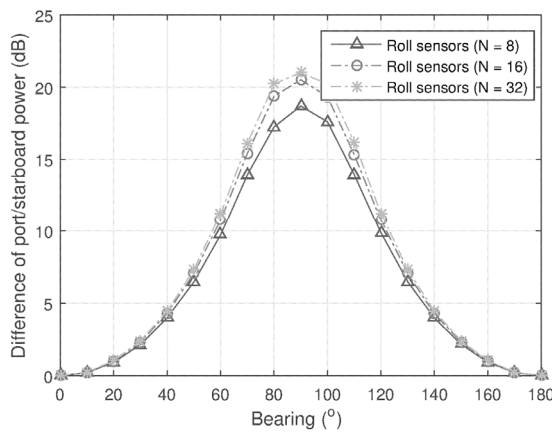


Fig. 8. Difference of port/starboard power for source bearing.

센서 사이의 뒤틀림변화가 크지 않아 롤 센서의 개수에 큰 영향을 받지 않았다. 하지만 변화량의 표준편차가 30°, 50°인 경우는 센서 배열의 뒤틀림 변화가 커졌기 때문에 롤 센서의 개수에 따른 성능차이가 크게 나타났다. 실험결과 롤 센서의 개수가 증가함에 따라 보상성능이 증가하였으며, 좌우 구분성능을 만족하기 위해서 설계사양에 맞는 롤 센서의 사용이 필요할 것으로 판단된다. Fig. 8은 Fig. 7의 모의실험에서 음향 벡터 센서 사이의 뒤틀림 변화량의 표준편차가 30°인 경우에 대해 음원의 방위각에 따른 좌우 구분성능을 나타낸 것이다. 음원의 방향이 음향 벡터 센서 배열의 0°, 180° end-fire 근처에서는 좌우 구분성능이 저하되어 보상의 성능여부를 확인하기 어렵다. 90° broadside 근처에서는 롤 센서의 개수에 따라 성능이 Fig. 7과 같이 나타난다.

## V. 결론

본 논문에서는 음향 벡터 센서 배열의 뒤틀림에 따른 빔형성 결과에서 좌우 구분 모호성에 대하여 분석하였다. 그리고 롤 센서의 오차, 센서 배열의 비선형변화에서 센서개수에 따른 좌우 구분 성능에 대한 영향을 분석하였다. 음향 벡터 센서 배열의 뒤틀림에 대한 적절한 보상을 통한 음향 벡터 센서 배열의 좌우 구분 성능향상을 확인하였다. 롤 센서의 추정오차에 대한 영향은 좌우 구분성능에 크게 영향을 미치지 않았으며, 비선형으로 변화하는 센서 배열에서 롤 센서의 개수에 따른 보상성능은 크게 차이가 났다. 따라서 적절한 롤 센서를 이용하여 센서 배열을 구성하는 것이 필요하다. 음향 벡터 센서 배열을 운용함에 있어 뒤틀림에 따른 좌우 구분 성능저하가 심각하게 나타나기 때문에 적절한 뒤틀림 보상에 대한 고려가 필요함을 확인하였다.

## 감사의 글

이 논문은 2016년도 한화탈레스(주)의 재원을 지원 받아 수행된 연구이다(계약번호 : C-16-001).

## References

1. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound* (McGrawHill, New York, 1983), pp. 54-60.
2. S. C. Nardone, A. Lindgren, and Kai Gong, "Fundamental properties and performance of conventional bearings-only target motion analysis," *IEEE Transactions on automatic control* **29**, 775-787 (1984).
3. T. Warhonowicz, H. Schmidt-Schierhorn, and H. Hostermann, "Port/Starboard discrimination performance by twin line array for a LFAS sonar system," in *Proc. UDT, Europe*, 398 (1999).
4. J. P. Feuillet, W. S. Allensworth, and B. K. Newhall, "Nonambiguous beamforming for a high resolution twin-line array," *J. Acoust. Soc. Am.* **97**, 3292 (1995).
5. G. W. M. van Mierlo, S. P. Beerens, R. Been, Y. Doisy, and E. Trouve, "Port-Starboard discrimination on hydrophone triplets in active and passive towed arrays," in *Proc. UDT, Pacific*, 63-68 (2000).
6. Y. W. Ryu, E. C. Jeong, and S. Y. Chun, "Analysis on noise correlation of triplet line array sensors in the east sea" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **34**, 479-486 (2015).

7. A. Nehorai and E. Paldi, "Acoustic vector sensor array processing," IEEE Trans. signal Process, **42**, 2481-2491 (1994).
8. J. Cao, "Survey on acoustic vector sensor and its applications in signal processing," IEEE Control Conference (CCC), Chinese, (2014).
9. R. O. Nielsen, *Sonar Signal Processing* (Norwood, MA: Artech House, 1991), pp. 51-69.

▶ 이 균 경 (Kyun Kyung Lee)



1977년 2월: 서강대학교 전자공학과  
공학사  
1984년 2월: 텍사스 주립대 전자공학  
공학석사  
1987년 2월: 텍사스 주립대 전자공학  
공학박사  
1989년 6월 ~ 현재: 경북대학교 교수  
2007년 6월 ~ 현재: 수중 통신/탐지 특화  
연구센터 센터장  
<관심분야> 수중음향신호처리, 수중 분산  
네트워크

저자 약력

▶ 이 호 진 (Ho Jin Lee)



2010년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터  
학부 공학사  
2012년 2월: 경북대학교 IT대학 전자공학부  
공학석사  
2012년 3월 ~ 현재: 경북대학교 IT대학  
전자공학부 박사과정  
<관심분야> 배열신호처리, 수중음향신호  
처리

▶ 류 창 수 (Chang-Soo Ryu)



1992년 2월: 경북대학교 전자공학과  
공학사  
1994년 2월: 경북대학교 전자공학부  
공학석사  
2002년 2월: 경북대학교 전자공학부  
공학박사  
1994년 3월 ~ 1997년 12월: 국방과학연구소  
연구원  
2002년 ~ 현재: 영남이공대학교 전자정보  
계열 교수  
<관심분야> 소나신호처리, 표적 탐지 및  
추적

▶ 배 은 현 (Eun Hyon Bae)



2001년 2월: 경북대학교 전자과 공학사  
2003년 2월: 경북대학교 전자공학과  
공학석사  
2009년 2월: 경북대학교 전자공학과  
공학박사  
2005년 11월 ~ 현재: 한화탈레스 수석  
연구원  
<관심분야> 수중음향신호처리, 함정전투  
체계