

마이크로폰 어레이를 이용한 두 개의 동일 주파수 소음원의 위치 규명에 관한 연구

Localization of Two Monopole Sources with Identical Frequency Using Phased Microphone Array

이재형* · 황선길** · 최종수***

Jaehyung Lee, Seongil Hwang and Jong-Soo Choi

Key Words : Microphone Array(마이크로폰 어레이), Array Design(어레이 설계), Beam-pattern(빔패턴)

ABSTRACT

A simplified view of array design and application process was introduced. Array design is critical to achieve a successful phased array measurements. A planar microphone array is designed to produce optimum performance and also to fit economic requirement in integrating data acquisition system. Certain performance characteristics are of primary concern when designing arrays. These characteristics include array resolution, spatial aliasing and array sidelobe suppression. Every array has its directional pattern that shows such characteristics. Assuming that a monopole source is located in center, beam patterns have been simulated varying measurement conditions such as number of sensors, array aperture size, distance between array and source, frequency of interest and so on. Sensor correction was conducted on every channel using magnitudes and phases of FRF with respect to a reference microphone channel. Then with a spiral type array, measurements have been made with two point sources of same frequency in order to investigate array resolving abilities. It is observed that higher frequency source achieves better resolution than lower one does.

1. 서 론

어레이는 독립적인 센서들이 모여 이루는 큰 측정 장치의 의미를 가진다. 각 측정 센서는 실험 상황에 따라 마이크로폰이나 변동 압력 센서들로 구성할 수 있다. 어레이를 이용하여 공력 소음을 측정하고자 할 때 어레이의 각 센서의 위치와 소음원 위치에 의해 발생하는 위상차를 이용하게 된다. 센서에서 받아들이는 신호는 기하학적 위치에 따라 생기는 위상차를 이용하여 마치 고정되어 있는 어레이를 가상으로 회전하듯이 계산된다. 이것은 어레이가 물리적으로 어느 방향을 바라보거나 특정한 지점을 향하게 하여 소음원을 측정하는 효과를 만들어 낸다. 이런 과정을 통해 어레이로 관찰하는 평면에 대하여 음압의 크기 분포를 그려 소음원을 규명할 수

있다.

어레이를 이용하여 소음원을 측정하는 방법은 센서의 수와 배치 형상에 따라 성능이 변하기 때문에 어레이 형상의 설계는 소음원 규명 실험을 수행하기 전에 우선적으로 고려되어야 한다. 어레이의 성능은 어레이 분해능(array resolution), 공간 앨리어싱(spatial aliasing) 그리고 사이드롭(sidelobe) 등에 의하여 영향을 받으며 각 어레이가 갖는 특성을 설명할 수 있다. 어레이의 분해능은 소음원의 위치를 명확히 규명하는 정도를 말한다. 공간 앨리어싱은 적절하지 않은 어레이 설계에 의해 발생하는 것으로 실제 소음이 발생하는 곳이 아닌 부분에 소음원이 나타나는 현상을 말한다. 사이드롭을 낮추는 능력은 어레이가 저항하는 점이 아닌 다른 부분에서 발생하는 소리 에너지를 감소시키는 능력을 의미하는데 사이드롭은 어레이가 측정할 수 있는 동적 영역(dynamic range)에 영향을 주게 된다.^[1] 또한 어레이의 특성은 실험 조건, 센서의 수와 어레이의 크기에 의해 많은 영향을 받기 때문에 어레이는 실험 비용과 직접적인 관계가 있고 경제성을 고려해 설계해야 한다.

위와 같은 어레이가 갖는 특성을 고려하면서 다음과 같은

* 책임서사, 정회원, 한국항공우주연구원
E-mail : aerjhl@kari.ac.kr
Tel: (042) 821-7761 Fax: (042) 825-9225

** 충남대학교 대학원 항공우주공학과, 석사과정

*** 정회원, 충남대학교 항공우주공학과

과정을 반복하여 어레이를 설계할 수 있다. 첫째 여러 가지 측정 조건을 고려하여 어레이를 설계한다. 다음 여러 어레이 형태에 대한 평가 후 최적의 어레이를 선정하여 실험에 사용하는 것이다.

어레이는 여러 형태로 구성될 수 있고 측정 조건에 따라 빔패턴의 형상도 다르게 나타난다. 본 연구에서 나선형 어레이 형상에 대하여 설계 방법을 제시하였고 점음원 모사를 통한 빔패턴을 계산하였다. 그리고 빔패턴의 비교를 통해 어레이를 선정하는 과정을 보였다. 선정된 어레이의 형태를 이용하여 몇 개의 점음원에 대하여 소음원 측정 실험을 수행하였고 분해능과 사이드롭에 의한 영향을 비교하여 어레이 성능을 분석하였다.

2. 빔형성 방법과 어레이 형상 설계

2.1 빔형성 방법

음원이 측정점으로부터 멀리 존재할 경우 전파되는 음파를 평면파로 가정할 수 있고, 가까이 존재할 경우 구면파로 가정하여 센서들에 측정되는 신호의 상대적 시간지연을 이용하여 음원의 방향이나 위치를 계산할 수 있다. 어레이 기법을 이용한 본 연구에서는 빔형성 방법을 적용하였고 이 방법을 근접음상의 상황에서 측정하는 것으로 가정하므로 소음원의 형태를 구면파를 발생하는 점음원으로 가정한다. 어레이의 각 센서가 음원으로부터 신호를 받게될 때, 음원이 있다고 가정된 가상점의 위치와 실제 음원이 있는 위치가 일치하지 않을 경우 위상차에 의한 각 센서 신호 상호 간의 간섭에 의하여 출력 값은 감소하게 된다. 이러한 간섭은 가상점의 위치에 따라 변화하며 어레이의 방향성(빔패턴)을 나타내게 된다. 위에서 구한 어레이 출력신호를 주파수에 변환하여 주파수 도메인에서 다음과 같이 어레이 출력

$W(k, \vec{x}, \vec{x}^u)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$W(k, \vec{x}, \vec{x}^u) \equiv \sum_{m=1}^M w_m \frac{r_m^c}{r_m^m} e^{jM(G^u - \hat{r}) - (G^u - r_m)} \quad (1)$$

여기서 \vec{x} 는 어레이가 가정된 음원의 위치(가상점)를 의미하고, \vec{x}^u 는 음원의 위치이다. 그리고 r^c 와 r_m^m 은 각각 소음원으로부터 어레이 중심과 m번째 센서까지의 거리이고, r 과 r_m 은 각각 가상점으로부터 어레이 중심과 m번째 센서까지의 거리이다. w_m 은 어레이의 응답을 개선하기 위해 사용되는 가중치이다. 어레이 응답은 \vec{x}^c 와 \vec{x} 의 값이 일치하는 점 순간의 어레이 출력 값을 기준으로 하여 dB로 표현할 수 있다.^[2]

2.2 어레이 형상 설계

(1) 어레이 설계 요구 사항

소음원 계속 시 사용하고자 하는 어레이는 다음과 같은 사항을 고려하여 설계해야 한다.

- 전체 주파수 범위
- 공간 분해능
- 어레이 크기에 의한 측정 범위
- 동적 영역(메인롭과 사이드롭의 크기차)
- 측정하는 위치에 따른 어레이의 배치

공간분해능은 일반적으로 길이의 단위로 표시된다. 결정된 어레이 크기에 대하여 측정하고자 하는 관심 주파수가 높아지면 분해능은 좋아지게 되므로 주로 분해능이 나빠지는 낮은 주파수의 경우를 염두에 두어 설계해야 한다. 공간 분해능은 항공기 날개의 플랩이나 슬랫의 끝 부분처럼 두 개 이상의 소음원이 존재하는 경우에 다수의 소음원들이 잘 분리될 수 있도록 조정해야 한다. 좁은 무향 실험 실비나 동등에서 소음원 계속 시 어레이에 도달하는 음파의 경로가 막히거나 반사되는 일이 없는지 확인해야 하며 어레이 크기에 의한 측정 범위를 결정한다. 어레이에 사용되는 센서의 수는 사이드롭의 크기를 결정짓는 중요한 요소이다. 경험적으로 볼 때 메인롭(main lobe)에 비하여 평균 10dB 이하의 값을 갖도록 설계하는 것이 좋다.^[3]

(2) 빔패턴 계산과 특성

본 연구에서는 나선형 어레이 형상을 이용하여 측정 조건을 변화하여 빔패턴의 형상을 관찰하였다. 어레이의 성능은 빔패턴에서 나타나는 빔폭과 사이드롭의 형태에서 비교하여 신빙할 수 있다. 빔패턴은 식에서 실제 소음원을 기준으로 한 파워와 가상 음원에 대한 파워의 비를 로그값으로 나타낸 것이다.

$$dB(\vec{x}) = 20 \log_{10} \left[\frac{|W(k, \vec{x}, \vec{x}^u)|}{|W(k, \vec{x}^c, \vec{x}^u)|} \right] \quad (2)$$

어레이의 응답으로부터 어레이의 배열에 따라 발생하는 빔폭과 사이드롭의 특성을 알 수 있다. 어레이 빔폭은 어레이 빔패턴의 파워가 반이 되는 지점으로부터 만나는 각도로 정의된다. 다시 말해 빔패턴에 있는 점들 중에 메인롭보다 3dB 낮은 부분에 있는 지점들이다. 임의의 주어진 소음원 거리가 있으면 이 각도의 빔폭은 거리 단위로 환산하여 표시될 수 있다. 어레이의 공간 분해능은 빔폭의 크기에 의하여 결정되며 관심 주파수가 커질수록 분해능은 좋아지고 관심 주파수가 낮아지면 분해능은 나빠진다. 분해능은 어레이의 크기, 측정거리와 센서의 수에 의해서도 영향을 받는다.

어레이는 공간적인 차원에서 신호를 샘플링하는 개념으로 생각할 수 있다. 공간 엘리어싱(spatial aliasing)은 시간 영

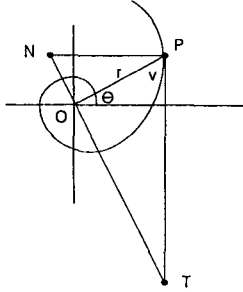


Fig. 1 Geometry for a logarithmic spiral.

역(time domain)에서의 것과 비슷한 개념으로 공간적으로 발생하는 것으로 이 때문에 발생하는 것이 사이드롭이다. 시간 영역에서 낮은 샘플링 속도에 의해 여러 주파수 성분을 구별하는데 불완전함을 보이는 것처럼 공간상에서도 넓은 센서 간격의 배치에 의하여 여러 방향에서 전파되는 소음을 구별하는데 어려움을 보일 수 있다. 이런 현상을 방지하기 위해 시간 영역에서는 가장 높은 주파수 보다 두 배 이상으로 샘플링을 하거나 필터를 사용하는데 공간영역에서는 관심 파장의 반이 넘지 않는 센서 간의 간격 배치로 샘플링을 하면 된다.

(3) 나선형 어레이의 빔패턴

본 연구에서 사용된 나선형 어레이(Dougherty 1998)^[1]는 넓은 범위의 주파수 영역에 대하여 제한된 숫자의 센서로 사이드롭을 저감하는 효과를 보이고 있다. Fig. 1은 나선형 어레이를 설계할 때의 도형을 보여주고 있는데 나선형 어레이는 로그함수의 형태로 센서를 배열한 것으로 나선형에 대한 근사표현 방정식은

$$r(\theta) = r_0 \exp[\cot(\theta)\theta] \quad (3)$$

으로 표현되며 θ 는 각도, r_0 은 중심(O로부터 점 P까지의 거리, r_0 은 $\theta=0$ 일 때 나선 각(spiral angle)이다. OP와 NT, NP와 PT는 서로 수직이고 PT는 P점에서 나선에 접한다. θ_0 는 나선에 대한 각으로 점 O로부터 나선형 곡선을 차례로 된다. r_0 , r_{max} , θ_0 와 센서의 수 M 이 주어지면

$$l_{max} = \frac{r_0 \sqrt{1 + \theta_0^2}}{\theta_0} \left(\frac{r_{max}}{r_0} - 1 \right) \quad (4)$$

에서 나선의 최대 길이 l_{max} 을 구하고 $\Delta l = l_{max}/(M-1)$ 에서 센서의 간격을 구한다. 그리고 다음 식(5)와 식(6)을 이용하여 센서의 좌표를 구할 수 있다. 본 실험을 위하여 나선형 어레이에 대하여 세 가지 경우의 어레이 형상을 구하여 빔패턴을 확인하였다.

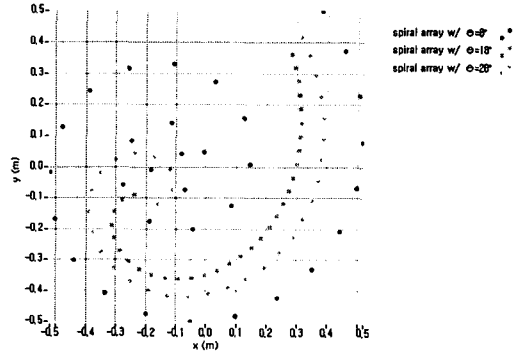


Fig. 2 Spiral array with 32 elements with spiral angle θ is 8, 18 and 28 degree.

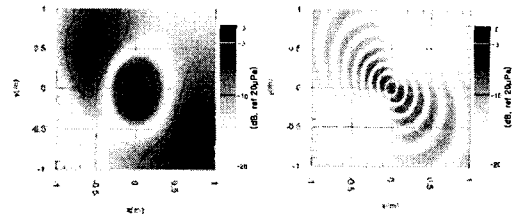


Fig. 3 Spiral array with 32 elements with spiral angle is 8 degree and beam-patterns when depth is 1m and frequencies of interest are 1kHz(left) and 5kHz(right).

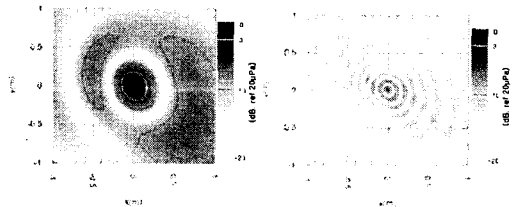


Fig. 4 Spiral array with 32 elements with spiral angle is 18 degree and beam-patterns when depth is 1m and frequencies of interest are 1kHz(left) and 5kHz(right).

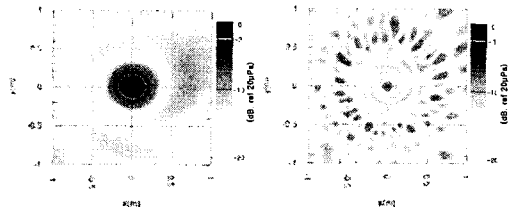


Fig. 5 Spiral array with 32 elements with spiral angle is 28degree and beam-patterns when depth is 1m and frequencies of interest are 1kHz(left) and 5kHz(right).

$$\theta_m = \frac{1}{k} \ln \left(1 + \frac{kl_m}{r_1 \sqrt{1+l^2}} \right) \quad (5)$$

$$r_m = r_1 \exp(l\theta_m) \quad (6)$$

Fig. 3의 각 빔패턴 그래프에서 빔폭은 -3dB에 부분으로 굵은 노란선으로 표시되어 있고 메인롭과 사이드롭의 크기 차이가 -10dB인 곳에는 가는 붉은 선으로 표시하였다. 나선형 어레이는 진주파수 범위에 대하여 낮은 사이드롭 레벨의 빔패턴을 보여주고 있는 것을 확인하였다. 관심 주파수가 1kHz인 경우 θ 가 28도인 빔패턴이 가장 좋고 5kHz의 경우 θ 가 8도인 빔패턴 형상이 낫다. 28도의 경우 사이드롭이 중심 가까이에는 없지만 주변에 높게 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 본 논문에서 사용한 어레이는 r_1 가 0.05m이고 r_{max} 는 0.7m 그리고 θ 는 18도인 경우의 어레이 형태를 선정하여 실험을 하도록 했다.

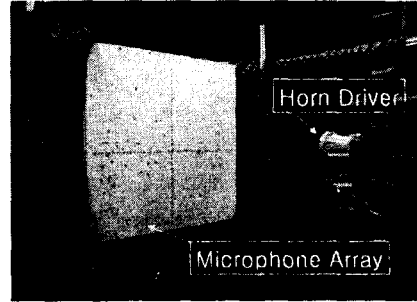
3. 실험 장치 구성

2차원 어레이 성능 시험은 충남대학교 항공우주공학과에서 수행되었고 이곳에 있는 무향풍동실은 반부향실로 개조하여 사용할 수 있도록 되어 있으며 차단주파수는 350Hz이다.

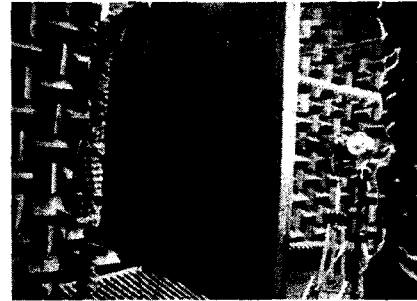
어레이에 사용된 센서는 전부 32개로 시중에서 저렴하게 구할 수 있는 일반 보청기용 콘덴서 마이크로폰 31개를 사용했고 이를 보정하기 위한 센서로 한 개의 B&K사의 type 4181 마이크로폰을 사용하였다. 데이터수집장비는 NI사의 PXI-1172를 4장을 사용하여 32개의 신호를 동시에 측정하였다. 측정거리는 1m이고 주파수는 정현파 1kHz와 5kHz의 경우에 대하여 측정을 실시하였다. 실험에 사용된 혼 드라이버(horn driver)는 점음원과 같은 특성을 지닌 것을 확인하여 사용하였다. 조건에 따라 혼 드라이버를 이동하며 소음원을 계속하였다.

어레이는 Fig. 2위 두 번째 형태로 설치되었으며 Fig. 6에서 보듯이 나무판에 센서의 위치를 구멍낸 다음 고정하였다. Fig. 7의 위 그림은 본 실험에 사용된 손으로 직접 제작한 보청기용 마이크와 앰프의 모습이다.

어레이 보정을 위한 데이터를 만들기 위해 Fig. 7의 아래 그림과 같이 실험에 사용하는 샘플링 주파수로 측정을 실시하였다. 우선 0Hz부터 25.6kHz까지의 백색 소음을 이용하여 충분히 먼 거리에서 평면파의 음파를 만들고 B&K사의 인텐시티 마이크로폰 두 개를 사용하여 평면파가 오는 것을 확인하였다. Fig. 5의 그림처럼 32개의 마이크로폰을 설치하고 가운데에 0번 채널을 한 개의 인텐시티 마이크로폰으로 설치하여 데이터를 받았다. 측정된 데이터는 0번 채널을 기준으로 나머지 채널의 신호의 주파수 응답함수를 구하면 이것을 크기와 위상 보정하는데 사용한다.



(a)



(b)

Fig. 6 Pictures of experimental apparatus. (a) Front view of spiral microphone array and a horn driver. (b) Rear view of spiral microphone array setup. Array consists of one B&K condenser microphone type 4181 and thirty one hearing-aid microphones.

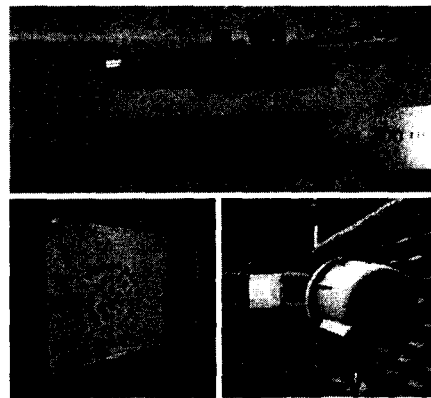


Fig. 7 Hearing-aid microphone(top), front view of microphones assembly for amplitude and phase correction and view from horn driver.(bottom)

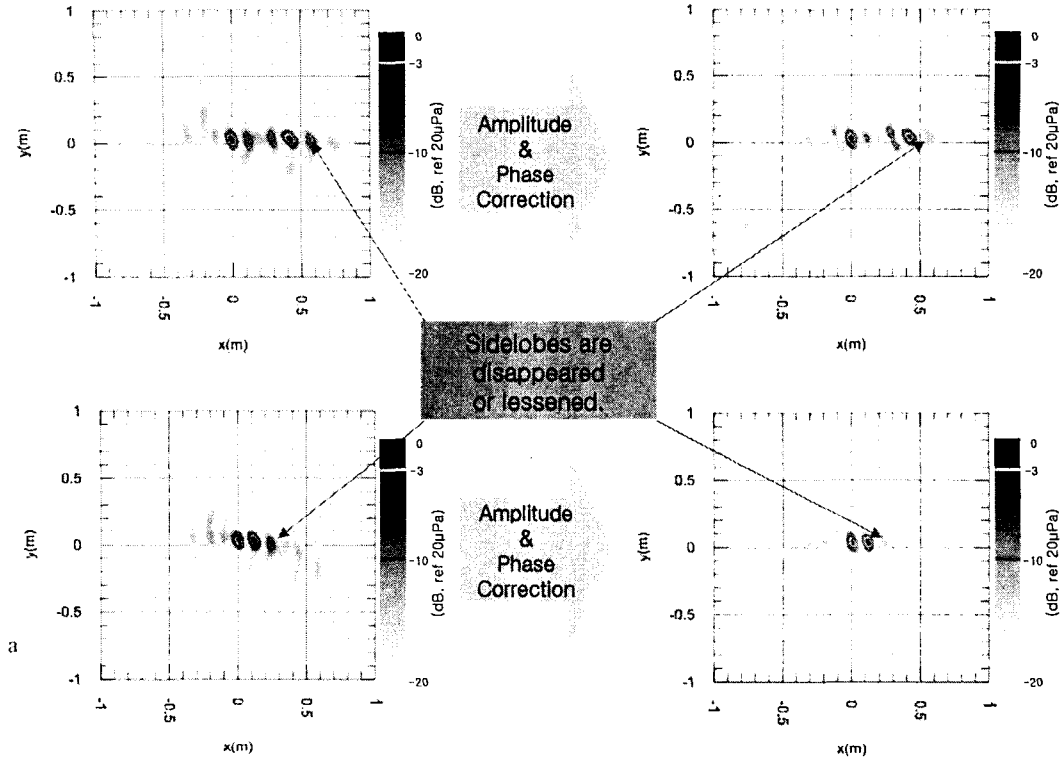


Fig. 8 Power distribution before correction(left) when frequency is 5kHz and depth is 1m(left) and after correction(right)

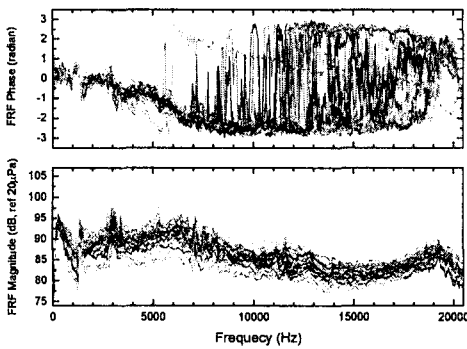


Fig. 9 FRF phases and magnitudes of hearing-aid microphones with respect to B&K intensity microphone when low-pass white noise was generated from horn driver. The wave front was measured to be plane wave.

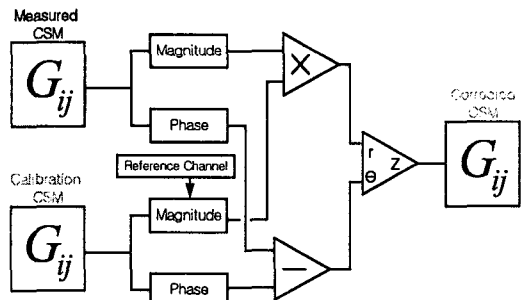


Fig. 10 Measured data cross-spectrum correction algorithm using calibration cross-spectrum matrix.

4. 실험 결과

4.1 어레이 보정

일반적으로 센서의 신호 크기와 위상차는 센서마다 서로 다르기 때문에 이를 고려해야 한다. 특히 어레이는 다수의 센서를 사용하기 때문에 계측 시 주의하여 보정해야 한다. 신호에 대한 보정은 Fig. 10에서 보여주듯이 측정 데이터의

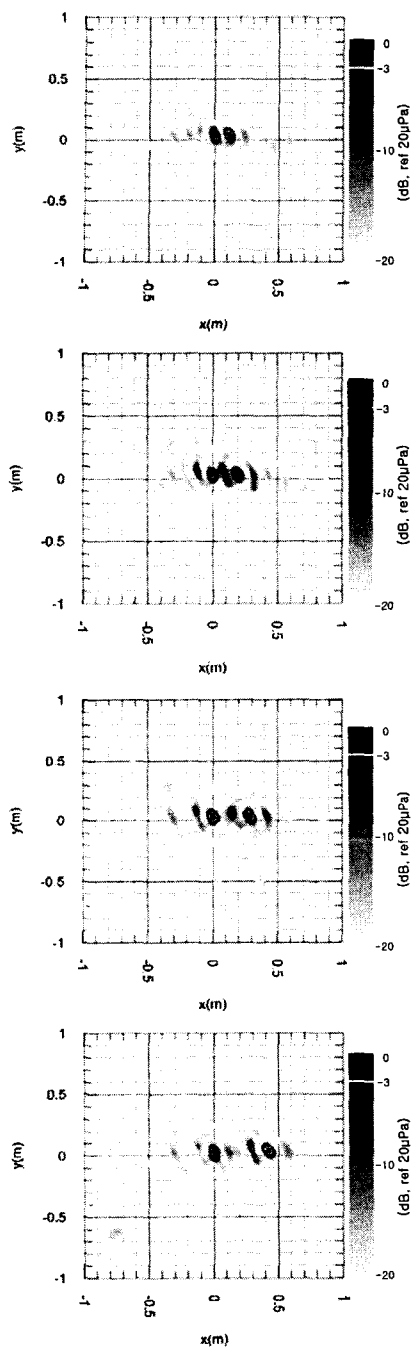


Fig. 11 Power distributions measured by 32 spiral microphone array. Frequency of interest is 5kHz and depth is 1m. Distance between two sources is 0.12m, 0.2m, 0.3m and 0.44m (from top)

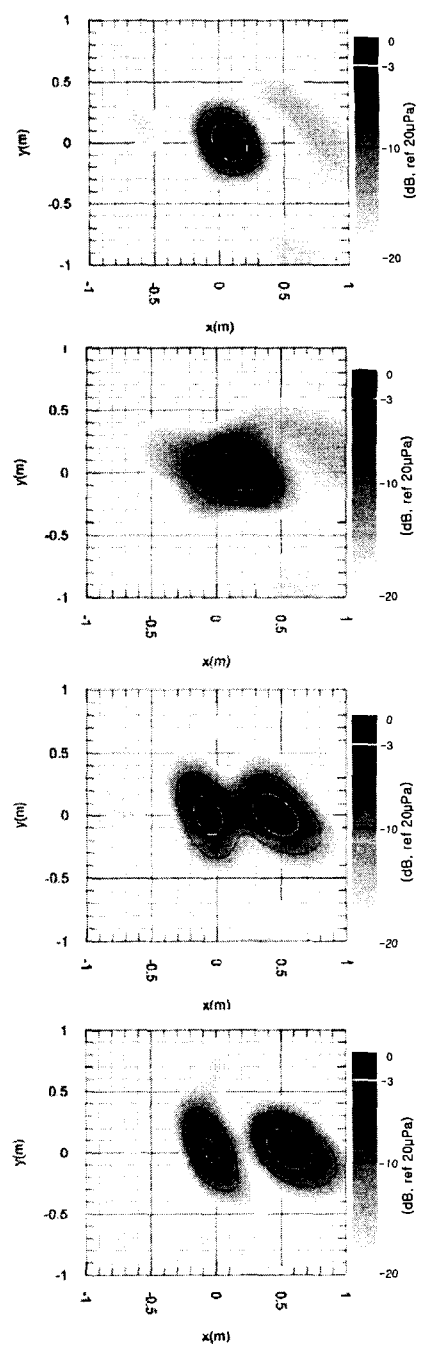


Fig. 12 Power distributions measured by 32 spiral microphone array. Frequency of interest is 1kHz and depth is 1m. Distance between two sources is 0.12m, 0.23m, 0.44m and 0.60m (from top)

상호스펙트럼을 앞서 얻은 보정용 신호의 상호스펙트럼을 이용하여 각 채널 별 크기대로 그리고 위상 차이대로 보정한다. 각 센서의 신호에 대한 차이는 위상차를 이용하여 계산하는 빔형성 방법에 영향을 줄 수 있기 때문에 이를 보정하는 경우와 하지 않는 경우의 결과를 Fig. 8에서 확인해 보았다.

Fig. 8은 보정 전과 후의 파워의 분포가 어떻게 변화하는지를 보여주고 있는 그래프이다. 왼쪽의 그래프는 보정하기 전의 그래프이고 오른쪽은 보정한 후의 결과로 메인룸에는 큰 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 보정 전에 보이는 사이드룸들이 보정 후에 사라지거나 작아지는 것을 확인할 수 있다. 사이드룸의 현상이 줄어드는 것은 위상에 의한 영향을 줄인 결과로 볼 수 있다.

4.2 두 개의 소음원에 대한 결과

두 개의 소음원을 1m거리에서 분해하는지를 확인하였다. 관심 주파수는 1kHz와 5kHz로 하였고 32개의 마이크로폰을 나선형으로 배열한 어레이로 측정된 결과를 살펴보았다. 혼 드라이버의 크기로 인해서 0.12m까지 근접한 상황부터 점차 거리를 벌려 측정한 결과, 5kHz의 경우에 전체적으로 잘 분해하는 것을 확인할 수 있다. 1kHz의 경우 0.12m와 0.23m의 경우에는 분해하지 못하지만 0.44m 이상의 거리만큼 떨어져 있는 경우에는 두 개의 소음원을 찾아내는 것을 확인할 수 있다. 이것은 어레이가 가지고 있는 빔폭의 특성에 영향을 받는 것으로 낮은 주파수에서의 빔폭이 넓어지 분해능이 낮아지는 것을 확인할 수 있는 것이다. 관심주파수가 1kHz인 경우 빔폭이 대략 0.3m이므로 빔폭 이내의 소음원을 구별하는데 문제가 있으나 빔폭 밖에 소음원이 존재하는 경우에는 충분히 계속해내는 것을 확인할 수 있었다. 주파수가 5kHz인 경우 빔폭은 대략 0.1m가 안되기 때문에 0.12m 이상의 소음원에 대하여 깨끗하게 소음원의 분포가 관찰됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구를 통하여 같은 주파수를 갖는 두 개의 소음원은 마이크로폰 어레이에 의하여 정확히 분리되는 것을 확인하였다. 높은 주파수의 경우 어레이가 갖는 분해능은 좋아지게 되기 때문에 낮은 주파수의 경우에 관찰을 할 경우 최적의 어레이 형태를 설계하여 측정하는 것이 중요하다. 어레이가 갖는 빔폭보다 더 큰 영역에서 발생하는 소음원이나 서로 근접해 있는 소음원들은 더 큰 크기의 어레이로 계속해야 하는 것을 확인할 수 있었다.

또한 센서의 보정을 통하여 저렴한 마이크로폰을 대체할 수 있는 가능성을 확인하였다. 원음장에서 측정된 평면파 데이터들 이용한 보정방법이 유효함을 보정 전후의 파워 분포에서 볼 수 있었고, 빔형성 방법에 사용되는 상호스펙트럼의 계산과정에 적용하였다. 이는 고가의 장비를 대체할 수 있는 방법으로 충분히 효용성이 있음을 본 연구에서 확인하였다.

어레이 설계 시 빔패턴에 영향을 주는 요소들을 이용한 어레이 설계 과정과 빔패턴 확인 방법을 정리하여 본 실험에 사용하였다.

6. 후기

이 연구(논문)은 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구사업(스마트부인기기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) Mueller, T. J.(Ed.), 2002, Aeroacoustic Measurements, Springer Verlag, Berlin.
- (2) Johnson, D. H. and Dudgeon, D. E., 1993, Array Signal Processing: Concepts and Techniques, Prentice Hall, New Jersey.
- (3) Steinberg, B. D., 1976, Principles of Aperture and Array system Design, John Wiley & sons, New York.
- (4) Humphreys, W.M., Brooks, T.F., Hunter, W.W., Kristine, Meadows, R., 1998, Design and Use of Microphone Directional Arrays for Aeroacoustic Measurement, AIAA 36th Aerospace Science Meeting & Exhibit.
- (5) Sijtsma, P. and Holthusen, H., 1999, Source Location by Phased Array Measurement in Closed Wind Tunnel Test Sections, 5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Seattle, WA, AIAA-99-1814.
- (6) Pumphrey, H.C., 1993, Design of Sparse Arrays in One, Two, and Three Dimensions, J.Acoust.Soc.Am.93, 1620-1628.
- (7) Venkatesh, S.R., Polak, D.R., and Narayanan, S., 2000, Phased Array Design, Validation, and Application to Jet Noise Source Localization., AIAA-2000-1934.
- (8) Mosher, M., 1996, Phased Arrays for Aeroacoustic Testing: Theoretical Development, AIAA-96-1713