

능동소음제어를 위한 IIR 구조 2차경로 추정 알고리즘

(IIR Structure Secondary Path Estimation Algorithms for Active Noise Control Systems)

최영훈* · 안동준 · 남현도**

(Young-Hun Choi · Dong-Jun Ahn · Hyun-Do Nam)

Abstract

In this paper, IIR structures are proposed to reduce the computation complexity of the secondary-pass estimation in active noise control(ANC) systems. However, there are stability problems of using IIR models to reduce the computation complexity in ANC systems. To overcome these problems, we propose a stabilizing procedure of recursive least mean squares (RLMS) algorithms for estimating the parameters of IIR models of the secondary path transfer functions.

The multichannel ANC systems are implemented by using the TMS320C6713 DSP board to test the performance of computation complexity and stability of the proposed methods. Comparing the IIR filters with the FIR filters, the IIR filters can reduce 50[%] of the computation and obtain similar noise reduction result.

Key Words : Active Noise Control, Secondary Path Estimation, IIR Filter, 3 Dimensional Enclosure

1. 서 론

소음은 500[Hz] 혹은 그 이하의 저주파 소음 및 그 이상의 고주파 소음으로 나눌 수 있는데, 인간의 수면을 방해하고 집중력을 감소시키며 짜증과 피로를 가중시킨다. 소음을 줄이기 위한 대책으로 여러 가지 연구가 진행되어 왔는데, 그 대표적인 방법이 수동적인 소음제어 방법과 능동적인 소음제어 방법이다.

수동적인 소음제어 방법은 흡음재나 방음재를 사용하여 소음을 차단하는 방법으로, 특히 500[Hz] 미만의 소음특성을 가지는 소음을 제거하기 위해서는 사용하기 어려운 문제점이 있다. 이를 해결하기 위한 방법이 소음을 소음으로써 해결하는 능동적인 방법인 능동소음제어(Active Noise Control) 기술이다[1]. 능동소음제어 기술의 기본적인 개념은 음의 간섭현상을 이용한 것으로서, 소음원과 크기는 같고 위상이 180[°] 위상차이가 나는 2차 음원을 발생시켜서 원하는 위치의 소음을 감쇄하는 방법이다[2].

능동소음제어 시스템은 제어용 필터와 적응제어 알고리즘 두 부분으로 이루어져 있다. 일반적으로 능동소음제어를 위한 제어 필터의 구조는 필터의

* 주저자 : 단국대학교 전자전기공학과 석사과정
** 교신저자 : 단국대학교 전자전기공학부 교수
Tel : 031-8005-3603, Fax : 031-8021-7219
E-mail : hdnam@dankook.ac.kr
접수일자 : 2011년 1월 11일
1차심사 : 2011년 1월 13일
심사완료 : 2011년 2월 1일

계수추정 알고리즘이 간단하고 안정한 FIR구조가 많이 사용되고 있으나 IIR 필터에 비해 비슷한 성능을 얻기 위해 필터의 차수가 커져 계산량이 많아지는 단점이 있다[2]. 필터계수 추정 적응 알고리즘으로는 FXLMS알고리즘이 주로 적용되어 왔다 [3-5].

본 논문에서는 3차원 폐공간에서 계산량과 안정성이 강화된 다중채널 능동소음제어 시스템을 구현하여 소음을 감쇄하고자 하였다. 능동소음제어를 하기 위해서는 먼저 2차 경로 추정을 해야 하는데, 2차경로 추정 시에 기존에 많이 사용하던 FIR 구조 대신에 계산량이 적고 안정성이 강화된 IIR 필터 구조를 사용하였다. 능동소음제어를 위한 적응필터로 FIR 필터를 사용한 경우와 IIR 필터를 사용한 경우를 실험을 수행하여 그 결과를 비교 분석하였다.

2. 적응 IIR 필터 알고리즘

2.1 IIR 구조 LMS 알고리즘

IIR LMS 알고리즘을 위한 간단한 블록 다이어그램은 아래의 그림 1과 같이 나타낼 수 있다[6]. 여기서 $x(n)$ 과 $y(n)$ 은 각각 기준입력값과 제어필터의 출력값이고, $d(n)$ 과 $e(n)$ 은 각각 제어를 하지 않을 때의 소음신호와 제어시의 오차값을 의미한다.

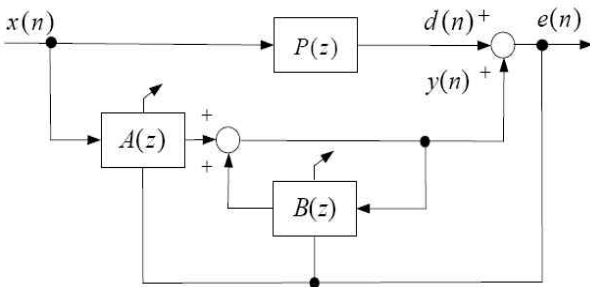


그림 1. IIR LMS 알고리즘 블록 다이어그램
Fig. 1. Block diagram of IIR LMS

$x(n)$ 과 $y(n)$ 을 입력과 출력으로 하는 전달함수 $H(z)$ 은

$$H(z) = \frac{A(z)}{1-B(z)} \quad (1)$$

이 되며, L, M차의 $A(z)$ 와 $B(z)$ 라 하면 IIR 필터의 계수 벡터 $A(n)$ 와 $B(n)$ 를

$$A(n) \equiv [a_0(n) a_1(n) \dots a_{L-1}(n)]^T \quad (2)$$

$$B(n) \equiv [b_1(n) b_2(n) \dots b_M(n)]^T \quad (3)$$

라고 한다면, 실제 시스템의 출력값은 다음과 같다.

$$y(n) = W^T(n)U(n) \quad (4)$$

$$W(n) \equiv \begin{bmatrix} A(n) \\ B(n) \end{bmatrix}, U(n) = \begin{bmatrix} X(n) \\ Y(n-1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$X(n) = [x(n) x(n-1) x(n-2) \dots x(n-l+1)] \quad (6)$$

$$Y(n-1) \equiv [y(n-1) y(n-2) \dots y(n-M)]^T \quad (7)$$

을 의미한다. 따라서 시스템의 출력값 $y(n)$ 은 $A(n)$ 과 $B(n)$ 의 함수라고 할 수 있다.

최소경사법을 이용하여 계수들의 업데이트식을 구하면

$$W(n+1) = W(n) + \mu U(n)e(n) \quad (8)$$

이다. 또한 위의 식을 다시 $A(n)$ 과 $B(n)$ 각각의 업데이트 식으로 나누어 쓸 수 있다.

$$A(n+1) = A(n) + \mu_a X(n)e(n) \quad (9)$$

$$B(n+1) = B(n) + \mu_b Y(n-1)e(n) \quad (10)$$

2.2 안정한 IIR 구조 LMS 알고리즘

IIR 구조 LMS 알고리즘은 차수에 비해 성능이 좋으나 제한제어 필터 계수가 완전히 수렴하기 전에 큰 오차가 발생한다. 이 경우 수렴계수의 크기에 따라서 극점이 소음제어 초기에 z 평면의 단위원 밖으로 빠

저나가서 발산하는 경우가 많으므로 초기에 제한제어 필터계수의 업데이트 식에서 극점의 위치를 단위 원의 중심 방향으로 조금 옮겨 주는 전처리 과정을 거침으로써 좀 더 안정된 IIR LMS 알고리즘을 적용할 수 있다[6]. 이를 위해 제한제어 전달함수 행렬 $[I_k - B(n)]$ 을 다음 식과 같이 정의한다. I_k 는 $k \times k$ 단위행렬이다.

$$F(k) = \begin{bmatrix} f_{11}(z) & f_{12}(z) & \dots & f_{1k}(z) \\ f_{21}(z) & \dots & \dots & f_{2k}(z) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ f_{k1}(z) & \dots & \dots & f_{kk}(z) \end{bmatrix} = I_k - kB(z) \quad (11)$$

$$f_{kk}(z) = 1 + kb_{kk,1}(n)z^{-1} \dots + k^L b_{kk,L}(n)z^{-L}, \quad 0 \leq k \leq 1 \quad (12)$$

제한제어 전달함수의 $f_{kk}(z)$ 의 근을 z_1 라 한다면 $f_{kk}(kz)$ 를 만족시키는 근은 kz_1 이 된다. 즉

$$f_{kk}(kz) = 1 + kb_{kk,1}(n)(kz)^{-1} \dots + k^L b_{kk,L}(n)(kz)^{-L}, \quad 0 \leq k \leq 1 \quad (13)$$

따라서 제한제어 전달함수의 $[1 - b_{kk}(z)]$ 을 전처리하여 극점을 k 배 만큼 원점방향으로 조정이 가능하다. 능동소음제어 초기에 오차가 커서 극점이 크게 변동되기 때문에 k 를 0에 가까운 값으로 정해 원점방향으로 당겨주며 정상상태에는 k 를 1로 하여 원래의 극점 값을 가진다. 즉

$$k(n+1) = \lambda k(n) + (1 - \lambda), \quad k(0) = 0, \quad 0 \leq k \leq 1 \quad (14)$$

식 (14)과 같이 k 를 가변시켜 가면서 IIR LMS 알고리즘의 안정도를 강화할 수 있다.

3. 3차원 폐공간에서의 능동소음제어

3.1 다중채널 IIR LMS 알고리즘 시스템

Single-reference/multiple-output($1 \times 2 \times 2$) IIR LMS 알고리즘은 아래의 그림 2와 같이 나타낼 수 있다[1].

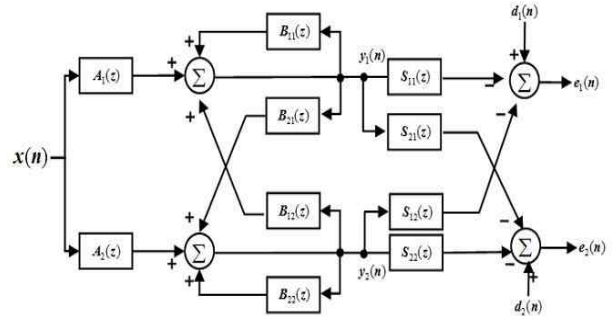


그림 2. $1 \times 2 \times 2$ IIR LMS 시스템 상세도
Fig. 2. Schematic diagram of $1 \times 2 \times 2$ IIR LMS systems

$$y_1(n) = A_1^T(n)X(n) + B_{11}^T(n)Y_1(n) + B_{12}^T(n)Y_2(n) \quad (15)$$

$$y_2(n) = A_2^T(n)X(n) + B_{21}^T(n)Y_1(n) + B_{22}^T(n)Y_2(n) \quad (16)$$

$$X(n) = [X(n) X(n-1) \dots X(n-L+1)]^T \quad (17)$$

$$Y_k(n) = [Y_k(n-1) Y_k(n-2) \dots Y_k(n-L)]^T \quad (18)$$

$k = 1, 2$

$$A_k(n) = [a_{k,0}(n) \ a_{k,1}(n) \ \dots \ a_{k,L-1}(n)]^T \quad (19)$$

$$B_{ki}(n) = [b_{ki,1}(n) \ b_{ki,2}(n) \ \dots \ b_{ki,L}(n)]^T \quad (20)$$

$i = 1, 2 \quad k = 1, 2$

두 개의 오차 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$e_1(n) = d_1(n) - s_{11}(n)*y_1(n) - s_{12}(n)*y_2(n) \quad (21)$$

$$e_2(n) = d_2(n) - s_{21}(n)*y_1(n) - s_{22}(n)*y_2(n) \quad (22)$$

Weight update를 위해서는 2차경로 전달함수 $\widehat{S}_{11}(n)$, $\widehat{S}_{12}(n)$, $\widehat{S}_{21}(n)$, $\widehat{S}_{22}(n)$ 의 추정이 필요한데, 본 연구에서는 IIR 구조를 사용하여 이를 추정하였다. 2차경로가 추정되면 적응필터는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$A_1(n+1) = A_1(n) + \mu[\widehat{S}_{11}(n)*X(n)]e_1(n) + \mu[\widehat{S}_{21}(n)*X(n)]e_2(n) \quad (23)$$

능동소음제어를 위한 IIR 구조 2차경로 추정 알고리즘

$$A_2(n+1) = A_2(n) + \mu[\widehat{S}_{12}(n)*X(n)]e_1(n) + \mu[\widehat{S}_{22}(n)*X(n)]e_2(n) \quad (24)$$

$$B_{11}(n+1) = B_{11}(n) + \mu[\widehat{S}_{11}(n)*Y_1(n)]e_1(n) + \mu[\widehat{S}_{21}(n)*Y_1(n)]e_2(n) \quad (25)$$

$$B_{21}(n+1) = B_{21}(n) + \mu[\widehat{S}_{12}(n)*Y_1(n)]e_1(n) + \mu[\widehat{S}_{22}(n)*Y_1(n)]e_2(n) \quad (26)$$

$$B_{12}(n+1) = B_{12}(n) + \mu[\widehat{S}_{11}(n)*Y_2(n)]e_1(n) + \mu[\widehat{S}_{21}(n)*Y_2(n)]e_2(n) \quad (27)$$

$$B_{22}(n+1) = B_{22}(n) + \mu[\widehat{S}_{12}(n)*Y_2(n)]e_1(n) + \mu[\widehat{S}_{22}(n)*Y_2(n)]e_2(n) \quad (28)$$

3.2 IIR 구조 2차경로 추정

본 논문에서 제안한 IIR 구조 2차경로 추정 알고리즘은 다음과 같다.

1. 제어 대상 신호 $x(n)$ 을 발생시킨다.
2. 오차 센서로부터 목표신호 $d(n)$ 을 얻는다.
3. 다음과 같은 적응 알고리즘에 적용한다.

(a) 출력을 계산한다.

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} \widehat{S}(n)x(n-l) \quad (29)$$

(b) 오차를 계산한다.

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (30)$$

(c) $e(n)$ 의 평균 값이 e_{ref} (오차 기준값)보다 작으면 추정을 중단한다. e_{ref} 는 반복 실험에서 얻은 좋은 특성을 보이는 실험치를 이용한다.

(d) LMS 알고리즘을 이용하여 계수를 갱신한다.

$$\widehat{S}(n+1) = \widehat{S}(n) + \mu x(n-l)e(n), \quad l=0, 1, \dots, L-1 \quad (31)$$

IIR 구조를 적용할 경우에는 $\widehat{S}(n)$ 대신에 분자, 분모 각각의 $A(n)$ 과 $B(n)$ 의 업데이트 식으로 나뉘어 쓸 수 있으며, IIR 구조 알고리즘의 안정성 향상을 위하여 2.2절에 제시한 안정도 향상 기법을 적용한다.

$$A(n+1) = A(n) + \mu_a X(n)e(n) \quad (32)$$

$$B(n+1) = B(n) + \mu_b Y(n-1)e(n) \quad (33)$$

(e) 적응 필터 $\widehat{S}(z)$ 가 최적 해에 수렴할 때까지 위의 과정을 반복한다.

(f) 반복추정 횟수가 미리 설정된 최대추정 횟수보다 크면 추정을 중단하여 시스템의 발산을 방지한다. 이때 최대추정 횟수는 실험에서 얻어진 시스템이 발산하지 않는 최대추정 횟수이다.

4. 실험 및 검토

본 논문에서는 3차원 폐공간에서의 다중채널 능동소음제어 시스템을 구현하여 실험을 수행하였다. 단 일채널에 대한 실험을 수행하여 2차 경로 오프라인 추정 시 FIR필터 구조와 IIR 필터 구조를 사용하였고, 적응필터도 각각에 경우에 대하여 FIR 필터와 IIR 필터를 사용한 경우를 비교 분석하였으며, 다중채널 IIR 시스템에 대해서도 같은 실험을 수행하였다. 소음원으로는 협대역 소음을 사용하였다.

시스템의 구성은 소음원과 2차 음원을 위한 스피커, 각 부분에서의 소음감쇄를 위한 마이크로폰, 스피커의 출력조정 및 마이크로폰의 감도조절을 위한 증폭기, 알고리즘을 처리할 DSP로 구성되어 있다.

그림 3은 능동소음제어 실험의 전체 시스템 구성도이며 그림 4는 실험에 사용된 IIR 구조의 FXLMS 알고리즘의 블록선도이다.

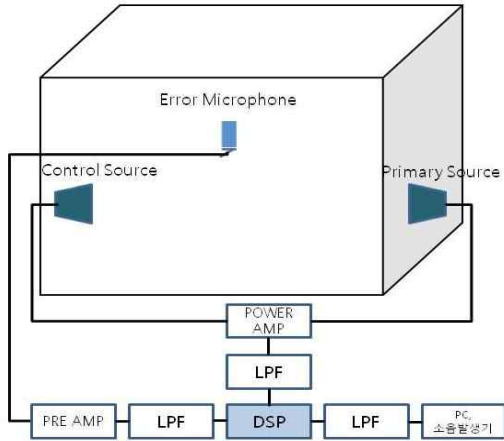


그림 3. 능동소음제어 실험 구성도
Fig. 3. Diagram of ANC systems for experiments

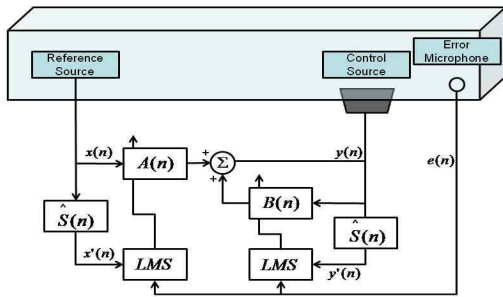


그림 4. IIR 구조 ANC 시스템의 블록선도
Fig. 4. Block diagram of IIR structure ANC systems

그림 5는 실험에 사용된 음향시스템과 DSP 보드의 사진이며, 그림 6은 실험용 3차원 폐공간에 마이크로 폰 및 제어용 스피커를 설치한 사진이다.

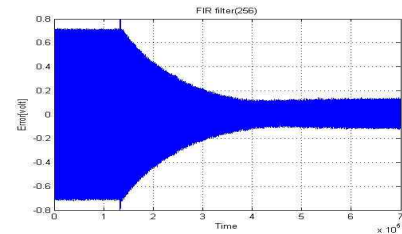


그림 5. 실험 장비의 구성
Fig. 5. Configuration of experimental apparatus

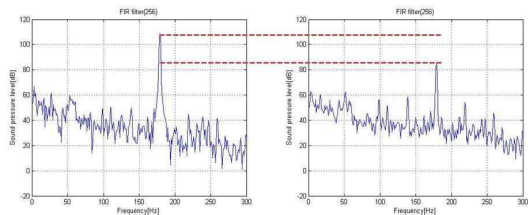


그림 6. 실험용 3차원 폐공간
Fig. 6. Three dimensional experimental enclosure

그림 7 (a)는 단일채널 FXLMS 적용한 경우이다. 2차 경로 오프라인 추정과 적응필터 모두 FIR 필터 구조를 사용하고 협대역 소음을 적용하였으며, 2차 경로 추정 시 256차, 적응필터 차수 256차를 사용한 경우의 소음제어 전후의 오차신호이고 (b)는 소음제어 전후의 FFT 신호이다.



(a) Error signals



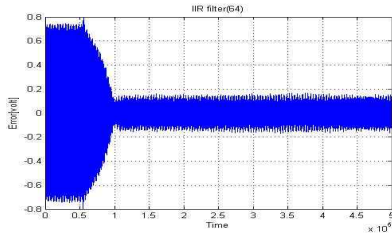
(b) FFT results

그림 7. FIR 필터 구조 사용 시 실험결과 (256차)
Fig. 7. Experimental results for FIR filter (256 order)

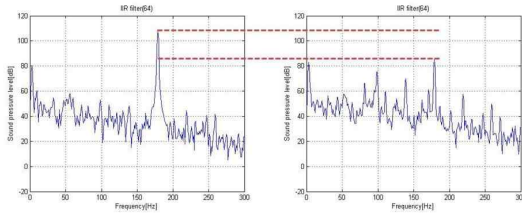
그림 8 (a)는 단일채널 FXLMS 알고리즘 적용한 경우이다. 2차 경로 추정과 적응필터 모두 IIR 필터 구조

능동소음제어를 위한 IIR 구조 2차경로 추정 알고리즘

를 사용하고 협대역 소음을 적용하였다. 2차 경로 오프라인 추정 시 64차, 적응필터는 64차를 사용한 경우의 소음제어 전후의 오차신호이고 (b)는 소음제어 전후의 FFT 신호이다.



(a) Error signals



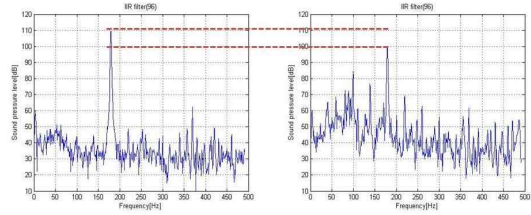
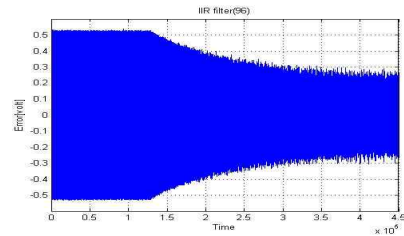
(b) FFT results

그림 8. IIR 필터 구조 사용 시 실험결과 (64차)
Fig. 8. Experimental results for IIR filters (64 order)

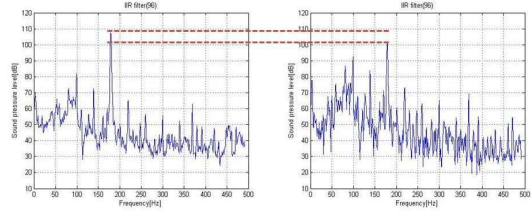
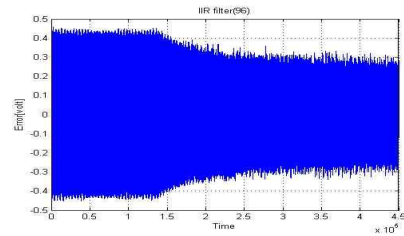
표 1. 폐공간에서의 능동소음제어 실험
Table 1. ANC experimental results in 3 dimensional enclosure

2차 경로 (차수)	적용필터 (차수)	채널	적용소음	소음감쇄 (dB)	비고
FIR(256)	FIR(256)	단일	협대역	≈15[dB]	그림 8
IIR(64)	IIR(64)	단일	협대역	≈14[dB]	그림 9
IIR(64)	IIR(64)	다중	협대역	≈5[dB]	그림 10

그림 9 (a)는 다중채널 FXLMS 알고리즘의 적용 하여 2차 경로 오프라인 추정과 적응필터 모두 IIR 필터 구조를 사용하고 협대역 소음을 적용한 경우이다. 2차 경로 추정 시 64차, 적응필터 64차를 사용한 경우 소음 제어 전후의 Mic1에서의 오차신호 및 FFT신호 이고, (b)는 Mic2 에서의 소음제어 전후의 오차신호 및 FFT 신호이다.



(a) Error signals and FFT at Mic1



(b) Error signals and FFT at Mic2

그림 9. 다중채널 IIR 필터구조의 오차신호 및 FFT 신호
Fig. 9. Experimental results for multi-channel IIR filters

표 1에서는 3차원 폐공간에서 능동소음제어 실험의 전체 환경과 결과를 정리하였다.

협대역 소음을 사용하여 단일채널에 대한 소음제어 실험을 하였을 시 2차 경로 오프라인 추정과 실제 제어를 하는데 있어 IIR 필터를 사용한 경우가 FIR 필터를 사용한 경우보다 계산량이 50[%] 정도 적음에도 불구하고 전체적으로 약 15[dB] 내외의 비슷한 소음 감쇄 효과를 볼 수 있었고, 다중채널에 대한 소음제어

실험 결과 평균적으로 4~5[dB] 이상의 소음감쇄 효과를 볼 수 있었다. 소음원과 에러 마이크로폰 사이의 이득조절 등 세밀한 조정을 수행한다면 더 우수한 소음감쇄 효과가 기대되며 계산량을 많이 필요로 하는 다중채널 능동소음제어를 하는데 적용이 가능할 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 2차 경로 추정 시에 FIR 구조 대신에 IIR 구조를 사용함으로써, 계산량을 줄이는 방법을 제안하였다.

단일채널에 대해 협대역 소음을 사용하여 2차 경로 오프라인 추정과 실제 제어를 하는데 있어 IIR 필터를 사용한 경우가 FIR 필터를 사용한 경우보다 계산량이 50[%] 정도인데도 불구하고 평균 15[dB]의 비슷한 소음감쇄 효과를 얻을 수 있었고, 이를 다중채널에 적용한 결과 평균 4~5[dB] 이상의 소음감쇄 효과를 얻을 수 있었다. 이는 계산량을 많이 필요로 하는 다중채널 능동소음제어를 하는데 있어 효과적일 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(과제 번호 09기술혁신 E05)에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] S. M. Kuo and D. Morgan, Active Noise Control System, John Wiley and Sons, Inc. New York, 1996.
- [2] S.J. Elliott and P.A. Nelson, "The active control of sound," Electronics and Communication Eng. Journal, pp.127-136, 1990.
- [3] 황 정현, 서 성대, 김 준래, 남 현도, "Adjoint LMS 알고리즘을 사용한 화력발전소 소음의 협대역 능동제어," 대한 전기학회 하계 학술대회 논문집, Vol. D, pp. 3197, 2000.

- [4] Zhang and N. Gong, "A Novel Variable Step Size LMS Algorithm Based on Neural Network," ISKE-2007 Proceedings, 2007.
- [5] S. Ringwelski and U. Gabbert, "Modeling and simulation of active noise and vibration control using a coupled FE-BE formulation," International Congress on Sound and Vibration, Daejeon, Korea, 2008.
- [6] 서 성대, 안 동준, 남 현도, "3차원 공간의 능동소음제어를 위한 안정화된 다중채널 적응 필터," 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, 대한전기학회, 2008.

◇ 저자소개 ◇



최영훈(崔榮勳)

1981년 4월 8일생. 2008년 한림대학교 전자공학과 졸업. 2011년 단국대학교 전기공학과 재학.

Tel : (031)8005-3617,

E-mail : rnesance@dankook.ac.kr



안동준(安東俊)

1964년 1월 2일생. 1986년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1995년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 아주자동차대학 자동차계열 부교수.

Tel : (041)939-3081

E-mail : ahndj@motor.ac.kr



남현도(南炫道)

1956년 3월 27일생. 1979년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991~1992년 Visiting fellow, ISVR, England. 1982년~현재 단국대학교 전기공학과 교수. 1988년~현재 단국대학교 부설 산업

기술 연구소장.

Tel : (031)8005-3603

E-mail : hdnam@dankook.ac.kr