

반사파가 존재하는 실내 공간에서의 음원 탐지 방법

Source Identification in an Interior Sound Field

○ 최 영 철*, 김 양 한**

Young-Chul Choi and Yang-Hann Kim

ABSTRACT

Identification of noise sources, their locations and strengths, have been taken great attention. The method that can identify noise sources normally assumes that noise sources are located at a free field. However, the sound in a reverberant field consists of that coming directly from the source plus sound reflected or scattered by the walls or objects in the field. In contrast to the exterior sound field, reflections are added to sound field. Therefore, we have to consider the reverberation effect on the source identification method. The main objective of this paper is to identify noise source in the reverberant field. At first, we try to identify noise sources in a rigid wall enclosure using the spherical beamforming method. In many case of practical interest, the wall has an admittance so that complex reflection process occurred. In this paper, we assumed the complex reverberant field in the enclosure to be the sum of plane waves with random incidence and magnitude. Then the effects of reverberant field at interior source identification have been studied theoretically as well as experimentally

1. 서론

반사파가 무시할 정도로 작은 실외 공간에 있는 음원을 탐지, 즉 음원의 위치와 세기(source intensity)를 추정하는 방법은 잘 알려져 있다[1]. 물 속에서 물체가 움직일 때 발생하는 소리를 추적하여 그 위치를 알아내는 것은 군사적으로 피아의 식별과 관련된 매우 중요한 문제이며 따라서

오랫동안 주변 소음에 강건한 식별법 개발에 많은 노력이 경주되어 왔다. 통상적으로 이야기하는 경우와는 달리 공기 또는 물속에 있는 어떠한 음원에 대하여 그 위치와 음원의 세기를 추정하는 물리적 상황은 두개의 큰 서로 다른 음향학적인 상황으로 분리하여 볼 수 있다. 첫번째의 경우는 앞서 언급한 경우와 같이 반사의 영향이 무시할 정도로 작은, 즉 반사파에 의한 신호가 직접음에 의한 신호에 비하여 매우 작아서 그 영향을 무시할 수 있는 경우이며, 두 번째의 경우는 이와는 달리 반사파의 영향이 상대적으로 무시할 수 없을 정도

* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

** 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

이어서 이러한 물리적 상황을 신호처리 방법에 적극적으로 반영하여야 하는 경우이다. 첫번째의 경우는 참고 문헌[1]에서 잘 기술하고 있는 기존의 방법, 즉 빔형성 방법(beamforming method)을 위시한 고유치해석방법(eigenvalue analysis)등으로 분류되는 방법들을 사용할 수 있다. 두번째의 상황은 이와는 달리 반사파를 고려하는 신호처리 방법이 첫번째 방법에 보완되어야 할 것임은 쉽게 생각할 수 있을 것이다. 결국은 발생 가능한 반사파를 구체적으로 어떻게 모델링하여 신호처리 방법을 보완할 수 있는가가 연구의 초점이 될 것이다. 결국 반사파가 상당한 정도 존재하는, 즉 잔향음장(reverberant acoustic field)에 찾고자 하는 음원이 있는 경우 이 음원을 찾을 수 있는 신호처리 방법론을 개발하는 것이 연구의 목적이 된다. 이 목적을 달성하기 위한 제반 문제에 관한 정의는, 과연 마이크로폰의 배열 및 개수는 어떻게 하는 것이 목적에 적합한가, 그리고 전술한 신호처리 방법, 즉 반사파를 표현하는 모델은 어떠한 것이 적합한가 하는 것이다.

본 논문에서는 먼저 반사파에 대한 가장 기초적인 모델인 강체벽을 가졌을 때의 음원 탐지에 대해 알아 본다. 다음으로 어떤 유한한 임피던스를 갖는 벽면이 실내에 존재할 때 반사파가 소음원을 규명하는데 어떠한 영향을 미치는지를 알아 보고, 이를 기반으로 실내 소음원을 탐지 규명하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 빔형성 방법

Fig. 1은 빔형성 방법에 대한 가장 간단한 예를 보여 주고 있다. 평면파가 어레이에 수직인 방향으로 θ_s 의 각도를 가지고 입사 될 때 평면파가 이웃한 마이크로폰에 도달하기 위해서는 $d \sin \theta_s$ 거리를 이동해야 한다. 따라서 이웃한 마이크로폰 사이에는 $\tau = \frac{d \sin \theta_s}{c}$ 만큼의 시간지연이 존재하

게 된다. 이와 같이 평면파의 입사되는 각도에 따라서 각 마이크로폰 사이에 시간지연, 즉 위상차이가 생기게 되는데 빔형성 방법은 이러한 성질을 이용하여 소음원의 위치를 찾게 된다.

빔형성 방법에 대해 좀더 구체적으로 살펴보자. 우선 M 개의 마이크로폰으로부터 측정된 신호를 다음식과 같이 벡터로 나타낸다.

$$\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_M]^T \quad (1)$$

그 다음 가상의 음원을 모델링하여 각 마이크로폰 위치에서 얻게 될 신호를 예측하여 벡터로 나타내는데, 이 벡터를 스캔 벡터(scan vector)라 부르고 평면파 모델일 경우 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{W} = \frac{1}{\sqrt{M}} \{e^{jkd \sin \theta}, e^{jk2d \sin \theta}, \dots, e^{jkMd \sin \theta}\}^T \quad (2)$$

빔형성 방법은 스캔 벡터인 식(2)에서 θ 를 변화가면서 측정된 신호인 식(1)과 비교하여 실제 소음원의 위치인 θ_s 를 찾게 된다. 이때 두 벡터를 비교한다는 것은 수학적 의미에서 내적(inner product)한다는 것을 의미하고 실제 소음원의 위치인 $\theta = \theta_s$ 에서 최대값을 가지게 된다. 이때 빔형성 파워는

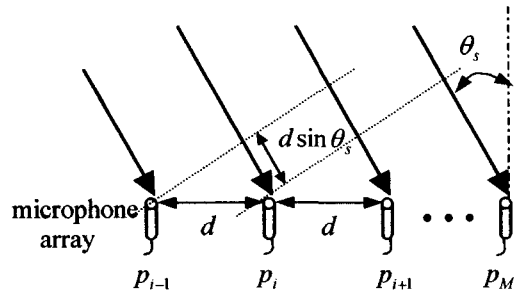


Fig1. Beamforming method for a plane wave model

$$P_{beamforming} = \mathbf{W}^H \mathbf{E} [\mathbf{P} \mathbf{P}^H] \mathbf{W} \quad (3)$$

$$= \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W}$$

로 정의 된다. 여기서 \mathbf{R} 은 \mathbf{P} 의 상관행렬 (correlation matrix)을 나타낸다.

음원이 근거리 존재할 경우에는 음파의 파면이 구형처럼 방사되기 때문에 스캔 벡터는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{W} = \frac{1}{\sqrt{M}} \{e^{jkr_1}, e^{jkr_2}, \dots, e^{jkr_M}\}^T \quad (4)$$

여기서 r_i 는 음원에서 i 번째 마이크론 사이의 거리를 의미한다.

3. 강체벽을 가진 실내 공간에서의 음원 탐지

실내 공간이나 덕트내에 소음원이 존재할 경우에 소음원을 규명하기 위해서는 반드시 반사에 대한 영향을 고려해야 한다. 이러한 반사파에 대한 가장 기초적인 모델은 완전반사를 가정하여 공간내의 모드(mode)들을 더하여 표현하는 방법일 것이다. 이절에서는 강체벽을 가진 덕트에서 음원을 탐지하는 방법에 대해 알아본다.

소음원은 단극 음원의 형태를 갖고, 덕트의 길이는 무한하며, 음파는 강체 벽면에서 완전 반사한다고 가정할 때 무한 길이의 덕트에 관한 그런 함수(Green's function)를 유도하여 보면 다음 식과 같이 구할 수 있다.[2]

$$g(x, y, z | x_0, y_0, z_0) = \frac{j}{2S} \sum_n \frac{\Psi(x_0, y_0)}{k_n \Lambda_n} \Psi(x, y) e^{jk_n |z - z_0|} \quad (5)$$

여기서 (x, y, z) 는 측정점을 나타내고,

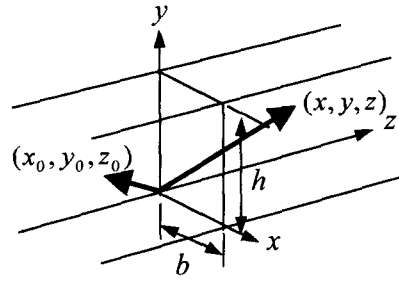


Fig.2 Infinite duct with rectangular section : (x, y, z) is measurement point and (x_0, y_0, z_0) is source location

(x_0, y_0, z_0) 는 음원의 위치를 나타낸다.(Fig.3) 그리고 Ψ 는 선정한 덕트의 경계조건을 만족하는 고유함수(Eigen function)를 의미하고, S 는 덕트의 단면을, 그리고 j 는 복소수를 나타낸다. 만약 덕트의 단면이 사각형이고 강체벽을 가졌다면 다음식을 만족하게 된다.

$$\Lambda_{mn} = \frac{l}{c_m c_n} \quad c_m = \begin{cases} 1 & m=0 \\ 2 & m>0 \end{cases} \quad (6)$$

$$k_{mn}^2 = k^2 - \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2$$

식(7)을 이용하여 강체벽을 가진 사각 덕트내의 반사파를 그런 함수로 모델하여 모드의 합으로 표현한다면 스캔 벡터는 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{W} = \frac{j}{2bh} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Psi(x_0, y_0)}{k_{mn} \Lambda_{mn}} \Psi(x_1, y_1) e^{jk_{mn} z_1 - z_0}, \dots \right. \\ \left. \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Psi(x_0, y_0)}{k_{mn} \Lambda_{mn}} \Psi(x_M, y_M) e^{jk_{mn} z_M - z_0} \right\}^T \quad (7)$$

여기서 고유함수는 $\Psi_{mn} = \cos \frac{m\pi}{b} x \cos \frac{n\pi}{h} y$ 식을 만족하고, h 와 b 는 각각 덕트의 높이 및 폭을

의미한다.

식(4)는 반사파의 영향을 무시할 수 있는 자유공간에서 사용되는 스캔벡터를 나타내지만, 식(7)은 반사파가 존재하는 실내에서 소음원의 위치를 추정할 수 있는 스캔 벡터를 의미한다. 이 스캔 벡터는 강체벽을 가진 덕트내의 음장을 모드의 합으로 표현함으로써 반사파를 표현하고 있다. 즉, 식(7)을 식(3)에 대입하여 스캔 벡터로 사용하면 터널 내에서 반사파를 고려한 빔형성 파워를 계산하여 소음원의 위치를 추정할 수 있게 된다.

이러한 이론적인 내용을 검증하기 위해서는 강체벽에 가까운 덕트에서 실험을 수행해야 할 것이다. 공기의 특성 임피던스(characteristics impedance)는 약 $415 \text{ Pa}\cdot\text{sec}/\text{m}$ 이기 때문에 이

보다 매우 큰 값을 가지는 아크릴 ($10 \sim 30 \times 10^6 \text{ Pa}\cdot\text{sec}/\text{m}$)로 덕트를 제작하여 실험을 수행하면 강체벽이란 가정에 큰 무리가 없을 것이다. 어레이는 모든 방향의 분해능을 고려하여 16개의 마이크로폰으로 X자형으로 배치하여 실험을 수행하였다.

Fig. 3은 아크릴 덕트내에 소음원이 존재할 때 반사파를 모드의 합으로 표현하여 음원의 위치를 추정한 결과를 보여주고 있다. 결과 그래프에서 볼 수 있듯이 한 개의 단극 소음 뿐만 아니라 두 개의 독립소음이 존재할 때도 음원의 위치를 정확하게 추정할 수 있다.

실험에서 얻을 수 있는 중요한 결과는 반사파가 존재하는 실내 공간에서도 음장을 잘 표현할 수 있는 스캔 벡터를 적절히 선정하면 음원의 위치를 잘 추정할 수 있다는 것이다.

4. 임피던스 벽을 갖는 실내공간에서의 음원 탐지

음의 전파 경로에 벽 또는 물체가 존재하게 되면 임피던스 부정합에 의하여 소리는 반사하게 된다. 이때 생성된 반사파는 벽면의 임피던스에 의하여 결정된다. 만약 벽면이 강체이면 소리는 벽면에서 완전반사를 하지만, 거의 모든 경우 벽면은 유한한 임피던스(impedance)를 갖고 있고 따라서 부분적인 반사가 이루어지게 된다.

벽면에서의 반사가 매우 불규칙하게 발생된다면 이러한 반사파는 크기 및 입사각이 랜덤한 무한 개의 평면파들의 합으로 볼 수 있을 것이다. 따라서 실내공간에서의 음장은 Fig.4와 같이 소음원에서 나오는 직접음과 반사파에 해당하는 크기 및 입사각이 랜덤한 평면파 들의 합으로 볼 수 있다. 이것을 주파수 영역에서 즉 임의의 한 주파수에 대한 음압의 공간상 분포는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

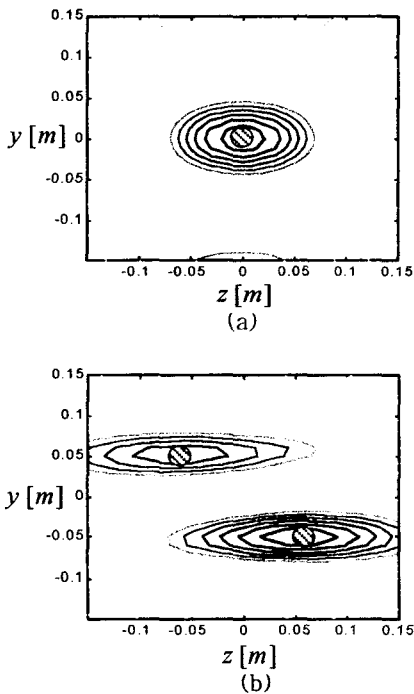


Fig. 4 Beamforming power distribution, source frequency =2kHz (a) single source : true source location $(y,z)=(0,0)$ (b) incoherent sources: true source locations $(y_1,z_1)=(0.05,-0.06)$ $(y_1,z_1)=(-0.05,0.06)$.

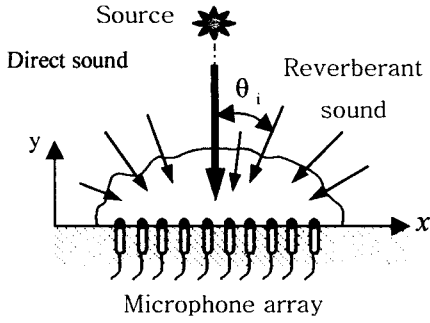


Fig.4 Reverberant field in an enclosure.

$$p_m(x) = A \frac{e^{jkr_{ms}}}{r_{ms}} + \sum_{i=1}^{\infty} B_i e^{j k x \sin \theta_i} \quad (8)$$

여기서 A 는 소음원에서 나오는 음의 크기를 나타내며, r_{ms} 는 소음원과 m 번째 마이크로폰 사이의 거리를 의미한다. 또한 B_i 와 θ_i 는 각각 i 번째 평면파의 크기와 위상각을 의미하며 여기서는 랜덤한 변수이다. 식(8)에서 우변의 첫 번째 항은 소음원에서 나오는 직접음을 나타내고, 두 번째 항은 크기 및 입사각이 랜덤한 평면파들의 합을 의미하며 여기서는 반사파에 해당된다. 식(8)는 사실 소음원이 단극 음원일 경우를 가정하고 있다. 이러한 가정은 제안하는 방법의 현실적인 적용성을 낮게 하는 결함이 있다고 볼 수 있다. 그러나 측정위치가 소음원에서 수 파장이상 떨어져 있을 경우 유한한 체적을 갖는 일반적인 소음원도 단극 음원으로 볼 수 있는 점을 고려한다면 실제 적용성에 사실 큰 무리가 없다 볼 수 있다.

식 (8)을 행렬로 나타내면, 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{P} = \mathbf{S} + \sum_{i=1}^{\infty} B_i \Phi_i \quad (11)$$

여기서 $\mathbf{P} = \{p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_M)\}^T$

$$\mathbf{S} = \left\{ A \frac{e^{jkr_1}}{r_1}, A \frac{e^{jkr_2}}{r_2}, \dots, A \frac{e^{jkr_M}}{r_M} \right\}^T$$

$$\Phi = \left\{ e^{j k x_1 \sin \theta_1}, e^{j k x_2 \sin \theta_1}, \dots, e^{j k x_M \sin \theta_1} \right\}^T$$

복소 영역(complex domain)에서 무한개의 랜덤한 복소 변수들을 모두 더한다면 0으로 접근하게 됨은 쉽게 알 수 있다. 이러한 성질을 이용하여 식(11)의 상관행렬을 구하면 다음식과 같이 간략히 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{P}\mathbf{P}^H \\ &\cong \mathbf{S}\mathbf{S}^H + \xi \mathbf{I} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 ξ 는 반사파의 전체 파워를 나타내고, \mathbf{I}

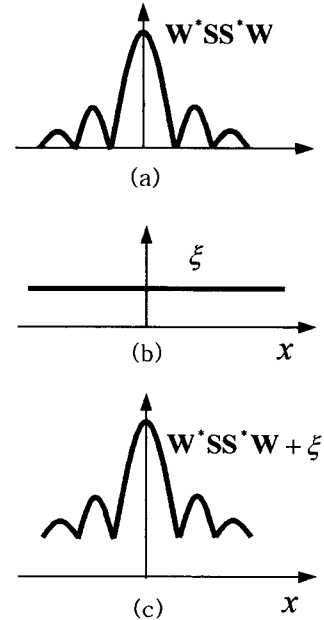


Fig. 5 Beamforming power distribution, (a) beamforming power by direct sound (b) beamforming power by reflect sound, (c) total beamforming power

는 단위행렬(unitary matrix)을 나타낸다. 빔형성 파워는 상관행렬(correlation matrix)에 스캔 벡터(scan vector)를 곱하므로 다음식과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} \text{Power} &\cong \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \\ &= \mathbf{w}^H \mathbf{S} \mathbf{S}^H \mathbf{w} + \xi \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)의 우변의 첫번째 항은 실제 소음원에 의한 빔형성 파워를 나타내고(Fig. 5(a)), 두 번째 항은 랜덤한 반사파에 의한 빔형성 파워(Fig. 5(b))를 나타내고 있다. 따라서 전체 빔형성 파워

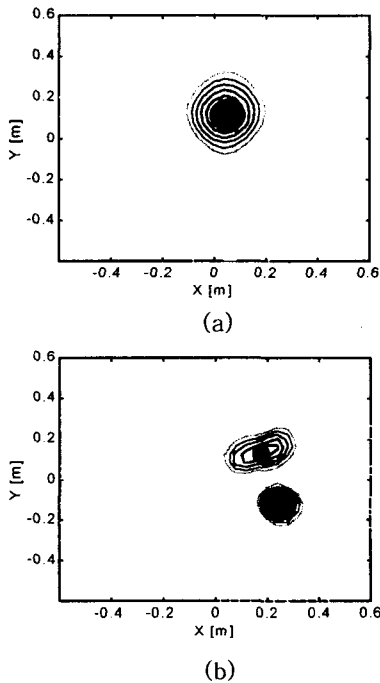


Fig. 6 Source prediction in consideration of reverberant field. (a) Single Source : frequency 9.3kHz, location $(x,y) = (0.06\text{m}, 0.085\text{m})$, source, (b) Incoherent Sources : frequency 19.9kHz, source location $(x_1,y_1) = (0.25\text{m}, -0.08\text{m})$, $(x_2,y_2) = (0.166\text{m}, 0.152\text{m})$

는 Fig. 5(c)와 같이 반사파의 전체파위에 해당하는 만큼 DC성분이 생길 뿐 소음원의 위치는 변하지 않음을 알 수 있다.

식(11)이 의미하는 바는 실내 벽면의 표면이나 형상들이 매우 불규칙하여 반사파가 더욱 랜덤하게 발생하도록 한다면 소음원을 규명하는 입장에서 더욱 유리해 지게 된다는 것이다.

이러한 결론을 검증하기 위해 사각 단면이 1.2m X 1.2m인 덕트내에 22℃의 물을 채워 넣고 실험을 수행하였다. 물의 특성 임피던스는 $1.5 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{sec}/\text{m}$ 이고 덕트의 특성 임피던스는 $4 \sim 40 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{sec}/\text{m}$ 이기 때문에 음파는 벽면을 강제벽으로 느끼지 못하게 된다. 따라서 벽면에서는 완전반사가 아닌 복잡한 과정에 의해 반사가 일어날 것이다.

실험에 사용된 센서 어레이는 모든 방향의 분해능을 고려하여 32개의 하이드로폰을 십자형으로 배치 하였다.

Fig 6(a)는 단극 소음원이 덕트 내에 존재할 때의 실험결과를 보여 주고, Fig.6(b)는 두개의 독립 소음원(incoherent sources)이 존재할 때의 결과를 보여 주고 있다. 결과에서 보여 주듯이 실제 소음원의 위치와 빔형성 방법에 의한 추정된 소음원의 위치가 정확히 일치함을 관찰할 수 있었다. 즉 벽면에서 반사가 매우 복잡하게 발생한다면, 이러한 반사파는 입사각 및 크기가 랜덤한 평면파의 합으로 볼 수 있고, 음원의 위치를 추정하는 데는 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

5. 결론 및 토의

실제 많은 경우에는 실외 소음뿐만 아니라, 실내에서도 소음원을 찾는 문제가 많이 대두되고 있다. 실내에서 소음원을 규명할 때 가장 큰 문제로 나타나는 것이 반사파에 대한 처리일 것이다.

본 논문에서는 이러한 반사파를 가장 간단한 경우인 강제벽을 가진 덕트에 대해 알아 보았다.

이때 내부에 형성된 반사파를 모드의 합으로 모델링하여 음원의 위치를 추정하였다. 반사파가 존재하는 실내 공간에서도 음장을 잘 표현할 수 있는 스캔 벡터를 적절히 선정하면 음원의 위치를 잘 추정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

다음으로 어떤 유한한 임피던스를 갖는 벽면이 존재할 때 음원의 위치를 추정하는 방법에 대해 살펴 보았다. 이때 반사파를 입사각 및 크기가 랜덤하게 입사되는 평면파들의 합으로 가정하고, 빔형성 방법을 통해 소음원을 규명할 때 어떠한 영향을 미치는지에 대해 알아 보았다. 반사파는 빔형성 파워를 전체적으로 크게 할 뿐, 음원의 위치를 추정하는 데는 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 이 사실로부터 실내공간의 반사파가 랜덤하면 할수록 소음원을 규명하는 입장에서는 더욱 유리해짐을 알 수 있었다.

후 기

실험에 도움을 주신 삼성 중공업의 강관형 박사, 이무열씨께 감사 드립니다. 본 연구는 삼성중공업, 과학기술부의 국가지정연구실(NRL)사업에 의해 지원 되었으며, 지원에 깊이 감사 드립니다.

참고 문헌

1. Don H. Johnson and Dan E. Dudgeon, Array Signal Processing, PTR Prentice Hall, 1993
2. J. W. Choi, "Identification of Near Field Source," Ph. D. Dissertation, KAIST
3. Morse and Ingard, Theoretical Acoustics, McGraw-Hill, pp500-501, 1968
4. J. W. Choi "View on beamforming method and its application on vehicle noise identification," First workshop on vehicle noise visualization and identification, 2000
5. 김영기, 김양한, "평판에서의 음향파워와 구면

파 모델을 이용한 빔형성 파워와의 비교," 한국 음향학회지 제16권 제6호 pp.12-18