

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

(2002년 3월 4일 접수 ; 2002년 5월 24일 심사완료)

Key Words : Source Identification(소음원 규명), Reverberant Field(잔향 음장), Beamforming Method(빔형성 방법), Scan Vector(스캔벡터)

ABSTRACT

Identification of noise sources, their locations and strengths, has been taken great attention. The methods that can identify noise sources normally assume that noise sources are located in 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 fist, we try to identify noise sources in a rigid wall enclosure using the beamforming method. In many cases of practical interest, the wall has admittance so that random reflections occur in an enclosure. 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 we try to explain effects of reverberant field at interior source identification.

1. 서 론

반사파가 무시할 정도로 작은 실외 공간에 있는 음원을 탐지하는 방법, 즉 음원의 위치와 세기(source intensity)를 추정하는 방법은 잘 소개되어 있다(예를 들면 참고문헌 (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 어떠한 음원에 대하여 그 위치와 음원의 세기를 추정하는 물리적 상황은 두개의 큰 서로 다른 음향학적인 상황으로 분리하여 볼 수 있다. 첫번째의 경우는 앞서 언급

한 경우와 같이 반사의 영향이 무시할 정도로 작은, 즉 반사파에 의한 신호가 직접음에 의한 신호에 비하여 매우 작아서 그 영향을 무시할 수 있는 경우이며, 두번째의 경우는 이와는 달리 반사파의 영향이 상대적으로 무시할 수 없을 정도이어서 이러한 물리적 상황을 신호처리 방법에 적극적으로 반영하여야 하는 경우이다. 첫번째의 경우는 참고문헌 (1)에서 잘 기술하고 있는 기존의 방법, 즉 빔형성 방법(beamforming method)을 위시한 고유 구조 해석(eigen structure analysis) 등으로 분류되는 방법들을 사용할 수 있다. 두 번째의 상황은 이와는 달리 반사파를 고려한 신호처리 방법이 첫번째 방법에 보완되어야 할 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 찾

† 책임저자, 정회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : yhkim@mail.kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3025, Fax : (042) 869-8220

* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

을 수 있는 신호처리 방법론을 개발하는 것이 연구의 목적이 된다. 이 목적을 달성하기 위한 제반 문제에 관한 정의는, 과연 마이크론의 배열 및 개수는 어떻게 하는 것이 목적에 적합한가, 그리고 전술한 신호처리 방법, 즉 반사파를 표현하는 모델은 어떠한 것이 적합한가 하는 것이다.

2. 음원 탐지 방법

실내 소음원을 규명할 때는 일반적으로 센서의 개수 및 위치에 대한 제한을 받게 된다. 따라서 적은 수의 마이크론을 사용하여 소음원의 위치 및 세기를 구할 수 있는 방법이 필요하게 된다. 이러한 요구 조건을 만족하면서 소음원을 규명할 수 있는 방법으로 빔형성 방법이 있다. 이 방법은 센서 어레이를 사용하기 때문에 인텐시티 방법, 음향 홀로그래피 방법 등에 비해 시간과 노력이 적게 드는 장점이 있다. 본 연구에서는 센서 어레이를 이용한 가장 대표적인 방법인 빔형성 방법을 사용하여 실내 소음원 규명에 적용하고자 한다.

각 마이크론에서 측정되는 신호에 음원의 모델에 따라 위상보정을 하여 얻은 신호 파워로부터 음원의 입사각 또는 위치를 찾는 방법을 빔형성 방법이라 하고, 다음식과 같이 정의 된다.

$$P_{beamforming} = \mathbf{W}^H E[\mathbf{P}\mathbf{P}^H] \mathbf{W} = \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W} \quad (1)$$

여기서 $P_{beamforming}$ 은 빔형성 파워(beamforming power)를 의미한다. 그리고 \mathbf{P} 는 각 마이크론에서 측정된 신호를 벡터로 표현한 것이고, \mathbf{W} 는 스캔 벡터(scan vector)로써 가상의 음원을 모델링하여 각 마이크론 위치에서 얻게 될 신호를 벡터로 나타낸 것이다. 또한 \mathbf{R} 은 상관행렬(correlation matrix)을 나타내고, 위 첨자 H 는 허미션(hermitian)을 의미한다.

식 (1)은 \mathbf{R} 즉 마이크론 어레이에 측정된 신호의 공간상 특성과 가장 잘 일치하는 \mathbf{W} 를 찾아내는, 즉 빔형성 파워가 최대가 되는 \mathbf{W} 를 찾는 것이 소음원 혹은 음원의 위치를 찾는 것임을 이야기하고 있다. 결국은 선택하는 \mathbf{W} 가 얼마나 실제 음압 신호의 공간상 특성(\mathbf{R})과 유사한가가 탐지의 성공여부를 좌우한다.

따라서 빔형성 방법은 음원의 위치를 규명하는데

있어 스캔 벡터가 그 성능을 좌우함을 쉽게 알 수 있다. 예를 들어 음원이 멀리 존재하여 파면(wave front)이 평면처럼 전파 된다면 스캔 벡터는 평면파 모델에 기초하여 표현할 수 있다. 하지만 음원이 측정점 가까이 존재하게 되면 파면은 구형처럼 전파 되기 때문에 스캔 벡터는 구면파 모델⁽²⁾을 이용하여 표현할 수 있다. 이와 같이 어레이를 이용한 음원 탐지 방법에서 음원의 위치를 찾는 문제는, 곧 스캔 벡터가 실제 음원에 의해 형성된 음장을 얼마나 잘 표현하는가와 직결되어 있음을 알 수 있다. 따라서 실내에 음원이 존재하여 반사파를 무시할 수 없는 경우라도, 스캔 벡터가 발생 가능한 반사파를 잘 모델링하여 기존의 신호처리 방법을 보완한다면 음원의 위치를 탐지할 수 있음을 쉽게 생각할 수 있다. 따라서 실내 음원 탐지에서 가장 중요한 문제인 반사파에 대한 모델링에 대해 알아 보기로 한다.

3. 공기 중에서의 음원 탐지

반사파에 대한 가장 기초적인 모델은 실내의 벽이 강체로 되어 있어 벽면에서 완전 반사를 하는 경우이다. 이때 생성되는 반사파는 벽면의 경계 조건을 만족하는 고유모드(eigen-mode)들의 합으로 표현할 수 있다.

소음원이 단극 음원의 형태를 갖고, 덕트의 길이는 무한하며, 음파는 강체 벽면에서 완전 반사한다고 가정할 때 사각단면을 가진 무한 길이의 덕트에서 반사파를 고려한 스캔 벡터는 다음식과 같이 표현할 수 있다.

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

$$\Psi_{mn} = \cos \frac{m\pi}{h} y \cos \frac{n\pi}{b} z$$

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

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

여기서 (x, y, z) 는 측정점을 나타내고, (x_0, y_0, z_0) 는 음원의 위치를 나타내며(Fig. 1), h 와 b 는 각각 덕트

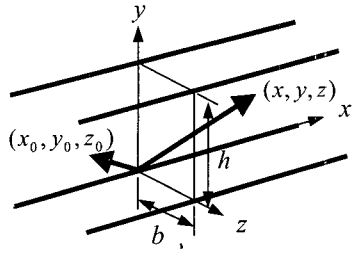
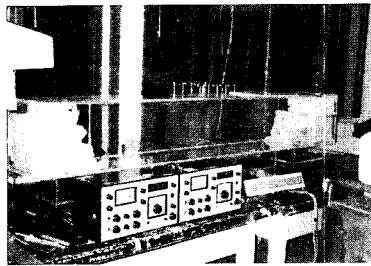
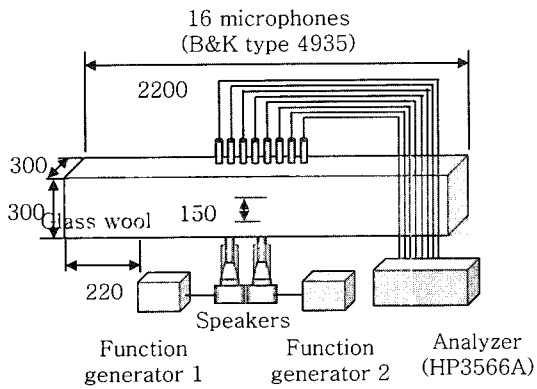


Fig. 1 Infinite duct with rectangular section : (x, y, z) is measurement point and (x_0, y_0, z_0) is source locationis



(a)

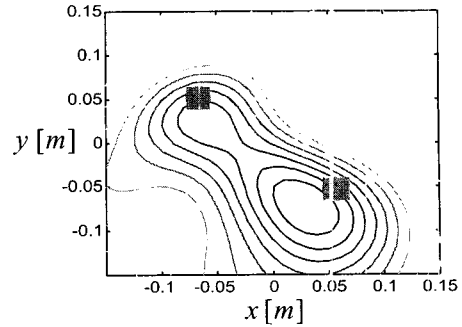


(b)

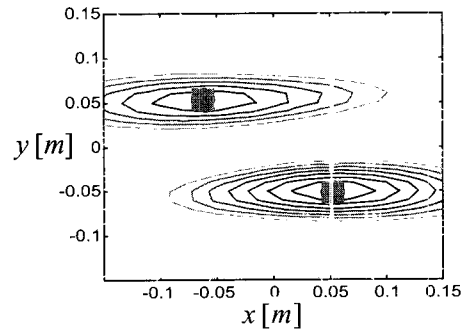
Fig. 2 Experimental setup for the source identification in the duct with rectangular section. (a) picture, (b) schematic experimental setup

의 높이 및 폭을 의미한다. 그리고 ψ 는 선정한 덕트의 경계조건을 만족하는 고유함수(eigen function)를 의미하고, j 는 복소수를 나타낸다.

식 (2)가 의미하는 것은 강체벽을 가진 덕트 내에 소음원이 존재하더라도 반사파를 고유모드의 합으로 표현된 스캔벡터를 사용한다면 소음원의 위치를 추정할 수 있음을 의미한다. 즉, 이 스캔 벡터를 식 (1)에 대입하면 덕트 내에서 반사파를 고려한 빔형성 방법



(a)



(b)

Fig. 3 Experimental results for incoherent sources: true source locations $(x_1, y_1) = (-0.06 \text{ m}, 0.05 \text{ m})$, $(x_2, y_2) = (0.06 \text{ m}, -0.05 \text{ m})$. Frequency = 2 kHz (a) Beamforming power using conventional scan vector which is expressed by a spherical wave model, (b) beamforming power using the scan vector which is expressed as the sum of the rigid wall modes

을 통해 소음원의 위치를 추정할 수 있게 된다는 것이다.

이러한 이론적인 내용을 검증하기 위해 Fig. 2와 같이 길이가 2.2 m이고 단면이 0.3 m × 0.3 m인 아크릴 덕트를 제작하여 실험을 수행하였다. 이때 아크릴의 특성 임피던스(characteristic impedance)는 공기의 특성 임피던스에 비해 약 10^6 배 정도로 매우 크기 때문에 강체벽이라는 가정을 만족하게 된다. 아래는 모든 방향의 분해능을 고려하여 16개의 마이크로폰으로 X자형으로 배치하였다.

실제 많은 경우는 한 개의 소음원 보다는 다수의 음원이 함께 존재하는 경우가 많을 것이다. 이런 의미에서 Fig. 3는 독립 소음원(incoherent source)이 두 개 존재할 때의 결과를 보여 주고 있다. 실제 소

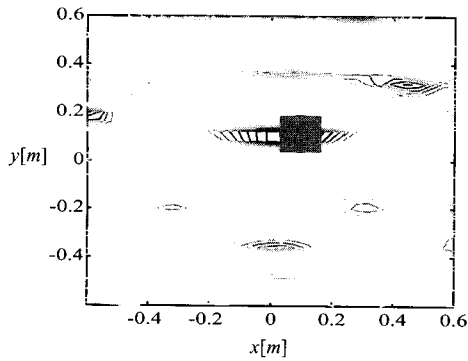


Fig. 4 Experimental result show the beamforming power distribution using the scan vector which is expressed as the sum of the rigid wall modes

음원이 $(x_1, y_1) = (-0.06 \text{ m}, 0.05 \text{ m})$ 와 $(x_1, y_1) = (0.06 \text{ m}, -0.05 \text{ m})$ 에 존재할 때 빔형성 방법을 이용하여 소음원의 위치를 예측한 결과를 보여 주고 있다. Fig. 2(a)는 기존의 방법, 즉 반사파를 고려하지 않은 구면파 모델에 기초한 스캔 벡터를 사용했을 때의 결과를 보여 주고 있는데, 음원의 위치를 정확히 추정하지 못함을 알 수 있다. 하지만 반사파를 고려한 스캔 벡터인 식 (2)을 사용했을 경우에는 빔형성 방법 (Fig. 3(b))으로 소음원의 위치를 정확하게 추정하였다. 그리고 Fig. 3(b)를 관찰하여 보면 x 축 방향에 비해 y 축 방향으로의 분해능이 좋음을 관찰할 수 있다. 이것은 축 방향으로는 무한길이라고 가정하였기 때문에 모드가 존재하지 않고 단지 y 축과 z 축 방향으로만 모드가 존재하기 때문이다.

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. 수중에서의 음원 탐지

지금까지는 매질이 공기 일 때, 즉 실내 벽면의 임피던스가 매우 커 강체벽처럼 작용할 때 소음원을 규명하는 방법에 대해 살펴 보았다.

그러면 반사파가 존재하는 물 속에서 물체가 움직일 때 발생하는 소리를 추적하는 경우에도 앞의 반사파에 대한 모델을 그대로 적용할 수 있을까? 이에 대한 대답을 얻기 위해 사각 단면이 $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ 인 수

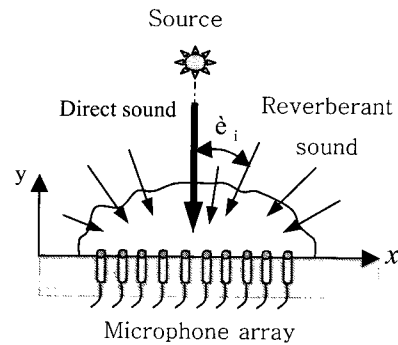


Fig. 5 Reverberant field in an enclosure

조 터널 내에 22°C 의 물을 채워 넣고 실험을 수행하였다. 이때 실험에 사용된 센서 어레이는 모든 방향의 분해능을 고려하여 32개의 하이드로폰을 십자형으로 배치하였다.

Fig. 4은 강체벽의 경계조건을 만족하는 고유함수들의 합으로 나타낸 식 (2)를 적용하였을 때의 결과를 보여주고 있다. 결과 그래프에서 보여 주고 있듯이 음원이 물 속에 있을 때는 앞의 반사파 모델이 잘 맞지 않음을 쉽게 짐작할 수 있다.

이러한 결과를 초래한 가장 큰 원인은 물의 특성 임피던스가 매우 크기 때문에 음파는 수조 터널의 벽을 더 이상 강체로 보지 않게 되고, 따라서 벽면에서는 반사가 복잡하게 발생하는 것이다.

본 연구에서는 이러한 반사파를 Fig. 5와 같이 크기 및 입사각이 랜덤한 무한개의 평면파들의 합으로 표현한 모델링을 시도하였다. 이 모델에서는 실내공간에서의 음장을 소음원에서 나오는 직접음과 반사파에 해당하는 크기 및 입사각이 랜덤한 평면파들의 합으로 표현하고 있다. 이것을 주파수 영역에서 즉 임의의 한 주파수에 대한 음압의 공간상 분포는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$p_m(x) = A \frac{e^{jkr_m}}{r_m} + \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{jks_n \sin \theta_n} \quad (3)$$

여기서 A 는 소음원에서 나오는 음의 크기를 나타내며, r_{ms} 는 소음원과 m 번째 마이크로폰 사이의 거리를 의미한다. 또한 B_n 와 θ_n 는 각각 n 번째 평면파의 크기와 위상각을 의미하며 여기서는 랜덤한 변수이다. 식 (3)에서 우변의 첫 번째 항은 소음원에서 나오는 직접음을 나타내고, 두 번째 항은 크기 및 입사각이 랜덤한 평면파들의 합을 의미하며 여기서는 반사파에

해당된다. 식 (3)은 사실 소음원이 단극 음원일 경우를 가정하고 있다. 이러한 가정은 제안하는 방법의 현실적인 적용성을 낮게 하는 결함이 있다고 볼 수 있다. 그러나 측정위치가 소음원에서 수 파장 이상 떨어져 있을 경우 유효한 체적을 갖는 일반적인 소음원도 단극음원으로 볼 수 있는 점을 고려한다면 실제 적용성에 사실 큰 무리가 없다 볼 수 있다.

식 (3)을 행렬로 나타내면, 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{P} = \mathbf{S} + \sum_{i=1}^{\infty} B_i \Phi_i \quad (4)$$

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

$$\mathbf{S} = \left\{ A \frac{e^{jk_1 x}}{r_1}, A \frac{e^{jk_2 x}}{r_2}, \dots, A \frac{e^{jk_M x}}{r_M} \right\}^T$$

$$\Phi = \{e^{jk_1 x \sin \theta_1}, e^{jk_2 x \sin \theta_2}, \dots, e^{jk_M x \sin \theta_M}\}^T$$

빔형성 방법을 이용하여 소음원을 규명하기 위해서는 먼저 상관행렬 (correlation matrix)을 구해야 한다. \mathbf{R} 을 \mathbf{P} 의 상관행렬 (correlation matrix)이라고 한다면 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= E[\mathbf{P}\mathbf{P}^H] \\ &= \mathbf{S}\mathbf{S}^H + \mathbf{S} \sum_{i=1}^{\infty} (B_i \Phi_i)^H + \left(\sum_{i=1}^{\infty} B_i \Phi_i \right) \mathbf{S}^H \\ &\quad + \sum_{i=1}^{\infty} |B_i|^2 \Phi_i \Phi_i^H + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1, j \neq i}^{\infty} B_i B_j \Phi_i \Phi_j^H \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 B_i 와 $e^{jkx \sin \theta_i}$ 는 복소 변수 (complex variable) 이기 때문에 Fig. 6처럼 복소 영역 (complex domain)에서 표현할 수 있고, 무한 개를 모두 더하면 서로 상쇄되어 0으로 접근하게 된다. 마찬가지로 복소 변수 두 개를 곱한 $B_i B_j$, $B_i \Phi_j$ 도 복소 변수이므로 Fig. 5처럼 모두 더한다면 0으로 접근하게 될 것이다.

따라서 식 (5)은 다음식과 같이 간략히 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{R} \cong \mathbf{S}\mathbf{S}^H + \xi \mathbf{I} \quad (6)$$

여기서 ξ 는 반사파의 전체 파워를 나타내고, \mathbf{I} 는 단위행렬 (unitary matrix)을 나타낸다. 빔형성 파워는 상관행렬 (correlation matrix)에 스캔 벡터 (scan vector)를 곱하므로 다음식과 같이 나타낸다.

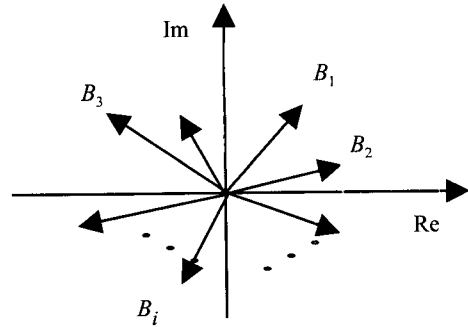


Fig. 6 Magnitudes of each plane wave at a complex domain

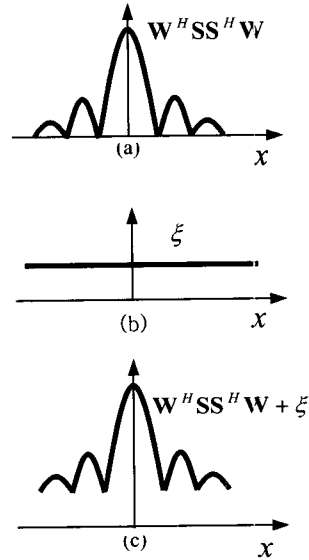


Fig. 7 Beamforming power distribution.

- (a) beamforming power by direct sound
- (b) beamforming power by reflect sound,
- (c) total beamforming power

$$\begin{aligned} \text{Power} &\cong \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W} \\ &= \mathbf{W}^H \mathbf{S} \mathbf{S}^H \mathbf{W} + \xi \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)의 우변의 첫번째 항은 실제 소음원에 의한 빔형성 파워를 나타내고 (Fig. 7(a)), 두 번째 항은 랜덤한 반사파에 의한 빔형성 파워 (Fig. 7(b))를 나타내고 있다. 따라서 전체 빔형성 파워는 Fig. 7(c)와 같이 반사파의 전체 파워에 해당하는 만큼 DC성분이 생길 뿐 소음원의 위치는 변하지 않음을 알 수 있다. 즉 반사파가 마치 공간상의 백색잡음 (white noise)처럼 거동함을 알 수 있다.

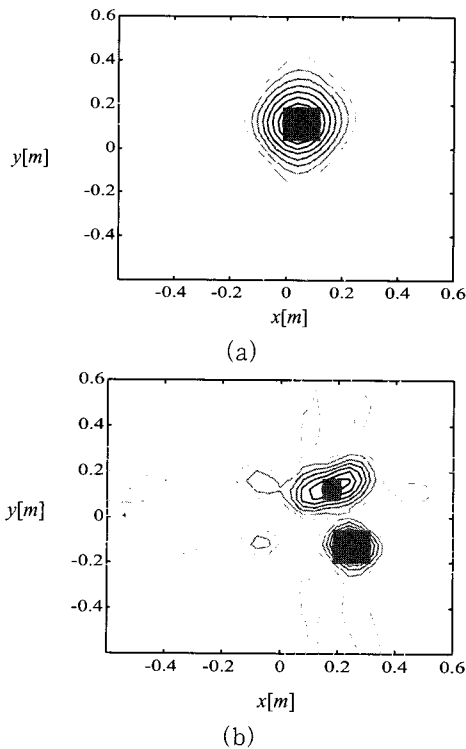


Fig. 8 Source prediction by using Eq. (7) (a) Single Source : frequency 9.3 kHz, location $(x, y) = (0.06 \text{ m}, 0.085 \text{ m})$, source, (b) Incoherent sources : frequency 19.9 kHz, source location $(x_1, y_1) = (0.25 \text{ m}, -0.08 \text{ m})$, $(x_2, y_2) = (0.166 \text{ m}, 0.152 \text{ m})$

식 (7)이 의미하는 바는 반사파를 더욱 랜덤하게 발생하도록 한다면 소음원을 규명하는 입장에서는 더욱 유리해 지게 된다는 것이다.

이러한 모델이 잘 맞는지 검증하기 위해, Fig. 4와 똑 같은 상황, 즉 수조터널 내에 물을 채워 넣고 실험을 수행하였다.

Fig. 8(a)는 단극 소음원이 수조터널 내에 존재할 때의 실험결과를 보여 주고, Fig. 8(b)는 두개의 독립 소음원(incoherent sources)이 존재할 때의 결과를 보여 주고 있다. 이 결과에서 실제 소음원의 위치와 빔형성 방법에 의한 추정된 소음원의 위치가 정확히 일치함을 관찰할 수 있었다. 즉 벽면에서 반사가 매우 불규칙하게 발생한다면, 이러한 반사파는 입사각 및 크기가 랜덤한 평면파의 합으로 볼 수 있고, 음원의 위치를 추정하는 데는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

5. 결론

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 물리적 상황이 다른, 즉 매질이 공기일 때와 물일 때로 나누어 대해 살펴 보았다. 매질이 공기일 때는 실내 내부에 형성된 반사파를 고유 모드들의 합으로 모델링하여 음원의 위치를 추정하였다. 이와는 달리 매질이 물일 때는 볼의 특성 임피던스가 매우 크기 때문에 유한한 임피던스를 가진 벽면이 존재할 때의 상황과 유사하게 된다. 이때 반사파를 입사각 및 크기가 랜덤한 평면파들의 합으로 가정하고, 빔형성 방법을 통해 소음원을 규명하였다. 반사파는 마치 공간상의 백색 잡음처럼 거동하여 빔형성 파워를 전체적으로 크게 할 뿐, 음원의 위치를 추정하는데는 영향을 미치지 않는다는 중요한 사실을 알 수 있었다. 이 사실로부터 실내 공간의 반사파가 랜덤하면 할수록 소음원을 규명하는 입장에서는 더욱 유리해짐을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 반사파가 존재하는 실내 공간에서도 잔향 음장을 잘 표현할 수 있는 스캔 벡터를 선정하면 음원의 위치를 잘 추정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

실험에 도움을 주신 삼성중공업의 강관형 박사, 이 무열씨께 감사 드립니다. 본 연구는 삼성중공업, 과학기술부의 국가지정연구실(NRL)사업에 의해 지원되었으며, 지원에 깊이 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Johnson, D. H. and Dudgeon, D. E., 1993, Array Signal Processing, PTR Prentice Hall.
- (2) Choi, J. W. and Kim, Y. H., 1995, "Estimation of Locations and Strengths of Broadband Planar and Spherical Noise Sources Using Coherent Signal Subspace," J. Acoust. Soc.

Am, Vol. 98(4), pp. 2082~2093.

(3) Choi, J. W., "Identification of Near Field Source," Ph. D. Dissertation, KAIST.

(4) Morse and Ingard, 1968, Theoretical Acoustics, McGraw-hill, pp. 500~501.

(5) Choi, Y. C. and Kim, Y. H., 2001, "Noise Source Identification in a Reverberant Field Using

Beamforming Method", Inter Noise 2001, the Hague, Netherlands, August 27-28, pp. 2199~2203

(6) 김시문, 김양한, 1996, "독립, 키독립 음원이 동시에 존재할 경우 선형 마이크로폰 어레이를 이용한 소음원 탐지 방법." 한국소음진동공학회지, 제 6 권, 제 6 호, pp. 835~842.