

〈논 문〉

# 단일 센서 방식의 적응 능동 소음제어

## Adaptive Active Noise Control of Single Sensor Method

김 영 달\* · 장 석 구\*

Young-Dal Kim and Suk-Goo Chang

(2000년 3월 8일 접수 ; 2000년 11월 20일 심사완료)

**Key Words** : Active Noise Control(능동소음제어), Adaptive Model(적응모델), Single Channel(단일채널)

### ABSTRACT

Active noise control is an approach to reduce the noise by utilizing a secondary noise source that destructively interferes with the unwanted noise. In general, active noise control systems rely on multiple sensors to measure the unwanted noise field and the effect of the cancellation. This paper develops an approach that utilizes a single sensor. The noise field is modeled as a stochastic process, and an adaptive algorithm is used to adaptively estimate the parameters of the process. Based on these parameter estimates, a canceling signal is generated. Oppenheim assumed that transfer function characteristics from the canceling source to the error sensor is only a propagation delay. This paper proposes a modified Oppenheim algorithm by considering transfer characteristics of speaker-path-sensor. This transfer characteristics is adaptively cancelled by the proposed adaptive modeling technique. Feasibility of the proposed method is proved by computer simulations with artificially generated random noises and sine wave noise. The details of the proposed architecture, and theoretical simulation of the noise cancellation system for three dimension enclosure are presented in the paper.

### 1. 서 론

고도로 발전하고 있는 산업사회에서 산업용 기기와 자동차 등에 의해 원하지 않는 소음이 발생되어 인간에게 소음공해를 주고 있어 이러한 환경을 탈피하고자 이를 차단하기 위하여 방음시설을 하거나 방음벽을 설치하고 있다. 그러나 이러한 수동적인 방법들은 500 Hz 이상인 고주파 소음일 경우는 가능하지만, 500 Hz 이하인 저주파 소음일 경우 이를 차단하기 위해서는 두꺼운 방음시설을 해야 하는 등 경제적 부담이 가중되기 때문에 능동 소음 제어(active noise control: ANC)라는 새로운 방식이 제안되었으며, 이를 실용화시키기 위해 세계적으로 많은 노력들을 하고 있다<sup>(1~3)</sup>.

그 후 1980년대에 덕트내의 소음제거에 이용하는 적응 ANC 방식이 Eriksson에 의해 제안되었다<sup>(4)</sup>. 그러나 이 경우 두 개 이상의 센서를 사용하는 일반적인 ANC 시스템은 스피커에서 입력 센서로 제거용 신호가 케환되어 성능이 저하된다는 것이다. 이런 문제를 해결하기 위해 소음 제거용 스피커의 배치를 이용하는 방법이나 적응 필터 설계시 케환의 영향을 고려하는 방법 등이 있다<sup>(4,5)</sup>. 그러나 이 경우 시스템만 더욱 복잡해지고 성능은 개선되지 않아 두 개 이상의 센서를 사용할 때 발생하는 문제를 단일 센서를 사용하여 해결한 새로운 ANC 시스템이 제안되었다<sup>(6,7)</sup>.

1991년 Graupe 등은 소음원과 제어음원 전체를 식별하여 제어음원의 케환을 따로 고려할 필요가 없도록 한 방식을 제안하였다<sup>(7)</sup>. Graupe 알고리즘은 단일 센서를 가지는 ANC 시스템으로 기존의 두 센서를 사용한 방식에 비해 알고리즘과 시스템 구성이 간단하고 소음 감쇠 성능도 뛰어나고 있다. 그러나 제어음원과 오차 센서 사이의 전파

\* 정회원, 대전산업대학교 전기공학과.

지연이 한 샘플 간격보다 클 경우 성능이 저하되어 실제 시스템 구성시 스피커와 센서를 매우 가까이 두어야 하는 단점이 있다. 1994년에 Oppenheim 등은 새로운 단일 센서 ANC 시스템을 제안하였는데, 이는 센서의 출력에서 입력 소음신호를 추출하고 스피커와 센서사이의 전파 지연을 보상하기 위해 입력 소음 필드의 예측값을 사용한 방식이다<sup>(6)</sup>. 그러나 스피커와 센서 사이의 전달 특성을 단순히 지연 성분만 있는 것으로 가정하였기 때문에 실제 시스템을 구성한다면 스피커와 센서의 전달 특성 때문에 소음 제거 성능이 저하된다.

한편 입력센서와 오차센서 하나씩만 존재는 이중 채널 시스템에는 두 센서사이에서 전파지연(propagation delay)이 발생하므로 오차센서로 소음을 예측할 수 있다는 장점은 있으나 입력센서에 2차 음원이 다시 입력되는 피드백 현상이 문제점으로 남고 있다<sup>(5,8,9)</sup>.

그러므로 이러한 다중 또는 이중채널 시스템들은 제어음원의 구성에 있어서 피드백 영향을 최소화하거나 적응필터를 설계할 때 피드백 효과를 이용하는 방법 등이 있다<sup>(2)</sup>.

본 연구에서는 다중 또는 이중 채널을 이용한 ANC 시스템의 장단점을 분석하여 단일 채널 시스템에 적응모델을 추가한 새로운 ANC 시스템을 제안하고자 하며, 본 연구에서 기본 모델로 이용한 참고문헌 (6)에서는 전달함수를 스피커-소음경로-센서사이에서 전파지연만을 고려한 것으로 참고문헌 (10)에 의하면 이는 음향장비의 전달특성으로 인하여 많은 소음제어 성능을 저하시킬 수 있다고 보고 있기 때문에 참고문헌 (6)의 모델에 스피커-소음경로-센서의 전달특성  $G(z)$ 을 재구성하여 새로운 모델을 제안하였다.

또한 다중 채널 시스템에서는 제어음원은 2차 소음원을 만드는데 이용되고 있으나, 단일 채널 시스템에서는 1차 소음과 2차 소음사이를 추정하는데 이용되며, 스피커와 센서사이의 전파지연에 대한 보상에서 소음의 예측된 값이 이용되고 있다.

예측 파라미터들을 적응적으로 추정하는 것은 AR (autoregressive) 시스템으로 소음을 모델링에 사용함으로써 시간에 따라 변하거나 변하지 않는 소음 모두를 소거하는데 이용할 수 있다<sup>(11-13)</sup>.

따라서 제안한 알고리즘에 랜덤신호 및 정현파 신호를 스피커를 통하여 출력시켜 제안된 ANC 시스템으로 적응적으로 추정하여 모의 실험을 통한 소음 감쇠 특성을 확인하고자 한다. 이상과 같은 모의 실험 결과들을 토대로 향후 현장에 적용하기 위한 보완적 연구내용으로 삼고자 한다.

## 2. 단일채널 능동 소음제어

이중 또는 다중 채널 ANC 시스템은 입력센서, 적응필터, 제어음원 및 오차센서 등으로 구성되어 있으며, 입력 센서는 오차센서와 임의의 거리만큼 떨어진 위치에서 원하지 않는 소음을 측정하는데 사용되며, 측정된 신호는 적응필터의 입력이 된다. 그러나 이러한 시스템은 스피커에서 발생된 제어음원이 입력센서로 다시 피이드백 되는 문제점을 가지고 있다.

그러나 단일 채널 ANC 시스템은 이러한 단점을 보완하게 되며, 센서는 1차 음원  $s(n)$ 과 제어음원  $c(n)$ 의 합인 센서의 출력  $m(n)$ 을 검출하며, 에너지를 최소화시키기 위하여 cancellation 알고리즘에 적용시켜 제어 스피커 입력  $r(n)$ 을 생성함으로써 이를 스피커를 통하여  $c(n)$ 을 Fig. 1과 같이 출력시키며, 이 시스템의 전체 구성도는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 전달함수  $G(z)$ 는  $r(n)$ 으로부터  $m(n)$ 까지의 스피커-소음경로-센서사이의 전체 전달특성 중에서 전파지연 성분만으로 가정하였기 때문에  $G(z) = z^{-\Delta}$ 로 된 시스템으로 고려할 수 있다.

여기서,  $m(n)$ 은  $s(n)$ ,  $c(n)$ , 및  $v(n)$ 의 합이므로  $G(z)$ 을 알 수 있다면  $r(n)$ 도 알 수 있는 값이 되므로 센서에서의 1차 소음원 추정치  $z(n) = s(n) + v(n)$ 을  $2m(n)$ 으로부터 얻을 수 있다.

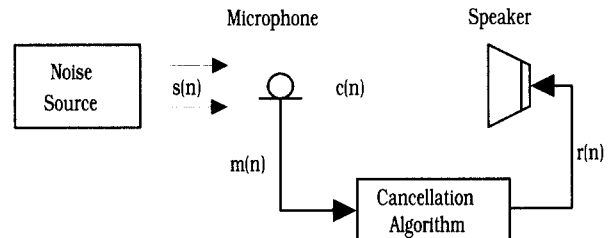


Fig. 1 Generic single-channel ANC system

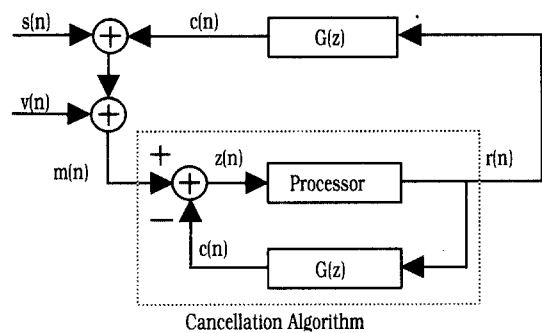


Fig. 2 Block diagram single-channel ANC system

$m(n)$ 의 잉여 오차신호를 최소화하기 위해  $r(n)$ 은 1차 음원 추정치  $z(n)$ 의 예측 값으로부터 추정되도록 하여야 함으로  $z(\tau), \{\tau=1, \dots, n\}$ 을 이용하여 최소 평균 자승오차(minimum mean square error : MMSE)를 예측할 수 있다. 즉,  $r(n)$ 은

$$r(n) = -E\{z(n+\Delta)|z(n), z(n-1), \dots, z(1)\} \quad (1)$$

이고,  $z(n) = s(n) + v(n)$ 이므로  $m(n)$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m(n) &= z(n) - r(n) \\ &= z(n) - E\{z(n+\Delta) | z(n), \\ &\quad z(n-1), \dots, z(1)\} \end{aligned} \quad (2)$$

Oppenheim은  $s(n)$ 의 MMSE를 구하기 위해 그 계수를 적응 알고리즘을 통해 추정하였으며, 추정된 계수는  $z(n)$ 의 예측 값을 알아내어 제어 스피커의 입력을 구하게 된다. 이것을 식으로 나타내면  $z(n)$ 과  $s(n)$ 은 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$z(n) = s(n) + v(n) \quad (3)$$

$$s(n) = \sum_{k=1}^P \alpha_k s(n-k) + u(n) \quad (4)$$

여기서, 입력 백색잡음  $u(n)$ 과  $v(n)$ 은 각각  $\sigma_u^2$ 와  $\sigma_v^2$ 의 평균 음향파워 즉, 분산이며,  $P$ 는 AR 모델 차수이다. 따라서 적응 알고리즘을 통해 시간  $n$  까지의 예측 값으로부터 구한  $s(n+\Delta)$ 의 MMSE의 추정치는  $r(n) = -\hat{s}(n+\Delta)$ 일 때 식 (1)에서  $\hat{s}(n+\Delta)$ 를 적응적으로 계산하여 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{s}(n+\Delta) = E\{s(n+\Delta)|z(1), z(2), \dots, z(n)\} \quad (5)$$

따라서, 파라미터  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p, \sigma_u^2, \sigma_v^2$ 을 정확하게 알 수 있다면, 칼만 필터 알고리즘을 사용하여 이 추정치를 구할 수 있다<sup>(6)</sup>. 칼만 필터 알고리즘에서 신호원 계수들의 추정 방정식은 다음과 같다.

$$\hat{\alpha}(n+1) = \hat{\alpha}(n) - \gamma_n (\mathbf{Q}_{21}(n) + \mathbf{Q}_{22}(n) \hat{\alpha}(n)) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_u^2(n+1) &= \hat{\sigma}_u^2(n) - \gamma_n \\ &\quad \left( \hat{\sigma}_u^2(n) - \frac{1-\lambda}{1-\lambda^n} (\mathbf{Q}_{21}(n) + \mathbf{Q}_{22}(n) \hat{\alpha}(n)) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

위 식에서,  $\mathbf{Q}_{ij}(n), i, j = 1, 2$ 는 반복적으로 계산하는 것이고, 음향파워는 가중치 평균값을 다음과 같이 추정하였다.

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_v^2(n+1) &= \hat{\sigma}_v^2(n) - \delta_n \left( \hat{\sigma}_v^2(n) - \frac{1-\eta}{1-\eta^n} \xi(n) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $\xi(n)$ 은  $v(n)$ 의 추정치  $\sigma_v^2$ 가  $E\{(z(n) - s(n))^2\}$ 임으로 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \xi(n) &= \eta (\xi(n-1) + (z^2(n) \\ &\quad - 2z(n)\hat{s}(n|n) + \hat{s}^2(n)) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (7)~(9)에서 나타낸  $\lambda$  및  $\eta$ 는 망각인자로서 항상 1과 0 사이의 값을 갖도록 하여야 하며,  $\gamma_n$ 와  $\delta_n$ 은 step size들로서 신호의 세기에 따라 그 크기가 결정된다.

따라서 식 (6)~(8)은 역행렬을 이용하지 않았기 때문에 계산이 간단하므로 유용하다고 볼 수 있으며, 이 식을 이용하여 소음원에 관한 계수들을 순차적으로 구할 수 있어 소음원의 계수들에 대한 정보 없이도 Oppenheim 알고리즘을 사용할 수 있을 것이다. 그러나 이 알고리즘은 스피커-센서 사이의 전파경로에 대한 전달특성을 단순히 전파지연만 있는 것으로 가정하였기 때문에 온라인 시스템으로 구성할 경우 스피커와 센서의 전달특성 때문에 소음제거 성능이 저하된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Oppenheim 구조에 스피커와 센서의 전달특성을 상쇄시키는 적응 모델을 추가하였고, 또한 적응 필터는 칼만 필터를 이용하였다.

### 3. 단일 센서 방식의 적응 능동 소음제어

Oppenheim 구조는 소음 전달경로에 전파지연만 존재하는 시스템으로만 가정하였으나 ANC 시스템의 성능은 음향경로의 전달함수뿐만 아니라 스피커와 센서의 전달특성으로 인하여 많은 영향을 받게된다<sup>(14)</sup>.

따라서 본 연구에서는 참고문헌 (10)에서 다루었던 음향 시스템의 동특성을 이용하여 소음제거 시스템을 스피커-소음경로-센서의 전달함수  $G(z)$ 을 재구성하여 새로운 모델을 제안하고자 한다. 즉, 음향장비인 스피커와 센서의 전달특성을 고려한 전달함수는  $G'(z)$ 로, 소음경로에서 나타나는 전파지연을  $Z^{-d}$ 로 각각 가정하여 다음 식과 같이 놓았다.

$$G(z) = G'(z) \cdot Z^{-d} \quad (10)$$

스피커-소음경로-센서의 경로에서 전달특성으로 인한 소음제거 성능의 저하를 막기 위하여 Oppenheim 구조인 Fig. 2에 FXLMS 구조로 구성된 적응 필터  $W(z)$ 을 직렬로 연결한 소음제어 시스템을 Fig. 3에 나타내었다. 또

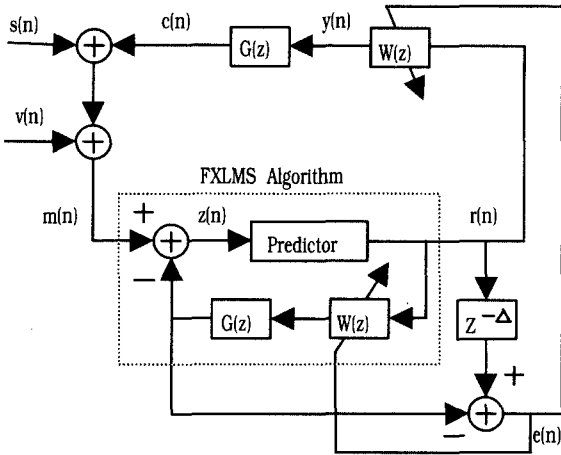


Fig. 3 Single-channel ANC system using adaptive model

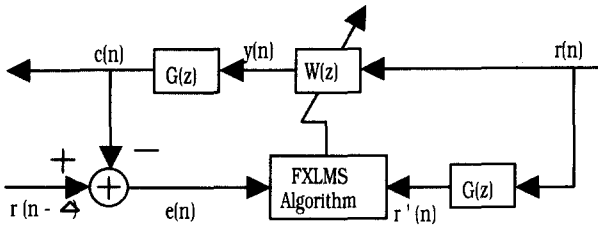


Fig. 4 Adaptive model using FXLMS algorithm

한 FXLMS 알고리즘을 이용한 것은 적응 필터의 출력이 가중치 계수들을 개선하는데 바로 이용되지 못하기 때문이며, 이 알고리즘을 적용한 적응 모델만을 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 적응 필터 출력  $y(n)$ 은 다음 식으로 주어진다.

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w(i) r(n-i) = \mathbf{W}^T(n) \mathbf{r}(n) \quad (11)$$

여기서, 가중치 벡터와 신호 벡터  $\mathbf{W}(n)$ 과  $\mathbf{r}(n)$ 은 다음과 같이 놓을 수 있다<sup>(15)</sup>.

$$\mathbf{W}(n) = (w(0), w(1), \dots, w(N-1))^T \quad (12)$$

$$\mathbf{r}(n) = (r(n), r(n-1), \dots, r(n-N+1))^T \quad (13)$$

또, N은 가중치의 수를 나타낸다. 따라서  $c(n)$ 은 다음과 같이 된다.

$$c(n) = \sum_{j=0}^{L-1} G_{1j} y(n-j) + \sum_{i=1}^P G_{2i} c(n-i) \quad (14)$$

여기서,  $G_{1j}$ 와  $G_{2i}$ 는 IIR 필터 구조를 갖는  $G(z)$ 의 부분 항들로 다음과 같으며, L과 P는  $G_1(z)$ ,  $G_2(z)$  계수의 차수이다.

$$G(z) = \frac{G_1(z)}{1 - G_2(z)} = \frac{\sum_{j=0}^{L-1} G_{1j} Z^{-j}}{1 - \sum_{i=1}^P G_{2i} Z^{-i}} \quad (15)$$

따라서  $c(n)$ 과  $e(n)$ 을 정리하여 나타내면 다음과 같다.

$$c(n) = \sum_{j=0}^{L-1} G_{1j} \left( \sum_{i=0}^{N-1} w(i) r(n-i-j) \right) + \sum_{i=1}^P G_{2i} c(n-i) \quad (16)$$

$$e(n) = r(n-\Delta) - c(n) \quad (17)$$

경사법(steepest descent method)을 이용하여  $\mathbf{W}(n)$ 을 적응시켜 정리하면 다음과 같이 된다<sup>(15)</sup>.

$$\begin{aligned} \hat{\nabla}(n) &= \frac{\partial e^2(n)}{\partial \mathbf{W}(n)} \\ &= 2 \cdot e(n) \cdot \frac{\partial e(n)}{\partial \mathbf{W}(n)} \\ &= 2 \cdot e(n) \cdot \frac{\partial}{\partial \mathbf{W}(n)} \cdot \{r(n-\Delta) - c(n)\} \\ &= -2 \cdot e(n) \cdot \mathbf{G}_1 \cdot \mathbf{r}(n) \end{aligned} \quad (18)$$

여기서,  $\mathbf{G}_1$ 은  $G_1(z)$ 을 벡터로 표현한 것으로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{G}_1 = (G_{10} \ G_{11} \ G_{12} \ \dots \ G_{1L-1}) \quad (19)$$

그러나  $\mathbf{G}_1 \cdot \mathbf{r}(n)$ 은 적응 필터 입력  $r(n)$ 이  $G(z)$ 을 거쳐 나온 출력 값 중에서 입력과 관련된 항이므로 식 (18)을 이용하면 가중치 벡터는 다음 식으로 적응된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{W}(n+1) &= \mathbf{W}(n) + \mu \{-\hat{\nabla}(n)\} \\ &= \mathbf{W}(n) + 2\mu \cdot e(n) \cdot \mathbf{G}_1 \cdot \mathbf{r}'(n) \end{aligned} \quad (20)$$

여기서,  $\mathbf{r}'(n)$ 은  $\mathbf{r}(n)$ 이 필터된 값으로 가중치를 적응시킬 때 이용된다.

#### 4. 모의 실험 및 결과검토

스피커-소음경로-센서의 전달함수  $G(z)$ 는 시간에 따라 변하지 않고 이미 정해진 전달함수이므로 참고문헌 (10)으로부터 구할 수 있다<sup>(7)</sup>. 이 전달함수는 각 계수를 추정함으로써 구해질 수 있기 때문에 랜덤 신호를 스피커로 출력시켜 이를 입력신호로 하고 센서의 입력신호를 출력으로 하여 MATLAB의 rarx.m 함수를 이용하는 방법과 Fig. 5와 같은 전달함수를 추정하는 시스템을 구성하여 실시간으로 전달함수를 추정하였다. 이때 시스템을 5차로 가

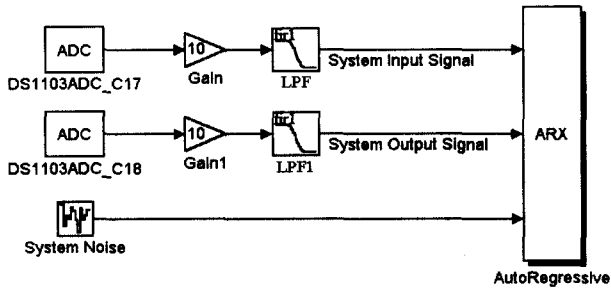


Fig. 5 Block diagram of estimate system for transfer function

정하였고, 추정 방법은 망각인자를 0.98로 하였으며, 기본적인 계수추정은 SLS(sequential least squares) 알고리즘을 이용하였다<sup>(16)</sup>. 따라서 실험실내의 3차원 공간에서 스피커-소음경로-센서의 음향경로에 대한 추정된 전달함수는 다음과 같다.

$$G(z) = \frac{0.1057z^{-1} - 0.0425z^{-2} + 0.0260z^{-3} - 0.0494z^{-4} - 0.0047z^{-5}}{1 - 1.6013z^{-1} + 0.9167z^{-2} - 0.3288z^{-3} + 0.0819z^{-4} + 0.0124z^{-5}} \quad (21)$$

소음 신호는 랜덤 신호와 정현파 신호를 발생시켜 모의 실험 프로그램인 MATLAB의 SIMULINK에서 이용하였다. 식 (21)과 같이 추정된 전달함수  $G(z)$ 를 사전 지식이 있는 것처럼 가정하여  $\hat{G}(z) = G(z)$ 이라 하였으며, 랜덤신호 및 정현파 신호와 각각의 소거된 신호는 똑같은 전달함수를 갖는 스피커-앰프를 통하여 전달되고 있는 것으로 하였다. 랜덤신호 및 정현파 신호는 Fig. 2의 시스템에서  $z(n)$ 과 같은 것이며, 소음제어의 목적은 센서의 출력  $m(n)$ 의 에너지를 최소화하기 위한 것으로써 식 (1)에 따라  $r(n)$ 은  $z(\tau)$ ,  $\tau = n - \Delta, \dots, 1$ 일 때 예측되는  $z(n)$ 에서 예측오차와 같도록  $m(n)$ 을 만들었다. 센서로 측정된 소음  $\sigma_v^2$ 의 분산을 추정하기 위해 센서의 출력을  $v(n)$ 으로 하기 위하여 ANC를 OFF시켰을 때 가장 조용한 곳에 센서를 위치시켰으며, 다음 식을 이용하여 추정하였다.

$$\sigma_v^2 \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v^2(n) \quad (22)$$

또한 소음 감쇠(attenuation)는 다음 식을 이용하여 계산하였다<sup>(6)</sup>.

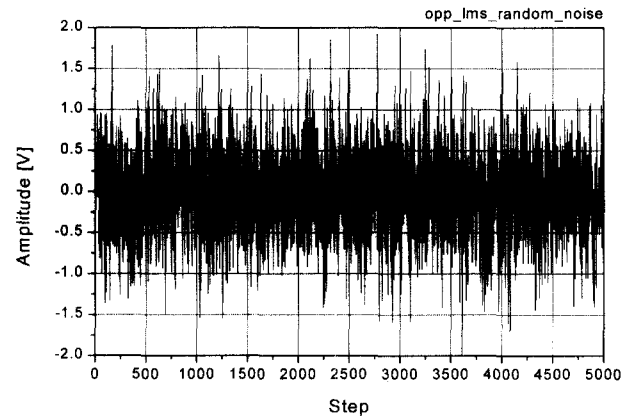
$$attenuation \text{ (dB)} = -10 \log_{10} \frac{E\{m^2(n)\}}{E\{z^2(n)\}} \quad (23)$$

여기서,  $E\{z^2(n)\}$ 는 원 소음 신호에 대한 평균 음향 파워이고,  $E\{m^2(n)\}$ 는 잉여 소음 신호의 평균 음향 파

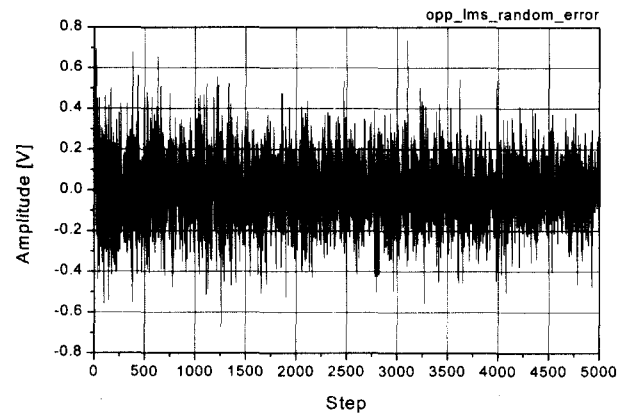
위로 잉여 소음 신호는 예측오차와 같다.

#### 4.1 각 소음을 예측기에 적용한 경우

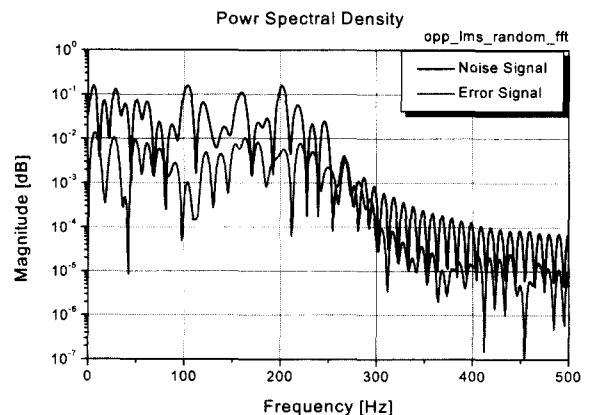
앞에서 살펴본 이론적인 배경을 토대로 랜덤 소음 및 정현파 소음을 이용하여 Oppenheim 모델인 Fig. 2에서 소음경로에 전파지연만 존재하는 것으로 가정하였을 경우 단일 주파수만을 제거하도록 하여 모의 실험 결과를 Fig.



(a) Random noise



(b) Error signal



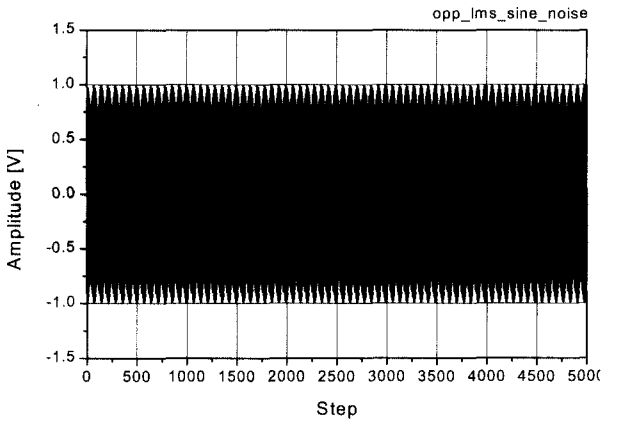
(c) Power spectrum of random noise and error signal

Fig. 6 Cancellation result of random noise

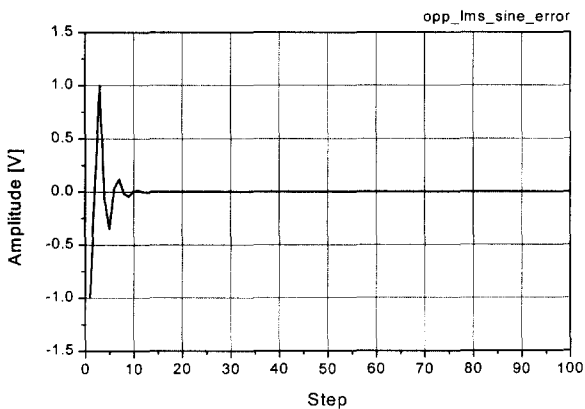
6과 7에 나타내었다.

4.2 각 소음을 적응모델에 적용한 경우

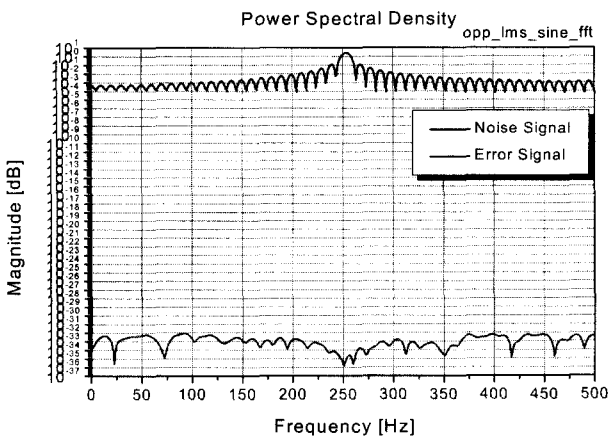
여기서는 랜덤 소음 및 정현파 소음을 이용하여 본 연구에서 제안한 적응모델을 이용한 Fig. 3에서 스피커-소음 경로-센서의 전달함수  $G(z)$ 를 식 (10)으로 고려한 경우의 모의 실험 결과를 Fig. 8과 9에 나타내었다.



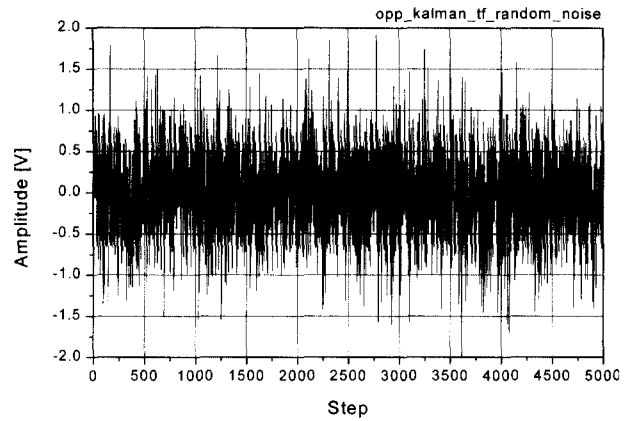
(a) Sine wave noise



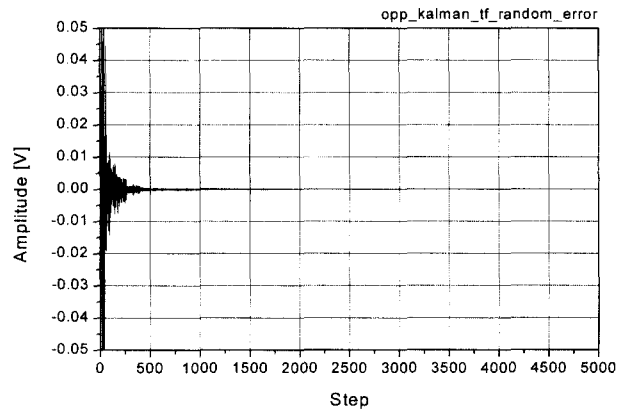
(b) Error signal



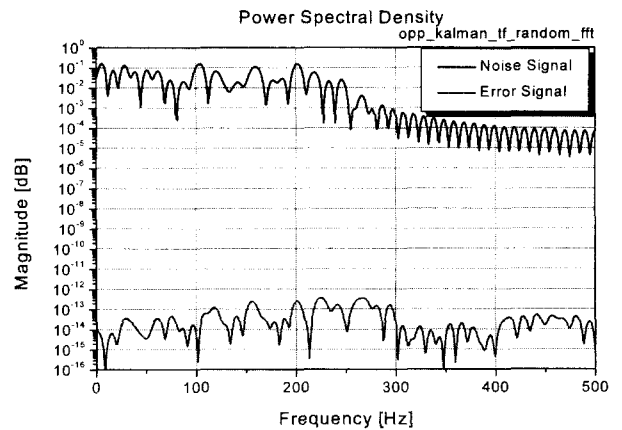
(c) Power spectrum of sine wave noise and error signal  
Fig. 7 Cancellation result of sine wave noise



(a) Random noise



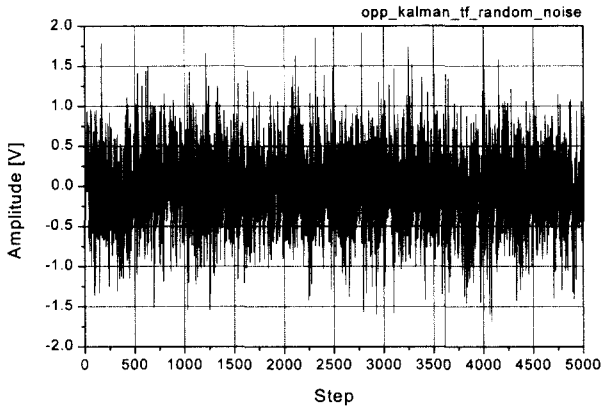
(b) Error signal



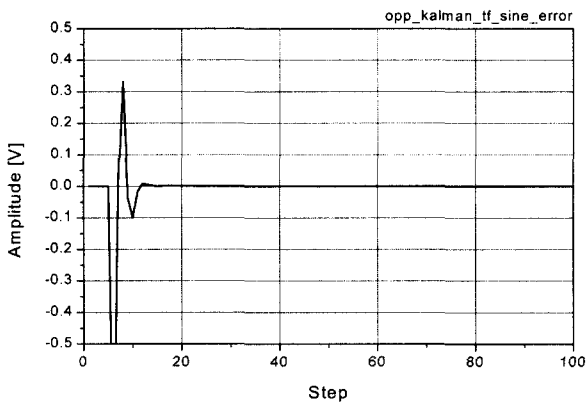
(c) Power spectrum of random noise and error signal  
Fig. 8 Cancellation result of random noise

4.3 모의 실험 결과 비교 및 검토

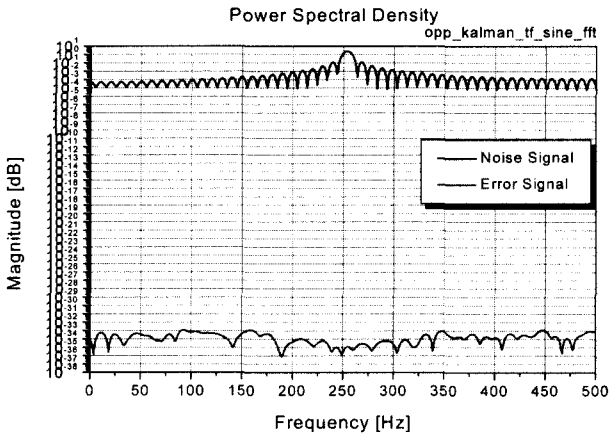
본 모의 실험에 이용한 소음원은 랜덤 신호 및 정현파 신호이며, 각각의 결과를 Table 1에 정리하여 나타내었다. 또한 본 연구에서 얻은 모의 실험 결과를 검증하기 위해 Table 2에 본 연구에 인용한 여러 개의 참고문헌 결과를



(a) Sine wave noise



(b) Error signal



(c) Power spectrum of sine wave noise and error signal

Fig. 9 Cancellation result of sine wave noise

나타내었으며, 3차원 폐공간만을 대상으로 한 참고문헌의 결과와 비교 검토한바 참고문헌의 결과는 9.12~45 dB사이의 값을 갖고 있으며, 그 중 참고문헌 (6)은 35~45 dB의 많은 량의 소음 감쇠 결과를 얻고 있으나 이는 특정 소음을 대상으로 무향실에서 실험한 것으로 매우 양호한 소음 감쇠를 이루고있다. 본 연구에서는 많은 소음 주파수들이

섞인 혼합 신호임에도 불구하고 18~43 dB 정도의 소음 감쇠로 보이나, 이는 본 연구에서 제안한 적응모델을 적용한 것만을 대상으로 했을 경우 28~43 dB로 우수하게 소음 감쇠가 이루어졌음이 입증되었다.

특히 본 연구에서 제안한 적응 모델을 이용한 알고리즘의 경우 cancellation을 하고자 하는 소음에 여러 형태의 잡음이 혼합된 경우 순수한 소음보다 더 많은 소음 감쇠 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

Table 1 Simulation result of the respective algorithm

구분	조건	ANC Result
Fig. 6	예측기 이용	18 dB
Fig. 7	예측기이용	25 dB
Fig. 8	적응모델이용	43 dB
Fig. 9	적응모델이용	28 dB

Table 2 Simulation results for references

Ref. No.	환경	ANC Result
17	3차원 폐공간	500 Hz 이하 : 9.12 dB
18	3차원 폐공간	30 dB
9	3차원 폐공간	30 dB
5	3차원 폐공간	15 dB
6	3차원 폐공간	· Helicopter : 45 dB · 프로펠러비행기: 40 dB · Jet Airplane : 35 dB

## 5. 결 론

음향 시스템의 동특성을 토대로 각종 소음의 데이터를 이용하여 소음제어를 한 결과 능동 소음제어에서 두 센서를 사용하면 소음제거용 신호가 입력센서로 귀환 되어 소음 제거성능을 저하시키기 때문에 Oppenheim은 단일센서를 이용한 능동소음제어 알고리즘을 제안하였다. 그러나 이 알고리즘은 스피커와 센서의 간격을 매우 가까이 두어야 하는 단점이 있기 때문에 스피커와 센서의 위치를 가까이 해야하는 헤드폰 등에 한정적으로밖에 사용할 수 없었다. 또한 이 알고리즘은 스피커와 센서사이의 소음경로에서만 전파지연이 있는 것으로 가정하였기 때문에 하드웨어로 구현할 때 스피커와 센서의 전달특성으로 인해 소음 감쇠 성능이 현저히 저하될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 적응 알고리즘으로 사용하는 LMS 알고리즘 대신에 칼만 필터를 이용함으로써 소음신호를 예측할 수 있고, 실제 상황에 맞도록 스피커-소음전달경로-센서로 이루어지는 전달특성을 모두 고려하는 적응 모델을 이용한 단일 센서

방식의 적응 능동 소음제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘을 이용해 스피커-소음경로-센서의 전달특성이 안정한 경우 단일 소음원과 다중 소음원에 대하여 모의 실험을 함으로써 18~43 dB의 매우 우수한 소음 감쇠 성능을 보였다.

특히 본 연구에서 제안한 적응 모델을 이용한 알고리즘의 경우 cancellation을 하고자 하는 소음에 여러 형태의 잡음이 혼합된 경우 순수한 소음보다 더 많은 소음 감쇠 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이상의 결과들을 볼 때 본 연구에서 제안한 알고리즘은 매우 유용함을 확인하였으며, 인용한 참고문헌들의 결과들과 비교한 경우 우수한 소음 감쇠 성능을 보임으로써 본 연구가 매우 높은 실용가능성을 가지고 있음을 타진할 수 있었다.

차후 본 연구의 결과는 발전소, 변전소 및 공장 등에서 사용하는 전기기계 및 회전기계에서 발생하는 소음이 문제가 되는 장소의 작업환경을 획기적으로 개선할 수 있리라 사료되며, 향후 연구 과제로는 제어 스피커와 오차 센서의 위치에 따른 제어효과를 분석하고, 이에 적절한 제어 알고리즘을 제안하여 현장에 적용하고자 한다.

### 참고 문헌

(1) Chaplin, G. B., 1984, "Method and Apparatus for Canceling Vibration." U.S. Patent No. 4 489 441 Dec. 18.  
 (2) Eriksson, L. J. Allie, M. C. and Bremigan, C. D., 1988, "I Active Noise Control using Adaptive Digital Signal Processing," in Proc. ICASSP(New York), pp. 2594~2597.  
 (3) Warnaka, G. E. Poole, L. and Tichy, J., "Active Attenuator, 1984," US Patent 4 473. 906. Sept. 25.  
 (4) Eriksson, L. J. et. al., 1987, "The Selection and Application of an IIR Adaptive Filter for use in Active Sound Attenuation", IEEE Trans. Acoust. Speech, and Signal Processing, Vol. ASSP-35, No.6, pp. 433~436.  
 (5) Eriksson, L. J. and Allie, M. C. 1989, "Use of Random Noise for On-line Transducer Modeling in an Adaptive Active Attenuation System", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 85, No. 2, pp. 797~802.  
 (6) Oppenheim, A., V. Zangi, K. C. and Gaupe, D., 1994, "Single-Sensor Active Noise Cancellation", IEEE Transactions on Speech and Processing, Vol. 2, No. 2, pp. 285~290.  
 (7) Graupe, D., Efron, A. J., 1991, "A Output-Whitening Approach to Adaptive Active Noise Cancellation", IEEE Trans. on Circuit and Systems,

Vol.38, No.11, pp. 1306~1313.

(8) Feintuch, P. L., Bershad, N. J. and Lo, A. K., 1993, "A Frequency Domain Model for "Filtered" LMS Algorithm-Stability Analysis, Design, and Elimination of the Training Mode-", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 41, No. 4, pp. 1518~1531.  
 (9) Morgan, D. R. and Thi, J. C., 1995, "A Delayless Subband Adaptive Filter Architecture", IEEE Trans. on Signal Proc., Vol. 43, No. 8, pp. 1819~1830.  
 (10) 김영달, 정창경, 심재명, 1999, "변압기 소음제어를 위한 음향 시스템의 동특성 해석 및 전달함수 추정", 한국조명·전기설비학회, Vol. 13, No. 3.  
 (11) Shoureshi, R., Brackney, L., Kubota, N. and Batta, G., 1993, "A Modern Control Approach to Active Noise Control", Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control, Vol. 115, pp. 673~678.  
 (12) Nakamura, M., Sasaki, M., F. Fujisawa, Yamada Y. and Shibata, K., 1997, "Active Control of Periodic Noise with High-Order Harmonic Frequencies (Control Performance Improvement using a Spectrum-Shaping Method)", Trans. of The Japan Society of Mechanical Eng., Vol. 63, No. 613, pp. 3145~3152.  
 (13) T. Hayashi, A. Enamito., and Suzuki, S., 1995, "A Study on Active Noise Control in 3-Dimensional Space(Active Acoustic Power Control using Acoustic Nodal Points)", Trans. of The Japan Society of Mechanical Eng., Vol.61, No.586, pp. 2402~2407.  
 (14) Suzuki, S. and Hayashi, T., 1994, "Adaptive Active Noise Control System with Howling Canceler (2-Microphone Transfer Function Ratio System)", Trans. of The Japan Society of Mechanical Eng., Vol.60, No.569, pp. 169~174.  
 (15) Sen M. Kuo, and Dennis R. Morgan, 1996, "Active Noise Control Systems", John Wiley & Sons.  
 (16) Graupe, D., 1984, "Time Series Analysis, Identification and Adaptive filtering", 2nd Ed. Malabar, Florida, Krieger Publishing Co..  
 (17) Efron, A. J. and Han, L. C., 1994, "Wide-area Adaptive Active Noise Cancellation", IEEE Trans. on Circuits and System-II: Analog and Digital Proc., Vol. 41, No. 6, pp. 405~409.  
 (18) Yamaoka, T. Kojima, E., and Shinada, M., 1996, "Development of Wide-Band Active Noise Control System for One-Dimensional Acoustic Duct", Trans. of The Japan Society of Mechanical Eng., Vol. 62, No. 596, pp. 1403~1411.