

임의크기를 갖는 소음원 위치 추정

선종천, 강연준

서울대학교 음향 및 진동 실험실

Noise Source localization of the Random Amplitude Sources

JongChoen Sun, YeonJune Kang

Acoustics & Vibration Lab. School of Mech. & Aerospace Eng. Seoul National Univ.

E. mail : sun@acustica.ac.kr, yeonjune@snu.ac.kr

요약

일반적으로 빔형성 방법은 다수의 독립된 소음원들을 찾아 내기 위한 매우 효과적인 방법으로 각 어레이 마이크로폰들간의 간격에 따른 위상의 차이를 이용한다. 그러나 이러한 위상차는 파장의 길이와 밀접한 관계를 가지므로 어레이의 형상 및 마이크로폰들의 위치는 주파수에 의해 제한 받으며 빔조정 벡터 또한 주파수의 함수로 여러 주파수가 섞여 있는 경우 한계가 있을 수 밖에 없다. 본 논문에서는 크기가 임의적인 음원들에 대하여 주파수와 무관한 빔조정 벡터를 구성함으로써 위상에 대한 제한 없이 소음원을 찾을 수 있는 방법을 제안 하였다.

1. 서론

빔형성 방법은 홀로그래피와는 달리 직접적으로 소음원 근처에서 음압을 측정할 수 없는 상황에서 원거리에서 측정한 정보로 소음원을 역으로 추정하여 찾아 낼 수 있는 방법이다. 다양한 알고리즘이 소개되어 있으나 대부분의 방법은 각 어레이 마이크로폰의 위치에 따른 위상의 차이를 바탕으로 한 빔조정 벡터를 구성하는 것으로부터 출발한다. 그러므로 어레이 형상 및 간격, 관심 주파수의 선택 등에 있어서 제한을 받을 수 밖에 없다.

그러나 크기가 임의로 변하는 신호들은 주파수에 무관한 빔조정 벡터를 구성하여 위치를 추정하는 것이

가능하다. 특히 크기가 임의로 변하는 신호로써 비정상 상태의 다양한 신호뿐만 아니라 협대역 주파수 성분을 포함하는 신호에 대한 시간 영역에서의 신호들이 이러한 특징을 가지고 있어 이러한 빔조정 벡터를 이용하여 협대역 신호 및 시간 영역에서의 음원 추정을 위한 빔 벡터 연구의 기초가 될 수 있다.

2. 빔형성 모델링 및 소음원 규명

일반적인 빔형성 방법은 아래의 그림과 같이 임의의 방향에서 평면파 또는 구면파가 입사할 때 각 어레이 마이크로폰들간의 거리 차이로 인한 위상차를 이용하여 빔조정 벡터를 구성한다. 식(1)은 각 마이크로폰 사이의 위상차를 고려하여 일반적인 평면파에 대한 입사신호와 어레이 마이크로폰간의 관계를 표현한 식으로 이 식에서 빔조정 벡터가 주파수로 표현된 함수임을 알 수 있다.

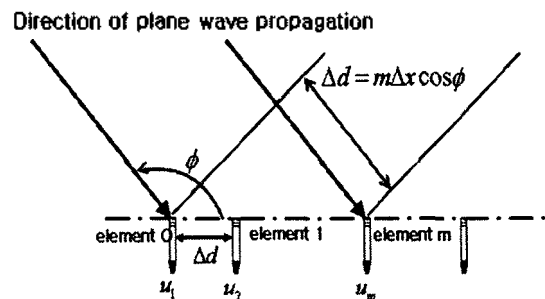


그림 1. 평면파 빔형성 모델

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ e^{jkd \cos \phi} & & e^{jkd \cos \phi_N} \\ \dots & \dots & \dots \\ e^{jkMd \cos \phi} & & e^{jkMd \cos \phi_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ \cdot \\ s_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \dots \\ n_M \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.1 빔형성 모델링

아래와 같이 2 개의 크기가 임의적으로 변하는 독립적인 음원으로부터 방사되는 구면파의 음압을 M 개의 어레이 마이크로폰으로 측정한다고 가정하자. 그러면 m 번째 마이크로폰에서 받은 신호는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

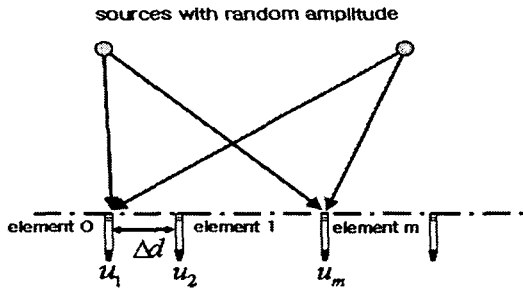


그림 2. 구면파 빔형성 모델

$$u_m = A_1 X_1(t) e^{j\phi_1} + A_2 X_2(t) e^{j\phi_2} + n_m \quad (2)$$

여기서 X 및 ϕ 는 각각 임의적인 특성을 갖는 값이며 A 는 파형의 특징에 의해 결정되는 주파수 및 거리의 함수이고 n_m 은 각 마이크로폰에서의 노이즈이다. 계속해서 임의의 m 번째 마이크로폰에서 받은 신호와 그 크기의 제곱항은 다음과 같다. 편의를 위해 노이즈의 항은 제외하여 식을 전개하였으며 노이즈의 영향은 다음장에서 따로 살펴보았다.

$$\begin{aligned} |u_m|^2 = & A_1^2 X_1(t) X_1(t)^* + A_1 A_2^* X_1(t) X_2(t)^* e^{j(\phi_1 - \phi_2)} \\ & + A_1^* A_2 X_2(t) X_1(t)^* e^{-j(\phi_1 - \phi_2)} + A_2^2 X_2(t) X_2(t)^* \end{aligned} \quad (3)$$

위의 식 (3)에서 둘째항과 셋째 항은 평균을 할 경우 음원들간의 서로상관함수가 되어 사라지는 항이나 4 개의 모든 항은 서로간에 상관성(correlation)이 없음을 쉽게 관찰 할 수 있다. 일반적으로 N 개의 독립적인 소음원이 존재할 경우 N^2 개의 이러한 항이 존재하게 되며, 또한 음원으로부터 측정 센서까지의 거리가 파장의 길이에 비해 비교적 가까운 거리에

있다면 구면파로 가정할 수 있으므로 식 (3)에서의 첫째 항과 마지막 항에서의 A_i 는 다음과 같이 된다.

$$A_i^2 = \left| \frac{e^{-jkr_i}}{r_i} \right|^2 = \left(\frac{1}{r_i} \right)^2 \quad (4)$$

따라서 임의의 M 개의 마이크로폰에 대한 입력벡터 (5)로부터 식 (6)과 같은 꼴이 되도록 빔 조정 행렬 및 음원 벡터를 구성 할 수 있다.

$$U = [u_1^2 \ u_2^2 \ \dots \ u_N^2]^T \quad (5)$$

$$U = AS + N \quad (6)$$

또는,

$$U = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{r_{11}}\right)^2 & \left(\frac{1}{r_{1N}}\right)^2 \\ \cdot & \cdot \\ \left(\frac{1}{r_{M1}}\right)^2 & \left(\frac{1}{r_{MN}}\right)^2 \end{bmatrix} \mathbf{a}_1 \ \mathbf{a}_2 \begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ S_3(t) \\ S_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ N_M \end{bmatrix} \quad (7)$$

위의 식에서 처음 두 열은 식 (3)에서의 첫째 항과 마지막 항에 대응하는 벡터이고 \mathbf{a}_1 및 \mathbf{a}_2 는 두 음원간의 상관함수에 대응하는 빔조정 벡터로 실제로 이 항들을 물리적으로 구성하는 것은 많은 한계가 있다.

2.2 소음원 규명 및 노이즈의 영향

식(6)의 노이즈 항을 제외한 입력벡터의 코베리언스 행렬은 다음과 같이 계산 되어 진다.

$$\mathbf{R}_{UU} = E[\mathbf{U}\mathbf{U}^H] = \mathbf{A}E[\mathbf{S}\mathbf{S}^H]\mathbf{A}^H = \mathbf{A}\mathbf{R}_{SS}\mathbf{A}^H \quad (8)$$

식(8)의 \mathbf{R}_{UU} 는 $M \times M$ 행렬로 4 개의 두드러지는 고유값을 가짐을 식 (3)으로부터 알 수 있다. 즉 각각의 고유값은 서로간 상관성이 없는 항들에 대응하는 값으로 일반적으로 N 개의 음원에 대하여 N^2 개의 고유값을 갖게 되므로 이에 대응하는 고유벡터들을 제외한 $M - N^2$ 개의 널 벡터(null vector)를 구성 할 수가 있다. 그러나 또한 이것은 N 개의 소음원에 대하여 측정점의 수가 최소한 $N^2 + 1$ 보다 많아야 함을 의미하기도 하므로 최소로 필요로 하는 마이크로폰의 수는 다음과 같다.

The minimum number of sensor $\geq N^2 + 1$ (9)

이렇게 구성된 널 벡터는 빔조정 벡터와 직교(orthogonal)하는 성질이 있으므로 식 (10)과 같이 공간 스펙트럼을 정의함으로써 빔조정 벡터 (11)에 대응하는 위치를 찾을 수 있다. 식 (11)은 일반적인 음압의 제곱값에 대응하는 빔조정 벡터와 같으므로 음원이 존재하는 위치에서 공간 스펙트럼의 값은 최대치를 갖게 된다.

$$\mathbf{P} = \frac{1}{\mathbf{b}_i^H \mathbf{V}} \quad (10)$$

$$\mathbf{b}_i = \left\{ \frac{1}{r_{i1}^2} \quad \frac{1}{r_{i2}^2} \quad \dots \quad \frac{1}{r_{iM}^2} \right\}^T \quad (11)$$

식 (10)에서 \mathbf{V} 는 4 개의 두드러지는 고유값을 제외한 나머지 값들로 구성된 널 벡터이다.

그러나 이러한 과정들은 각각의 음원에 대응하는 고유값 및 고유벡터가 정확히 구할 수 있을 때 가능하나 노이즈가 존재할 경우 고유값이 왜곡되어 오차를 유발 시킨다. 아래 식은 식 (3)에 노이즈 항을 포함시켜 계산된 식이다.

$$\begin{aligned} |u_m|^2 &= A_1^2 X_1(t) X_1(t)^* + A_2^2 X_2 X_2^* + n_m^2 + \\ &A_1 A_2^* X_1(t) X_2(t)^* e^{j(\phi_1 - \phi_2)} + A_1^* A_2 X_2(t) X_1(t)^* e^{-j(\phi_1 - \phi_2)} \\ &+ A_1 n_m^* e^{j\beta_m} + A_2 n_m^* e^{j\beta_{2m}} + \dots \end{aligned} \quad (12)$$

위의 식에서 노이즈로 인해 서로간 비상관 관계에 있는 항들이 증가하게 됨을 확인 할 수 있는데, 이것은 실제 고유값의 분석에 있어 오차의 원인이 될 수 있다. 그러므로 식 (11)의 빔조정 벡터를 통한 분석 결과는 노이즈와 신호의 비(SNR)에 매우 민감할 수 밖에 없으며 이러한 노이즈의 영향을 다음장의 모의실험을 통해서 확인해 보았다.

3. 수치 해석 및 실험

3.1 모의 실험

아래의 그림과 같이 가상의 모의실험을 통하여 새롭게 모델링한 방법을 검증하여 보았다. 2 개의 점음원을 사용하였으며 기준마이크로폰은 12 개로 사각

어레이 형상으로 배열하였다. 가상의 음원의 위치는 (-0.25,0,0), (0.25,0,0)에 위치하며 기준마이크로폰이 위치하는 기준면과 음원면까지의 거리는 30cm 라고 가정하였다. 음원면은 1*1m 로 가정하였으며 각각 50 개의 격자로 나누어 스펙트럼을 구하였다.

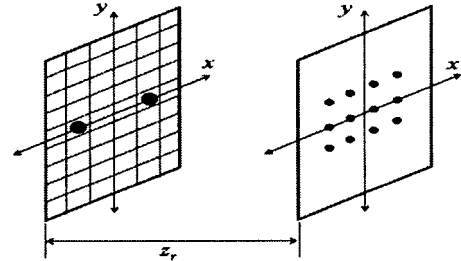


그림 3. 모의 실험 장치

그림 (3)은 앞서 새롭게 모델링한 방법으로 음원면에서 스펙트럼(\mathbf{P})의 분포를 그린 그림이며 그림 (4)는 $x=0$ 의 위치에서 노이즈 영향에 따른 스펙트럼 분포의 변화를 보여주는 그래프이다.

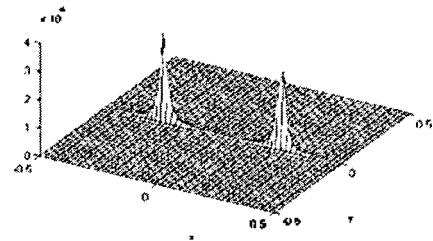


그림 4. 모의실험, 음원면에서 스펙트럼 분포($z_r=0.3m$, frequency= 1000Hz, (S/N)=20dB)

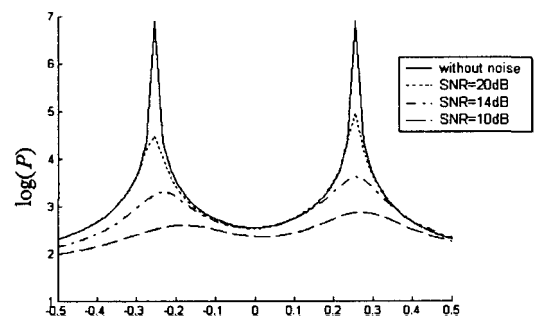


그림 5. 모의실험, 노이즈 영향에 따른 스펙트럼 변화 (S/N)이 14dB 이상의 환경에서는 결과가 매우 신뢰할 만 하였으나 그 이상의 시끄러운 환경에서는 어느 정도 오차가 발생함을 알 수 있다. 이는 앞서 2.2 절에서 보았듯이 노이즈가 전체적인 고유값을 변화시킴으로써 기인하는 오차로 해석 될 수 있다.

3.2 실험

아래의 그림은 두개의 음원에 대한 실험결과를 나타낸 그림으로 정확히 소음원의 위치를 추정하였음을 보여준다. 이 실험에서는 중심 주파수 600Hz 인 협대역 주파수로 가진 되는 일정한 크기의 두 개의 독립적인 음원을 사용하였으며 $z_r = 0.3m$ 의 위치에서 측정하였다. 12 개의 마이크로폰을 6 개씩 2 열로 배치하여 어레이를 구성하였으며, 모든 분석은 시간 영역에서 이루어 졌다.

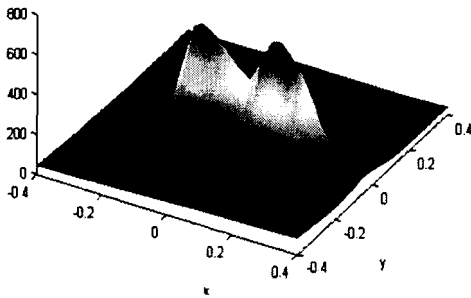


그림 6. 협대역 음원에 대해 시간 영역에서 계산된 스펙트럼 분포, $f_c = 600Hz$

위의 실험을 통하여 본 알고리즘이 임의의 크기를 갖는 소음원뿐만 아니라 이러한 특성을 지니는 일반적인 신호들에 대해서도 적용이 가능함을 보여주는 것으로, 이후 시간 영역에서의 빔조정 벡터를 구성하는데 있어서 기초가 될 수 있다.

4. 결과

그 크기가 임의적으로 변하는 신호들은 특히 구면파의 조건을 만족하는 경우 주파수에 무관한 빔조정 벡터를 구성하는 것이 가능함을 보였다. 이렇게 구성된 빔조정 벡터는 일반적인 빔형성 알고리즘에 비해 노이즈로 인한 오차가 커지는 단점이 있으나 어레이 형상 및 간격등에 있어서 좀 더 자유로울 수 있다. 또한 시간영역에서 이러한 특성을 갖는 신호들에 대해서도 적용이 가능함을 실험을 통하여 검증하였으며 더 나아가 시간 영역에서 광대역 빔조정 벡터의 구성에 대한 연구의 기초가 될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. M.R.Bai, "Industrial noise source identification by using an acoustic beamforming system", Transactions of the ASME, Vol. 120, 1998
2. Julius S. Bendat, "random data analysis and measurement procedures", Wiley, 2000
3. Joseph C. Liberti, Jr. "smart antennas for wireless communications", prentice hall, 1999