

이동하는 소음원 위치 추정을 위한 다양한 빔형성 기법 적용

Localization of Moving Sound Source Using Various Beamforming Methods

고 영 주* · 이 재 형* · 최 종 수† · 하 재 현**

Yeong-Ju Go, Jaehyung Lee, Jong-Soo Choi and Jae-Hyoun Ha

(Received November 17, 2015 ; Revised July 25, 2016 ; Accepted July 25, 2016)

Key Words : Beamforming Method(빔형성 방법), Time-domain Beamforming(시간영역 빔형성), Frequency Beamforming(주파수영역 빔형성), Narrowband Beamforming(협대역 빔형성), Broadband Beamforming(광대역 빔형성)

ABSTRACT

Capabilities of several beamforming techniques are compared for estimating the position of a moving source. Beamforming has enabled to widen our perspective of aeroacoustics in wind tunnel experiments and has provided useful approach in array measurements. Meanwhile beamforming techniques have been developed in a way to improve estimation accuracy and to save ing effort at the same time. In order to achieve reasonable outcome from aeroacoustic measurement, it is important to identify the spectral characteristics of source and to select an appropriate beamformer. Though aeroacoustic sources normally generates broadband noises, many array signal processing have been focused on narrowband processing which makes calculation numerically efficient. However, calculation in frequency-domain requires selection of single frequency of interest which affects spatial resolution and sidelobe level as a consequence. To be able to localize broadband noise source, it is proposed to use broadband beamforming. The formulas implements the deletion of diagonal term from cross spectral matrix. In this study, trajectory of flying source emitting broadband noise was simulated and several beamformers are applied.

1. 서 론

지연합 빔형성 기법(delay-and-sum beamforming)은 음향 및 전파 공학 분야에서 음원의 위치를 찾는 데 응용되어 왔다. 어레이에 전달되는 신호의 출력을 일정 시간만큼 지연하여 합하면 신호의 크기가 증폭되거나 상쇄된다. 지연하는 시간 길이는 어레이의 각 센서가 지향하는 지점에 대해 거리를 음속으

로 나누어 계산된다. 따라서 어레이의 각 센서에 도달하는 거리에 따라 즉, 지연된 시간에 따라 합한 신호의 크기가 다르게 된다. M 개의 센서로 구성된 어레이의 빔포머의 출력을 식으로 표현하면

$$b(t) = \sum_{m=0}^{M-1} w_m y_m(t - \Delta_m) \tag{1}$$

과 같이 표현된다. 여기서 t 는 시간, m 은 센서 번호, w_m 은 m 번째 센서의 가중치, y_m 은 m 번째 센

† Corresponding Author; Member, Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University
E-mail : jchoi@cnu.ac.kr
* Member, Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University
** Member, Agency for Defense Development

‡ Recommended by Editor Myung Jun Kim
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

서의 출력이며 Δ_m 은 m 번째 센서의 지연시간이다⁽¹⁾.

빔형성 기법의 성능을 결정하는 요소는 어레이 방향성(directionality), 공간 분해능(spatial resolution)과 부엽 저감 능력(sidelobe reduction)이다. 음향 빔형성 적용 시 공간 분해능과 부엽의 레벨 크기는 각각 실제 소음원 위치 판별에 대한 정확도와 음원의 존재 여부를 구별할 수 있는 능력에 대한 지표이다. 어레이의 크기, 센서의 배치 형태, 센서 수 그리고 적용 알고리즘 등이 성능 결정에 영향을 주며, 어레이 설계 시 측정 환경과 목적에 따라 고려할 필요가 있다. 정리하면 빔형성 기법은 물리적으로는 어레이 센서를 조정하거나, 전기적인 아날로그 지연 회로에서, 혹은 수학적 디지털 신호 처리 방법을 통해 수행되는 것이다⁽²⁾.

소음원이 움직일 경우 어레이에서 수신된 음파는 음파전달속도에 운동 속도를 더해 전파된다. 소음원이 움직이는 경우 도플러 효과가 관찰되며 주파수 분석 시 상대적인 속도와 거리에 따라 주파수가 변하게 된다⁽³⁾. 움직이는 소음원의 위치를 어레이 신호 처리로 추정하기 위해 도플러 효과를 제거해야 한다. 이는 상대적인 움직임에 대한 정보를 수신된 음압 신호의 형태를 재구성하는 방법으로 차량 및 프로펠러 소음원을 분석하는 경우에 적용되고 있다⁽⁴⁾. 회전하는 소음원의 위치를 파악하기 위해 빔형성 기법을 적용하는 과정은 도플러 효과 제거를 통한 연구이다. 발생한 소음원의 신호를 음원의 상대적인 움직임으로부터 내삽하여 재구성하는 두 가지 추출방법을 소개하고 있다⁽⁵⁾. 움직이는 음원과 어레이 간의 상대속도로 각 마이크로폰에서 측정되는 구형파 전파 모델을 만들어 빔형성 기법을 적용하였다. 이를 이용하여 차량에서 주기적으로 발생하는 충격 소음원의 위치를 추정하는 실험을 수행하였다⁽⁶⁾.

이러한 도플러 효과 제거는 빔형성 기법을 이용한 여러 공력소음 연구에 적용되고 있다. 이광세 등은 풍력 터빈블레이드의 방사소음 예측 및 저감을 위한 소음원 파악에 빔형성 기법을 적용하였다⁽⁷⁾. B&K 시스템을 이용하여 블레이드의 경계층과 난류 상호작용에 의한 소음원을 가시화하고 분석결과를 제시하였다. 노희민 등은 고속열차 소음특성 연구에 어레이 측정 기법을 적용하여 주요 공력소음에 대한 주파수 특성을 분석하였다⁽⁸⁾. 고영주 등은 어레이 측정을 통해 실린더 표면 음압 레벨을 예측하는 연

구를 수행한 바 있다⁽⁹⁾. 마이크로폰 어레이를 이용한 음향 측정과 표면에서의 변동압력 간에 상관관계 분석으로 예측 결과를 도출하였다. 로켓 발생 소음의 도래각 측정을 위한 어레이 측정기법이 소개된 바 있다⁽¹⁰⁾. 비행시험 시 로켓의 탄도 궤도를 어레이를 이용하여 측정하고 여러 빔형성 알고리즘을 이용하여 분석하였다.

어레이의 공간 분해능은 소음원 위치를 정확히 판별하거나 소음원들을 공간에서 구별하는 기준이며 주엽(main lobe) 빔폭의 크기를 통해 평가할 수 있다. 빔폭은 어레이 센서 형태, 크기 및 관심주파수에 의해 영향을 받는다. 빔형성 기법의 빔패턴에서 보이는 부엽은 실제 소음이 발생하는 위치가 아닌 부분에 빔이 나타는 것으로 원래 음원의 위치가 아닌 곳에 출력이 생기는 것이며 공간 엘리어싱(spatial aliasing)과 연관되어 있다. 공간 엘리어싱이란 관심주파수의 반파장(half wavelength) 보다 넓게 이산적으로 분포한 센서들에 의해 발생하는 grating lobe(부엽 중 주엽의 크기에 가까운 것)에 의해 주엽의 판별도를 낮추는 현상이다. 따라서 이러한 현상은 관심주파수에 따라 영향을 받으며, 협대역 주파수 분석의 경우에 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 공간 엘리어싱은 적절한 센서 배치나 공간 필터 적용을 통해 어레이 성능을 개선할 수 있다.

이 논문에서는 움직이는 소음원의 위치 추정 정확도를 위해 추가적인 어레이 신호처리 기법으로 부엽을 감소시켰다. 일반 빔형성 방법(CBF, conventional beamforming)과 MUSIC(multiple signal classification), robust adaptive beamforming(RABF)을 적용한 예를 소개한다. MUSIC 및 RABF은 도래각(DoA, direction of arrival)을 추정하는 경우에 많은 분야에서 응용되어 왔다. 상호상관함수행렬에 포함된 정보를 이용하여 가중벡터를 조정하여 원하는 위치의 값은 일정하게 유지시키면서 어레이의 출력을 최소화시켜 성능을 향상시키는 기법이다⁽¹¹⁾.

근래에는 Dougherty는 광대역 빔형성 기법을 통해 특정 협대역 주파수에서의 분석을 넘어서 광대역 소음원에 대한 분석 결과를 소개하였다⁽¹²⁾. 일반 빔형성 방법은 특정 주파수 성분에 대해 상호상관 행렬을 계산하여 계산하는 주파수 영역 빔형성 기법으로서 소음 특성이 광대역일 경우 광대역 주파수 범위에 적용하는 알고리즘이 요구된다. 따라서 이 논문에서는 앞

서 언급한 주파수 영역 빔형성 기법과 시간 영역에서의 광대역 빔형성 방법의 이동 소음원에 대한 적용을 소개한다. 이동하는 소음원에서 각 방법들의 계산 결과를 비교하며 성능을 비교한다.

2. 빔형성 방법

2.1 주파수 영역 빔형성 방법

알고리즘 구현을 위한 빔형성 방법은 다음과 같은 방법으로 계산하며, 조향벡터 및 상관 스펙트럼에 따른 빔 파워 계산 방법에 따라 서로 다른 빔형성 기법 결과를 나타낸다. 이 연구에서는 일반적인 빔형성 방법 CBF, MUSIC, RABF 기법을 이용하여 알고리즘을 구현하였다.

(1) Conventional Beamforming

주파수 영역 빔형성 방법은 각 마이크로폰 신호의 데이터를 짧은 시간 푸리에 변환을 계산함으로써 협대역 분석하게 된다. 마이크로폰 어레이에서 측정된 관심주파수의 음압 계산은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p = [p_1(f) p_2(f) f_m(f) \cdots p_M(f)]^T \quad (2)$$

음압 행렬과 공액복소수로부터 상관스펙트럼 행렬 계산은

$$C = \frac{1}{2} pp^* \quad (3)$$

으로 표현된다. 어레이와 가상 소음원의 위치 관계에 의한 조향벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g = [g_1 g_2 g_m \cdots g_M]^T \quad (4)$$

여기서 조향벡터 $g_m = e^{-i\omega\Delta t} / 4\pi r$ 와 상관스펙트럼에 의한 일반적인 빔형성 방법의 빔 파워는 다음과 같이 계산된다.

$$b_{CBF} = \frac{g^* C g}{g^* g} \quad (5)$$

(2) MUSIC

MUSIC은 고유치 분리를 사용하여 상호상관 스펙트럼 행렬을 계산하게 된다. MUSIC 방법은 크로스 스펙트럼의 고유치 분리 방법을 이용하여 신호에 직교하는 노이즈 서브스페이스(noise subspace)를 구성하여 신호의 방향을 탐지하는 방법이다. MUSIC 방법은 상관관계가 있는 신호에서는 현저한 성능 저하를 보인다. 왜냐하면 비상관관계의 신호에서만 크로스 스펙트럼 행렬의 기저벡터들이 서로 독립적이어서 신호들과 노이즈 사이의 직교성이 유지되기 때문이다. 이와 같은 이유 때문에 상관성을 줄이는 방법을 사용한다. 여기서는 공간 평균법(spatial smoothing)을 사용하여 상관성을 줄인 크로스 스펙트럼 행렬을 사용한다. 위의 두 가지 경우의 시뮬레이션을 통해 빔형성 방법을 이용한 반사계수 측정법의 유용성을 알아본다.

$$b_{MUSIC} = \frac{g^* g}{g^* U_\sigma U_\sigma^H g} \quad (6)$$

(3) Robust Adaptive Beamforming

MVDR은 상호상관함수행렬에 포함된 정보를 이용하여 가중벡터를 조정하게 되는데, 원하는 위치(실제 음원의 위치)의 값은 일정하게 유지시키면서 어레이의 출력을 최소화 한다. 이 내용은 다음과 같이 간단하게 표현될 수 있다.

$$\min(w^H R w) \quad w^H d = 1$$

$$b_{MVDR} = \frac{C^{-1} g}{g^* C^{-1} g} \quad (7)$$

음원이 있는 위치에서는 일정한 값을 주고 나머지 어레이의 출력은 감소시키면 자동적으로 부엽과 빔폭은 감소하게 된다. MVDR은 이상적인 상황에서는 좋은 결과를 얻을 수 있지만 이 방법은 오차에 대한 감도가 상당히 크기 때문에 가정과 계산과정에서 생기는 작은 오차들에 의하여 결과는 급격히 나빠지게 된다. 이런 감도의 문제는 심각하기 때문에 실제에 적용하는 것에는 많은 어려움이 있다.

$$b_{Robust} = \frac{(C + \epsilon I)^{-1} g}{g^* (C + \epsilon I)^{-1} g} \quad (8)$$

(ϵ : Lagrange multiplier)

2.2 시간 영역 빔형성 방법

(1) 광대역 빔형성 방법

앞서 일반적인 빔형성 방법의 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$b_{conv} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} \langle p_i(t-\tau_{im}) p_k(t-\tau_{km}) \rangle \quad (9)$$

광대역 빔형성 방법은 주파수 영역의 자기상관함수 부분인 대각행을 제거함으로써 구현이 가능하다.

$$b_{br}(x_m) = \left\langle \sum_{i=0}^{N-1} p_i^2(t-\tau_{im}) + \sum_{i \neq k} p_i(t-\tau_{im}) p_k(t-\tau_{km}) \right\rangle \quad (10)$$

3. 시뮬레이션 분석

3.1 시뮬레이션 조건

선형으로 등속 이동하는 점음원에 대한 음압신호를 선형 마이크로폰 어레이로 측정하는 환경 조건에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 1에서 움직이는 경로와 마이크로폰 어레이의 위치를 보이고 있다. 마이크로폰 어레이는 선형이며 0.03 m의 등간격으로 24개로 구성하였다. 어레이는 소음원의 이동 경로의 출발지점으로부터 40 m인 곳으로부터 수직으로 10 m, 30 m와 50 m 만큼 떨어져 있으며 이동경로와 나란하게 위치한 상황을 가정하였다.

소음원은 0초부터 0 m 위치에서 100 m 거리를 50 m/s의 등속도로 이동한 것으로 가정하였다. 음향 신호 시뮬레이션 시 움직임을 고려하여 음압을 수신하는 센서에서 도플러 효과가 발생하는 것을 확인하였다. 백색 소음 특성을 발생하도록 하였으며 50 kHz로 샘플링 하였다. 음속은 343.4 m/s이다.

앞서 소개된 세 가지 어레이 기법을 적용하여 Fig. 2부터 Fig. 10에서 보듯이 소음원 위치를 시뮬레이션으로 추정하였다. 각 그래프의 가로는 시간이고 세로는 위치이며, 각 시간대의 빔파워는 0 m부터 100 m 사이의 가상공간을 설정하였으며 0.5 m 간격으로 격자를 생성하였다. 256개의 데이터로 구성된 각 시간별 데이터 블록(0.005 12초 길이의 데이터)의 빔파워는 오버랩이 없이 계산하였으며, 윈도우 없이 푸리에 변환을 수행하였다.

CBF, MUSIC, RABF은 관심주파수는 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz에서 협대역으로 분석하였고, 광대역 빔형성 기법은 일정 주파수와 관계없이 계산하였다. 위에서 언급한 어레이의 측정 거리 별로 계산하였다. 각 그래프에는 빔파워와 함께 실제 음원의 이동 경로를 실선으로 표시하였다. 각 그래프는 시간 대 별 빔분포를 나타내고 있으며 각 빔의 최댓값을 검은 점으로 표시하도록 하여 시간대 별로 소음원의 위치를 추정할 수 있다.

음원이 이동하며 발생하는 신호는 도플러 효과가 발생하기 마련이나, 이 시뮬레이션에서 백색잡음을 사용함으로써 관심주파수에 대한 영향을 무시할 수 있도록 하였다. 도플러 효과를 제거하지 않고 있는

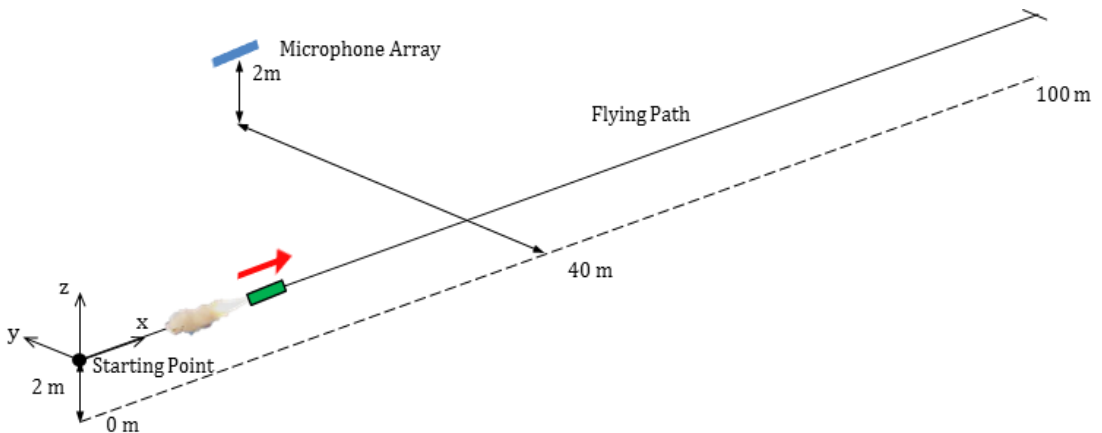


Fig. 1 Trajectory of moving sound source and location of microphone array

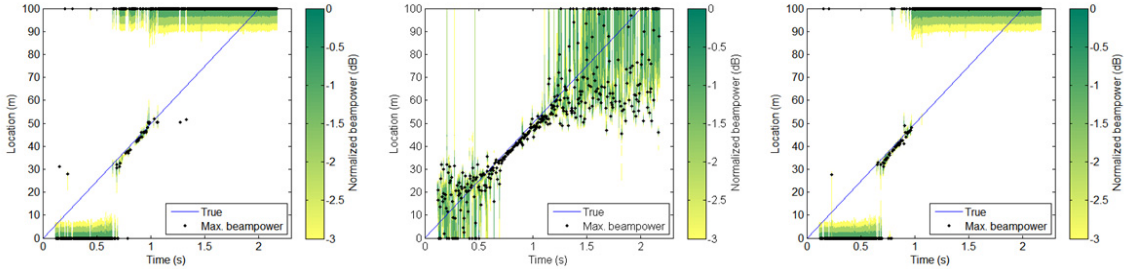


Fig. 2 Beampower distribution and the estimated positions of moving sound source along time when an linear array is 10 m away from the source trajectory. The frequency of interest is 1 kHz. From the left to the right, CBF, MUSIC, RABF

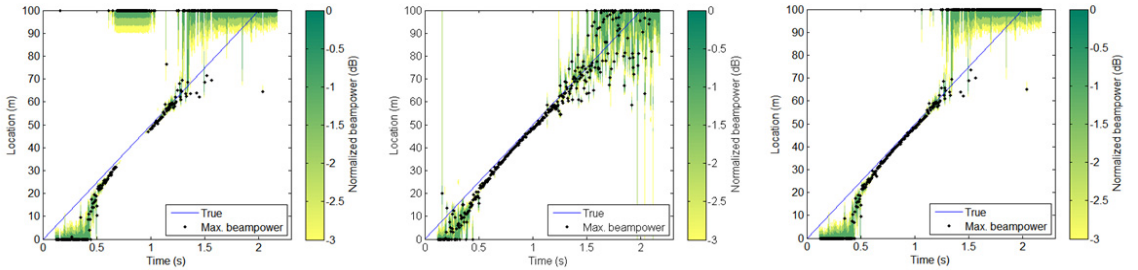


Fig. 3 Beampower distribution and the estimated positions of moving sound source along time when an linear array is 10 m away from the source trajectory. The frequency of interest is 5 kHz. From the left to the right, CBF, MUSIC, RABF

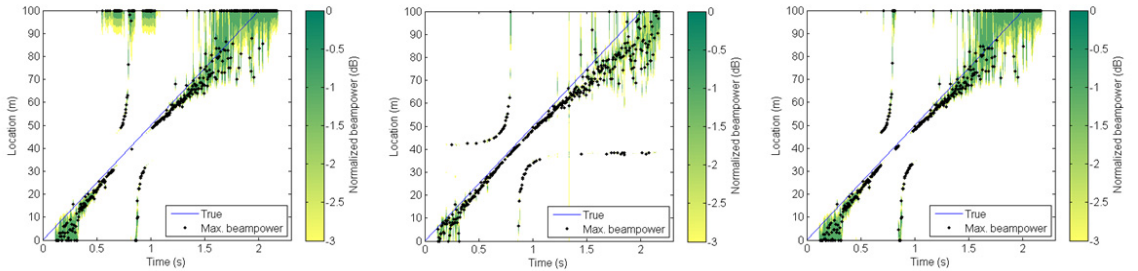


Fig. 4 Beampower distribution and the estimated positions of moving sound source along time when an linear array is 10 m away from the source trajectory. The frequency of interest is 10 kHz. From the left to the right, CBF, MUSIC, RABF

주파수에 대해 어레이 신호처리를 수행하였다.

3.2 측정 위치에 따른 분석

Fig. 2부터 Fig. 4는 각 기법을 이용하여 빔파워의 분포와 실제 음원이 이동한 경로를 비교한 것이며 모두 10 m 거리에서 어레이로 측정한 경우를 시뮬레이션한 결과이다. 실제 이동 경로와 비교하였을 때 어레이가 마주하고 있는 중심 구간에서 빔파워의

최댓값이 위치를 추정하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2의 CBF의 경우 어레이가 위치한 40 m 지점을 기준으로 좌우 10 m 범위 내에서 의미 있는 빔파워 결과가 나오고 그 외의 범위에서 벗어나는 결과를 내고 있다. 이는 일정한 간격으로 배치된 센서로 구성된 선형 어레이 빔패턴의 방향성으로 인해 발생한 것으로 부엽의 크기가 큰 범위에서 관찰된다. 이 같은 현상은 신호처리 기법에 관계없이 같은 거리

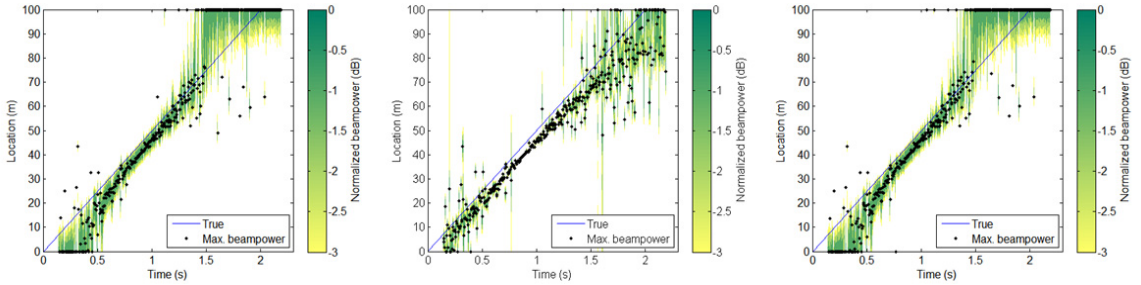


Fig. 5 Beampower distribution and the estimated positions of moving sound source along time when an linear array is 30 m away from the source trajectory. The frequency of interest is 1 kHz. From the left to the right, CBF, MUSIC, RABF

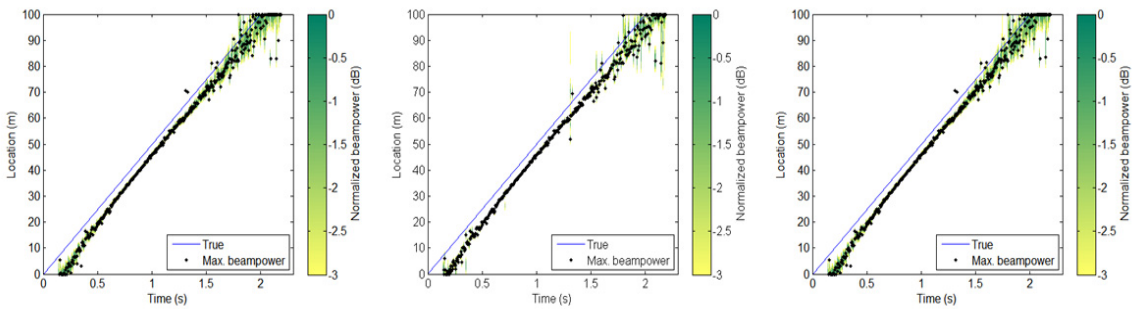


Fig. 6 Beampower distribution and the estimated positions of moving sound source along time when an linear array is 30 m away from the source trajectory. The frequency of interest is 5 kHz. From the left to the right, CBF, MUSIC, RABF

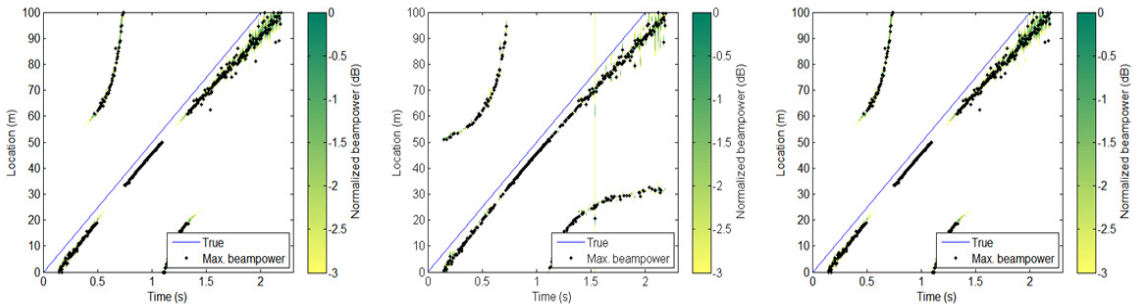


Fig. 7 Beampower distribution and the estimated positions of moving sound source along time when an linear array is 30 m away from the source trajectory. The frequency of interest is 10 kHz. From the left to the right, CBF, MUSIC, RABF

조건 별로 관찰된다. 주엽의 분포 형태가 중심에서 벗어난 형태로 인해 중앙 30 m에서 50 m가 아닌 20 m에서 30 m와 50 m에서 60 m범위에서 범과위가 의미 있는 추정값을 보이고 있으며 이를 벗어나면 다시 벗어난 범위에서 최댓값을 계산하고 있음을 Fig. 3의 CBF에서 확인할 수 있다. 같은 의미로 센서 간

격 또는 관심주파수로 인한 영향은 Fig. 4의 CBF에서도 확인할 수 있다.

3.3 신호처리 기법에 따른 분석

이는 MUSIC, RABF에서도 같은 패턴으로 나타난다. MUSIC의 경우 측정 거리에 관계없이 즉, 측

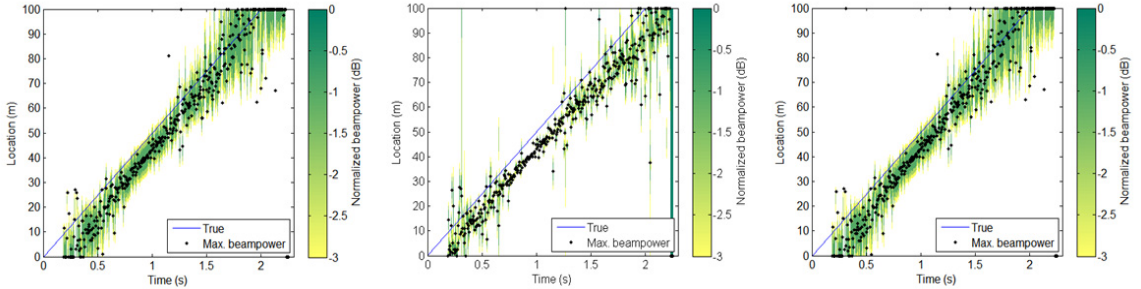


Fig. 8 Beampower distribution and the estimated positions of moving sound source along time when an linear array is 50 m away from the source trajectory. The frequency of interest is 1 kHz. From the left to the right, CBF, MUSIC, RABF

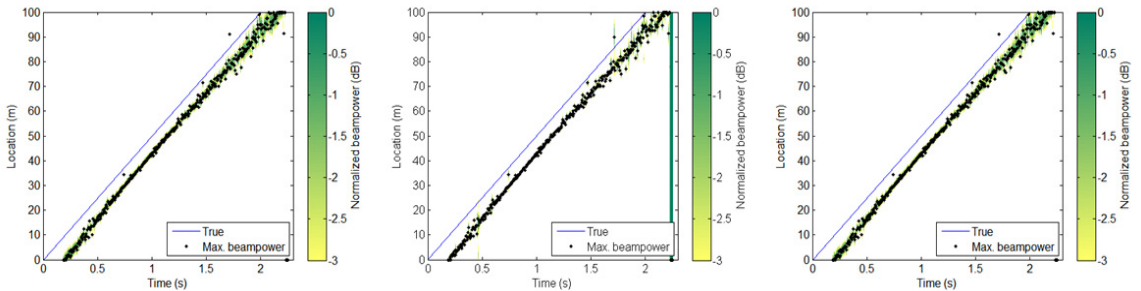


Fig. 9 Beampower distribution and the estimated positions of moving sound source along time when an linear array is 50 m away from the source trajectory. The frequency of interest is 5 kHz. From the left to the right, CBF, MUSIC, RABF

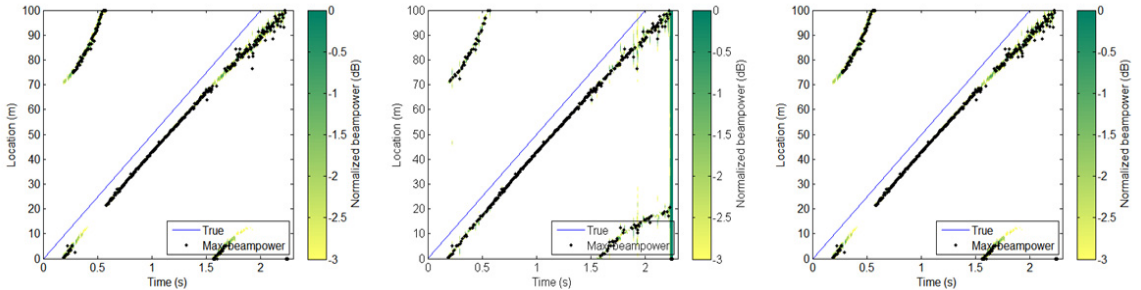


Fig. 10 Beampower distribution and the estimated positions of moving sound source along time when an linear array is 50 m away from the source trajectory. The frequency of interest is 10 kHz. From the left to the right, CBF, MUSIC, RABF

정 범위에 관계없이 운영 어레이의 특성 조건하에서 유용한 추정값을 계산하고 있다. 고주파의 경우 유용한 측정 범위가 벗어난 영역에서 추정값이 산개되어 있는 것을 볼 수 있다. 중심 범위에서도 실제 위치 뿐 아니라 벗어난 부분에서 추정값을 나타내고 있다. 이 점은 거리 축을 따라 살펴보는 것이 이해

하기에 편한데, 어레이가 위치한 40 m 지점에서 각 시간에 관계없이 중앙 부분에서도 추정값을 보이고 있는 것은 역시 빔패턴에 의한 영향이 반영된 것으로 이해할 수 있다.

Fig. 5에서 Fig. 10까지는 30 m와 50 m 측정거리에서 나온 시뮬레이션 결과이다. 전체적으로 소음

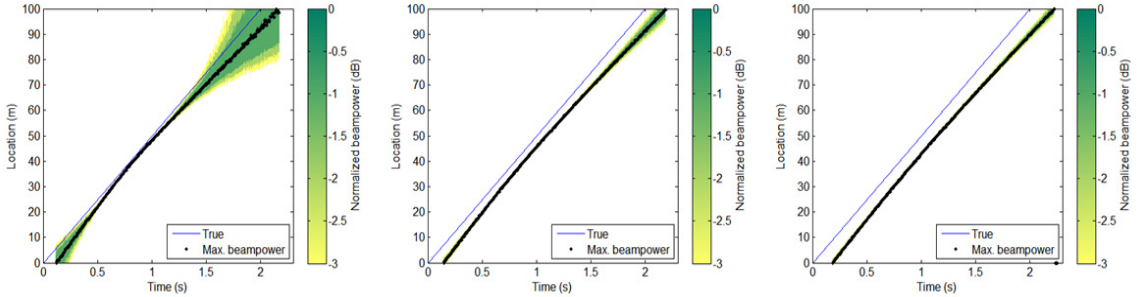


Fig. 11 Beampower distribution and the estimated positions of moving sound source along time when an linear array is 10, 30, 50 m away from the source trajectory. The result of broadband beamforming

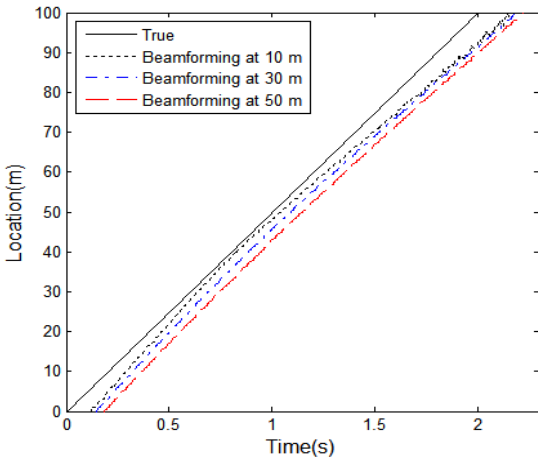


Fig. 12 Beampower distribution and the estimated positions of moving sound source along time when an linear array is 10

원의 이동 경로에서 벗어나 나란하게 위치를 추정하고 있다. 측정거리가 멀어질수록 CBF 빔패턴의 주엽에 의한 응답 범위가 넓어져 추정 결과가 개선되고 있으며 고주파 영역에서 부엽에 의한 영향이 관찰되고 있다.

3.4 측정 위치에 따른 분석

광대역 BF의 경우 저감되어 이동한 위치를 추정하고 있다. Fig. 12는 측정거리 변화에 따라 분석한 소음원의 이동경로다. 소음원은 어레이로부터 44.7 m 거리만큼 떨어진 시작점에서 출발하게 되며 최초 발생한 음파는 약 0.13초 후에 어레이에서 측정되고 그 시작점을 그래프 결과에서 확인할 수 있다. 소음원이 등속 운동함으로써 발생하는 전파 거

리 변화는 음파 전달 시간 변화의 원인이 되어 그래프 상에 진행 경로가 직선이 아닌 곡선 형태로 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 결론적으로 소음원에서 발생한 음파가 어레이에 도달하기까지 걸리는 전파 거리에 의해 지연시간이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이동경로가 어레이에 근접할 경우(40 m) 빔형성 방법에 의한 궤도의 추정값에 근접하나 차이를 보이고 있으며, 측정 위치가 멀어지면 추정궤적이 선형화되나 모든 시간에 대해 위치오차를 보인다. 위와 같은 비선형은 모든 빔패턴 방법에서 동일하게 관찰된다.

4. 결 론

이 연구에서는 CBF, MUSIC, RABF 및 광대역 빔형성 기법을 이용하여 움직이는 소음원의 위치를 추정하였다. 광대역 빔형성 기법의 경우 효과적으로 부엽이 저감되는 것을 확인하였다. 또한, 부엽의 저감과 빔폭의 감소로부터 어레이의 분해능이 향상됨을 보였다. 음원의 위치는 일정한 값을 유지하면서 어레이의 출력을 최소화시키는 RABF나 혼합된 어레이 형태 함수와 음원 분포 함수를 분리하여 성능을 향상시키는 CBF에 비하여 계산시간이 길어지지만 시간의 증가에 비해 상당히 좋은 결과를 보여준다. 여러 제한에 의하여 최적화되어 설계된 어레이를 사용하지 못할 경우에도 CBF와 RABF과 같은 성능 향상 기법들을 통하여 분해능의 향상이 있음을 확인하였다.

이 연구에서 사용된 성능 향상 기법 중에서는 광대역 빔형성 기법이 움직이는 소음원의 위치를 정확

히 추정한다고 할 수 있다. 이 기법을 적용할 경우 이 연구에 모든 주파수 대역에서 정확한 결과를 보인다. 부엽의 저감에서도 대단히 좋은 성능을 보이며 빔폭의 크기가 크게 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 경로가 휘어져 관찰되는 이유는 음파 전달의 지연에 의한 것으로 이를 보정하기 위해 소음원의 움직임에 대한 정보를 추정하여 전파 시간 동안의 이동 거리를 보정하면 정확한 위치를 추정할 수 있게 된다. 광대역 빔형성 기법의 경우 시간 영역에서 계산이 이루어지므로 계산 효율을 위한 기법이 요구된다.

후 기

이 연구는 2013년도 국방과학연구소 개별기초연구인 “음향 빔형성기법을 이용한 유도탄 초기/종말 탄도계측(ADD-13-01-01-02)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

(1) Johnson, D. H. and Dudgeon, D. E., 1993, *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*, PTR Prentice Hall, pp. 112~119.

(2) Van Trees, H. L., 2002, *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 59~70.

(3) Hong, S.-H. and Choi, J.-S., 2004, Experiments on the Noise Source Identification from a Moving Vehicle, *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference*, pp. 911~915.

(4) Sijtsma, P., Oerlemans, S. and Holthusen, H., 2001, Location of Rotating Sources by Phased Array Measurements, 7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit, AIAA 2001-2167.

(5) Lee, J. Hong, S.-H. and Choi, J.-S., 2004, Localization of Rotating Sound Sources Using Beamforming Method, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 1338~1346.

(6) Seo, D.-H., Jeon, J.-H., Park, C.-S. and Kim, Y.-H., 2009, Periodic Impulse Train Source Localization by Using Beamforming Method in Time Domain,

Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 492~493.

(7) Lee, G.-S., Shin, S.-H., Cheong, C. and Jung, S.-S., 2009, Localization of Acoustic Sources on Wind Turbine by Using Beam-forming Techniques, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 19, No. 8, pp. 809~815.

(8) Noh, H., Choi, S., Koh, H.-I. and Cho, J.-H., 2012, Aerodynamic Noise Characteristics of High-speed Trains Using the Beamforming Method, *Proceedings of KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 246~247.

(9) Go, Y.-J., Lee, J., Park, I., Kim, B. and Choi, J.-S., 2012, Sound Pressure Level Estimation for the 2-D Cylinder Noise by Using Beamforming Method, *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 435~436.

(10) Ha, J.-H., Kim, B.-S., Park, W. and Kim, S.-M., 2012, A Study for Direction of Arrival Estimation of Rocket Noise Using Acoustic Beamforming, *Proceedings of KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 576~577.

(11) Hwang, S., Rhee, W. and Choi, J.-S., 2005, Array Resolution Improving Methods for Beamforming Algorithm, *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 164~169.

(12) Dougherty, P. R., 2004, *Advanced Time-domain Beamforming Techniques*, AIAA 2004-2955.



Yeong-Ju Go received B.S., M.S., in Dept. of Aerospace Engineering from Chungnam National University, Korea. He is a Ph.D. candidate. His research interests are in the area of aerodynamics and aero-acoustics.



Jaehyung Lee received B.S. degree from Chungnam National University in 2001. He received his M.S. and Ph.D. degrees from CNU in 2003 and 2014, respectively. He is currently a PostDoc and lecturer at department of aerospace engineering, CNU. His research interests are acoustic signal processing.



Jong-Soo Choi received the B.S. from Seoul National University, the M.S. from KAIST and the Ph.D. degree from the Pennsylvania State University in 1991. He is currently a professor of Aerospace Engineering at Chungnam National

University, Korea. His research interests include aerodynamics and aeroacoustics related to rotating machinery and moving vehicles.



Jae-Hyoun Ha received the B.S. degree in electronic engineering from the Kumoh National Institute of Technology, Korea, in 2002. He has been with the Agency for Defense Development, Chungnam, Korea, His current research inter-

ests include real-time data acquisition and array signal processing.