

독립/비독립 음원의 위치 탐지 방법

김서문, 김양한**

(Localization of coherent/incoherent sources - simulation and experiment)

(Seamoon Kim, Yang-Hann Kim)

1. 서론

소음원을 규명하기 위한 방법으로 인텐시티 탐측자(intensity probe)로 인텐시티를 측정하여 소음원의 위치를 추정하는 방법 [1], 음압측정을 통해 음장을 재구성함으로써 음원을 찾아내는 홀로그래피 방법[2,3], 선형 마이크로폰 어레이를 이용한 소음원 탐지 방법 등이 있다. 인텐시티 방법은 음원이 존재하는 공간을 둘러싸는 면 위에서 인텐시티를 측정하여 음원을 찾는 방법으로 측정면에서의 인텐시티 정보를 얻게된다. 홀로그래피 방법은 홀로그램면이라는 가상면에서의 음압 측정으로부터 음장을 재구성하는 방법으로 인텐시티 뿐만 아니라 임의의 음장 정보, 이를 테면 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 위에서만 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 위치에 관심이 있다면 소음원 탐지 방법을 이용하는 것이 효과적이라고 말할 수 있다.

소음원 탐지 방법은 크게 beamforming 방법[4] 등과 같이 마이크로폰에 입력되는 위상 차이를 보정하는 방법과 MUSIC[5], GESE[6], ESPRIT[6] 등과 같이 음압 신호의 상관 행렬(correlation matrix)의 특성치 및 특성 벡터를 이용한 고유구조 해석 방법으로 나눌 수 있다.

음원의 형태를 평면파로 가정하여 입사각을 찾는 beamforming 방법[4,6]은 많은 연구가 이루어져 왔으며 구면파로 가정하여 음원의 위치를 찾는 방법도 최재용 등에 의해 제시되어졌다[7,8]. MUSIC 방법은 잡음의 분산값 정도에 해당하는 고유치에 대응하는 잡음 영역(noise subspace)과 잡음의 분산값 이상의 고유치에 대응하는 신호 영역(signal subspace)과의 직교

성을 이용하여 음원의 위치를 찾는 방법으로 beamforming 방법에 비해 공간 분해능이 매우 우수한 방법으로 알려져 있다. MUSIC 방법도 평면파 및 구면파 등의 가정에 기초하여 많은 연구가 진행되어 왔다[7-10]. 최근에 들어서는 완전한 상관 관계가 있는 음원의 경우에 MUSIC 방법을 이용해 음원을 탐지하는 연구가 진행중이다[11].

본 연구에서는 완전한 비독립 음원들만 존재하는 경우 뿐만 아니라 일부분만이 상관 관계가 있는 음장에 있어서 MUSIC 알고리즘을 이용한 음원 탐지 방법을 이론적으로 제시함을 물론 모의실험과 세계의 스피커(speaker)를 이용한 실험을 통해서 그 타당성을 검증하고자 한다.

2. 완전한 상관 관계가 있는 음장의 음원 탐지 이론[11]

독립 음원들이 존재하는 음장에서의 음원 탐지 이론은 beamforming 방법, MUSIC 방법 등에 의해서 많은 연구가 이루어져 왔으며 비독립 음원이 존재하는 경우에도 평면파 모델을 기초로하는 경우에 있어서 음원의 위치를 찾을 수 있다[6]. 본 장에서는 비독립 음원들만이 존재하고 있는 경우에 평면파 및 구면파 모델을 가정한 새로운 MUSIC 방법을 살펴보고자 한다.

2.1. 평면파 모델

동일한 단일주파수 f 를 가지며 서로 상관 관계가 있는 K 개의 비독립 음원이 존재하고 있을 때 m 번째 마이크로폰에 입력되는 신호 $p_m(f, t)$ 는 다음식과 같이 주어진다.

$$p_m(f, t) = \sum_{k=1}^K A_k e^{j(\omega x_m \cos \theta_k / c + \phi_k^m - \omega t)} + n_m(t) \quad (1)$$

여기서 A_k , ϕ_k^m , θ_k 는 각각 k 번째 음원의 크기, 초기 변위 및 입사각을 의미하며 x_m 은 m 번째 마이크로폰의 위치를 나타낸다. $n_m(t)$ 는 잡음 신호를 의미하며 시공간에 대해서 가우시안(Gaussian) 분포를 가지며 분산이 σ^2 라고 가정하자. 이때 상관 행렬(correlation matrix) R 은

$$R = E\{PP^H\} \quad (2)$$

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_M \end{bmatrix} \quad (3)$$

와 같이 정의되며 고유구조해석으로부터

$$\mathbf{R} = \beta \Sigma \beta^H \quad (4)$$

$$\beta = [\beta_s, \beta_n] \quad (5)$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \lambda_1 + \sigma^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

와 같은 식이 얻어진다. 여기서 β 는 고유벡터 행렬 (eigenvector matrix)을, Σ 는 고유치 행렬 (eigenvalue matrix)을 나타내며 λ_1 은 잡음이 없는 경우의 특성치를 의미한다. β_s 및 β_n 은 각각 신호 영역 특성벡터, 잡음 영역 특성벡터를 의미하며 $\lambda_1 + \sigma^2$ 와 σ^2 는 각각 신호 영역 특성치, 잡음 영역 특성치를 나타낸다.

스캔벡터(scan vector)는 N개의 비독립 음원들이 존재한다고 가정하면 서로 간섭을 일으키는 부분을 포함하는 형태로 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{S}_{pm} = \frac{1}{s_{p1}} [s_{p1}, \dots, s_{pM}]^T \quad (7)$$

$$s_{p1} = \sum_{n=1}^N A_n e^{j(\omega \cos \theta_n x_1 / c + \phi_n^n)} \quad (8)$$

여기서 하첨자 pm은 평면파 음원 모델(plane wave model)을 나타내며 ϕ_n^n , A_n 은 각각 n번째 음원의 초기 위상과 크기를 의미한다. 위의 두 식을 행렬식으로 표현하면

$$\mathbf{S}_{pm} = \frac{1}{s_{p1}} \mathbf{F} \mathbf{A} \quad (9)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} e^{j2\pi f \cos \theta_{s1} x_1 / c} & \dots & e^{j2\pi f \cos \theta_{sN} x_1 / c} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j2\pi f \cos \theta_{s1} x_M / c} & \dots & e^{j2\pi f \cos \theta_{sN} x_M / c} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{A} = [A_1 e^{j\phi_1^n}, \dots, A_N e^{j\phi_N^n}]^T \quad (11)$$

와 같다. 이 스캔벡터는 3N개의 미지수를 포함하고 있으며 마이크로폰 어레이에 입력되는 음원과 가장 비슷한 형태를 갖게하는 음원의 복소크기벡터 \mathbf{A} 를

$$\mathbf{A} = (\mathbf{F}^H \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^H \mathbf{P}_{s_{p1}} / p_1 \quad (12)$$

와 같이 계산한다면 스캔벡터는

$$\mathbf{S}_{pm} = \frac{1}{p_1} \mathbf{F} (\mathbf{F}^H \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^H \mathbf{P} \quad (13)$$

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

$$\text{Power}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N) = \frac{1}{\mathbf{S}_{pm}^H \beta_n \beta_n^H \mathbf{S}_{pm}} \quad (14)$$

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

2.2. 구면파 모델

음원이 단극(monopole) 음원인 경우 파형은 구면파 형태를 가지며 이때 마이크로폰 어레이에 입력되는 신호는

$$p_m(f, t) = \sum_{k=1}^K \frac{A_k}{r_{km}} e^{j(\omega r_{km} / c + \omega t + \phi_k^n)} + n_m(t) \quad (15)$$

와 같다. 여기서 r_{km} 은 k번째 음원과 m번째 마이크로폰 사이의 거리를 의미한다. 상관 행렬은 식 (2)와 같이 표현되며 고유구조해석에 의해 식 (4),(5),(6)을 얻는다. 구면파의 경우 스캔벡터는

$$\mathbf{S}_{sm} = \frac{1}{p_1} \mathbf{F} (\mathbf{F}^H \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^H \mathbf{P} = \frac{1}{s_{s1}} \mathbf{F} \mathbf{A} \quad (16)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r_{11}} e^{j2\pi f r_{11} / c} & \dots & \frac{1}{r_{N1}} e^{j2\pi f r_{N1} / c} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{r_{1M}} e^{j2\pi f r_{1M} / c} & \dots & \frac{1}{r_{NM}} e^{j2\pi f r_{NM} / c} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{A} = [A_1 e^{j\phi_1^n}, \dots, A_N e^{j\phi_N^n}]^T \quad (18)$$

와 같으며 MUSIC 파워는 N개 음원의 위치의 함수로

$$\text{Power}(\{(x_{s1}, y_{s1}), \dots, (x_{sN}, y_{sN})\}) = \frac{1}{\mathbf{S}_{sm}^H \beta_n \beta_n^H \mathbf{S}_{sm}} \quad (19)$$

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.

3. 일반 음장의 음원 탐지 이론

본 장에서는 완전한 상관 관계가 있는 음장의 음원 탐지론을 변형시킨 방법으로서 상관 관계가 있는 비독립 음원과 상관 관계가 없는 독립 음원이 같이 공존하는 경우에 MUSIC 방법을 이용하여 음원의 위치를 추적하는 방법을 제시하고 있다.

3.1. 평면파 모델

음압 신호 및 상관 행렬은 식 (1)과 식 (2)와 같이 주어지며 상관 행렬을 가지고 고유 구조 해석을 할 때 모든 음원이 상관 관계가 있는 경우 상관 행렬의 특성치 중 잡음의 분산값인 σ^2 보다

큰 값이 식 (6)에서 보는 바와 같이 1개 존재한다. 그러나 상관 관계가 없는 음원이 동시에 존재하는 경우는 그 갯수만큼 σ^2 보다 큰 특성치 값이 존재한다. 즉 특성치 행렬은

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \lambda_1 + \sigma^2 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 + \sigma^2 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & & \lambda_q + \sigma^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & & 0 & \sigma^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & \sigma^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

와 같으며 여기서 q 는 비상관 음원의 갯수를 나타낸다. 이 경우 q 개의 신호영역 벡터와 $M-q$ 개의 잡음영역 벡터를 얻는다. 스캔 벡터 및 MUSIC 파워는 식 (13)과 식 (14)로 주어지며 상관 관계가 있는 음원들만이 존재하는 경우와 비교해서 잡음영역 벡터의 갯수만 차이가 있을 뿐이다.

3.2. 구면파 모델

음압 신호 및 상관 행렬은 식 (15)와 식 (2)로 주어지며 이 경우 역시 평면파 모델과 마찬가지로 특성치 행렬은 식 (20)과 같은 형태로 주어진다. 스캔 벡터 및 MUSIC 파워는 식 (16)와 식 (19)로 비독립 음원들만이 존재하는 경우와 비교해서 잡음영역 벡터의 갯수만 차이가 있다.

4. 모의 실험

4.1. 비독립 음원의 위치 탐지

상관 함수가 1인 임의의 음장은 상관 관계가 있는 다수의 단극(monopole) 음원들의 조합으로 표현이 가능하다는 사실을 바탕으로 여러개의 비독립 단극 음원이 존재하는 경우 음원의 위치를 탐색하는 기초적인 모의 실험을 행하였다.

4.1.1. 모의 실험 조건

음원으로는 500Hz의 단일 주파수를 갖는 단극을 사용하였다. 음원의 갯수를 1-3개로 변화시켜 가면서 모의 실험을 행하였으며 각 음원의 세기와 위상은 같게 하였다. 음압을 측정하는 마이크로폰은 13개를 사용하였으며 마이크로폰 사이의 간격은 10cm로 하였다. 표 1은 각 경우의 음원의 x, y 좌표 및 음원의 크기와 마이크로폰의 x, y 좌표를 나타낸다.

4.1.2. 모의 실험 결과

음원의 형태는 단극으로, 음원의 갯수는 각 경우에 1-3개로 가정하여 MUSIC 파워를 계산하였다. 계산 범위는 x, y 방향으로 각각 (0m, 1.2m)로 하였다. 그림 1은 음원이 1개인 경우에 총 MUSIC 파워를 계산한 그림이다. 가정된 음원의 갯수에 관계없

이 음원의 위치를 정확히 찾아 주며 2개 이상의 음원으로 가정된 경우에는 결과로서 얻은 음원의 크기가 실제의 음원의 위치에 해당되는 것을 제외하고는 상당히 작은 값을 가짐을 알 수 있다(표 2 참조). 그림 2는 음원이 2개인 경우인데 1개로 가정된 경우에는 정확한 음원의 위치를 찾아주지 못하나 2개나 3개로 가정된 경우에는 음원의 위치를 정확히 찾아주고 있으며 3개로 가정된 경우에 실제의 음원의 위치에 해당하지 않는 음원의 크기는 무시할 정도로 작은 값을 가진다. 그림 3은 3개의 음원이 존재하는 경우로서 3개의 음원을 가정된 경우만이 정확한 위치를 찾을 수 있다.

앞의 결과로부터 비독립 음원들이 존재하는 경우 실제의 음원의 위치보다 많은 수로 음원의 갯수를 가정된 경우에 정확한 음원의 위치를 찾을 수 있음을 알 수 있다.

4.2. 독립/비독립 음원의 위치 탐지

표 1. 음원 및 마이크로폰의 위치 좌표 (단위 m)

음원의 좌표	음원이 1개인 경우	(0.5,0.6)
	음원이 2개인 경우	(0.4,0.3),(0.8,0.9)
	음원이 3개인 경우	(0.2,0.3),(0.5,0.8), (0.9,0.4)
마이크로폰의 좌표		(0.0,0.0),(0.1,0.0), ..., (1.2,0.0)

표 2. 예측한 음원의 위치 좌표 (단위 m), 크기 및 MUSIC 파워

실제 음원의 가정된 음원의 갯수	1	2	3
1	(0.5,0.6) 1.00 <1.75e15>	(1.1,0.3) 2.64e-2 <24.2>	(0.8,0.8) 8.13e-2 <9.11>
2	(0.5,0.6) 1.00 (1.2,0.9) 5.44e-9 <1.88e15>	(0.4,0.3) 1.00 (0.8,0.9) 1.00 <4.34e14>	(0.8,0.8) 0.974 (0.9,1.2) 1.31 <1.21>
3	(0.5,0.6) 1.00 (0.4,1.0) 2.79e-8 (0.1,0.1) 3.17e-9 <2.81e15>	(0.4,0.3) 1.00 (0.8,0.9) 1.00 (0.5,0.2) 4.75e-9 <4.75e14>	(0.2,0.3) 1.00 (0.5,0.8) 1.00 (0.9,0.4) 1.00 <2.87e14>

(x,y) : 음원의 위치, <> : MUSIC 파워

독립 음원과 비독립 음원이 공존하는 경우에 음원탐지 이론을 적용하여 모의 실험을 행하였다.

4.2.1. 모의 실험 조건

3개의 음원을 사용하였으며 좌표는 (0.5m,0.6m), (0.4m,0.3m), (0.8m,0.9m)이다. 그중 (0.4m,0.3m) 과 (0.8m,0.9m)에 위치한 2개

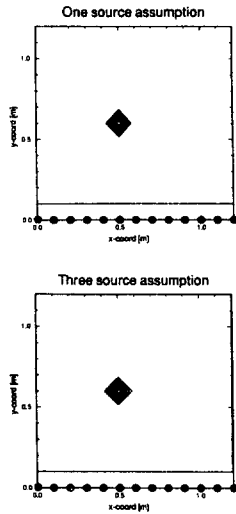


그림 1. 음원이 1개인 경우의 MUSIC 파워 (a) 1개의 음원 가정 (b) 2개의 음원 가정 (c) 3개의 음원 가정

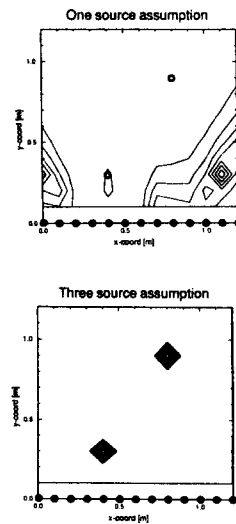


그림 2. 상관 관계가 있는 2개의 음원이 존재하는 경우의 MUSIC 파워 (a) 1개의 음원 가정 (b) 2개의 음원 가정 (c) 3개의 음원 가정

의 음원이 서로 상관 관계가 있는 경우에 대하여 MUSIC 방법을 적용하여 보았다. 그 외의 변수 값은 완전한 상관 관계가 있는 경우의 모의 실험과 동일하게 하였다.

4.2.2. 모의 실험 결과

그림 4는 임의의 음장이 존재하는 경우의 MUSIC 방법을 사용

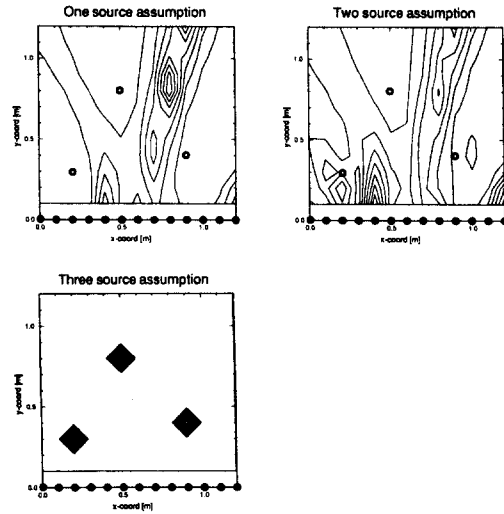


그림 3. 상관 관계가 있는 3개의 음원이 존재하는 경우의 MUSIC 파워 (a) 1개의 음원 가정 (b) 2개의 음원 가정 (c) 3개의 음원 가정

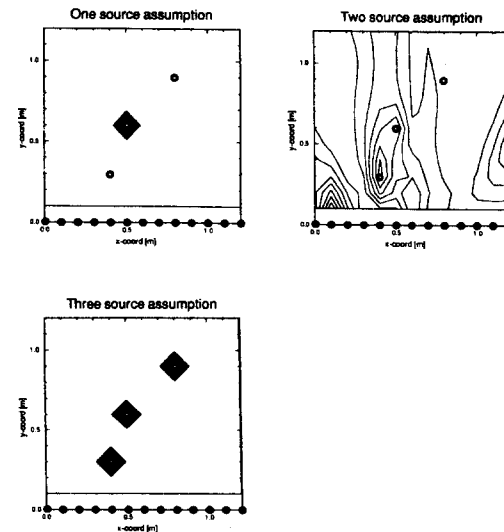


그림 4. 상관 관계가 있는 2개의 음원과 상관 관계가 없는 1개의 음원이 존재하는 경우의 MUSIC 파워 (a) 1개의 음원 가정 (b) 2개의 음원 가정 (c) 3개의 음원 가정

하여 MUSIC 파워를 나타낸 것이다. 한개의 음원을 가정하는 경우에 상관 관계가 없는 1개의 음원의 위치를 정확히 얻을 수 있으나 다른 2개의 음원은 두 음원 사이의 간섭에 의해서 정확한 위치를 찾는 것일 불가능함을 알 수 있다. 2개의 음원이 존재한다고 가정하는 경우는 가정한 2개의 음원들의 간섭 현상에 의해서 일어나 정확한 음원의 위치를 얻을 수 없는 것을 알 수 있으며 3개의 음원을 가정했을 때는 가정한 음원이 전체 음원의 갯수와 같은 경우로서 3개 모두 음원의 위치를 얻음을 보여주고 있다.

앞의 결과로부터 가정한 음원의 갯수가 실제 음원의 갯수보다 많다면 임의의 음장에 대해서도 음원의 위치를 구할 수 있음을 알았다.

5. 실험 및 결과

비독립 음원이 존재하는 경우의 실제 적용성을 확인해 보기 위하여 간단한 실험을 행하였다.

5.1. 실험 장치 및 방법

실험은 반사파가 존재하지 않도록 하기 위하여 무향실 안에서 행하였다. 그림 5는 실험 장치를 나타내고 있다. 음원으로는 지름이 약 20cm인 동일한 세개의 스피커를 사용하였으며 스피커의 위치는 일직선상에 존재하게 하고 스피커 사이의 거리는 각각 26.8cm와 26.2cm로 두어 고정시켰다. 각각의 스피커에서 나오는 음압 신호들이 서로 상관관계를 갖게하기 위하여 하나의 신호생성기(Sine Random Generator, B&K Type 1027)를 이용하였으며 492Hz의 단일 주파수를 내도록 하였다. 하나의 스피커에는 가진기의 신호를 직접 받도록하고 나머지 두개의 스피커에는 필터를 통과시켜 크기 및 위상을 달리하여 신호를 받아 구동시켰다. 음압을 측정하는 마이크로폰(Acousticel, PCB model 130A)은 13개로 하고 마이크로폰 사이의 간격은 10cm가 되게 하여 공간상의 엘리어싱(aliasing)은 일어나지 않도록 하였다. 마이크로폰과 스피커 사이는 645cm를 떨어뜨리고 스피커와 평행하게 고정시켜 음압을 측정하였다. 음압신호는 증폭기(Differential Amplifier, PCB model 514A)를 통하여 다채널 신호 분석기(16ch Signal Analyzer, HP 3566A)로 받았다.

5.2. 실험 결과

앞 장에서 서술되어 있는 상관 관계가 있는 경우의 소음원의 위치 탐지 방법을 이용하여 492Hz의 경우에 MUSIC 파워를 계산하였다. 음원의 갯수는 3개로 가정하였으며 음원의 위치는 가로 세로가 각각 120cm 되는 공간 안에 존재한다고 하여 5cm 간격으로 계산하였다.

그림 6은 MUSIC 파워의 분포를 나타내고 있으며 음원의 위치는 실제 음원의 위치와 유사함을 알 수 있다. 따라서 상관 관계가 있는 음원이 여러개 존재하는 경우에도 음원의 위치 탐지 방법의 적용이 가능함을 보여준다.

6. 결 론

음원의 위치를 찾는 문제에 있어서 비독립 음원들이 존재하는 경우, 근접장에서는 음원으로부터 나오는 파형을 평면파로 가정할 수 없고 구면파로 가정해야 하며, 여러개의 비독립 음원이 존재한다고 가정하여 각각의 음원의 위치를 변화시켜 가면서 MUSIC 파워를 계산하여야 한다.

실제 음원의 갯수보다 가정한 음원의 갯수가 작으면 정확한 음원의 위치를 가르치지 못하며 MUSIC 파워 값도 작다. 실제 음원의 갯수와 가정한 음원의 갯수가 같으면 정확한 음원의 위치를 가르치며 MUSIC 파워 값이 크게 얻어진다. 실제 음원의 갯수보다 가정한 음원의 갯수가 큰 경우 실제의 음원의 위치를 포함하여 다른 음원의 위치를 얻을 수 있으나 그 음원의 세기는 무시할 정도로 작다. 즉 실제 음원의 갯수보다 많은 수의 음원을 가정하여 음원을 탐지할 수 있다.

일반 음장 즉 독립 음원과 비독립 음원이 공존하는 경우 실제의 음원의 갯수만큼 가정한다면 음원의 위치를 찾을 수 있다.

참고 문헌

1. F.J. Fahy, Sound Intensity, Elsevier Applied Science, New York.
2. D. Maynard, E. G. Williams and Y. Lee, 1985, "Nearfield acoustic holography : I. Theory of generalized holography and

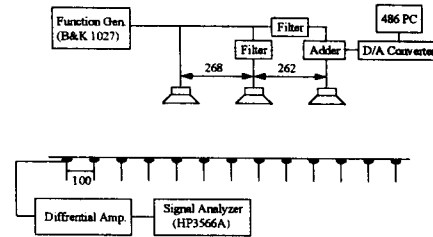


그림 5. 실험 장치 구성도 (단위 : mm)

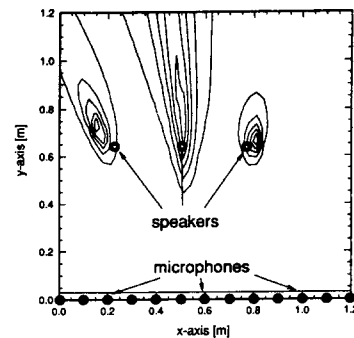


그림 6. 비독립 음원의 위치탐지 실험 결과 : MUSIC 파워 분포

- development of NAH," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 78, pp. 1395-1413.
3. A. Veronesi and J. D. Maynard, 1987, "Nearfield acoustic holography : II. Holographic reconstruction algorithms and computer implementation," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 81, pp. 1307-1322.
 4. Shan and T. Kailath, 1985, "Adaptive Beamforming for Coherent Signals and Interference," IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. ASSP-33, No. 3, pp527-530.
 5. R.O. Schmidt, 1986, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-34 No. 3, pp276-280.
 6. S. Pillai, 1989, Array Signal Processing, Chapter 2., Springer-Verlag.
 7. J.-W. Choi 1994 Ph.D. Dissertation, KAIST, Korea. Identification of Near Field Noise Sources.
 8. J.-W. Choi and Y.-H. Kim, 1995, "The Spherical Beamforming And MUSIC Method For The Estimation Of Location And Strength Of Spherical Sound Source," To appear Mechanical Systems and Signal Processing.
 9. J.-W. Choi and Y.-H. Kim, 1995, "Estimation of Locations and Strengths of Broad Band Planar and Spherical Noise Sources using Coherent Signal-subspace," To appear Journal of Acoustical Society of America.
 10. J.-W. Choi and Y.-H. Kim, 1994, "Theory On The Identification Of General Noise Sources Based On Correlation Matrix Of Microphone Array," Submitted to Journal of Sound and Vibration.
 11. J.-W. Choi, Y.-H. Kim and P.R. White, 1995, "Identification and Visualisation of Perfectly Coherent Sources by Using Line Array," Submitted to Journal of Sound and Vibration.