

고해상도 공기중 초음파 영상을 위한 기능성 빔형성법 적용

Functional beamforming for high-resolution ultrasound imaging in the air with random sparse array transducer

박춘수[†]

(Choon-Su Park^{1†})

¹한국표준과학연구원 물리측정본부 비파괴측정그룹
(Received March 28, 2024; accepted April 29, 2024)

초 록: 공기중 초음파 측정은 각종 기계 설비류의 이상 발생 예방 활동으로 산업계에서 사용되고 있다. 최근에는 다수의 초음파 센서 배열을 이용하여 설비의 이상 발생 위치를 찾을 수 있는 공기중 초음파 영상화 기법의 활용이 증가하고 있다. 초음파 음원의 위치를 가시화하기 위해 센서 별 위상 차이를 이용하는 빔형성법이 사용된다. 2차원 평면에 분포된 초음파 센서 배열을 이용해 3차원 공간에서 빔형성 파워 분포를 구할 수 있다. 본 논문에서는 관심 파장보다 크기가 큰 초음파 센서로 구성된 랜덤 희소배열(random sparse array)을 사용하고, 초음파 배열이 분포한 평면으로부터 일정한 거리만큼 떨어진 평행한 평면 내에서의 빔형성 파워 분포를 통해서 음원의 위치를 보여주는 영상화 기법을 구현하고자 한다. 기존의 빔형성법은 사용 하는 배열 센서의 개수와 그에 따른 구경의 크기 등에 의해 공간 해상도가 제한될 수밖에 없다. 본 연구에서는 배열이 가지는 기하학적 제약을 극복할 수 있는 방법으로 기능성 빔형성법을 적용하여 고해상도 초음파 영상화 기법을 구현하였다. 기능성 빔형성법은 수학적으로 일반화된 형태의 빔형성법으로 표현 가능하고, 기존의 빔형성법을 통해 얻어진 영상에서 주엽의 폭과 부엽의 크기를 저감시키는 역할을 하여 고해상도 영상화를 얻을 수 있는 장점이 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제한한 방법에 의한 영상화 성능을 관찰한 결과, 초음파 희소배열을 이용하여 공기중 초음파 음원의 해상도 증대가 성공적으로 구현됨을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 초음파 영상, 기능성 빔형성법, 랜덤 희소 배열, 고해상도 영상

ABSTRACT: Ultrasound in the air is widely used in industry as a measurement technique to prevent abnormalities in the machinery. Recently, the use of airborne ultrasound imaging techniques, which can find the location of abnormalities using an array transducers, is increasing. A beamforming method that uses the phase difference for each sensor is used to visualize the location of the ultrasonic sound source. We exploit a random sparse ultrasonic array and obtain beamforming power distribution on the source in a certain distance away from the array. Conventional beamforming methods inevitably have limited spatial resolution depending on the number of sensors used and the aperture size. A high-resolution ultrasound imaging technique was implemented by applying functional beamforming as a method to overcome the geometric constraints of the array. The functional beamforming method can be expressed as a generalized beam forming method mathematically, and has the advantage of being able to obtain high-resolution imaging by reducing main-lobe width and side lobes. As a result of observation through computer simulation, it was verified that the resolution of the ultrasonic source in the air was successfully increased by functional beamforming using the ultrasonic sparse array.

Keywords: Ultrasonic imaging, Functional beamforming, Random sparse array, High resolution imaging

PACS numbers: 43.60.Fg, 43.60.Jn

[†]Corresponding author: Choon-Su Park (choonsu.park@kriss.re.kr)

Non-destructive Metrology Group, Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, 267 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Republic of Korea

(Tel: 82-42-868-5940)



Copyright©2024 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

기계에서 방출되는 비정상적인 초음파 신호는 결합의 초기 징후로 간주될 수 있다. 산업용 초음파 검출기는 초음파가 발생하는 위치를 찾기 위해 널리 사용되고 있는데, 검출기 전면의 좁은영역에서 발생하는 초음파를 집중하여 측정하기 때문에 작업자가 직접 감시 영역을 일일이 스캔해야 하는 번거로움이 있다. 최근에는 전자장치의 발달로 인해 다채널의 초음파 영역대 신호를 샘플링할 수 있게 되어, 배열의 위상 정보를 이용한 다양한 신호처리 기법을 적용할 수 있다. 특히, 정합장 처리(matched field processing) 기법 중의 하나인 빔형성법을 이용하여 초음파 발생 위치를 시각화하는 기술이 개발되어 사용되고 있다.

다수의 센서를 이용하는 배열 신호처리에서 센서 간 위상 차이 정보를 정확히 획득하기 위해서는 관심 주파수의 파장과 센서 사이의 거리에 대한 샘플링 조건을 만족해야 한다. 센서 사이의 거리에 대한 샘플링 정리는 에일리어싱 효과를 방지하기 위해 센서 사이 거리가 관심 파장의 절반 미만이어야 한다. 이러한 조건을 비교적 쉽게 만족할 수 있는 가청 주파수 영역의 음향분야에서는 소음이 발생하는 위치를 찾고자 하는 음향 가시화에 대한 연구가 오래 전부터 관심 받아 왔으며,^[1] 큰 소음이 이슈가 되는 항공 분야를 포함한 다양한 분야에서 사용되는 가시화 장치의 발전으로 이어지고 있다.^[2] 그러나, 공기 중 초음파 센서의 크기는 일반적으로 관심 파장에 비해 크다. 센서를 관심 파장의 절반 미만으로 배치할 수 없는 경우 랜덤 희소배열 설계를 고려해야 한다.

랜덤 희소배열에 대한 연구는 초창기에 주로 전자기파 분야에서 이루어져 왔으며, 현재는 의료용 초음파, 소음 및 진동 분야로 확산되고 있다. Diarra *et al.*^[3]은 시뮬레이션 담금질(simulated annealing)을 사용하여 배열 성능을 유지하면서 정규배열 형태의 2차원 의료용 초음파 배열에서 소자 수를 줄이는 설계방법을 제안하였다. Li *et al.*^[4]은 경두 색조초음파(transcranial colour-coded duplex ultrasonography) 측정을 위한 희소배열을 설계하는 최적화된 알고리즘을 소개하였으며, Bjelić *et al.*^[5]은 교통소음 분석을 위해 최소최대(minimax) 알고리즘을 이용하여 주엽폭(main-

lobe bandwidth)을 유지하면서 최대부엽레벨(Maximum Side-lobe Level, MSL)을 최소화하는 최적의 마이크로폰 배치를 얻으려고 시도하였다. 한편, Kim *et al.*^[6]은 공기 중 초음파 영상화를 위해 유전 알고리즘을 이용하여 랜덤한 저밀도 초음파 배열을 설계 및 제작하여 초음파 음원의 위치를 가시화하는 연구를 수행하였다.

빔형성법을 이용한 영상화는 사용하는 배열의 전체 구경(aperture)의 크기와 센서 사이의 거리 등에 의해 구현 성능이 제한되는데,^[7] 이러한 구조적인 한계를 극복하기 위한 고해상도 신호처리 기법에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 배열의 상관행렬의 고유치 분해를 기반으로 한 방법들^[8-10]과 역합성곱을 이용하는 방법들^[11-13]이 제안되었다. 한편, Dougherty^[14]는 상호 스펙트럴 행렬을 기반으로 하여 잡음에 강인하면서 해상도를 증대시킬 수 있는 기능성 빔형성법(functional beamforming, fBF)을 제안하였다.

본 연구에서는 공기 중 초음파 음원의 위치 추정 가능한 랜덤 희소배열로 얻은 초음파 영상의 해상도를 향상시키는 방법으로 기능성 빔형성법을 적용하고자 한다. 이를 위해 II장에서는 랜덤 희소배열의 구성 및 성능을 살펴본다. III장에서는 기능성 빔형성법에 대한 이론적 내용을 살펴보고, IV장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 랜덤 희소배열로 획득된 초음파 영상에 기능성 빔형성법을 적용하여 공간 해상도 개선이 가능함을 확인하고자 한다.

II. 공기중 초음파 랜덤 희소배열

본 연구에서 사용하는 배열은 Reference [6]에서 설계된 랜덤 희소배열을 활용하여 초음파 영상화 해상도 개선을 위한 연구에 확대 적용하고자 한다. 사용되는 배열은 유전 알고리즘을 이용해 소자 배치 최적화를 진행해서 얻은 것이다. 센서의 개수는 112개이고, 센서가 배치되는 구경의 크기는 반경 50 mm이며, 각 센서 사이의 최소 간격은 센서의 최소 크기인 6 mm로 선정되었다. 일반적으로 기계 설비 이상진단용 혹은 로봇이나 차량의 물체 식별용 초음파 주파수 영역대는 30 kHz ~ 50 kHz가 주로 사용되는 것으로 알려져 있다.^[15] 관심 주파수 영역 내에서 가장

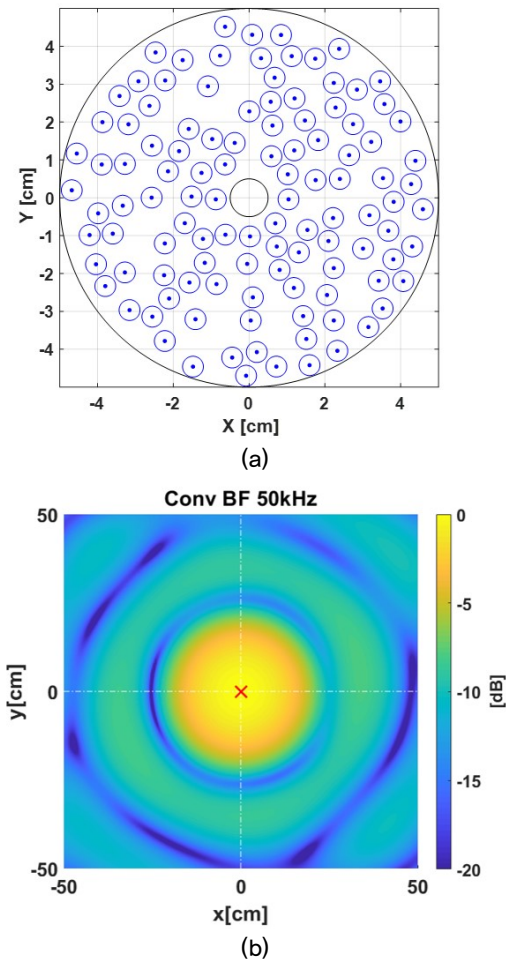


Fig. 1. (Color available online) The random sparse array. (a) Sensor configuration, (b) beamforming map.

긴 파장을 가지는 30 kHz의 주파수가 343 m/s의 전파 속도를 가지는 공기 중에서의 반파장은 약 5.7 mm로 센서 사이 거리를 파장의 절반 이하로 배치할 수 없으므로 희소배열이 필요하게 된다.

Fig. 1은 설계된 배열의 분포와 빔포밍 파워 분포를 보여준다. Fig. 1(a)는 구경 내에 배치된 센서의 분포를 볼 수 있는데, 반경 5 cm의 검정색 선은 배열의 외경을 나타내고 내부의 검정색 선은 다른 센서를 배치하기 위해 비워둔 공간이다. 파란색 점은 센서의 중심을 나타내고, 파란색 원은 센서의 최소 이격 거리인 직경 6 mm를 표현한다. 센서들이 전체 영역 내에서 서로 겹쳐지지 않고 잘 배치된 것을 볼 수 있다. Fig. 1(b)는 배열로부터 3 m 떨어진 곳의 관심영역 내 중심에 50 kHz의 초음파 단극음원이 있는 경우의 빔형성 맵이다. 붉은색 X표는 실제 단극음원의 위치

를 나타내는 것이고, 빔형성 맵의 최대값이 정확히 실제 위치와 일치하는 것을 확인할 수 있다.

III. 기능성 빔형성법

신호의 위상을 조절하여 가시화하는 방법인 빔형성법은 측정되는 신호와 모델링 신호의 유사성을 이용해 신호처리하는 정합장 처리 기법의 하나이다. 즉, 예측하고자 하는 음원의 특성에 맞는 기저함수를 모델링하여, 해당 기저함수와 가장 유사한 특성을 가지는 위치에서 높은 빔파워를 갖게 하는 방법이다. 따라서, 이를 통해 얻은 결과는 기저함수(혹은 스캔함수)의 실제 신호의 유사도에 의존한다. 평면파 혹은 구형파의 형태가 가장 손쉽게 모델링할 수 있는 전파 특성이 된다.

배열 신호처리에서 주파수 영역에서의 관찰은 각 센서 간 신호의 크기와 위상 차이만으로 표현 가능하여, 수식화에 편리하다. 그리고, 관찰하고자 하는 하나의 주파수에 대해서 선택적으로 영상화할 수 있는 장점이 있다. 이를 수학적으로 살펴보기 위해, M 개의 공기 중 초음파 센서를 이용해 측정한 음압을

$$P = [P_1, P_2, \dots, P_M]^T \tag{1}$$

와 같이 벡터의 형태로 표현할 수 있고, 이에 대응하는 스캔함수로 구성된 스캔벡터는

$$W = \frac{1}{\sqrt{M}} [W_1, W_2, \dots, W_M]^T \tag{2}$$

와 같다. 스캔벡터의 \sqrt{M} 은 위상 조절을 통한 빔파워를 계산할 때 크기를 정규화하기 위해 도입된 값으로 센서 개수에 따라 달라지므로 이를 이용해 정규화한 것이다. 스캔함수는 모델링하고자 하는 전파 특성에 따라 어떤 형태이든 가능한데, 특정 지점에 위치한 점음원의 경우,

$$W_m(x, y) = e^{j \frac{2\pi f r_m}{c}} \tag{3}$$

로 표현할 수 있다. 여기서, m 은 센서의 번호($m = 1, 2, 3, \dots, M$)를 나타내고, f 는 주파수, c 는 전파속도, r_m 은 m 번째 센서와 찾고자 하는 초음파 음원의 추정 위치 사이의 거리를 나타낸다. 측정된 신호와 스캔벡터를 이용한 빔형성 파워는

$$P_b = E[|W^H P|^2] \quad (4)$$

$$= E[W^H P P^H W] = E[W^H R W]$$

와 같고, $E[\cdot]$ 는 앙상블 평균, 위첨자 H 는 에르미트 공액을 의미하고, R 은 P 의 상관행렬을 나타낸다. 앙상블 평균 내부의 식을 살펴보면, 스캔벡터와 측정 데이터 벡터의 내적을 한다는 것을 알 수 있고, 이는 측정데이터와 스캔함수의 유사성에 대한 값을 도출함을 의미한다.

기능성 빔형성법은 Eq. (4)로 표현되는 빔형성파워에 지수 인자(ν)를 포함하는 일반화된 빔형성법으로

$$P_{b,\nu} = \left[W^H R^{\frac{1}{\nu}} W \right]^\nu \quad (5)$$

와 같이 표현할 수 있다. ν 는 빔형성 파워에 임의의 지수값을 강제로 부여하는 인자로서 정규화된 스캔 벡터의 값을 지수적으로 적은 값을 만드는 역할을 하여 주엽과 부엽의 크기를 줄인다. 이에 반해 상관행렬의 지수에 ν 의 역수가 들어감으로써 음원의 크기에 대한 정보는 그대로 유지될 것임을 알 수 있다. 기능

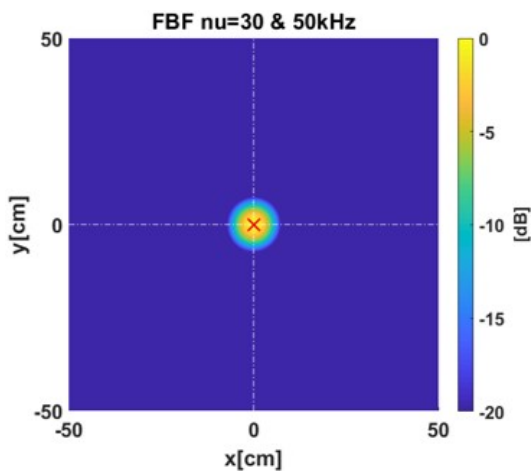


Fig. 2. (Color available online) Functional beamforming power distribution when $\nu = 30$.

성 빔형성법이 일반화된 빔형성법이라고 불리는 것은 ν 가 1의 값을 가질 때 기존의 빔형성법(conventional beamforming, cBF)과 동일한 형태를 가지기 때문이다. Fig. 2는 Fig. 1(b)와 동일한 조건에서 ν 가 30을 가질 때의 빔형성파워를 얻은 것이다. 같은 색 범위(-20 dB ~ 0 dB)로 빔형성파워 분포를 그렸을 때, 기존의 빔형성법에 비해 주엽의 너비가 많이 좁아지고 부엽도 거의 관찰이 되지 않는 것을 볼 수 있다. 수학적으로는 지수인자가 무한대로 커질 수 있고 그에 따라 성능이 개선될 것으로 예상할 수 있지만, 실제 측정되는 신호에 포함된 잡음이나 센서 위치 오차 및 배열센서 사이의 위상 오차 등으로 인해 성능은 제한된다. 실제 사용 가능한 지수값은 시스템의 위상 고정 여부 및 잡음 상태 등에 따라 다르겠지만 수십에서 수백 정도로 알려져 있다.^[14]

IV. 고해상도 공기 중 초음파 영상화

앞의 3절에서 성능을 확인한 기능성 빔형성 방법을 이용하여 2개의 음원의 구분 성능을 기존의 빔형성과 비교하여 보자. 2개의 음원이 배열로부터 3 m 떨어진 곳에 배열의 중심으로 같은 거리에 위치해 있는 경우에 대해 살펴보자. 두 음원은 50 kHz의 같은 크기의 소리를 발생한다고 가정하였다. Fig. 3은 기존의 빔형성과 기능성 빔형성($\nu = 30$)의 결과를 대표적으로 보여준다. 본 연구에서는 해상도를 높이는 기준으로 주엽폭의 개선을 목표로 하고, 이를 주어진 조건 내에서 2개의 음원을 구분하고자 하였다. 기존의 빔형성법이 약 30 cm의 주엽폭을 가지고 있으므로, 두 음원을 구분할 수 있는 최소 거리가 약 30 cm가 될 것이다. 이 경우에 기능성 빔형성법의 성능 개선을 확인하기 위해 기존의 빔형성법의 주엽폭 대비 1/3이내의 주엽폭을 가지는 최소 지수인자값으로 30을 선택하였다.

Fig. 3(a)는 2개의 음원(붉은 X 표시)이 구분이 되지 않고 긴 선음원 형태로 나타나면서 주변에 부엽들이 있으나, Fig. 3(b)는 2개의 음원이 명확하게 구분되면서 부엽이 없어진 것을 확인할 수 있다. Fig. 3의 두 음원의 거리는 32 cm 떨어져 있다. 두 음원 사이의 구분 능력이 거리에 따라 어떤 영향을 받는지 살펴보았다.

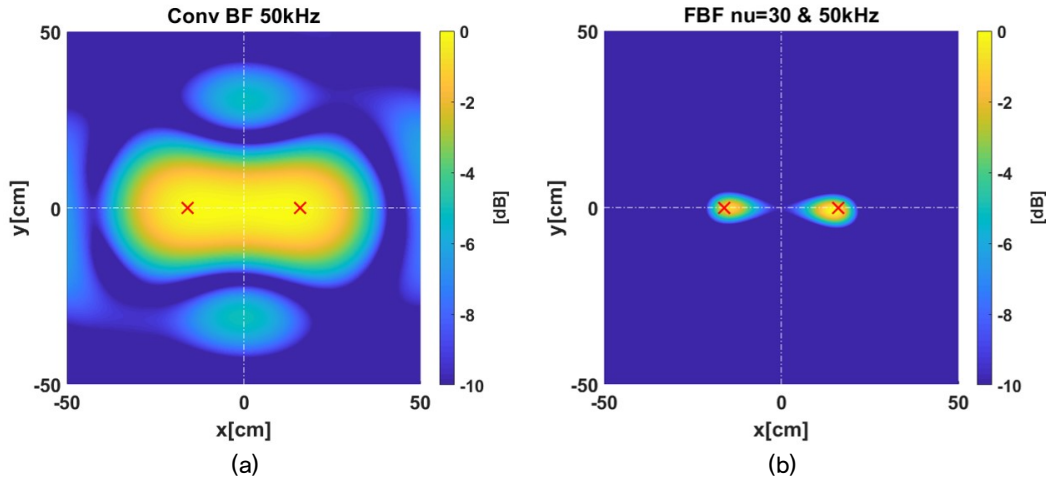


Fig. 3. (Color available online) Ultrasound imaging in the air for two sources, (a) conventional beamforming, (b) functional beamforming when $\nu = 30$.

Table 1. Minimum distance of source discrimination with respect to stand-off distance from the array.

Distance from array [m]	Distance between sources [cm]
1	10.7
2	21.3
3	32.1
4	45.4
5	54.0

Table 1은 음원과 배열 사이의 거리를 1m~5m 사이에서 바뀌가면서 기능성 빔형성법에 의한 음원 구분 최소 거리를 확인하여 본 것이다. 거리 별로 약간의 차이가 있지만 거리 대비 약 10%가 두 음원을 구분할 수 있는 최소 구분 거리가 되는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 구분능은 기능성 빔형성 분포를 결정하는 여러 인자들인 구경, 배열 내 소자 간 이격거리, 음원과 배열 사이 거리 및 지수인자(ν)에 따라 결정되는 주엽폭에 따를 것으로 예상할 수 있고, 본 연구에서 사용하는 랜덤 희소배열을 이용하고, 지수 인자가 30인 경우에 대해 거리 별, 주파수 별 주엽폭은 Fig. 4와 같이 얻어진다. Fig. 4(a)는 음원이 50 kHz의 주파수를 발생시킬 때, 배열과 음원 사이의 거리에 따른 주엽폭으로 3 dB 대역폭을 얻은 것이다. 거리가 멀어짐에 따라 영상의 대역폭이 커지는 것을 확인할 수 있다. 특히 기존 빔형성법은 거리가 멀어짐에 따라

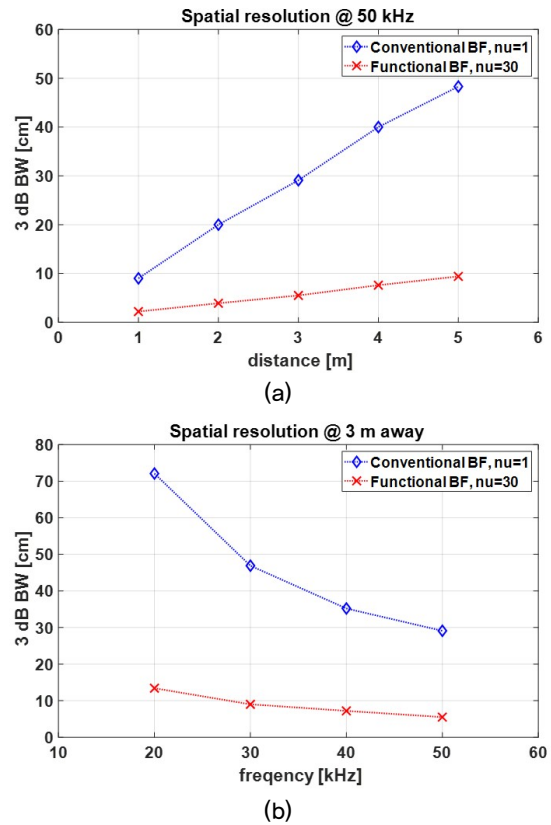


Fig. 4. (Color available online) 3 dB bandwidth of conventional BF and functional BF when $\nu = 30$ with respect to (a) distance between source and array, (b) frequency.

대역폭의 너비도 빠르게 증가하는 반면 기능성 빔형성법은 상대적으로 증가율이 낮음을 관찰할 수 있

다. Fig. 4(b)는 배열과 음원 사이의 거리는 3m로 유지한 채 주파수의 변화에 따른 주엽폭의 변화를 살펴본 것이다. 예상할 수 있는 것처럼, 주파수가 증가할수록 주엽폭의 너비가 감소하여 해상도가 좋아지는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

공기 중 초음파의 고해상도 영상화 구현을 위해서 랜덤 희소배열로 측정된 영상을 기능성 빔형성법을 이용하여 영상의 해상도와 관련된 주엽폭을 개선할 수 있음을 살펴보았다. 이를 위해, 먼저 랜덤 희소배열을 통해 기능성 빔형성법의 적용 가능성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하고, 기존의 빔형성법과의 차이점을 수학적으로 살펴보았다. 기능성 빔형성법은 지수 인자(ν)를 도입하여, 음원의 크기 정보는 상관행렬의 보상을 통해 유지 시키되 정규화된 스캔함수의 기여를 낮추어 주엽폭의 너비 감소 및 부엽의 크기를 줄이는 역할을 한다. 지수 인자가 1인 경우에는 기존의 빔형성법과 동일한 형태를 가지므로, 일반화된 빔형성법이라고 불리기도 한다.

기능성 빔형성법에 의한 해상도의 증대 성능을 살펴보기 위해, 같은 주파수를 발생시키는 두 개의 점 음원이 있는 경우에 대해 살펴보았다. 배열과 음원 사이 거리가 멀어짐에 따라 구분능(resolution)이 떨어지는 것을 확인할 수 있고, 두 음원을 구분할 수 있는 최소 이격 거리는 거리의 약 10% 임을 확인할 수 있었다. 이는 빔형성법의 주엽폭과 관련 있음을 알 수 있고, 이를 통해, 기능성 빔형성법은 지수인자의 변화를 통해 빔의 주엽폭과 부엽 감소에 확실한 효과를 가짐을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 한국표준과학연구원의 기본사업과제인 “인프라 구조안전 모니터링 기술개발(KRISS-240 11216)”과 과기부 연구개발특구 역량강화사업 중 “빅데이터 기반 에너지 수송 매설배관 스마트 감시 시스템 개발(2023-DDRD-0153)”의 연구 결과 중 일부이며 지원에 감사드립니다.

References

1. J. Billingsley and R. Kinns, “The acoustic telescope,” *J. Sound Vib.* **48**, 485-510 (1976).
2. R. Merino-Martinez, P. Sijtsma, M. Snellen, T. Ahlefeldt, J. Antoni, C. J. Bahr, D. Blacodon, D. Ernst, A. Finez, S. Funke, T. F. Geyer, S. Haxter, G. Herold, X. Huang, W. M. Humphreys, Q. Leclère, A. Malgoezar, U. Michel, T. Padois, A. Pereira, C. Picard, E. Sarradj, H. Siller, D. G. Simons, and C. Spehr, “A review of acoustic imaging methods using phased microphone arrays,” *CEAS Aero. J.* **10**, 197-230 (2019).
3. B. Diarra, H. Liebogtt, P. Tortoli, and C. Cachard, “Sparse array techniques for 2D array ultrasound imaging,” *Proc. Acoustics 2012*, 1591-1596 (2012).
4. X. Li, A. Gachagna, and P. Murray, “Design of 2D sparse array transducers for anomaly detection in medical phantoms,” *Sensors*, **20**, 5370 (2020).
5. M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, and M. Mijić, “Microphone array geometry optimization for traffic noise analysis,” *J. Acoust. Soc. Am.* **141**, 3101 (2017).
6. Y.-H. Kim, Y. Kim, and C.-S. Park, “2-D sparse random ultrasonic array design by genetic algorithm and C-scan imaging in the air” (in Korean), *J. Kr. Soc. Non-destruct. Testing*, **41**, 191-200 (2021).
7. M. T. Ma, *Theory and Application of Antenna Arrays* (John Wiley & Sons, New York, 1974), Chap. 1.
8. R. O. Schmidt, “Multiple emitter location and signal parameter estimation,” *IEEE Trans. Antenna Prop.* **34**, 276-280 (1986).
9. S. U. Pillai and B. H. Kwon, “GEESE (Generalized eigenvalues utilizing signal subspace eigenvectors)- A new technique for direction finding,” *Proc. of 22nd Asilomar Conf. Signal, Syst. Computers*, Pacific Grove, 568-572 (1998).
10. R. Roy and T. Kailath, “ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques,” *IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Proces.* **37**, 984-995 (1989).
11. U. J. Schwarz, “Mathematical-statistical description of the iterative beam removing technique (method CLEAN),” *Astron. Astrophysics*, **65**, 345-356 (1978).
12. T. F. Brooks and W. M. Humphreys, “A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays,” *J. Sound Vib.* **294**, 856-879 (2006).
13. J. Bardsley, J. Merikoski, and R. Vio, “The stabilizing properties of nonnegativity constraints in least-squares image reconstruction,” *Int. J. Pure Applied Math.* **43**, 95-109 (2008).
14. R. P. Dougherty, “Functional Beamforming,” *Proc. of 7th Berlin Beamf. Conf.* 1-25 (2014).

15. G. Allevato, J. Hinrichs, M. Rutsch, J. Adler, A. Jäger, M. Pesavento, and M. Kupnik, "Real-time 3D imaging using an air-coupled ultrasonic phased array," *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelect. Freq. Control*, **68**, 796-806 (2021).

저자 약력

▶ 박 춘 수 (Choon-Su Park)



2003년 2월 : 부산대 기계공학과 학사
2005년 8월 : KAIST 기계공학과 석사
2010년 2월 : KAIST 기계공학과 박사
2011년 2월 : 현대자동차 중앙연구원
2016년 2월 : 한국표준과학연구원 선임연구
 구원
2016년 3월 ~ 현재 : 한국표준과학연구원
 책임연구원