

(논문) SAE NO. 953777

# 다채널 적응 알고리즘을 이용한 잔향 음장에서의 능동소음제어에 관한 연구

## Active Noise Control of Reverberant Sound Field Using the Multi-Channel Adaptive Algorithm

김 홍 섭,\* 손 동 구,\* 오 재 웅\*\*  
H. S. Kim, D. G. Sohn, J. E. Oh

### ABSTRACT

In this study, Active noise control is implemented with single channel and multi-channel adaptive algorithm in 3 dimensional reverberant enclosure sound field, which occurs in complicated acoustic mode. First, for the one case excited with the resonant frequency of an enclosure, a target of control and the other cases excited with band-pass filtered random noise(100~400Hz), it is implemented to control reducing interior noise of enclosure with single channel and realtime multi-channel adaptive algorithm for global noise reduction in enclosure.

주요기술용어 : Global control(전역 제어), FIR filter(유한 응답 필터), Primary source(주소음원), Error sensor(오차 센서), Reference signal(참조 신호), Reverberant sound field(잔향 음장)

### 1. 서 론

산업 문명이 발달됨과 더불어 현대인은 원치 않는 환경에 더욱 빈번히 노출되고 있다. 이런 환경에 의한 피해가 속속 알려지고 쾌적한 환경에 대한 욕구가 증가됨에 따라 환경 개선 차원에서 대기, 수질과 더불어 소음에 대해서도 관심을 기울이게 된다. 특히, 최근에는 환경 오염원으로서의 소음에 대한 규제가 사회적 관심이 되고 있

으며 또한 생활 수준의 향상으로 정숙한 환경에 대한 요구가 증가되고 있다.

최근 신호 처리 방법의 개발과 전자 기술의 발달로 인하여 능동 소음 제어(active noise control) 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1)</sup> 공기 조화용 덕트같은 비교적 소음의 전파가 간단한 구조물에 대해 단일 채널의 능동 소음 제어를 적용한 연구 사례는 많이 알려져 있다.<sup>2), 3), 4)</sup> 이러한 사례들은 소음의 저감을 목적으로 하는 한 위치를 대상으로 하고 있다. 그러나, 실제적으로 소음의 전파 양상이 좀더 복잡한 음장이나 제어 목적상 다수의 위치에 소음을 저감하고자

\* 한양대학교 정밀기계공학과  
\*\* 정회원, 한양대학교 자동차공학과

하는 경우에는 이러한 단일 채널의 알고리즘으로는 한계가 있을 뿐만 아니라 관측기가 위치하지 않는 위치에서는 소음이 커지는 역효과를 초래할 수도 있다.<sup>5)</sup>

본 연구에서는 복잡한 음향 모드가 발생하는 3차원 잔향 밀폐계 음장에서 단일 채널과 다채널 적응 알고리즘을 이용하여 능동 소음 제어를 수행하였다. 먼저 단일 채널 적응 알고리즘을 이용한 밀폐계내 소음 제어 양상을 통해 그 한계를 제시하고 실시간 다채널 적응 알고리즘을 사용한 제어 결과와 비교하고자 한다. 또한 본 연구의 제어 대상으로 제작된 밀폐계의 공진 주파수가 가진된 경우와 500Hz 미만의 랜덤음으로 가진된 경우에 대해 개발된 실시간 다채널 적응 알고리즘을 이용한 밀폐계내 두 위치에서의 저감하려는 제어를 수행하였다.

2. 다채널 filtered-x LMS 알고리즘<sup>5), 6), 7)</sup>

일반적으로 밀폐계의 능동 소음 제어 시스템의 실제 설치도는 Fig.1과 같이 특징지어질 수 있다. P 주음원에 의해 발생한 주음원장은 밀폐계내(작업장에서 기계 소음)나 밖(비행기의 프로펠러 소음)일 수 있다.

주음원장을 제거하기 위하여 제어기는 N개의 부가 음원에 의해 작동되는데 이 주음원장은 밀폐계 내의 M개의 적절한 위치에서 오차 센서에 의해 측정되는 음압의 자승의 합을 최소화함으로써 저감되어 질 수 있다.

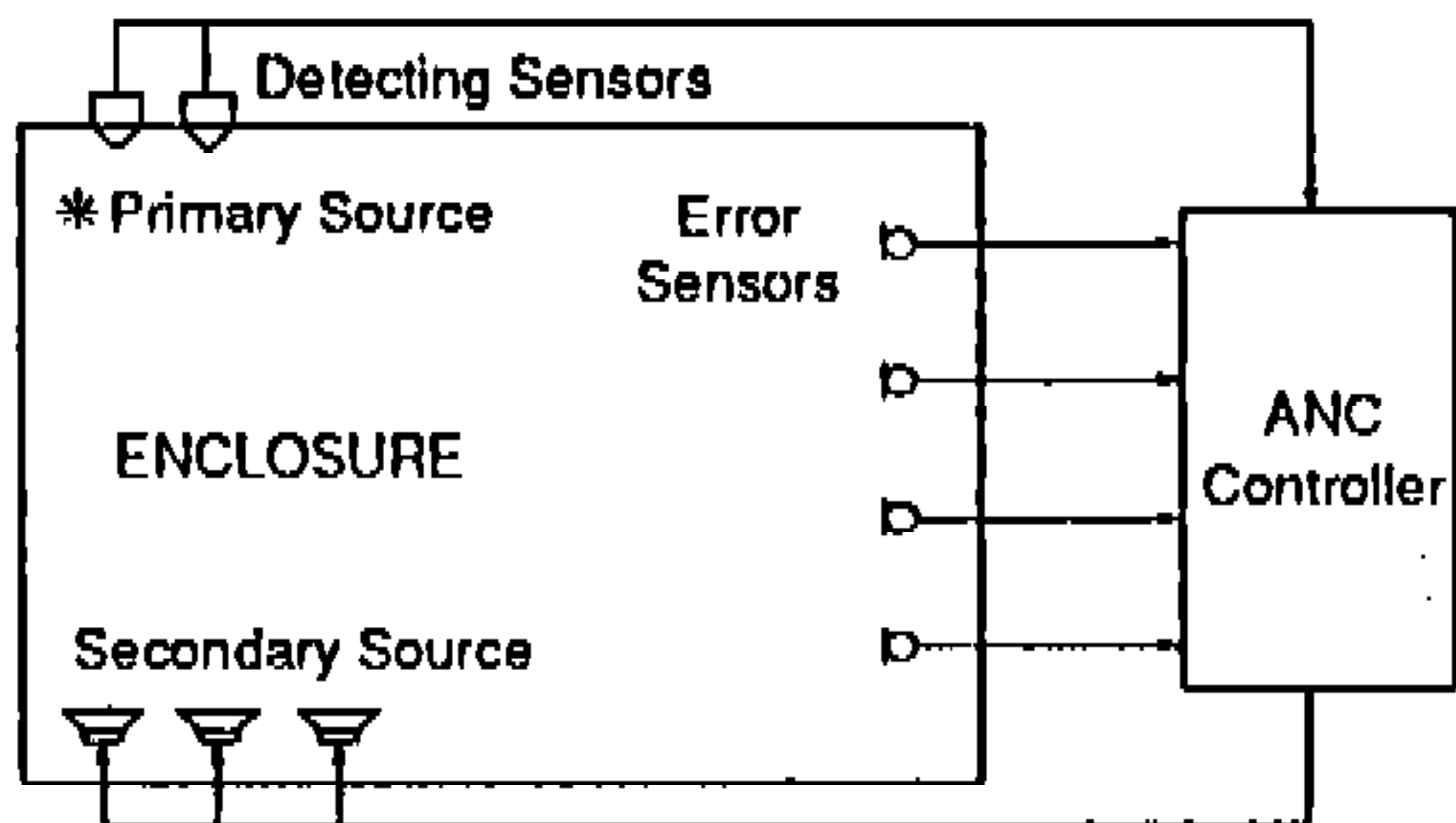


Fig.1 ANC system of the 3-D dimensional enclosure

k번째 샘플링의 m번째 오차 센서의 출력  $e_m(k)$ 는 이 센서의 압력에 기여하는 주음원으로부터 위 모든 소음  $d_{mp}(k)$ ,  $n=1, 2, \dots, p$ 와 똑같이 기여하는 부가 음원으로 인한  $z_{mn}(k)$ ,  $n=1, 2, \dots, N$ 의 중첩으로 구성된다.

$$e_m(k) = \sum_{p=1}^P d_{mp}(k) + \sum_{n=1}^N z_{mn}(k) \quad (1)$$

또한 k번째 샘플링된 n번 부가 음원으로서의 출력을  $y_n(k)$ 로 정의할 수 있는데, 이것은 참조 신호  $x_p(k)$  (주음원  $d_p$ 과 관련이 있고 p번째 탐지 센서에서 계측된)를 계수가  $w_{n,p}$ 인 유한 응답 필터를 이용하여 필터링 함으로써 얻을 수 있다.

$$y_n(k) = \sum_{p=1}^P \left( \sum_{i=0}^{L_{np}-1} w_{n,p} x_p(k-i) \right) \quad (2)$$

여기서,

$$X_n^T(k) = [x_1(k) x_1(k-1) \dots x_1(k-L_{n1}-1) \mid \dots \mid x_p(k) x_p(k) x_p(k-1) \dots x_p(k-L_{np}-1)]$$

$$W_n^T = [\omega_{n10} \omega_{n11} \dots \omega_{n1L_{n1}-1} \mid \dots \mid \omega_{np0} \omega_{np1} \dots \omega_{npL_{np}-1}]$$

그리고  $L_{np}$ 는  $(n \times p)$ 차 유한 응답 필터(FIR filter)의 차수이다.  $y_n(k)$ 와  $z_{mn}(k)$  사이의 전달 함수를 유한 응답 필터로 모델링할 수 있는데

$$z_{mn}(k) = \sum_{j=0}^{H-1} b_{mnj} y_n(k-j) \quad (3)$$

지연 연산자 q에 의해서 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$B_{mn}(q) = \sum_{j=0}^{H-1} b_{mnj} q^{-j} \quad (4)$$

식(3)을 지연 연산자를 이용하여 정리하면

$$z_{mn}(k) = B_{mn}(q)y_n(k) \quad (5)$$

식 (2)을 식(5)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$z_{mn}(k) = B_{mn}(q)X_n^T(k)W_n = Q_{mn}^T(k)W_n \quad (6)$$

여기서,  $Q_{mn}^T(k) = B_{mn}(q)X_n^T(k)$ 이다. 식(1)에 식(6)을 대입하고 정리하면

$$d_m(k) = \sum_{p=1}^P d_{mp}(k) \quad (7), (8)$$

$$e_m(k) = d_m(k) + \sum_{n=1}^N Q_{mn}^T(k)W_n + Q_m^T(k)W$$

$$\text{여기서, } Q_m^T(k) = [Q_{m1}^T(k) Q_{m2}^T(k) \cdots Q_{mN}^T(k)]$$

$$e^T(k) = e_1(k)e_2(k) \cdots e_M(k),$$

$$W^T = [W_1^T W_2^T \cdots W_N^T],$$

$$d^T(k) = d_1(k)d_2(k) \cdots d_M(k),$$

$$Q^T(k) = [Q_1^T(k) Q_2^T(k) \cdots Q_M^T(k)] \quad (9)$$

식(8)에서 오차 신호의 자승의 합은 제어기 계수  $W$ 의 함수로 표현할 수 있다.

$$\sum_{m=1}^M e_m^2(k) = e^T(k)e(k) = d^T(k)d(k) + W^T Q^T(k)Q(k)W + 2d^T(k)Q(k)W \quad (10)$$

식(10)에 기대치를 취하면 전체 오차  $J$ 를 얻는다.

$$J = E\{e^T(k)e(k)\} = J_0 + W^T R W + 2P^T W \quad (11)$$

여기서,  $J_0 = E\{d^T(k)d(k)\}$ ,  $R = E\{Q^T(k)Q(k)\}$ ,  $P^T = E\{d^T(k)Q(k)\}$

식(11)에서 전체 오차  $J$ 는 제어기 계수  $W$ 의

2차 함수이다. 그러므로 만약  $R$ 이 양의 한정적 (positive definite)하다면  $J$ 는 유일한 전체 최소 값을 가진다. 따라서  $W$ 에 대한 식(11)의 전체 미분을 0으로 함으로써  $J$ 를 최소화하는 최적해  $W^* = -R^{-1}P$ 를 구할 수 있다.

$$J_{min} = J_0 - R^{-1}P = J_0 + P^T W^* \quad (12)$$

$J$ 의 2차 함수 성질로 인하여 최적해  $W$ 는 최대 경사법을 이용하여 적응적으로 유도할 수 있다.

$$\omega_{n\mu}(k+1) = \omega_{n\mu}(k) + \mu(-\nabla_{\omega_{n\mu}(k)} J) \quad (13)$$

여기서,  $\mu$ 는 수렴 계수이다.

$$\nabla_{\omega_{n\mu}(k)} J = \frac{\partial}{\partial \omega_{n\mu}(k)} E\{e^T(k)e(k)\}$$

$\nabla J$ 를 구하기 위해  $J$ 의 예측치로서  $E[e^T(k)e(k)]$ 의 순간치를 구하면 식 (13)은 다음과 같이 된다.

$$\omega_{n\mu}(k+1) = \omega_{n\mu}(k) - 2\mu \sum_{m=1}^M e_m(k) \nabla_{\omega_{n\mu}(k)} e_m(k) \quad (14)$$

식(14)의 마지막 형태를 추론하기 위하여  $\nabla_{\omega_{n\mu}(k)} e_m(k)$ 에 대한 결과를 조사해야 한다.

$$\begin{aligned} \nabla_{\omega_{n\mu}(k)} e_m(k) &= \nabla_{\omega_{n\mu}(k)} \left[ d_m(k) + \sum_{n=1}^{H-1} z_{mn}(k) \right] \\ &= \nabla_{\omega_{n\mu}(k)} z_{mn}(k) \\ &= \sum_{j=0}^N b_{mnj} \nabla_{\omega_{n\mu}(k)} y_n(k-j) \quad (15) \end{aligned}$$

늦은 적응에 해당하는  $\omega_{n\mu}(k) \approx \cdots \approx \omega_{n\mu}(k-t)$  ( $t = \max\{G-1, H-1\}$ )를 가정함으로써 마지막 식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\nabla_{\omega_{n\mu}(k)} z_{mn}(k) \approx \sum_{j=0}^{H-1} b_{mnj} \nabla_{\omega_{n\mu}(k)} y_n(k-j) \quad (16)$$

지연 연산자와 식(5) 그리고

$\nabla \omega_{n\mu}(k)y_n(k-j) = x_p(k-i-j)$ 의 관계를 이용하면 식(16)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla \omega_{n\mu}(k)z_{mn}(k) \approx B_{mn}(q)x_p(k-i) \quad (18)$$

식(18)을 식(14)에 대입하면  $W^*$ 를 유도하기 위한 적응식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \omega_{n\mu}(k+1) \\ = \omega_{n\mu}(k) - 2\mu \sum_{m=1}^M e_m(k)(B_{mn}(q)x_p(k-i)) \end{aligned} \quad (19)$$

식(9)에 정의된 벡터, 행렬에 의해서 이 형태는 간단히 쓸 수 있다.

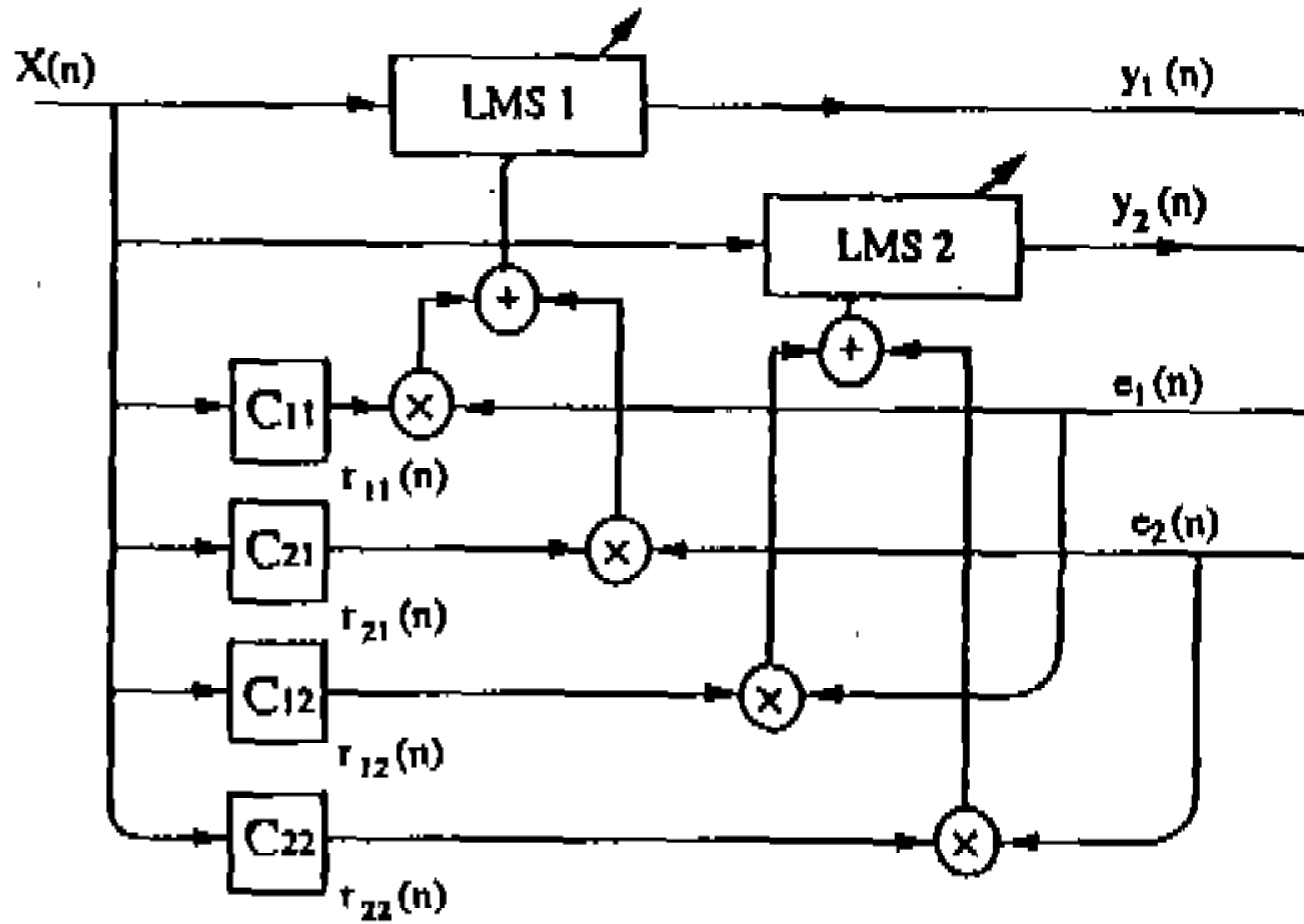


Fig.2 Block diagram of the multi-channel (2x2) adaptive algorithm

Table 1 Mode number and natural frequency of enclosure

Mode number	Natural frequency	Mode number	Natural frequency
(1, 0, 0)	132 Hz	(0, 0, 1)	304 Hz
(0, 1, 0)	218 Hz	(0, 1, 1)	330 Hz
(1, 1, 0)	254 Hz	(2, 1, 0)	342 Hz
(2, 0, 0)	264 Hz	(0, 2, 0)	436 Hz

$$W(k+1) = W(k) - 2\mu Q^T(k)e(k) \quad (20)$$

### 3. 밀폐계내 다채널 적응 제어 실험

본 연구에서 사용된 밀폐계의 크기는  $1.29 \times 0.78 \times 0.56$ (m)이며 밀폐계 내부는 전파되는 소음이 각각의 벽면에서 반사되어 오는 소음을 줄이기 위해 두께 10cm의 흡음재를 밀폐계 표면에 부착하였다. 제어 대상 주파수는 100~400Hz로 하였는데 이것은 밀폐계 내부에서 높이 방향의 모드(0, 0, 1)가 304Hz에서 발생하기 때문이다.<sup>8)</sup>

주소음원(primary source)으로 사용되는 스피커는 밀폐계 내에 3차원 음장을 형성시킬 수 있도록 밀폐계의 구석에 위치시켰다.<sup>8)</sup> 제어 스피커(control speaker)는 단일 채널에서는 Fig. 3에서  $S_1$ 을 사용하였고 다채널(2x2)에서는  $S_1, S_2$  스피커를 사용하였다. 오차 센서(error sensor)로 이용되는 마이크로폰은 밀폐계내 노드 절선(nodal line)을 피하여 밀폐계내 모든 소음을 관측할 수 있게 위치시켰는데 단일 채널에서는  $M_1$ , 다채널에서는  $M_1, M_2$ 를 사용하였다. 스피커와 마이크로폰의 높이는 0.42m이고 평면상에서의 위치는 Fig.4에 나타내었다.

참조 신호(reference signal)는 주소음원 스피커로 입력되는 전기적인 신호를 사용하였으며 마

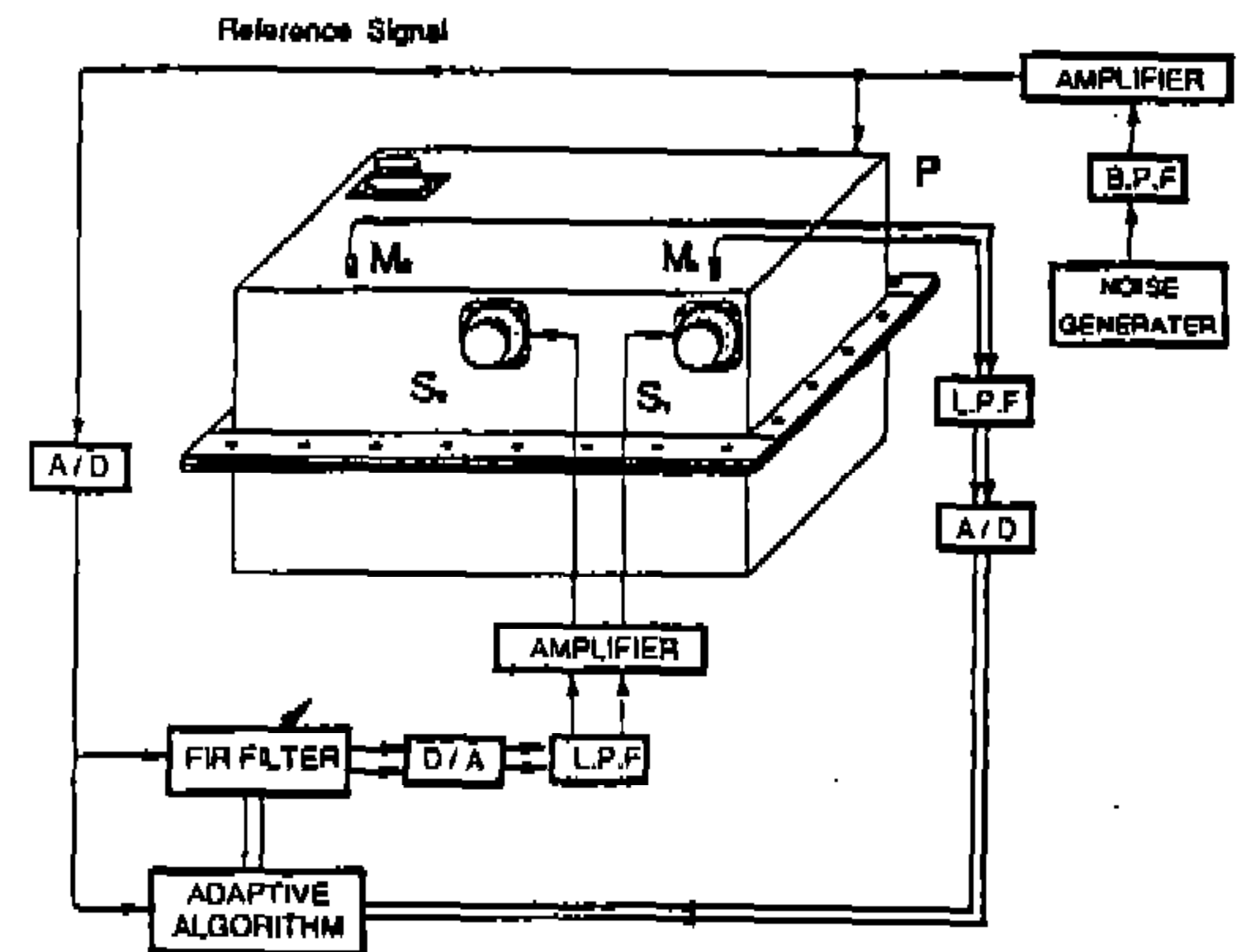


Fig.3 Schematic diagram of multi-channel active noise control system

이크로폰에서 측정된 음압 신호와 제어 스피커로의 제어 신호에 각각 저역 통과 필터(lowpass filter)를 설치하였다. 실험에 사용된 능동 소음 제어기는 고속 신호 처리 프로세서인 TMS320c30와 A/D·D/A 회로를 내장한 DSP 보드를 이용하였다. Fig.5는 밀폐계내 제어 스피커  $S_1$ 과 오차 센서  $M_1, M_2$  사이의 음향계 전달 함수를 100차의 유한 응답 필터를 이용하여 모델링한 결과이다.

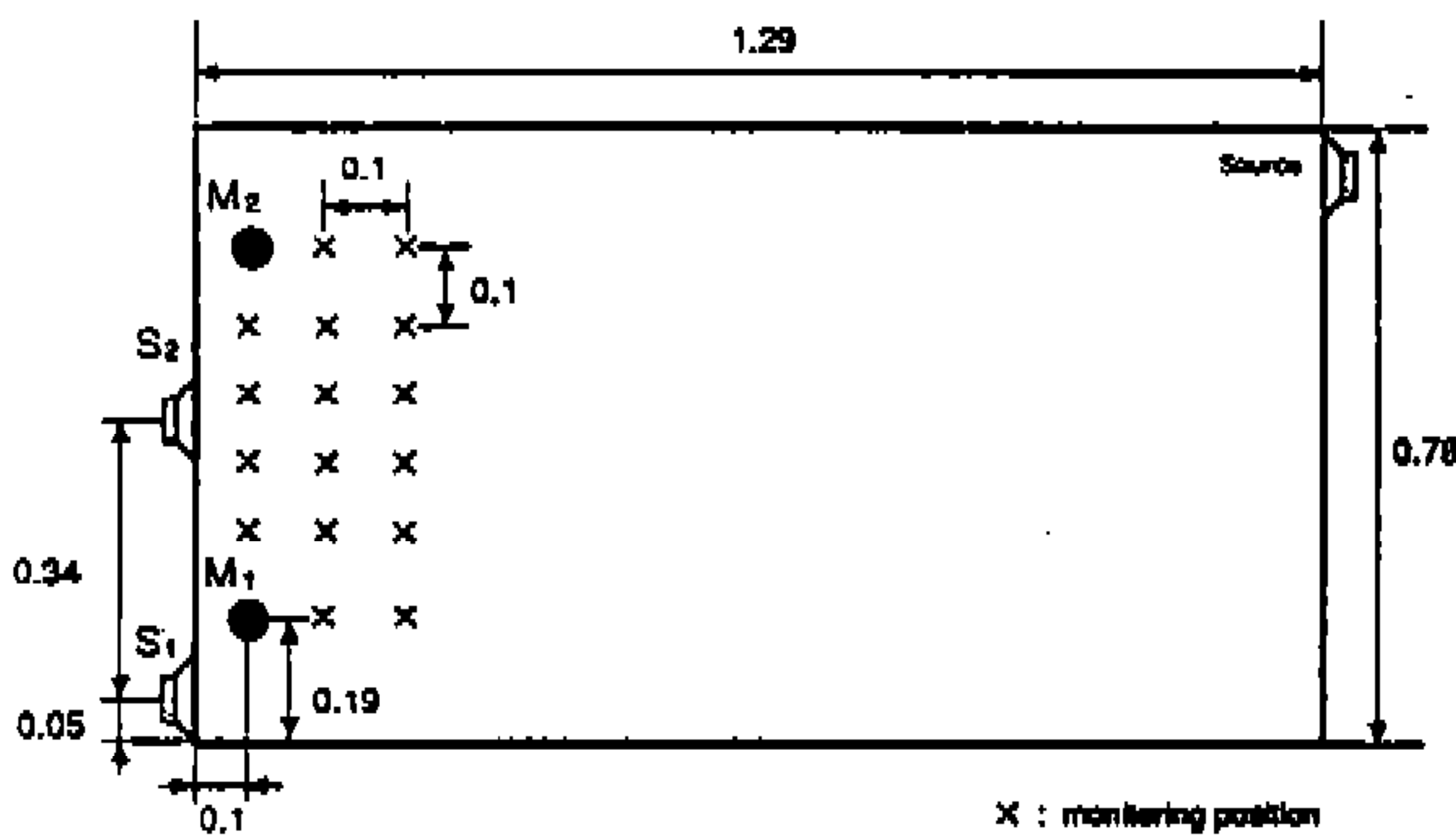
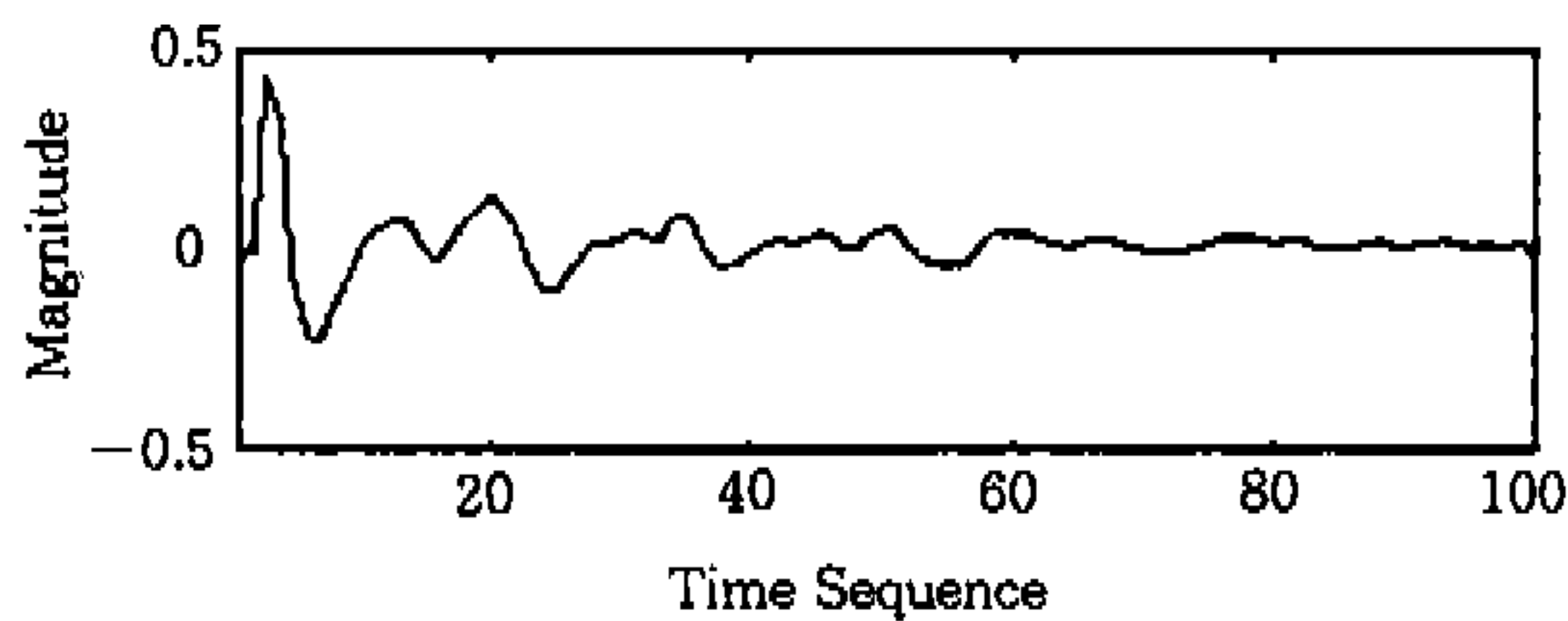
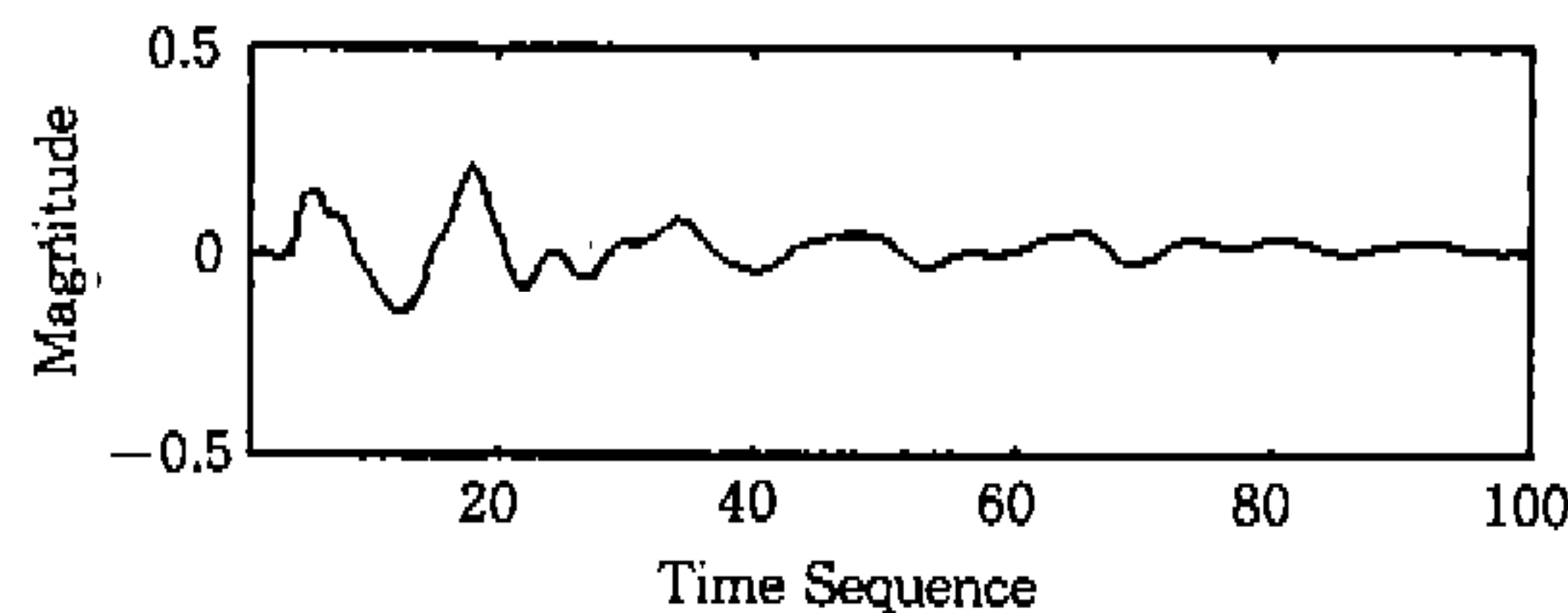


Fig.4 Position of control speaker ( $S_1, S_2$ ) and error microphone ( $M_1, M_2$ ) in a plane (height : 0.42m)



(1)  $C_{11}$ —plant transfer function between speaker ( $S_1$ ) and microphone ( $M_1$ )



(2)  $C_{12}$ —plant transfer function between speaker ( $S_1$ ) and microphone ( $M_2$ )

Fig.5 Results of acoustic plant transfer function identified by 100-th FIR filter

### 3.1 공진 주파수로 가진된 밀폐계 내부 제어 실험

밀폐계 내부 음향계 전달 함수는 Fig.6와 같은 데 1차 모드(132Hz)의 에너지가 나머지 잔여 모드에 비해 지배적임을 알 수 있다.

따라서 주소음원에서 밀폐계 내의 1차 공진 주파수로 가진할 경우 밀폐계 내에서 단일 채널, 다채널을 이용하여 제어 실험을 수행하였다. Fig.7은 단일 채널을 이용하여 제어 실험을 수행한 결과로 40dB 정도의 저감 효과를 볼 수 있었으며 Fig.8, 9는 다채널을 이용하여 제어 전후의 음압을 각각  $M_1, M_2$  위치에서 측정된 결과로 단일 채널과 동일한 정도의 저감 효과를 얻을 수 있었다.

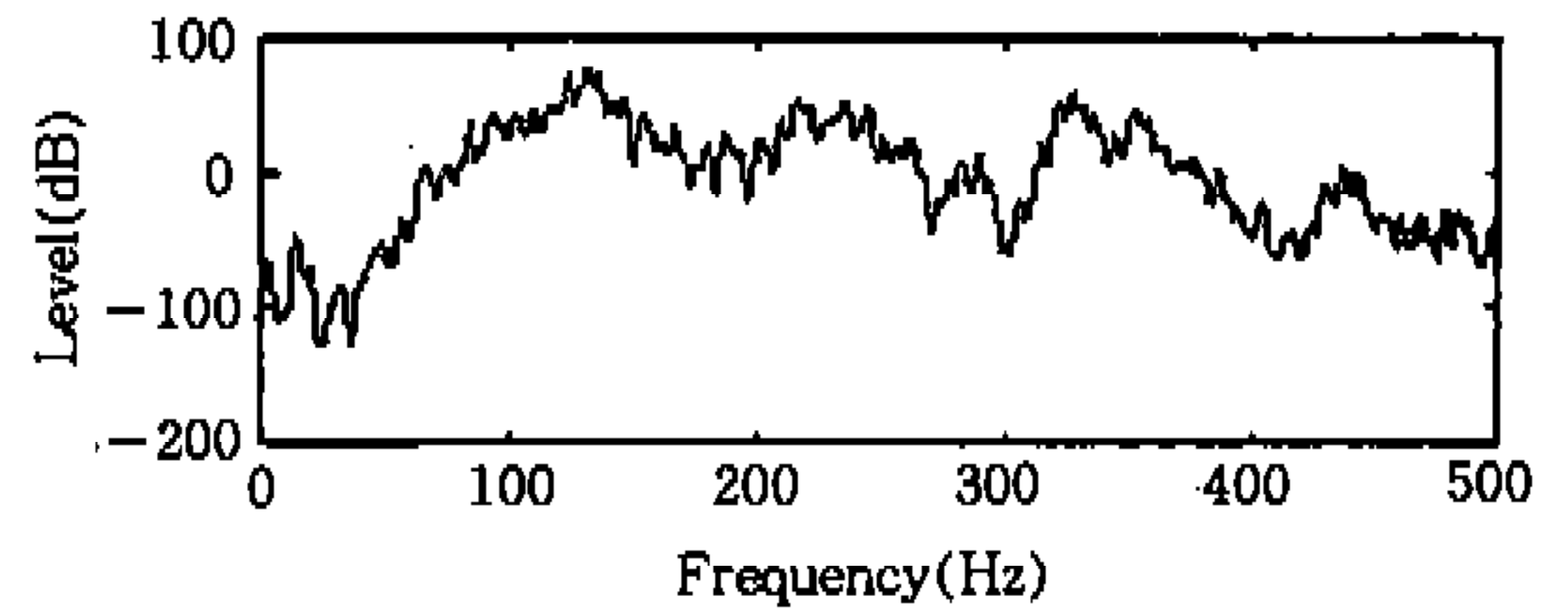


Fig.6 Acoustic transfer function of enclosure

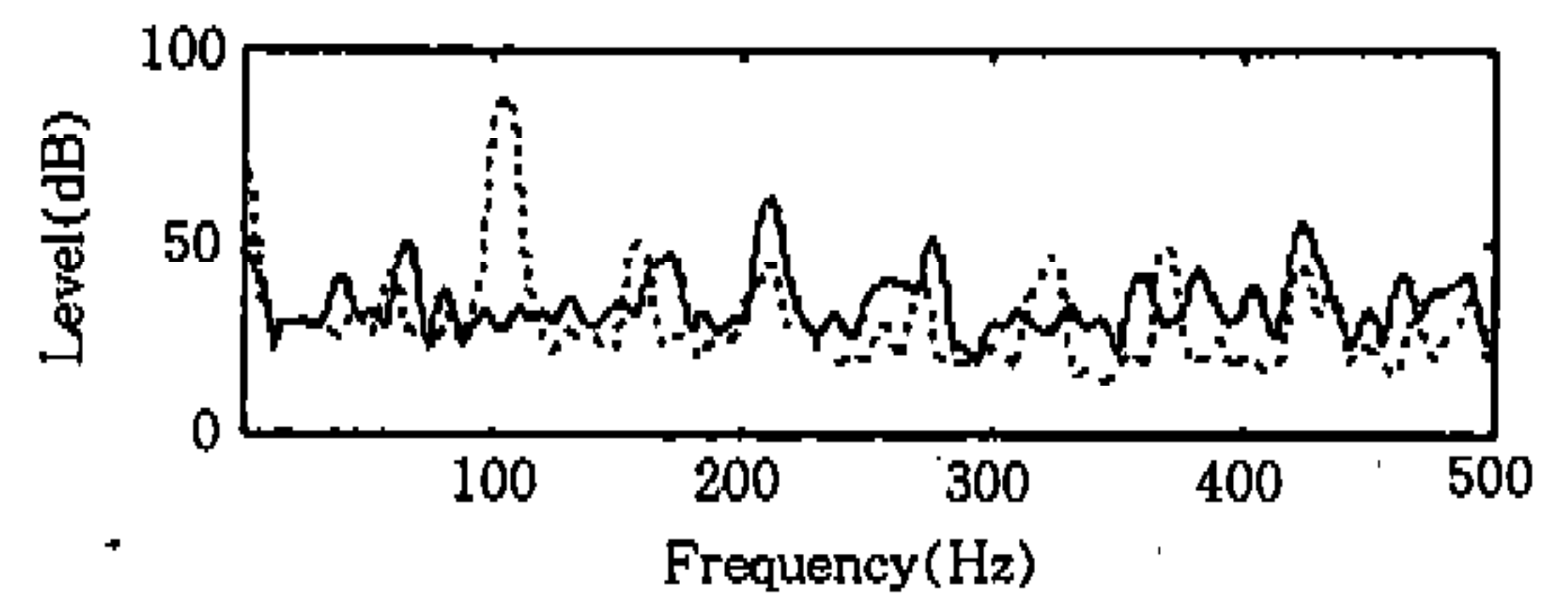


Fig.7 Control results of  $M_1$  position using single channel adaptive algorithm for resonant frequency (132Hz)

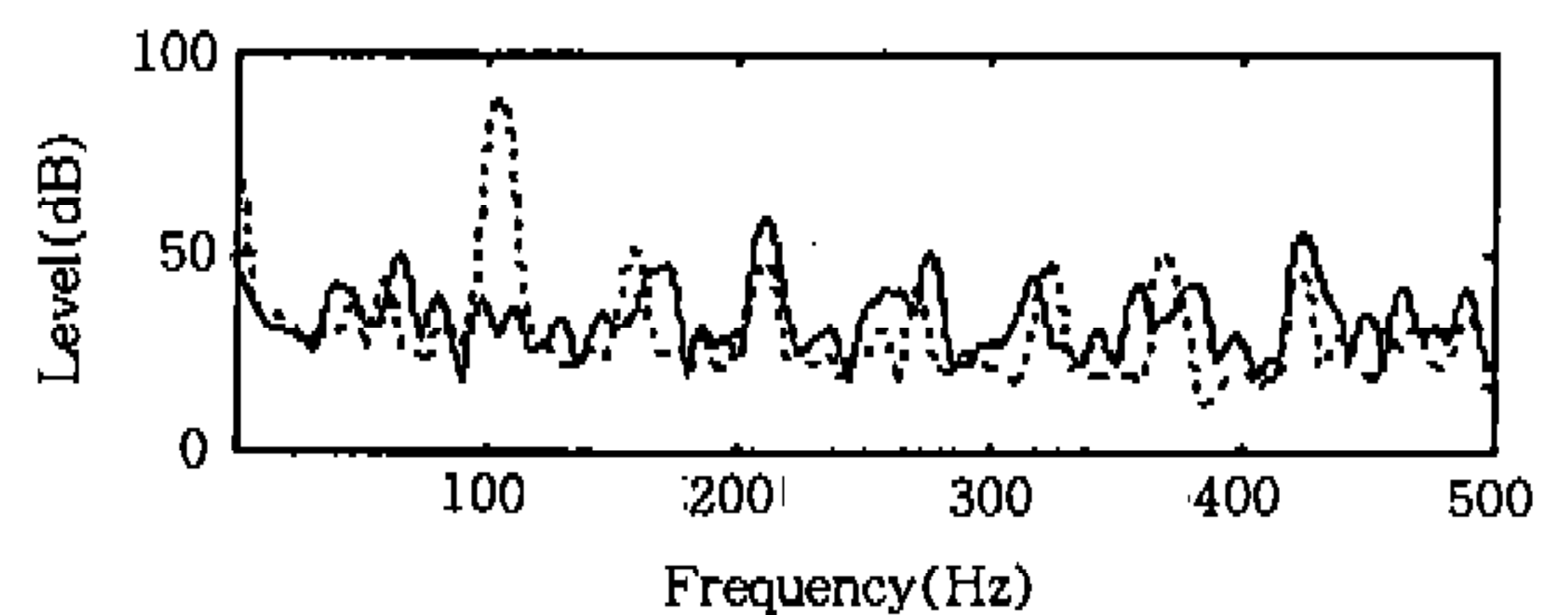


Fig.8 Control results of  $M_1$  position using multi-channel ( $2 \times 2$ ) adaptive algorithm for resonant frequency (132Hz)

3.2 랜덤 가진된 밀폐계 내부 제어 실험

주소음원으로 100~400Hz 사이의 랜덤음을 사용하였을 경우의 제어 결과를 단일 채널은 Fig.10, 다채널은 Fig.11, 12에 나타내었는데 제어대상 주파수 대역에서 10dB 정도의 저감 효과를 얻을 수 있었다. 이와 같은 특정 지역에서의 소음 저감의 정도는 다채널을 사용하여 제어 실험을 수행하여도 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

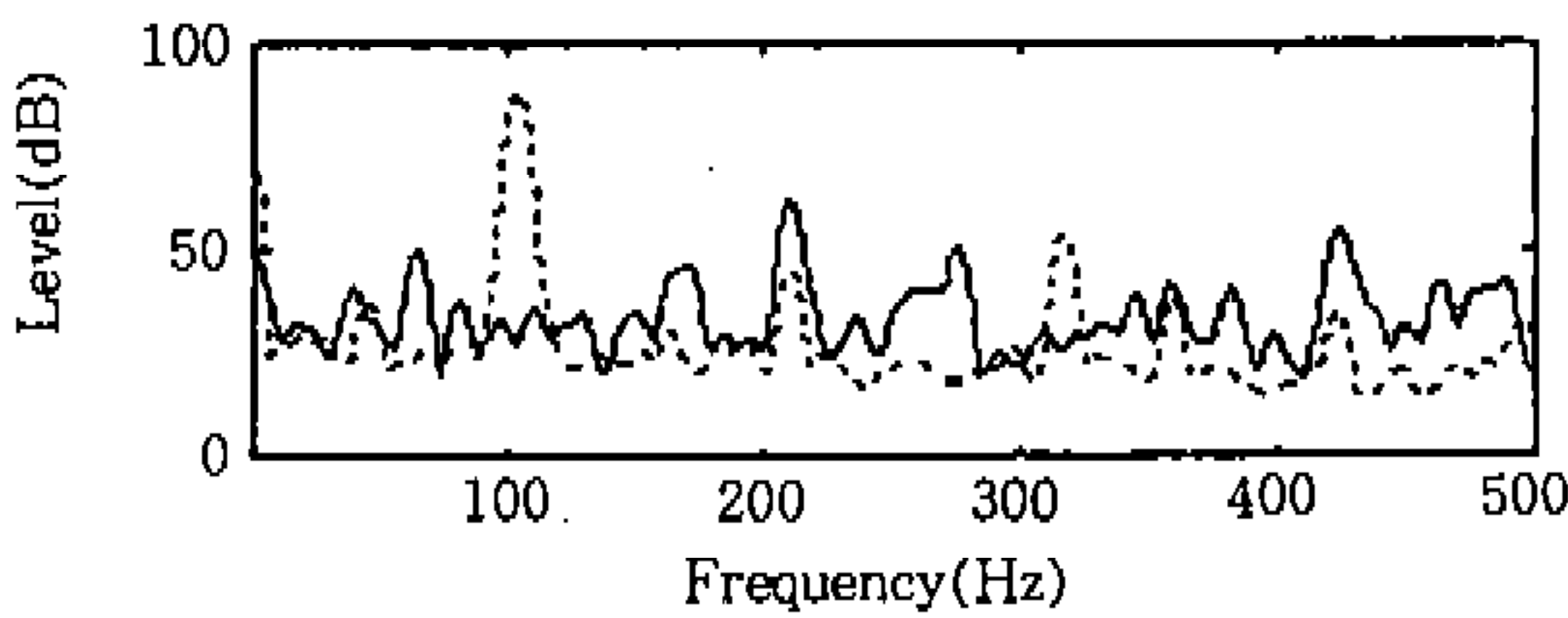


Fig.9 Control results of M<sub>2</sub> position using multi-channel(2×2) adaptive algorithm for resonant frequency(132Hz)

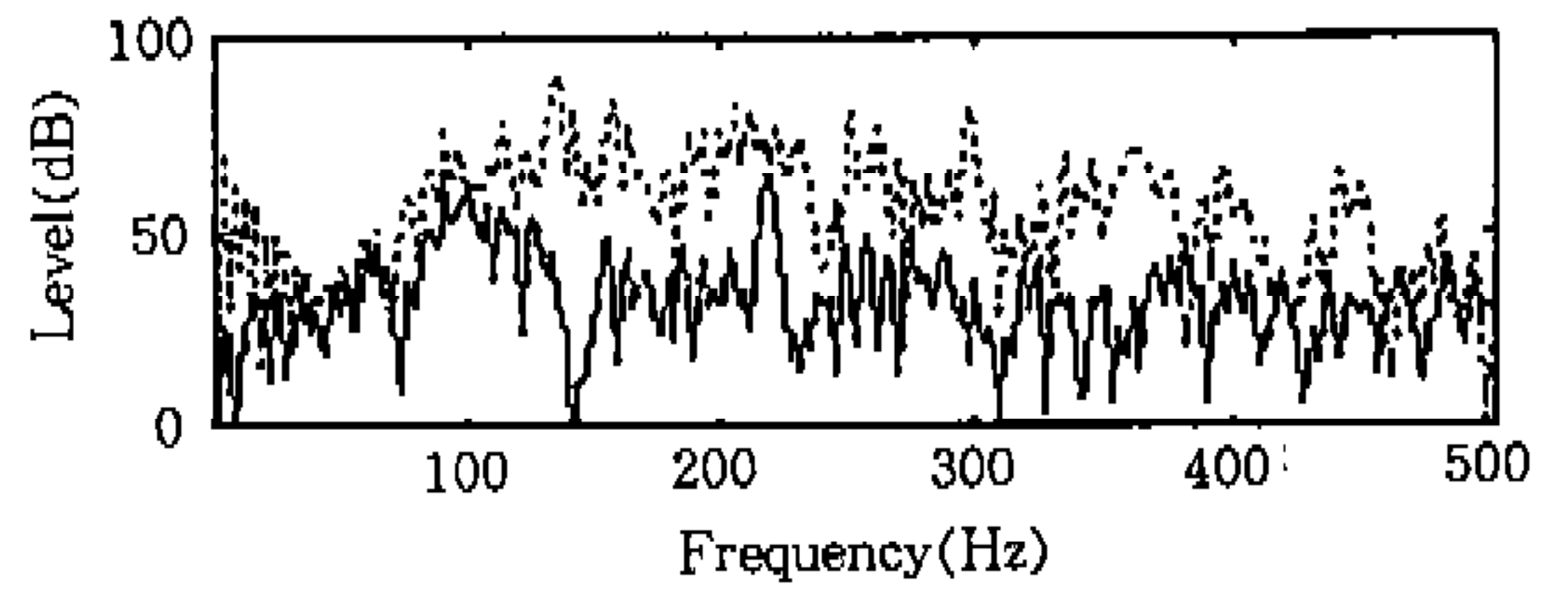


Fig.10 Control results of M<sub>1</sub> position using single channel adaptive algorithm for band-pass filtered random noise(100~400Hz)

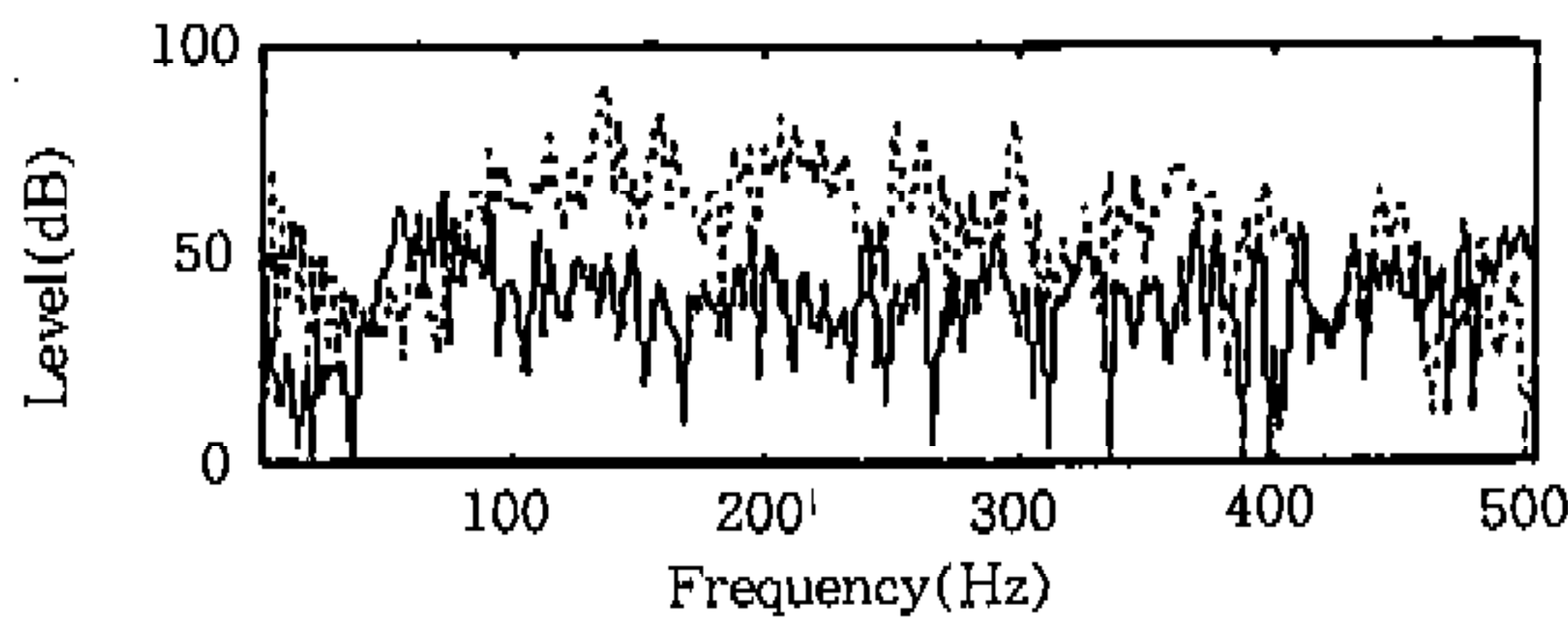


Fig.11 Control results of M<sub>1</sub> position using multi-channel(2×2) algorithm for band-pass filtered random noise(100~400Hz)

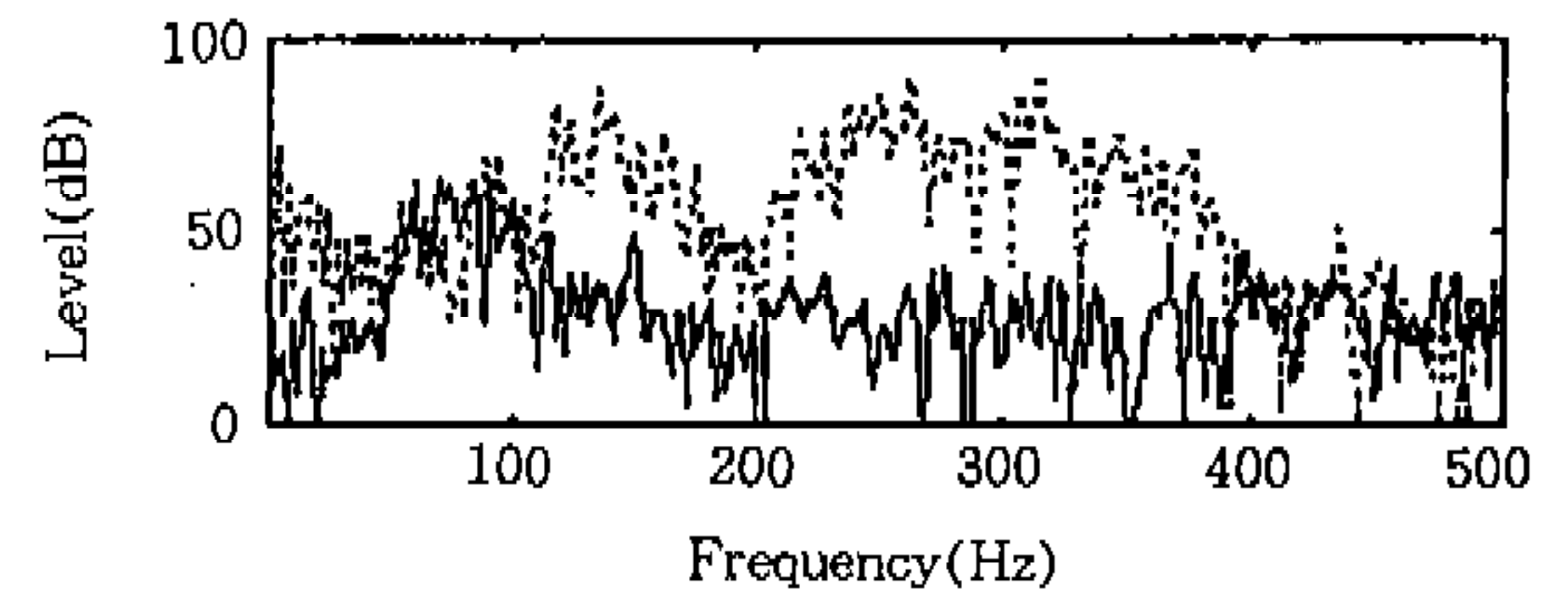


Fig.12 Control results of M<sub>2</sub> position using multi-channel(2×2) algorithm for band-pass filtered random noise(100~400Hz)

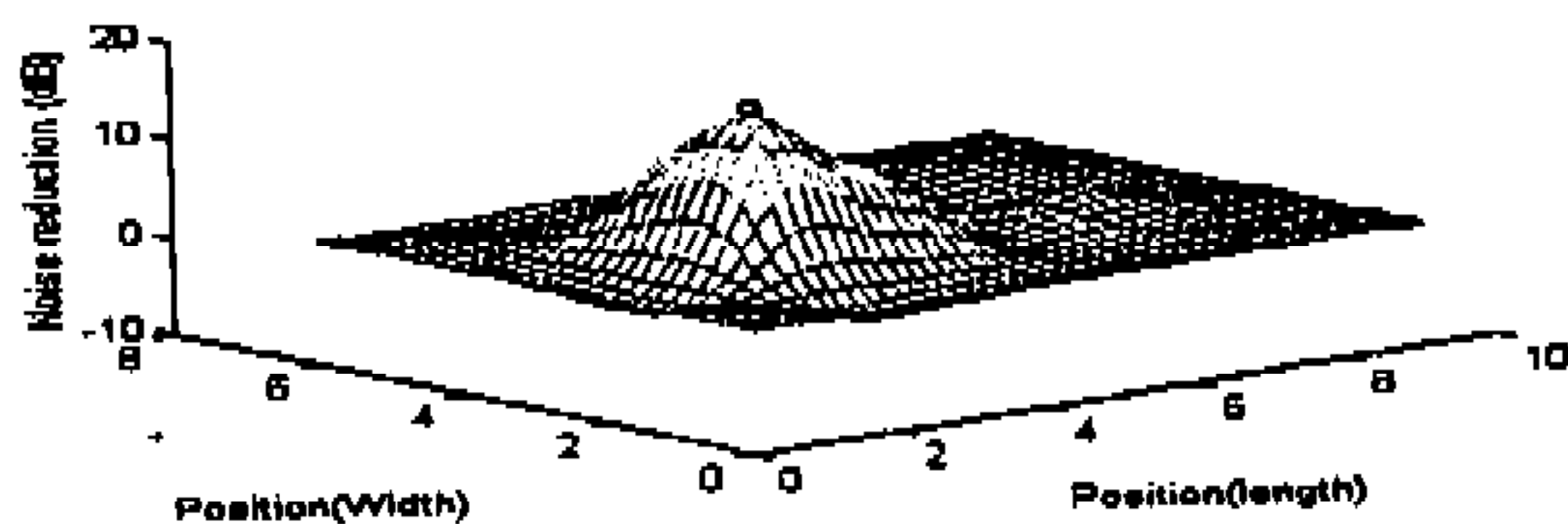


Fig.13 The phase of noise reduction using single channel adaptive algorithm for band-pass filtered random noise(• : microphone position)

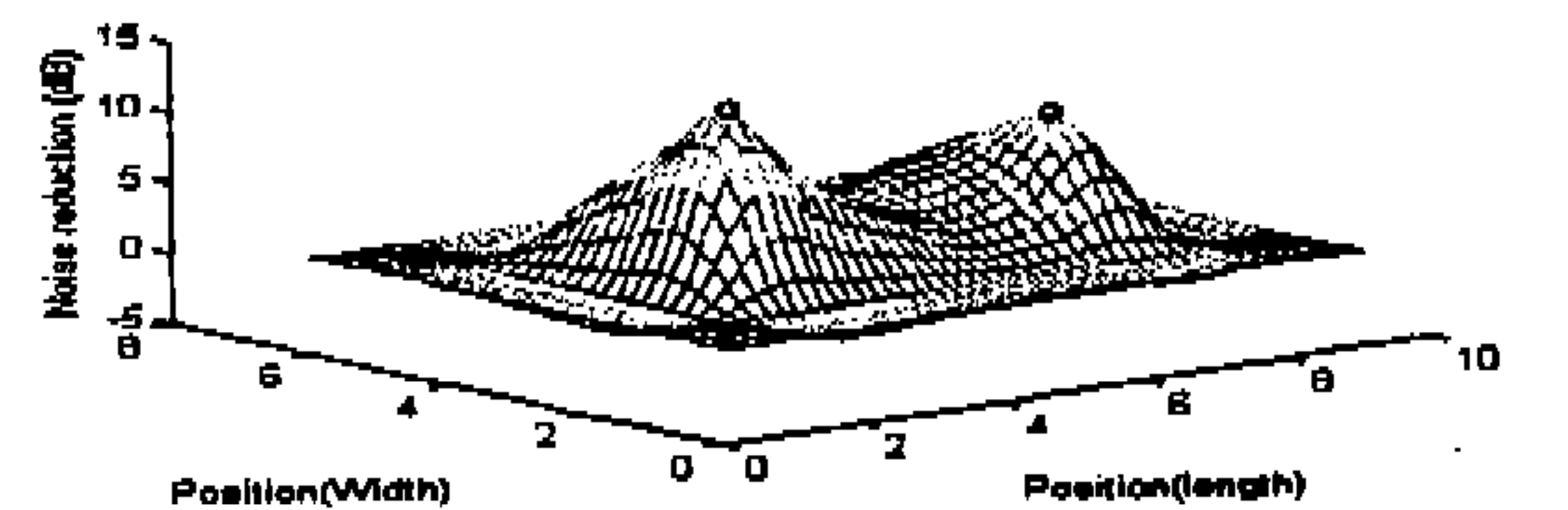


Fig.14 The phase of noise reduction using multi-channel adaptive algorithm for band-pass filtered random noise(• : microphone position)

단일 채널 적응 알고리즘을 이용하여 제어 실험을 수행한 결과에서 관측기가 위치한 곳의 소음 저감은 15dB정도이나 관측기가 위치하지 않은 Fig.13의 1번 위치에서는 제어 전보다 소음이 증가하는 역효과를 가져왔다. 그러므로 단일 채널을 사용하여 복잡한 음향 모드가 존재하는 음장에서 제어를 수행하는 경우에는 관측기가 위치하지 않은 곳에서 역효과로 인하여 밀폐계내 전역 제어에는 한계를 보임을 알 수 있다. Fig. 15는 다채널 적응 알고리즘을 이용하여 제어 실험을 수행한 결과로 관측기가 위치한 1, 6번 위치 뿐만 아니라 그 외의 위치에서의 저감 정도도 향상됨을 알 수 있다. 그러므로 다채널 적응 알고리즘을 사용하여 밀폐계내 제어 실험을 수행한 결과 단일 채널과는 달리 전역 제어 성능을 보임을 알 수 있고 이러한 결과로 복잡한 음향 모드가 존재하는 3차원 음장에서는 전역 제어를 위해서는 다채널 적응 알고리즘을 사용해야 함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

복잡한 음향 모드가 존재하는 3차원 밀폐계에서 다채널 적응 제어 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 개발된 다채널 적응 알고리즘을 이용하여 3차원 밀폐계에서 제어 실험을 수행한 결과 공진 주파수의 정현파와 100~400Hz 사이의 랜덤 소음을 잘 저감시킴을 알 수 있었다.
- 2) 단일 채널 적응 알고리즘을 이용하여 3차원 밀폐계의 소음 제어를 수행할 경우 관측기가 위치하지 않은 위치에서는 역효과를 발생시킬 수도 있음을 알 수 있었다.
- 3) 다채널 적응 알고리즘을 이용하여 3차원 밀폐계의 소음 제어를 수행할 경우 2개의 관측기 사이의 상호 작용에 의해서 밀폐계

내 전역 소음 제어 효과가 발생함을 알 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. P. A. Nelson and S. J. Elliott, 1992, "Active control of sound", Academic Press
2. 김홍섭, 오재용외 2명, 1994, "DSP를 이용한 능동소음제어 시스템의 개발", 한국정밀공학회지, Vol.11, No.1, pp. 108~113
3. S. D. Synder and C. H. Hansen, 1989, "Active noise control in ducts : some physical insights", J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 86, pp. 184~194
4. L. J. Eriksson and M. C. Allie, 1989, "Use of random noise for on-line transducer modeling in an adaptive active attenuation system", J. Acoust. Soc. Amer., Vol.85, No.2, pp. 797~802.
5. S. J. Elliot et al, 1987, "A multiple error LMS algorithm & its application to the active control of sound and vibration", IEEE Trans. Acoustic Speech Signal Processing, Vol.ASSP-35, pp. 1423~1434
6. Bao and Brussel, 1993, "Adaptive active control of noise in 3-D reverberant enclosures", Journal of sound and vibration, Vol.161, No.3, pp. 501~514
7. 김홍섭, 오재용외 2명, 1992, "자동차 실내 소음 저감을 위한 다채널 능동소음제어에 관한 연구(I) : 컴퓨터 시뮬레이션", 자동차공학회지, Vol.14, No.5, pp.95~106.
8. 김홍섭, 오재용외 2명, 1993, "조화가진된 밀폐계 음장에서의 능동소음제어(I) : 컴퓨터 시뮬레이션", 대한기계학회 논문집, Vol.17, No.5, pp. 1054~1065