

능동 적응 소음 제어기의 실시간 구현

이종필 장영수 서진현
서울대학교 공과대학 전기공학과

정찬수
송실대학교 공과대학 전기공학과

Real-Time Impletation of Active Adaptive Noise Controller

J.P. Lee Y.S. Jang J.H. Seo
Dept. of Elec. Eng. Seoul Nat. Univ.

C.S. Jeong
Dept. of Elec. Eng. Soongsil Univ.

ABSTRACT

Real-time implementations of active noise controller are proposed and tested. For compensation of time delay of feed-back path, the n-step ahead prediction is applied. And predicting source noise and reflection noise respectively, reflection noise can be cancelled. For real-time processing, the DSP56001(Digital Signal Processor) is used. Experimental results show that the proposed controller is stable and of good performance.

I. 서론

산업 및 경제의 발달에 따라 환경문제에 대한 관심이 날로 증대하고 있으며 특히, 소음 등 공해에 대한 관심의 증대로 이에 대한 연구가 매우 활발하게 이루어지고 있다. 소음에 대한 연구는 소음원(noise source)으로부터 소음을 어떻게 하면 적게 방출할 수 있는가 하는 방법에 대한 연구와 흡음제 및 소음 방지에 대한 연구 등 기계, 건축, 재료공학적인 연구와 소음 제어 등 전기·전자적인 연구로 분류할 수 있다.

특히, 2차 음원(source)를 이용한 능동 소음 제어에 관한 연구는 70년대 이후 미국, 일본, 유럽 등지에서 활발히 이루어지고 있는데 저주파의 소음을 감쇠시키는데 있어서 종래의 수동적 방법보다 탁월한 효과를 보여주고 있다.

80년대에 들어와 덕트(duct)내에서의 소음 제거, 자동차 및 항공기 내에서의 능동 소음 제어 등에 관한 연구가 일본을 비롯한 각국에서 활발히 연구되고 있다. 우리나라에서도 보다 나은 작업환경을 원하는 근로자들의 욕구 증대, 한계에 이른 자동차 산업의 타개를 위한 고급화의 필요성, 항공기 산업에의 본격적인 참여를 위한 프로펠러 소음제거의 필요성 등으로 인해 능동소음제어에 대한 연구가 필요하게 되었다.

능동소음제어의 기본적인 아이디어는 1차 소음원으로부터 발생한 소음을 마이크로 감지하여 위상을 180도 바꾸어 다시 스피커를 통해 내보내서 소음을 상쇄시키는 것이다. 이때의 문제점은 2차 음원에서 발생한 2차음과 반사음이 다시 마이크로를 통해 귀환됨으로써 생기는 안정도의 파괴 문제와 적응필터의 구성 문제이다.

지금까지의 능동 소음 제어에 관한 연구는 개루프 제어(open loop control)가 주를 이루고 있는데, 좋은 효과를 얻기 위해서는 모든 제어시스템의 요소들이 위상 지연이 거의 0 이어야 하고 (nearly zero phase delay) 제어되지 않는 시스템의 파라미터 (uncontrolled system parameter)가 거의 상수여야 하나, 실제로는 그렇지 않은 경우가 많으므로 소음제어기의 성능을 떨어뜨리게 된다. 이를 해결하기 위하여 적응 소음 제어 (adaptive noise control) 기법을 이용한 능동 적응 소음 제어가 연구되었다.

본 논문에서는 귀환경로의 시간지연을 보상하는 방법으로 지연된 시간을 고려한 선행예측을 사용하는 적응 필터를 이용하고, 2차음의 귀환으로 인한 안정도의 파괴 문제는 귀환되는 신호를 예측에서 제외시키는 방법으로 해결하였다. 반사되어 오는 소음의 제거와 잘못된 예측에서 오는 제어기의 발산을 방지하기 위하여, 2 개의 마이크로를 이용 소음원에서 발생하는 소음과 반사 소음을 분리 예측하는 제어기를 설계하였다.

실제의 제어기 구성에 문제가 되는 실시간 처리 문제는 연산속도가 매우 빠른 신호처리기(DSP56001)를 이용하여 안정도가 보장되고 소음 제거 능력이 뛰어난 능동 소음 제어기를 구현하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 적응 능동 소음 제어의 개요를 설명하고, III장에서 능동 소음 제어의 문제점들을 살펴보았다. IV장에서는 위의 문제점에 대한 해결방안을 제시하였으며, V장에서 능동 소음 제어기를 구현하고, 마지막으로 VI장에서 결론을 맺는다.

II. 능동 소음 제어

일반적으로 소음은 주기함수이므로

$$s(t) = b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (2.1)$$

와 같이 여러개의 정현파의 합으로 나타낼 수 있다.

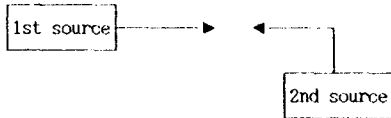


그림 2.1 시불변 소음의 제어
Fig. 2.1 control of time-invariant noise

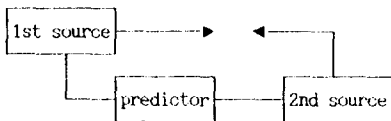


그림 2.2 시변 소음의 제어
Fig. 2.2 control of time-varying noise

식(2.1)에서 $b_0, A_n, \omega, \theta_n$ 등을 찾으면 소음 $s(t)$ 는 그림(2.1)과 같이 2차 음원에서 반주기의 위상차를 가지는 신호를 발생시켜 소음을 제거할 수 있으나 많은 경우 $b_0, A_n, \omega, \theta_n$ 등은 시간에 따라 변하므로 그림(2.1)과 같이 예측자(predictor)를 사용하여 다음신호를 예측하여야 한다.

$$s(t) = \sum_{n=1}^N a_n s(t-n) + e(t) \quad (2.2)$$

$$s'(t) = \sum_{n=1}^N a_n s(t-n) \quad (2.3)$$

$$s_c(t) = -s'(t) \quad (2.4)$$

이 때 소음 $s(t)$ 은 식(2.2)과 같이 AR 모델로 보고 적응 필터를 구성하여 계수를 찾고, 얻어진 계수로 식(2.3)과 같이 예측하여 제어음 $s_c(t)$ 를 발생시켜 소음을 상쇄한다.

III. 능동 소음 제어의 문제점

소음 제어의 실제응용에는 다음과 같은 문제점들이 있다.

- 실시간 처리 (real time processing)
- 궤환 경로의 시간뒤짐 (time delay)
- 반사소음 (reflection noise)

1. 실시간 처리

신호 처리이론에서 일반적으로 주파수가 f_0 인 신호의 처리에 필요한 샘플링주파수 (sampling frequency : f_s)는

$$10f_0 < f_s \quad (3.1.1)$$

로 알려져 있다.

샘플링주파수가 f_s 일 때 샘플링 시간은 그 역수 $1/f_s$ 이고 그림(2.2)의 예측자는 샘플링 시간안에 필요한 연산을 마쳐야 한다. 1 KHz 이내의 신호분석을 위한 샘플링주파수는 10 KHz이상이 되어야하며, 따라서 샘플링 시간은

$$1/10 \text{ KHz} = 10^{-4} \text{ sec} \quad (3.1.2)$$

가된다.

예측자는 샘플링 시간안에 예측을 마쳐야 하는데 일반적인 처리기 (AT,386등의 personal computer)로는 주어진 시간안에 연산을 하기가 거의 불가능하다.

2. 궤환 경로의 시간뒤짐

일반적으로 예측자는 바로 다음 스텝의 값을 예측한다.

그림(3.1)에서 알 수 있듯이 소음원(noise source)에서 발생된 신호는 마이크, 증폭기, A/D변환기를 통하여 예측자로 전해지며, 또 예측되어진 신호는 역순으로 스피커로 전달되는데 이 도중에 각 요소들 (마이크, 증폭기, 변환기, 스피커등)은 각각 시간뒤짐을 갖는다.

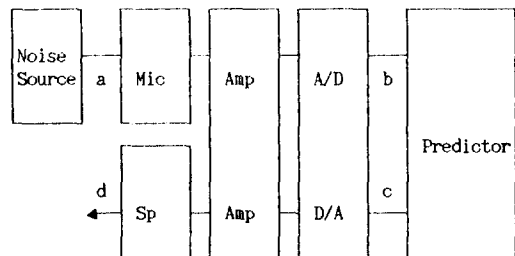


그림 3.1 소음 제어기의 시간지연
Fig. 3.1 time-delay of noise controller

시간 t_0 에 발생하는 소음은 d_{ab} (a,b 간의 delay time) 후에 예측자로 전달되고 예측신호는 d_{cd} (c,d간의 delay time) 후에 소리로 전달된다. 그러므로 예측자가 바로 다음 스텝의 신호를 정확하게 예측한다고 해도 위의 시간지연으로 인하여 소음원에서 나오는 신호와는 시간적으로 일치되지 않으므로 위상차이가 발생하게된다.

3. 반사소음

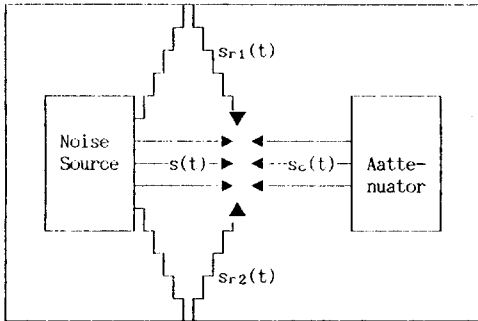


그림 3.2 반사파의 영향
Fig. 3.2 effect of reflection noise

그림(3.2)에서 보듯이 소음원에서 발생하는 신호 $s(t)$ 가 주위에 반사된 $s_{r1}(t), s_{r2}(t)$ 등이 발생된다.

반사파는 예측되지 못하므로 예측자에서 $s(t)$ 를 정확하게 예측하여 $s_c(t)$ 를 발생시켜도 반사파의 영향으로 완전한 소음감쇠를 기대할 수 없다.

IV. 능동 소음 제거의 문제점의 해결.

1. 실시간 처리

m 개의 정현파로 이루어진 신호의 분석은 $2m$ 의 AR 모델 차수를 갖는 필터가 필요하며, $2m$ 의 차수(order)를 갖는 필터(RLS 알고리즘 사용)는 곱하기와 나누기(mul/div)에만 $3 \times (2m)^2$ 의 연산이 필요하다.

일반적으로 80286이나 80386등의 처리기를 가진 퍼스날 컴퓨터(80286/80386 CPU based personal computer) 경우 곱셈 한 번을 약 100 클럭(clock) 동안에 처리하지만, 신호 처리전용 처리기(Digital Signal Processor ; DSP)는 하드웨어적으로 곱셈을 하여 단지 2~3 클럭만에 처리한다. 소프트웨어적으로 연산도중 다음 연산에 필요한 데이터를 미리 가져 오는 파이프라이닝(pipe-lining) 기법을 이용하여 짧은 시간에 많은 연산을 행함으로써, 비교적 고주파 성분의 소음까지도 실시간 처리가 가능하다. 이와같은 장점은 AR 차수를 높여 많은 신호를 처리할 수 있을 뿐 아니라 샘플링 시간을 더욱 짧게 하므로써 높은 주파수대의 소음 제거를 가능하게 한다.

2. 시간지연

그림 (3.1)에서 예측에 필요한 시간을 d_{bc} 라고 하면, 샘플링시간은 d_{bc} 와 같으므로

$$\text{스텝수} \approx \frac{d_{ab} + d_{bc} + d_{cd}}{d_{bc}} \quad (4.2.1)$$

가 된다. 즉, 아래의 그림과 같이

- $(t_0 + d_{ab})$ 시간에 소음원에서 $s(t_0 + d_{ab})$ 신호가 나올 때
- 예측자에 $s(t_0)$ 신호가 전달되고
- d_{bc} 시간동안 예측자는 $s(t_0 + d_{ab} + d_{bc} + d_{cd})$ 신호를 예측하며
- $(d_{bc} + d_{cd})$ 시간후에, 소음원에서 $s(t_0 + d_{ab} + d_{bc} + d_{cd})$ 신호가 발생될 때
- 스피커는 예측자에서 예측된 반대신호를 발생.

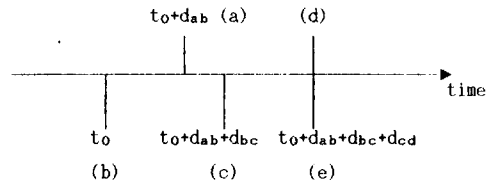


그림 4.1 n 스텝 선행 예측
Fig. 4.1 n-step ahead prediction

이 것은 예측자가 바로 다음 스텝을 예측하는 대신 식 (4.1)로 주어지는 스텝 만큼의 앞을 예측해야 하므로, RLS 알고리즘을 이용하여 n스텝 앞을 선행 예측(n-step ahead prediction) 하여야하는데, 흐름도(flowchart)는 다음과 같다.

필터 차수 ; N
선행 스텝수 ; n

- $N+n$ 개의 데이터를 읽는다
- (1)-(N)의 데이터로 회귀벡터(regression vector) Φ_1 을 구성한다.
- $(n+1)-(n+N)$ 의 데이터로 회귀벡터 Φ_2 를 구성한다.
- 계수벡터 Θ 를 Φ_1 에 곱하여 $s'(n+N)$ 을 예측한다.
- $s(n+N) - s'(n+N) = \text{error}$ 를 구한다.
- 위에서 구한 error로 Θ 를 갱신(update)한다.
- 갱신된 Θ 에 Φ_2 를 곱하여 $s'(2n+N)$ 을 예측한다.
- 새로운 신호 $s(n+N+1)$ 을 읽고 Φ_1, Φ_2 를 갱신한다.
- Go to ④

3. 반사소음

반사음의 영향은 음향공학등을 이용하여 제한된 공간의 반사특성을 미리 알아내 제어하거나, 반사음까지도 예측하여 제어하는 필터를 구성하여야 한다.

(1) 소음신호만을 고려한 제어기.

그림(4.3.1)과 같이 소음신호의 측정은 지향성 마이크를 사용하며, 마이크는 소음원에 밀착시켜 배치한다. 이 때 마이크를 통하여 들어오는 신호는 거의 모두 소음원에서 발생하는 신호이며 예측자는 이것으로 다음 신호를 예측하여 제어음을 발생한다.

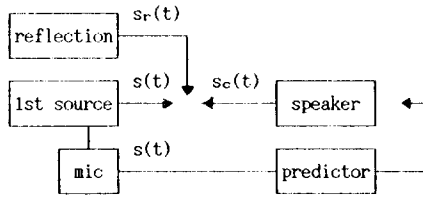


그림 4.3.1 소음 신호만을 이용한 제어
Fig. 4.3.1 control using noise signal only

이 방법은 계수의 수렴이 빠르고 2차음원의 신호가 마이크를 통해 귀환되지 않으므로 안정하나, 제어음은 소음원만을 대상으로 제어하므로 공간상에서 반사되는 반사음을 상쇠할 수 없어서 완전한 소음감쇠를 기대하기가 어렵다.

(2) 반사음을 고려한 제어기.

그림 (4.3.2) 와 같이 소음신호의 측정은 무지향성 마이크를 사용하며, 마이크는 소음원과 소음제어기의 중간에 위치하도록 배치한다.

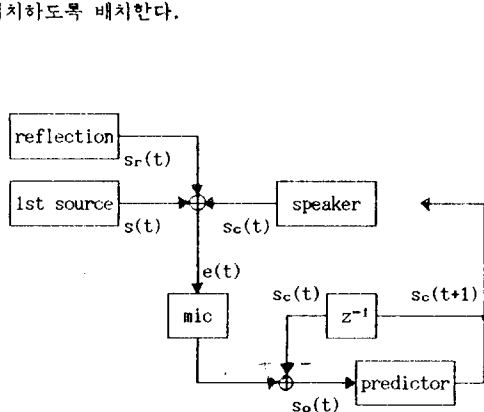


그림 4.3.2 오차신호를 이용한 제어
Fig. 4.3.2 control using error signal

오차신호 $e(t)$ 는 식(5.3.1)과 같이 소음신호, 반사신호, 제어신호의 합이 된다. 2차 음원으로부터의 귀환에 의한 안정도의 파괴 방지를 위해, 제어 대상 신호 $s_0(t)$ 는 식 (5.3.2)와 같이 오차신호 $e(t)$ 에서 예측자가 가지고 있는 제어신호 $s_c(t)$ 를 빼서 얻는다.

$$e(t) = s(t) + s_r(t) + s_c(t) \quad (5.3.1)$$

$$\begin{aligned} s_0(t) &= e(t) - s_c(t) \\ &= s(t) + s_r(t) \end{aligned} \quad (5.3.2)$$

이 때, 반사 신호 $s_r(t)$ 는

$$s_r(t) = s_{r1}(t) + s_{r2}(t) + \dots \quad (5.3.3)$$

이며, 각각의 반사신호는 소음원에서 발생한 $s(t)$ 와 각각 다른 위상차를 갖게된다.

$$\begin{aligned} s_{r1}(t) &= s(t-t_1) \\ s_{r2}(t) &= s(t-t_2) \\ &\vdots \end{aligned} \quad (5.3.4)$$

소음신호 $s(t)$ 가 m 개의 정현파로 이루어 졌다고할 때 $2m$ 의 차수를 가지는 적응 필터로 소음신호는 예측할 수 있으나, 반사신호와 더해진 $s_0(t)$ 는 $2m$ 의 필터로는 예측할 수 없다. 실제로 그림(5.3.2)과 같이 제어기는 발산하게 되는데 이것을 방지하기 위해 필터의 차수를 무리하게 증가시키면 샘플링 시간안에 계산을 마칠 수 없게되어 제어기는 소음제어의 기능을 잃고 만다.

(3) 소음신호와 반사신호의 분리예측을 이용한 소음제어기

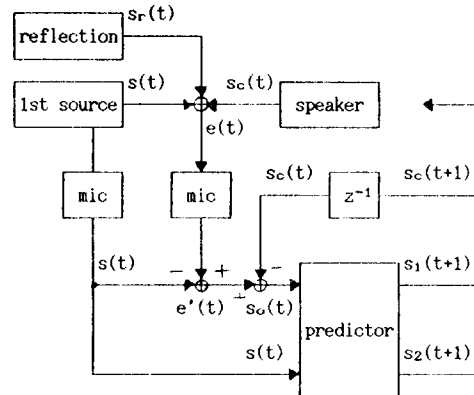


그림 4.3.3 분리된 오차신호를 이용한 제어
Fig 4.3.3 control using separated error signal

(2)에서 제기된 문제의 해결을 위해 그림 (4.3.3)과 같이 소음신호와 오차신호를 분리 예측하는 방법을 살펴보자. 예측자는 오차신호에서 얻어진 $s_o(t)$ 와 소음원에서 직접 측정된 $s(t)$ 를 따로 예측한다.

$$e(t) = s(t) + s_r(t) + s_c(t) \quad (5.3.3)$$

$$e'(t) = e(t) - s(t) \\ = s_r(t) + s_c(t) \quad (5.3.4)$$

$$s_o(t) = e'(t) - s_c(t) \\ = s_r(t) \quad (5.3.5)$$

$s(t)$ 의 예측은 $2m$ 의 필터로 예측하며 $s_o(t)$ 는 적당한 차수를 선택하여 예측한다.

$$s_1(t) = \sum_{i=1}^{2m_0} a_i s_o(t-i) \quad (5.3.6)$$

$$s_2(t) = \sum_{j=1}^{2m} b_j s(t-j) \quad (5.3.7)$$

이 때, $s_o(t)$ 의 예측이 잘못되어 발산하게되면 예측자는 $s_1(t+1)$ 을 내지않고 $s_2(t+1)$ 만을 내주어 전체적인 제어기를 안정하게한다.

$$\text{if } s_1(t+1) > \alpha \\ s_c(t+1) = s_2(t+1)$$

이 제어 방법은 제어기의 안정도를 보장하면서 반사음의 영향도 고려함으로써 (1), (2)의 방법보다 훌륭한 결과를 얻을 수 있다.

V. 능동 소음제어기의 구현.

1. 실험 장치

실험장치는 그림(5.1)과 같으며 각각의 기구들은 다음과 같다.

(i) 소음원(noise source)

함수발생기(function generator)를 사용하여 정현파를 소음으로 이용한다.

(ii) A/D, D/A변환기

16비트의 해상도를 얻을 수 있으며 내부적으로 저대역 필터를 내장하고 있어서 anti-aliasing 필터와 복원필터(reconstruction filter)등이 따로 필요하지않다.

(56ADC16)

(iii) 처리기

신호처리전용 DSP56001 (10 MIPS)을 사용하여 24비트의 연산을 한다.

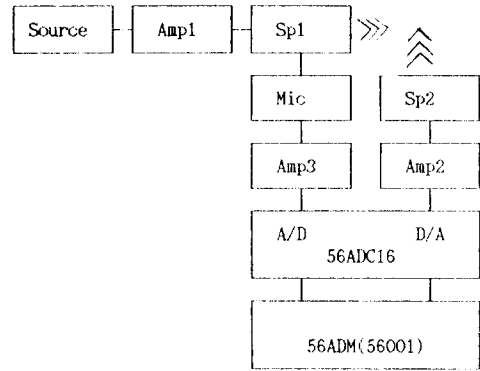


그림 5.1 실시간 능동 소음 제어기

Fig. 5.1 real-time active noise controller

실험에서 예측시간(샘플링시간)은 0.25 msec (d_{bc})이며 측정된 귀환경로의 시간지연 $d_{ab} + d_{bc} + d_{ca}$ 는 약 4 msec가 되어 필요한 선행 예측 스텝수는 $n=16$ 이 되며, 따라서 샘플링 주파수는

$$1 / 0.25 \times 10^{-3} = 4 \text{ KHz} \quad (5.1)$$

가 된다. 그러므로 약 400 Hz 내의 소음을 제어할 수 있다.

2. 측정

그림(5.2)와 같이 소음원(speaker1)과 2차음원(speaker2)으로부터 등거리에 마이크를 설치하여 측정하였다.

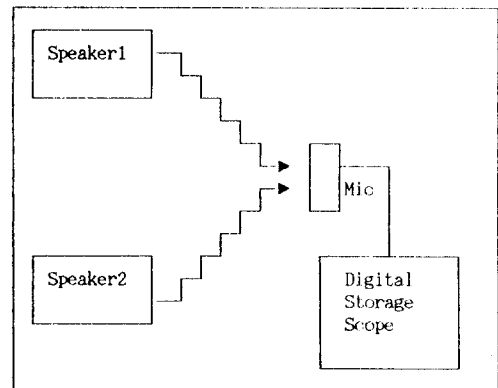


그림 5.2 제어된 소음의 측정

Fig. 5.2 detection of controlled noise

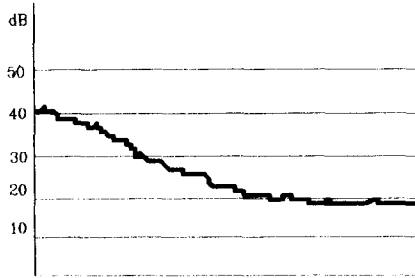


그림 5.3.1 소음 신호만을 이용한 제어
Fig. 5.3.1 control using noise signal

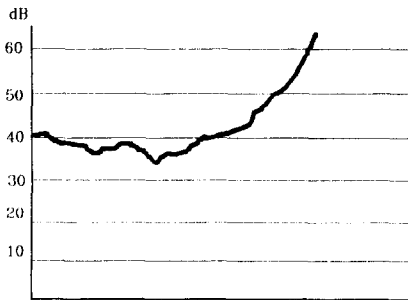


그림 5.3.2 오차음을 이용한 제어
Fig. 5.3.2 control using error signal

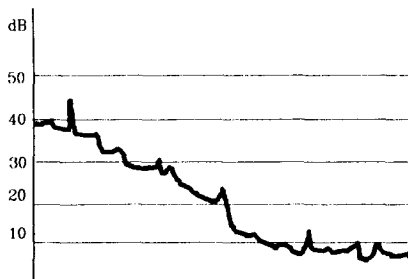


그림 5.3.3 분리된 오차신호를 이용한 제어
Fig. 5.3.3 control using separated error signal

본 논문에서는 능동 소음 제어 방법에서 발생하는 실시간처리, 궤환경로의 시간지연, 반사음등의 문제점을 신호처리 전용 처리기의 사용과 파이프라이닝(pipe-lining), 지연시간을 고려한 선행 예측(n-step ahead prediction), 소음과 반사음의 분리 예측의 방법으로 해결 하였다.

반사음의 영향을 고려하지 않은 실험결과 40 db의 소음을 20 db로 감쇠시킬 수 있었으나 분리 예측을 이용한 방법으로 10 db 이하로 줄일 수 있었다.

금후의 개선 과제로는 일정지점의 소음제어가 아니라 모든 공간에서 소음이 제어 될 수 있도록, 여러개의 마이크와 스피커를 이용한 다수의 제어기의 병렬 처리 연구가 이루어져야 하겠다.

참고 문헌

- 1) Thomas Alexander, Adaptive Signal Processing, Springer-Verlag, 1984.
- 2) Bernard Widrow and Samuel D. Stearns, Adaptive Signal Processing, Prntice-Hall, 1985.
- 3) Goodwin Sin, Adaptive Filtering Prediction and Control, Prentice-Hall, 1984.
- 4) Shankar Sastry and Mark Bodson, Adaptive Control, Prentice-Hall, 1989.
- 5) Kun Shan Lin, Digital Sigal Processing Application, Prentice-Hall, 1987.
- 6) Sangil Park, "Real-Time Implementation of New Adaptive Detection Structure using the DSP56001", Proc. of Int. Conf. on Systems Engineering, pp.281-284, Dayton, OH, Aug. 24-26, 1989.
- 7) Motorola Inc., DSP56000/DSP56001 Digital Signal Processor User's Manual, Rev.1, 1989.
- 8) J. C. Burgess, " Active Adaptive Sound Contol in a Duct ; A Computer Simulation", J of Acoustical Society of America, Vol. 70, pp 715-726, 1981.
- 9) S.J. Elliott, I.M. Stothers and P.A. Nelson, "A multiple Error LMS Algorithms and its Application to the Active Control of Sound and Vibration", IEEE, Tr. of ASSP, Vol. ASSP-35, pp 1424-1434, 1987.