

〈論 文〉

# 독립, 비독립 음원이 동시에 존재할 경우 선형 마이크로폰 어레이를 이용한 소음원 탐지 방법

## Identification of Coherent/Incoherent Noise Sources Using A Microphone Line Array

김 시 문\* · 김 양 한\*\*

Sea-Moon Kim and Yang-Hann Kim

(1996년 7월 26일 접수 ; 1996년 10월 22일 심사완료)

**Key Words :** Source Identification(음원 탐지), Correlatoin Matrix(상관 행렬), Coherent Source(비독립 음원), Incoherent Source(독립 음원), Plane Wave(평면파), Spherical Wave(구면파), Beamforming Method(빔형성 기법), MUSIC Method(MUSIC 방법)

### ABSTRACT

To identify the locations and strengths of acoustic sources, one may use a microphone line array. Apparent advantage of the source identification method utilizing a line array is that it requires less measurement points than intensity method and holography. This method is based on the information of magnitude and phase difference between pressure signals at each microphone. Since those differences are dependent on the source model, we have to assume them such as plane, monopole, etc.. In this paper the conventional source identification methods such as beamforming method and MUSIC method are briefly reviewed by modeling a source as plane and spherical wave, then a modified method is introduced. This can be applied to sound field which may be either coherent or incoherent. Typical simulations and experiment are performed to confirm this identification method.

### 1. 서 론

산업의 발달과 더불어 보다 편리한 생활과 쾌적한 환경에 대한 욕구가 증가되었으며 소음에 대한 관심도 증가되었다. 소음을 발생시키는 원인으로는 구조물의 진동, 유체의 난류 유동 등이 있으며 이러한 소음을 효과적으로 줄이기 위해서는 소음원의 규명이 선행되어야 할 것이다.

소음원을 규명하기 위한 방법으로 인텐시티 탐촉자(intensity probe)로 인텐시티를 측정하여 소음원의 위치를 추정하는 방법<sup>(1)</sup>, 음압측정을 통해 음장을 재구성함으로써 음원을 찾아내는 홀로그래피 방법<sup>(2,3)</sup>, 선형 마이크로폰 어레이를 이용한 소음원 탐지 방

법<sup>(4)</sup> 등이 있다. 인텐시티 방법은 음원이 존재하는 공간을 둘러싸는 면 위에서 인텐시티를 측정하여 음원을 찾는 방법으로 측정면에서의 인텐시티 정보를 얻게된다. 홀로그래피방법은 홀로그램면이라는 가상면에서의 음압 측정으로부터 음장을 재구성하는 방법으로 인텐시티 뿐만 아니라 임의의 음장 정보, 이를테면 음압, 입자 속도 등을 구할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이들 두 방법은 임의의, 선정된, 한 면에서 측정을 요구하기 때문에 측정점이 많아 그만큼 많은 노력과 시간을 필요로 한다. 이에 반해 선형 어레이를 이용한 소음원 탐지 방법은 한 선 위에 서만의 음압 측정으로부터 소음원의 위치 및 크기를 구할 수 있어 앞의 두 가지 방법에 비해 시간과 노력이 적게 든다는 장점을 가지고 있다. 따라서 만약 공간 내의 음장 정보 보다는 음원의 위치 및 크기에 관심이 있다면 소음원 탐지방법을 이용하는 것이 보다 효과적이라고 말할 수 있다.

\*한국과학기술원 기계공학과 박사과정

\*\*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

소음원 탐지 방법은 크게 빔형성 기법 (beamforming method)<sup>(5)</sup> 등과 같이 마이크로폰에 입력되는 위상 차이를 보정하는 방법과 MUSIC<sup>(6)</sup>, GESE<sup>(4)</sup>, ESPRIT<sup>(4)</sup> 등과 같이 음압 신호의 상관 행렬 (correlation matrix)의 고유치 (eigenvalue) 및 고유벡터 (eigenvector)를 이용한 고유구조 해석 방법으로 나눌 수 있다.

음원의 형태를 평면파로 가정하여 입사각을 찾는 빔형성 기법<sup>(4, 5)</sup>은 많은 연구가 이루어져 왔으며 구면파로 가정하여 음원의 위치를 찾는 방법도 최재응 등에 의해 연구되어졌다<sup>(7, 8)</sup>. MUSIC 방법은 잡음의 분산값 정도에 해당하는 고유치에 대응하는 잡음 영역 (noise subspace)과 잡음의 분산값 이상의 고유치에 대응하는 신호 영역 (signal subspace)과의 직교성을 이용하여 음원의 위치를 찾는 방법으로 빔형성 기법에 비해 공간 분해능이 매우 우수한 방법으로 알려져 있다. MUSIC 방법도 평면파 및 구면파 등의 가정에 기초하여 많은 연구가 진행되어 왔으며<sup>(7-10)</sup>, 최근에 들어서는 완전한 상관 관계가 있는 음원의 경우에 MUSIC 방법을 이용해 음원을 탐지하는 연구가 진행중이다<sup>(11)</sup>. 그러나 여러개의 입력신호에 의해서 생성 가능한 독립/비독립 음장 내의 음원탐지 방법에 관한 연구는 미약했었다.

본 논문에서는 평면파 및 구면파 모델을 바탕으로 빔형성 기법 및 MUSIC 방법을 적용하는 기존의 독립 음원 탐지 연구내용을 간략히 정리함과 함께, 새로운 연구 결과로서 독립/비독립 음원이 공존하는 음장내에서 MUSIC 알고리즘을 이용한 음원 탐지 방법을 이론적으로 제시하고 있다. 또한 모의실험과 세계의 스피커 (speaker)를 이용한 실험을 통해서 그 적용 가능성을 검증하고 있다.

## 2. 음원의 모델링과 상관 행렬

선형 어레이를 이용한 음원 탐지 방법은 각 마이크로폰에 수신되는 음압 신호의 크기 및 위상차의 정보를 바탕으로 하기 때문에 이들을 결정짓는 음원의 형태를 가정하는 일이 매우 중요하다. 음원과 마이크로폰 사이의 거리가 마이크로폰 어레이의 구경 크기에 비해서 큰 경우 입사되는 음파는 평면파로 가정할 수 있으며 음원이 마이크로폰에 근접해 있는 경우 평면파 모델보다는 구면파 모델로 가정하는 것이 타당하다. 음원이 여러개 존재하는 경우 각각의 음원이 독립 혹은 비독립 조건에 따라 음압 신호로부터 구성된 상관 행렬 특성이 달라지며 이를 살펴

보면 다음과 같다.

### 2.1 평면파 모델

M개의 마이크로폰으로 구성되어 있는 어레이 (array)에 단일주파수  $f$ 를 가진 K개의 평면파가 입사되고 있는 경우, m번째 마이크로폰에 수신되는 신호  $p_m(f, t)$ 는 다음식과 같이 주어진다.

$$p_m(f, t) = \sum_{k=1}^K A_k e^{j(2\pi f x_m \cos \theta_k + \phi_k + 2\pi f t)} + n_m(t) \quad (1)$$

여기서  $A_k$ ,  $\phi_k$ ,  $\theta_k$ 는 각각 k번째 평면파의 크기, 초기 위상 및 입사각을 의미하며  $x_m$ 은 m번째 마이크로폰의 위치 좌표를 나타낸다.  $n_m(t)$ 은 잡음 신호를 의미하며 시공간에 대해서 Gaussian 분포를 가지고 분산이  $\sigma^2$ 라고 가정하자. 음압벡터  $P_k$ 를 k번째 음원에 의한 음압벡터라고 하면 마이크로폰에 수신되는 음압 벡터 P는

$$P = [p_1 \cdots p_M]^T = P_1 + P_2 + \cdots + P_K \quad (2)$$

와 같이 표현할 수 있다. 이때 상관 행렬 R은

$$R = E\{PP^H\} \quad (3)$$

로 정의된다. 식 (3)은 각 마이크로폰 신호 사이의 위상 정보를 포함하고 있으며 음원들 상호간의 상관 정도에 따라 그 특성이 정해진다. 먼저 모든 음원들이 독립인 경우에 서로 다른 음원 사이의 상관 관계가 없으므로 상관 행렬 R은

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_K \quad (4)$$

와 같이 각 음원에 의해 구성된 상관행렬의 합으로 표현이 가능하며 따라서 잡음 신호를 무시하는 경우 R의 랭크(rank)는 음원의 개수와 같은 K가 된다. 이에 반해 모든 음원이 비독립인 경우 상관행렬을 독립인 경우와 같이 각 음원에 의한 상관 행렬로 분리되지 않으며 이때 랭크는 1이 된다. 독립/비독립 음원이 공존하는 경우는 독립 음원의 개수와 같은 수의 랭크를 가지며 그 값은 1과 K사이에 존재한다. 서로 상관 관계가 있는 음원들에 의해 구성된 상관 행렬을 각각  $R_{(q)}$ 라 하면

$$R = R_{(1)} + R_{(2)} + \cdots + R_{(Q)} \quad (5)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서 Q는 독립 음원군의 개수를 의미하며 모든 음원이 독립인 경우는  $Q=K$ , 비독립인 경우는  $Q=1$ 로서 식 (5)의 특수한 경우라 생각할 수 있다. 상관행렬은 랭크수 만큼의 음압 정보를 포함하고 있으며 각 음압 정보는 비독립 음원의 조합으로 생각할 수 있다. 이때 상관 행렬은

$$R = \beta \Sigma \beta^H \quad (6)$$

$$\beta = [\beta_s, \beta_n] \quad (7)$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \lambda_1 + \sigma^2 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 + \sigma^2 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & & & & \vdots \\ 0 & 0 & & \lambda_q + \sigma^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & & 0 & \sigma^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & \sigma^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

와 같은 고유구조 해석으로부터 음압 정보를 포함하는 신호 영역 및 포함하지 않는 잡음 영역으로 분리할 수 있다. 여기서  $\beta$ 는 고유벡터 행렬(eigenvector matrix)을,  $\Sigma$ 는 고유치행렬(eigenvalue matrix)을 나타내며  $\lambda_q$ 은 잡음이 없는 경우의 특성치를 의미한다.  $\beta_s$  및  $\beta_n$ 은 각각 신호 영역 특성벡터, 잡음 영역 특성벡터를 의미하며  $\lambda_q + \sigma^2$ 와  $\sigma^2$ 는 각각 신호 영역 특성치, 잡음 영역 특성치를 나타낸다. 또한 신호 영역은 음압 벡터가 스팬(span)하는 영역과 동일하기 때문에 음압 벡터와 잡음 영역 벡터는 직교 특성을 가지고 있으며 이 성질을 이용하여 음원 탐지를 하는 대표적인 방법이 뒤에 설명할 MUSIC 방법이다.

### 2.2 구면파 모델

음원이 단극(monopole) 음원인 경우 파형은 구면파 형태를 가지며 이때 마이크로폰 어레이에 입력되는 신호  $p_m(f, t)$ 는

$$p_m(f, t) = \sum_{k=1}^K \frac{A_k}{r_{km}} e^{j(2\pi f r_{km}/c + \varphi_k^2 + 2\pi f t)} + n_m(t) \quad (9)$$

와 같다. 여기서  $r_{km}$ 은  $k$ 번째 음원과  $m$ 번째 마이크로폰 사이의 거리를 의미한다. 이때 음압 벡터와 상관 행렬의 정의 및 특성은 앞절의 평면파 모델의 경우[식 (2)~(8)]와 동일하며 가정한 음원 모델링의 차이에 의해서 음압벡터 및 상관행렬의 내포하고 있는 형태 및 의미만이 다를 뿐이다.

### 3. 빔형성 기법(Beamforming Method)<sup>(5, 7)</sup>

각 마이크로폰에 수신되는 신호에 음원의 모델에 따른 위상 보정을 하여 얻은 신호의 합으로부터 음원의 입사각 또는 위치를 찾는 방법이다. 평면파의 경우 음압 벡터에 곱해지는 가중 벡터는

$$W(\theta) = [w_1(\theta) \cdots w_M(\theta)]^T \quad (10)$$

$$w_m(\theta) = \frac{1}{\sqrt{M}} e^{j2\pi x_m \cos \theta / c} \quad (11)$$

와 같이 가정되는 입사각  $\theta$ 의 함수이며 이때 빔형성 파워는

$$\text{Power}(\theta) = W(\theta)^H R W(\theta) \quad (12)$$

로 정의된다. 만약에 실제 음원의 입사각  $\theta_k$ 와 가정한 음원의 입사각  $\theta$ 가 일치하는 경우 빔형성 파워는 상대적으로 큰 값을 가지므로  $\theta$ 를 변화시켜 가며 빔형성 파워를 계산하여 음원의 위치를 추정할 수 있다. 구면파 모델의 경우 음원 추적 방법은 평면파 모델링의 경우와 같으며 단지

$$w_m(x, y) = \frac{1}{\sqrt{M}} \frac{e^{-j2\pi f r_m / c}}{r_m} \quad (13)$$

와 같은 가중 벡터의 차이만 존재한다. 여기서  $r_m$ 은 가정되는 음원과  $m$ 번째 마이크로폰 사이의 거리를 의미하며 가중벡터는  $x, y$ 의 함수로서 스캔영역의 평면파 모델의 경우와는 달리 2차원이 된다. 빔형성 기법은 공간상의 분해능이 떨어지기 때문에 근접해 있는 두 음원을 구분할 수가 없으며 비독립 음원이 존재하는 경우에는 구면파모델로 음원의 위치를 구할 수 없는 단점이 있는데 이 경우 다음에 설명할 MUSIC방법을 적용하여 음원을 추적한다.

## 4. MUSIC 방법<sup>(6, 7)</sup>

### 4.1 음원의 위치 탐지

전술한 바와 같이 MUSIC 방법은 상관 행렬의 고유구조 해석 결과로부터 얻은 신호 영역과 잡음 영역의 직교 특성을 이용하는 방법이다.

평면파의 경우

$$\text{Power}(\theta) = \frac{1}{S(\theta)^H \beta_n \beta_n^H S(\theta)} \quad (14)$$

$$S(\theta) = [s_1(\theta) \cdots s_M(\theta)]^T \quad (15)$$

$$s_m(\theta) = e^{j2\pi \cos \theta x_m / c} \quad (16)$$

와 같이 잡음 영역 벡터와의 내적의 역수로 MUSIC 파워를 정의하여 음원의 위치를 추적한다. 즉  $q = q_k$ 인 경우 스캔벡터  $S(q)$ 가 신호 영역 안에 포함되어 잡음영역과는 직교하므로 큰 MUSIC 파워를 생성한다.  $N$ 개의 비독립 음원들이 존재한다고 가정하면 스캔 벡터는 서로 간섭을 일으키는 부분을 포함하는 형태로

$$s_m = \sum_{n=1}^N A_n e^{j(2\pi / \cos \theta x_n / c + \varphi_n^2)} \quad (17)$$

와 같이 주어진다<sup>(11)</sup>. 여기서  $\phi_n^n$ ,  $A_n$ 은 각각  $n$ 번째 음원의 초기 위상과 크기를 의미한다. 위의 식 (17)을 행렬식으로 표현하면

$$S = FA \quad (18)$$

$$F = \begin{bmatrix} e^{j2\pi f \cos \theta_{x1}/c} & \dots & e^{j2\pi f \cos \theta_{xN}/c} \\ \vdots & & \vdots \\ e^{j2\pi f \cos \theta_{xM}/c} & \dots & e^{j2\pi f \cos \theta_{xNM}/c} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$A = [A_1 e^{j\varphi_1^n}, \dots, A_N e^{j\varphi_N^n}]^T \quad (20)$$

와 같다. 이 스캔벡터는  $3N$ 개의 미지수  $\theta_n$ ,  $A_n$ ,  $\phi_n$ 을 포함하고 있으며 마이크로폰 어레이에 입력되는 음원과 가장 비슷한 형태를 갖게하는 음원의 복소크기벡터  $A$ 를

$$A = F^+ P = (F^H F)^{-1} F^H P \quad (21)$$

와 같이 계산한다면 스캔벡터는

$$S = F (F^H F)^{-1} F^H P \quad (22)$$

와 같은 형태로 표현되며 미지수는  $N$ 개가 된다. MUSIC 파워는  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ 의 함수로서

$$\text{Power}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N) = \frac{1}{S^H \beta_n \beta_n^H S} \quad (23)$$

와 같이 얻을 수 있으며 가장 큰 MUSIC 파워를 나타내는  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ 이 음원이 존재하는 방향이 된다. 구면파 모델의 경우 스캔벡터는

$$s_m = \frac{e^{-j2\pi f r_{km}/c}}{r_{km}} \quad (24)$$

$$F = \begin{bmatrix} \frac{1}{r_{11}} e^{-j2\pi f r_{11}/c} & \dots & \frac{1}{r_{N1}} e^{-j2\pi f r_{N1}/c} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{1}{r_{1M}} e^{-j2\pi f r_{1M}/c} & \dots & \frac{1}{r_{NM}} e^{-j2\pi f r_{NM}/c} \end{bmatrix} \quad (25)$$

의 식을 이용하여 구할 수 있으며 MUSIC 파워는  $N$ 개의 음원의 위치의 함수로

$$\text{Power}\{(x_{s1}, y_{s1}), \dots, (x_{sN}, y_{sN})\} = \frac{1}{S^H \beta_n \beta_n^H S} \quad (26)$$

와 같이 구할 수 있다. 음원의 추정 위치  $(x_{si}, y_{si})$ 를 변화시켜 가면서 MUSIC 파워를 계산하여 가장 큰 값을 얻게되는 점이 음원의 위치가 된다.

#### 4.2 음원의 크기 예측

음원의 크기는 상관 행렬의 고유구조 해석으로부터 얻은 특성 벡터와 특성치로 유도된다. 식 (5)와 같이 상관 행렬  $R$ 은 서로 상관관계를 가진 음원들

간의 상관행렬  $R_{(q)}$ 의 합으로 표현된다. 여기서  $R$ 은  $Q$ 개의 신호 영역 벡터  $\beta_q$ 와 이에 대응하는 고유치  $\alpha_q$ 를 가지며  $R_{(q)}$ 는 한개의 신호영역 벡터  $\beta_{1(q)}$ 와 고유치  $\alpha_{1(q)}$ 를 갖는다. 이때  $R$  및  $R_{(q)}$ 는

$$R = \alpha_1 \beta_1 \beta_1^H + \dots + \alpha_Q \beta_Q \beta_Q^H \quad (27)$$

$$R_{(q)} = \alpha_{1(q)} \beta_{1(q)} \beta_{1(q)}^H \quad (28)$$

와 같이 표현되며 음압 벡터  $P$  및  $P_{(q)}$ 는

$$P = \sum_{k=1}^K P_k = \sum_{k=1}^Q P_{(q)} = TA \quad (29)$$

$$P_{(q)} = \sum_{k=n_{1(q)}}^{n'_{1(q)}} P_k = T_{(q)} A_{(q)} \quad (30)$$

와 같이 얻을 수 있다. 또한 상관 행렬의 고유 벡터인  $\beta_{1(q)}$ 의 성분에 해당되는  $\hat{A}_{(q)}$ 를

$$\beta_{1(q)} = T \hat{A}_{(q)} \quad (31)$$

와 같이 구할 수 있다면

$$R = E[PP^H] = E[TAA^H T^H] = TE[AA^H]T^H \quad (32)$$

$$R = \sum_{q=1}^Q R_{(q)} = \sum_{q=1}^Q \alpha_{1(q)} \beta_{1(q)} \beta_{1(q)}^H = T \left( \sum_{q=1}^Q \alpha_{1(q)} \hat{A}_{(q)} \hat{A}_{(q)}^H \right) T^H \quad (33)$$

의 관계식으로 부터

$$E[AA^H] = \sum_{q=1}^Q \alpha_{1(q)} \hat{A}_{(q)} \hat{A}_{(q)}^H \quad (34)$$

임을 알 수 있다. 각 음원의 크기는 식 (34)의 대각 성분의 크기로부터 구할 수 있으며  $k_1$ 행,  $k_2$ 열의 요소는  $k_1$ 번째 음원과  $k_2$ 번째 음원의 상관 계수를 의미하며 독립인 경우는 0, 비독립인 경우는 값이 존재하며 이때 위상각이 두 음원 사이의 위상차이가 된다.

### 5. 모의 실험

빔형성기 기법 및 MUSIC 방법을 이용한 음원 탐지는 최재웅 등에 의해 이론 및 실험적으로 많은 연구가 이루어져 왔다. 본 모의실험에서는 비독립 음원들이 존재하는 경우와 독립 / 비독립 음원이 공존하는 경우에 대해 MUSIC 방법을 이용하여 소음원의 위치 및 세기를 구하는 음원 탐지 알고리즘을 적용하여 보았다.

#### 5.1 비독립 음원의 위치 탐지

상관 함수가 1인 임의의 음장은 상관 관계가 있는 다수의 단극(momopole)음원들의 조합으로 표현이

가능하다는 사실을 바탕으로 여러개의 비독립 단극 음원이 존재하는 경우 음원의 위치를 탐색하는 기초적인 모의실험을 행하였다.

(1) 모의 실험 조건

음원으로는 500Hz의 단일 주파수를 갖는 단극을 사용하였으며 음원의 갯수를 1~3개로 변화시켜 가면서 모의 실험을 행하였다. 음압을 측정하는 마이크로폰은 16개를 사용하였으며 마이크로폰 사이의 간격은 10cm로 하였다. Table 1은 각 경우의 음원의  $x, y$  좌표 및 음원의 복소크기와 마이크로폰의

$x, y$  좌표를 나타낸다.

(2) 모의 실험 결과

음원의 형태는 단극으로, 음원의 갯수는 각 경우에 1~3개로 가정하여 MUSIC 파워를 계산하였다. 계산은  $x, y$  평면상에서  $(0.0 \sim 1.5m) \times (0.0 \sim 1.5m)$ 의 범위에서 0.1m 간격으로 하였다. 실제 음원이 1개인 경우에 가정한 음원의 갯수에 관계없이 음원의 위치 및 크기를 정확히 찾아 주며 2개의 이상의 음원으로 가정한 경우에는 결과로서 얻은 음원의 크기가 실제의 음원의 위치에 해당되는 것을 제외하고는 상당히 작은 값을 가짐을 알 수 있다(Table 2 참조). 실제 음원이 2개인 경우에 음원을 1개로 가정한 경우에는 정확한 음원의 위치 및 크기를 예측하지 못하나 2개나 3개로 가정하 경우에는 음원의 위치를 정확히 찾아주고 크기도 정확히 예측하고 있으며 MUSIC 파워값도 1개로 가정한 경우에 비해서 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 3개로 가정한 경우에 실제의 음원의 위치에 해당하지 않는 음원의 크기는 무시할 정도로 작은 값을 가진다. 3개의 음원이 존재하는 경우에는 3개의 음원을 가정한 경우만이 정확한 예측을 할 수 있으며 그 경우만이 큰 MUSIC 파워를 나타낸다.

앞의 결과로부터 비독립 음원들이 존재하는 경우

**Table 1** Simulation data for identification of coherent sources(\*: locations of sources[unit : m], \*\*: complex magnitudes of sources(real value, imaginary value), \*\*\*: locations of microphones[unit : m])

음원의 좌표와 복소크기	음원이 1개인 경우	(0.5, 0.6)*, (1.0, 0.0)**
	음원이 2개인 경우	(0.4, 0.3)*, (1.0, 0.0)** (0.8, 0.9)*, (3.0, 4.0)**
	음원이 3개인 경우	(0.2, 0.3)*, (1.0, 0.0)** (0.5, 0.8)*, (3.0, 4.0)** (0.9, 0.4)*, (0.0, -2.0)**
마이크로폰의 좌표		(0.0,0.0), (0.1,0.0), ..., (15.0,0.0)***

**Table 2** Simulation results for identification of coherent sources(\*: estimated locations of sources[unit : m], \*\*: estimated complex magnitude of sources(real value, imaginary value), \*\*\* : MUSIC power)

가정한 음원의 갯수 \ 실제 음원의 갯수	1	2	3
1	(0.5, 0.6)* (1.0, 4.9e-9)** 1.86e15***	(0.3, 1.3)* (7.5e-2, 1.2e-2)** 21.8***	(1.4, 0.2)* (1.7e-2, -2.7e-2)** 9.35***
2	(0.5, 0.6)* (1.0, 4.7e-9)** (1.5, 1.3)* (-2.9e-9, -3.2e-9)** 2.25e15***	(0.4, 0.3)* (1.0, 1.2e-9)** (0.8, 0.9)* (3.0, 4.0)** 2.67e14***	(0.3, 0.4)* (-1.7e-2, -6.1e-2)** (1.4, 0.2)* (1.3e-2, -3.1e-2)** 5.89e-1***
3	(0.5, 0.6)* (1.0, 5.3e-9)** (0.7, 0.4) (-1.0e-9, -1.6e-10)** (1.5, 1.4)* (3.4e-10, -5.7e-9)** 2.25e15***	(0.4, 0.3)* (1.0, 1.0e-9)** (0.8, 0.9)* (3.0, 4.0)** (0.1, 0.3)* (-1.6e-9, -2.0e-9)** 2.67e14***	(0.2, 0.3)* (1.0, -1.1e-8)** (0.5, 0.8)* (3.0, 4.0)** (0.9, 0.4)* (-6.8e-9, -2.0)** 1.36e-14***

실제의 음원의 위치보다 많은 수로 음원의 갯수를 가정한 경우에 정확한 음원의 위치를 및 크기를 예측함을 알 수 있으며 MUSIC 파워 값도 크다. 특히 더 많은 갯수의 소음원을 가정하는 경우에는 그 크기가 실제 소음원에 비해서 상당히 작은 소음원이 존재하는 것으로 여겨진다.

5.2 독립 / 비독립 음원의 위치 탐지

독립 음원과 비독립 음원이 공존하는 경우에 음원 탐지 이론을 적용하여 모의실험을 행하였다.

(1) 모의 실험 조건

3개의 음원을 사용하였으며 좌표는 (0.5m, 0.6 m), (0.4m, 0.3m), (0.8m, 0.9m)이다. 그중 (0.4m, 0.3)과 (0.8m, 0.9m)에 위치한 2개의 음원이 상관 관계가 있는 경우로 하였으며 각각의 복소 크기를 (2, 0), (3, 4)로 하였고, 나머지 하나의 음원의 크기는 (1, 0)으로 하였다. 그 외의 변수 값은 완전한 상관 관계가 있는 경우의 모의 실험과 동일하게 하였다.

(2) 모의 실험 결과

Fig. 1은 임의의 음장이 존재하는 경우의 MUSIC 방법을 사용하여 MUSIC 파워를 나타낸 것이다. 한 개의 음원을 가정하는 경우에 상관 관계가 없는 1개의 음원의 위치를 정확히 얻을 수 있으나 다른 2개의 음원은 두 음원 사이의 간섭에 의해서 정확한 위치를 찾는 것이 불가능함을 알 수 있다. 2개의 음원이 존재한다고 가정하는 경우는 2개의 비독립을 음원의 위치만을 찾아주는 것을 확인할 수 있다. 3개의 음원을 가정했을 때는 가정한 음원이 전체 음원의 갯수와 같은 경우로서 3개의 모두 음원의 위치를 얻음을 보여주고 있다. 이 경우 (0.5m, 0.6m)에 위치해 있는 음원의 크기는 1.0이며 (0.4, 0.3) 및 (0.8, 0.9)에 위치한 음원의 크기는 각각 2.0, 5.0이며 이들의 위상차이는 53.13도로서 정확한 값을 예측하고 있음을 보여준다. 또한 이 경우의 MUSIC 파워는 1개 혹은 2개로 가정한 경우에 비해서 큰 값을 나타내고 있다.

앞의 결과로부터 가정한 음원의 갯수를 늘려가며 MUSIC 알고리즘을 적용하는 경우에 실제 음원의 갯수와 같거나 많은 경우에 큰 MUSIC 파워값을 나타내며 이 경우 소음원의 위치 및 크기를 정확히 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

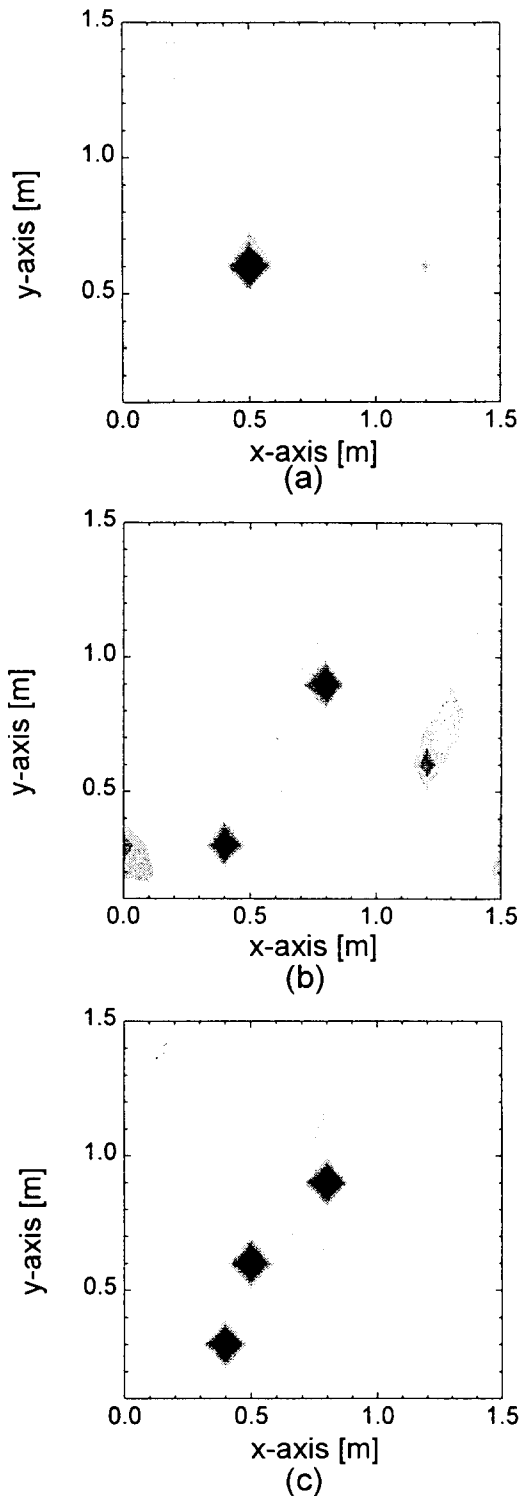


Fig. 1 Simulation results for identification of coherent/incoherent sources(Three sources exist : (0.5m, 0.6m), (0.4m, 0.3m), and (0.8m, 0.9m), Two are coherent : (0.4 m, 0.3m) and (0.8m, 0.9m)) (a) one source assumption (b) two sources assumption (c) three sources assumption

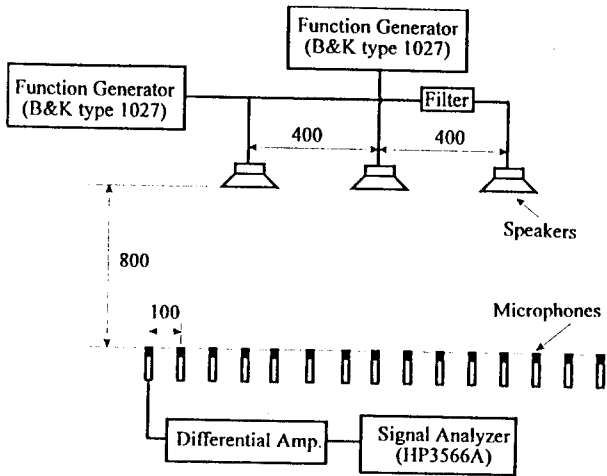


Fig. 2 Experimental setup for identification of coherent/incoherent sources (unit : mm)

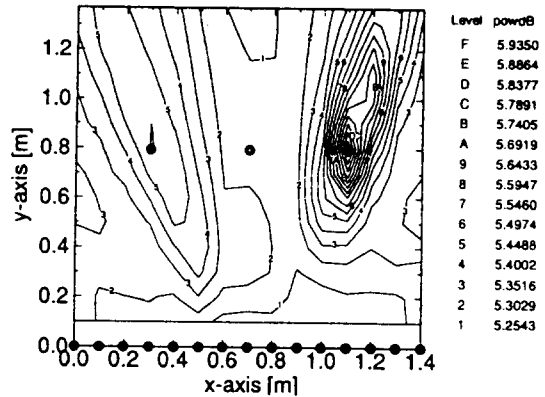


Fig. 3 Experimental result for identification of coherent/incoherent sources: distribution of MUSIC power

## 6. 실험 및 결과

독립 / 비독립 음원이 공존하는 경우의 실제 적용성을 확인해 보기 위하여 간단한 실험을 행하였다.

### 6.1 실험 장치 및 방법

실험은 반사파가 존재하지 않도록 하기 위하여 무향실 안에서 행하였다. Fig. 2는 실험장치를 나타내고 있다. 음원으로는 지름이 약 20cm인 동일한 세개의 스피커를 사용하였으며 스피커의 위치는 일직선상에 존재하게 하고 스피커 사이의 거리는 각각 40.0cm로 두어 고정시켰다. 각각의 스피커에 입력되는 가진 신호들 중 두개의 신호는 서로 상관관계를 가지고 있으며 다른 하나는 완전히 독립된 신호가 되게 하기 위하여 두개의 신호생성기(Sine Random Generator, B & K Type 1027)를 이용하였으며 500Hz의 중심 주파수를 가지고 10Hz의 주파수대역을 갖는 성분을 내도록 하였다. 중심에 위치한 하나의 스피커에는 하나의 신호생성기로부터 신호를 받았고 나머지 두개의 스피커는 독립된 다른 신호생성기에 의해 가진되게 하였으며 그중 하나는 필터(filter)를 통과시켜 크기와 위상을 달리 주었다. 음압을 측정하는 마이크로폰(Acousticel, PCB model 130A)은 15개로하고 마이크로폰 사이의 간격은 10cm가 되게하여 공간상의 엘리어싱(aliasing)은 일어나지 않도록 하였다. 마이크로폰과 스피커 사이는 80.0cm를 떨어뜨리고 스피커와 평행하게 고정시켜

음압을 측정하였다. 음압신호는 증폭기(Differential Amplifier, PCB model 514A)를 통하여 다채널 신호분석기(16ch Signal Analyzer, HP 3566A)로 받았다.

### 6.2 실험 결과

앞 장에서 서술되어 있는 독립 / 비독립 소음원이 분포되어 있는 경우의 MUSIC 방법을 적용하여 보았다. Fig. 3은 500Hz의 성분에 대해 음원의 갯수를 3개로 가정하여 MUSIC 파워를 계산한 그림이다. 음원의 위치는 가로 세로가 각각 140cm되는 공간안에 존재한다고 하였으며 10cm 간격으로 계산하였다. 예측된 음원의 위치는 실제 음원의 위치와 유사함을 알 수 있다.

실제 음원의 위치를 정확하게 가르키지 못하는 이유는 스피커의 모델이 단극 음원이 아닌 다른 형태를 가지고 있기 때문으로 생각된다.

## 7. 결 론

음원의 위치 및 세기를 예측하기 위한 방법으로 마이크로폰 선형 어레이를 이용한 빔형성기 기법과 MUSIC 방법 등이 있으며 이들 방법을 적용하기 위해서는 음원의 위치 및 특성에 따른 평면파 혹은 구면파 등의 음원 모델링이 선행되어야 한다.

MUSIC 방법은 빔형성기 기법에 비해 공간상의 분해능이 뛰어나며 음장을 형성하는 음원들의 독립 / 비독립 특성에 따라서 맞는 알고리즘을 적용하여야 한다.

모의실험 및 스피커 실험을 통해서 실제 음원의 갯수와 같거나 보다 많은 수의 음원의 갯수를 가정하면 소음원의 위치 및 크기를 정확히 예측할 수 있음을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- (1) Fahy, F. J., 1989, Sound Intensity, Elsevier Applied Science, New York.
- (2) Maynard, D., Williams, E. G. and Lee, Y., 1985, "Nearfield Acoustic Holography: I. Theory of Generalized Holography and Development of NAH," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 78, pp. 1395 ~ 1413.
- (3) Veronesi, A. and Maynard, J. D., 1987, "Near-field Acoustic Holography: II. Holographic Reconstruction Algorithms and Computer Implementation," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 81, pp. 1307 ~ 1322.
- (4) Pillai, S., 1989, Array Signal Processing, Springer-Verlag, New York, Chapter 2.
- (5) Shan, T. and Kailath, T., 1985, "Adaptive Beamforming for Coherent Signals and Interference," IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. ASSP-33, No. 3, pp. 527 ~ 530.
- (6) Schmidt, R. O., 1986, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-34, No. 3, pp. 276 ~ 280.
- (7) Choi, J.-W., 1994, Identification of Near Field Noise Sources, Ph. D. Dissertation, KAIST, Korea.
- (8) Choi, J.-W. and Kim, Y.-H., 1995, "The Spherical Beamforming And MUSIC Method For The Estimation Of Location And Strength Of Spherical Sound Source," Mechanical System and Signal Processing, Vol. 9, No. 5, pp. 569 ~ 588.
- (9) Choi, J.-W. and Kim, Y.-H., 1995, "Estimation of Locations and Strengths of Broad Band Planar and Spherical Noise Sources using Coherent Signal-subspace," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 98, No. 4, pp. 2082 ~ 2093.
- (10) Choi, J.-W. and Kim, Y.-H., 1994, "Theory On The Identification Of General Noise Sources Based On Correlation Matrix Of Microphone Array," Submitted to Journal of Sound and Vibration.
- (11) Choi, J.-W., Kim, Y.-H. and White, P. R., 1995, "Identification and Visualisation of Perfectly Coherent Sources by Using Line Array," Submitted to Journal of Sound and Vibration.