

덕트 소음 제거를 위한 하이브리드형 능동 소음제어기의 설계.

홍석기, 안동준**, 남현도*
*단국대학교 전기공학과, **대천전문대학

Design of a Hybrid Active Noise Controller for Duct Noise

Suk-Ki Hong*, Dong-Jun Ahn** , Hyun-Do Nam*
* Dept. of Electrical Engineering, Dankook University
** Dae-Cheon Jr. College

Abstract This paper presents hybrid active noise control (HANC) systems which is based on the combination of feedforward and feedback ANC controllers. HANC systems use FIR filters and is based on primary noise regeneration principle and filtered-X LMS algorithms. HANC systems show better attenuation characteristics and residual spectrum. The order of adaptive filters used in HANC systems is lower than that of conventional feedforward and feedback ANC systems.

A proposed HANC algorithm was implemented using a Texas Instruments TMS320C31 digital signal processor for experimental verification.

1. 서 론

능동 소음제어(Active Noise Control, ANC) 기술은 1936년에 Paul Lueg가 미국 특허를 출원한 것에 그 기원을 둘 수 있으며, 미국과 영국 등 선진국에서는 1970년대 후반부터 [1-3] 우리 나라에서는 1980년대 후반부터 활발히 연구가 진행되고 있다. 특히 고속의 DSP 프로세서의 발달로 복잡한 능동 소음제어 알고리즘을 쉽고, 싸고, 작게 구현할 수 있게 되었다.

능동 소음제어 시스템은 제어기의 구조에 따라 제어 방식과 전향 제어 방식으로 분류할 수 있다[4-5]. 전향 제어 기법은 기준센서로부터 검출된 외부 기준 신호와 제어 대상 신호의 상관관계를 이용하여 비교적 넓은 영역에서의 소음감쇄가 가능한 광역 제어(global control) 방식이나, 제어음원에서 발생된 제어 음파가 소음원 방향으로 역전파되어 소음 신호를 검출하는 기준센서에 검출됨으로써 음향 쾌환(acoustic feedback)이 발생하게 되어 시스템의 성능이 저하되고 불안정해지는 문제가 있다[6]. 쾌환 제어 기법은 국부 제어(local control) 방식으로 외부 기준 신호를 제거하였으므로 전향 제어 기법에 따른 편연적으로 존재하는 음향 쾌환 문제를 해결하였으나 전체의 계통에 쾌환루프가 형성되어 시스템이 불안정해지는 단점이 있다.

전향 및 쾌환 제어 시스템을 실현하기 위해서는 가변적인 시스템 환경에 적절히 적용할 수 있는 FIR(finite impulse response) 또는 IIR(infinite impulse response) 구조를 갖는 적응 필터를 사용해야 하는데, FIR 필터를 사용하는 경우에는 필터의 차수가 높아지기 때문에 DSP 처리시 계산 양이 증가하는 단점이 있으며, IIR 필터를 사용하는 경우에는 FIR 필터에 비해 수렴 속도와 성능은 우수한 반면 시스템의 불안정 문제를 먼저 고려해야 한다[7-9].

본 논문에서는 전향 제어기와 쾌환 제어기를 혼합함으로써 전체적으로 IIR의 구조를 가지며, 수렴 속도 또한 빠르고, 하드웨어로 구현시 계산 부담이 적으며, 협대역 및 광대역 소음에 대한 제거 성능이 우수한 하이브리드형 능동 소음제어(Hybrid Active Noise Control, HANC) 시스템을 제안하였다.

2. 하이브리드형 능동 소음제어기의 설계

그림 1은 쾌환 및 전향 제어기를 이용하여 구성한 하이브리드형 능동 소음제어(hybrid active noise control) 시스템의 구조를 나타낸 것이다.

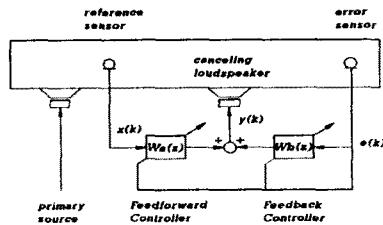


그림 1. 하이브리드형 능동 소음제어 시스템의 구조

그림 1에서 소음원 근처에 위치한 기준센서는 전향 제어기의 기준 신호를 제공하며 제어 스피커의 다운스트림에 위치한 오차센서에 의해서 검출된 전향소음은 쾌환 제어기의 기준 신호로 사용될 뿐만 아니라 전향과 쾌환 제어기의 파라미터를 적용시키는 경우에도 사용된다. 이때 기준 입력 센서로서는 회전 속도계나 가속도계 등과 같은 비음향센서의 사용이 가능하다.

그림 2는 filtered-X LMS 알고리즘[10-11] 및 1차 소음 제발생원[12]에 기초하여 설계된 HANC 시스템을 나타낸 것이다. 스피커의 제어 입력 신호는 전향 필터 $W_a(z)$ 와 쾌환 필터 $W_b(z)$ 의 출력의 합으로 주어진다. 제안된 HANC 시스템에서 제어 필터 $W(z)$ 는 두개의 입력 신호를 갖는다. 즉 기준 신호 $x(k)$ 와 추정된 소음 신호 $\hat{d}(k)$ 가 제어 필터로 입력된다. $C(z)$ 는 제어음원에서 오차센서에 이르는 오차 경로 전달함수를 나타낸다. 그러나 제어 필터의 출력 부분에 $C(z)$ 가 존재하기 때문에 LMS 알고리즘을 직접 적용할 수 없으므로 filtered-X LMS 알고리즘을 이용하여 그림 2와 같이 시스템을 변형해야 한다.

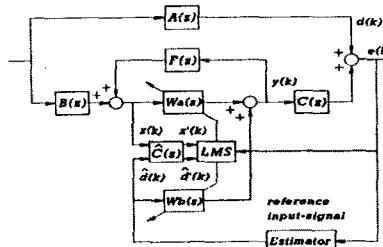


그림 2. FXLMS 알고리즘을 이용한 HANC 시스템의
블록선도

그림 2에서 $A(z)$ 는 1차 경로 전달함수를 나타내며, 오차 경로의 전달함수 $C(z)$ 는 오프-라인 혹은 온-라인 모멘팅 기법을 사용하여 추정할 수 있다. 그림 2에서 $\hat{C}(z)$ 는 오프-라인 기법으로 모델링된 오차 경로에 대한 FIR의 추정치를 나타낸다. Filtered-X LMS 알고리즘을 제안된 시스템에 적용시킴으로써 편

터링된 기준 입력 신호는 적용 필터 $W_a(z)$ 와 $W_b(z)$ 의 계수를 적용시키는데 사용된다.

그림 3은 케환 필터의 입력이 되는 기준 입력 신호를 발생시키기 위한 추정기(reference input signal estimator)를 나타낸 것이다.

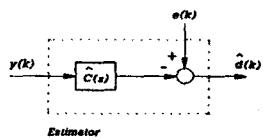


그림 3 기준 입력 신호를 발생시키기 위한 추정기

그림 2에서 제어신호 $y(k)$ 는 전향 필터와 케환 필터의 출력의 합으로 주어진다. 따라서

$$y(k) = W_a(k) * x(k) + W_b(k) * \hat{d}(k) \quad (1)$$

여기서 $W_a(k)$ 와 $W_b(k)$ 는 전향 필터와 케환 필터 즉 $W_a(z)$ 와 $W_b(z)$ 의 임펄스 응답, $*$ 는 콘벌루션 연산(convolution operation)을 나타낸다. 1차 소음 신호는 오차 신호 $e(k)$ 와 제어 신호 $y(k)$ 를 이용해 예측할 수 있다.

$$\hat{d}(k) = e(k) - c(k) * y(k) \quad (2)$$

여기서 $c(k)$ 는 FIR 필터 $\hat{C}(z)$ 의 파라미터이며, 오차 경로의 전달함수 $C(z)$ 의 FIR 추정치이다. 적용 필터 $W_a(z)$ 및 $W_b(z)$ 는 filtered-X LMS 알고리즘을 이용하여 다음과 같이 적용시킬 수 있다.

$$W_{a,i}(k+1) = W_{a,i}(k) - \mu_a e(k) x'(k-i), \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.a)$$

$$W_{b,j}(k+1) = W_{b,j}(k) - \mu_b e(k) \hat{d}'(k-j), \quad j = 0, 1, \dots, M-1 \quad (3.b)$$

여기에서 N 과 M 은 각각 전향 필터와 케환 필터의 길이다. 기준 입력 신호와 1차 소음의 예측 신호에 대한 필터링은 다음과 같다.

$$x'(k) = c(k) * x(k), \quad \hat{d}'(k) = c(k) * \hat{d}(k) \quad (4)$$

z -변환을 취하여 오차 신호에 대하여 정리하면

$$\begin{aligned} E(z) &= D(z) + \frac{X(z)W_a(z) + E(z)W_b(z)}{1 + \hat{C}(z)W_b(z)} C(z) \\ &= \frac{X(z)(A(z)(1 + \hat{C}(z)W_b(z)) + W_a(z)C(z))}{1 + \hat{C}(z)W_b(z) - W_b(z)C(z)} \end{aligned} \quad (5)$$

정상 상태 하에서 시스템의 오차 신호가 0에 수렴한다고 가정하면 위의 식에서 기준 입력 신호는 0이 아니므로

$$A(z)(1 + \hat{C}(z)W_b(z)) + W_a(z)C(z) = 0 \quad (6)$$

만약 오차 경로에 대한 FIR 모델이 수렴한다면 즉 $\hat{C}(z) = C(z)$ 이면

$$\frac{W_a(z)}{1 + C(z)W_b(z)} = -\frac{A(z)}{C(z)} \quad (7)$$

전달함수 $A(z)$ 와 $C(z)$ 는 실제적으로 극점과 영점을 갖는 IIR 구조며 이러한 극영점 구조의 복잡성 때문에 적용 필터 $W_a(z)$ 와 $W_b(z)$ 의 유일 해를 구할 수 없다. 그러나 전향 및 케환 필터 $W_a(z)$ 와 $W_b(z)$ 는 여러 개의 해가 존재하지만 1차 소음 신호를 최소화시키는 방향으로 수렴하면서 식(7)에 의하여 최적치에 도달하게 될 것이다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션의 수행은 본 논문에서 제안된 시스템과 존하는 시스템의 성능을 비교 분석하기 위해서 filtered-X LMS 및 filtered-U Recursive LMS 알고리즘을 이용하여 설계된 FANC 시스템과 filtered-X LMS 알고리즘 및 FIR 필터를 사용한 HANC 시스템에 대하여 각각 소음의 감쇄성능 및 수렴 속도를 비교하였다.

입력 소음 신호는 120[Hz] 및 300[Hz]의 주파수 성분을 가지는 정현파 신호에 백색 잡음을 침가하여 광대역 주파수 특성을 가지는 소음 신호를 구성하였으며, 터트 양단에서의 반사 계수 R_1, R_2 는 각각 0.1로 가정하였다. 또한 무지향 특성을 가지는 센서와 스피커를 사용하였으며, 각 트랜스듀서의 전달함수는 1로 가정하고 오차 경로 전달함수 $\hat{C}(z)$ 는 순지연(pure delay) 요소로 가정하여 HANC 시스템에 적용하였다.

그림 4는 filtered-X LMS 알고리즘 및 128차의 FIR 적용 필터를 사용하여 구성한 FANC 시스템에서 광대역 주파수 특성을 갖는 소음에 대한 감쇄성능 및 수렴 속도를 나타낸 것이다. 오차센서를 이용하여 측정된 잔차소음(residual signal)을 모니터한 것이다. 이것으로부터 FANC 시스템이 비교적 넓은 영역에서의 소음 감쇄가 가능함을 알 수 있다.

그림 5는 filtered-U Recursive LMS 알고리즘과 64차 - 64차의 IIR 제어 필터를 사용하여 설계된 FANC 시스템 성능에 대한 시뮬레이션의 결과를 보여주고 있다. 그럼으로부터 IIR 필터를 이용한 제어 시스템이 FIR 필터를 이용한 제어 시스템에 비해서 감쇄성능 및 수렴 속도가 우수함을 알 수 있다. 그러나 이 시스템은 FIR 필터를 이용한 시스템에 비해서 안정도가 떨어진다는 점을 명심해야 한다.

FANC using FIR and FXLMS
Broadband-noise case

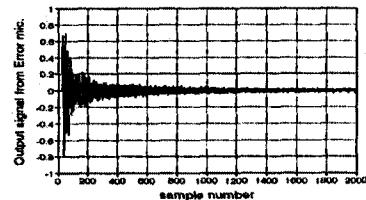


그림 4. FXLMS 알고리즘을 이용한 FANC 시스템의 감쇄성능
(128차 전향 필터를 사용한 경우)

FANC using IIR and FURLMS
Broadband-noise case

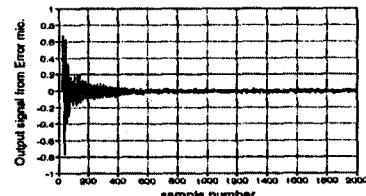


그림 5. FURLMS 알고리즘을 이용한 FANC 시스템의
감쇄성능 (64차 - 64차 IIR 전향 필터를 사용한 경우)

HANC using FIR and FXLMS
Broadband-noise case

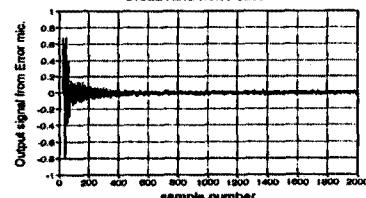


그림 6. FXLMS 알고리즘을 이용한 HANC 시스템의 감쇄성능
(60차 전향 필터와 34차 케환 필터를 사용한 경우)

그림 6은 filtered-X LMS 알고리즘 및 소음 제발생 원리에 기초하여 설계된 HANC 시스템에 대하여 60차의 전향 필터 $W_a(z)$ 와 34차의 케환 필터 $W_b(z)$ 를 사용한 HANC 시스템에 대하여 얻은 결과이다. 그림 6에서 보는 바와 같이 HANC 시스

템은 앞의 그림에서 보여진 FANC 시스템들 보다 제어 필터의 차수가 낮아 계산 부담이 상당히 감소하였으며 광대역 소음에 대한 감쇄성능도 우수함을 알 수 있다.

지금까지 수행된 시뮬레이션 결과로부터 HANC 시스템이 다음의 특징을 가짐을 알 수 있다. 첫째, HANC 시스템은 기존의 다른 제어 시스템에 비해 낮은 차수의 필터를 사용하며, 이는 실시간으로 구현할 때 마이크로 프로세서의 계산 부담이 상당히 감소됨을 의미한다. 둘째, 계환 소음제어 시스템은 주로 광대역 소음을 제거하는 반면 HANC 시스템은 광대역 소음뿐만 아니라 광대역 소음도 제거할 수 있다. 셋째, FANC 시스템은 검출 센서와 오차센서로부터 검출된 두 신호의 상관관계를 이용하여 소음을 제거하는데 실제의 용용에서 이것은 잘 충족되지 않는다. 왜냐하면 오차센서는 소음원으로부터 발생된 소음뿐만 아니라 광대역 주파수 특성을 갖는 플랜트 잡음도 검출하기 때문이다. 그러나 HANC 시스템은 이러한 플랜트 잡음을 존재하는 경우에도 FANC 시스템에 비해 우수한 감쇄특성을 보인다. 이는 계환 제어 필터 $W_b(z)$ 를 동작시킴으로써 오차센서에서 검출된 플랜트 잡음을 제거되며 때문이다. 넷째, 시뮬레이션 결과에서 보는 바와 같이 HANC 시스템은 FANC 시스템에 비해 수렴 속도가 상당히 개선되었음을 알 수 있다.

4. 실험 및 검토

본 논문에서는 Texas Instruments社에서 개발된 TMS320C31 프로세서를 사용하였다. TMS320C31 프로세서는 32-bit floating-point 연산을 전용으로 하는 DSP (40MFLOPS, 25MIPS, 33MHz)이다. 덕트에 대한 소음제어 실험을 수행하기 위해서 실험 장비는 16-bit 8채널 마이크 앰프 및 16-bit 5채널 20[Watt] 스피커 파워 앰프를 사용하였다. A/D와 D/A converters는 각각 200k sps (sample per second) 16-bit 8채널 A/D, 16-bit 4채널 D/A를 사용하였다. 또한 주파수 중첩 현상(aliasing)을 방지하기 위해서 A/D, D/A converter의 입력단 및 출력단에 1[Hz]의 cut-off frequency 및 저주파 대역의 특성을 가지는 필터(lowpass filter)를 부착하였다.

실험을 위해서 제작된 모의 공조용 덕트는 길이가 6[m], 폭이 0.24[m], 높이가 0.26[m]이며, 마이크로폰과 스피커 베치 및 이동이 용이하고 덕트의 양단은 개방과 밀폐가 가능하도록 설계하였다. 덕트의 제질은 제작을 용이하게 하기 위해 두께가 12[mm]인 목재 핵판을 사용하였으며 덕트의 공명 현상을 완화하기 위해서 내벽에 흙을 채울 부착하였다. 실험에 사용된 2개의 스피커는 직경이 8[inch]인 60[Watt] 저음용을 사용하였는데 각각 소음원과 2차 음원으로 사용하였다. 또한 제작된 모의 공조용 덕트에서의 광동 소음제어를 수행하기 위한 적응 제어 알고리즘으로는 FXLMS 알고리즘을 사용하였다.

실험에서는 4장에서 수행한 컴퓨터 시뮬레이션과 같이 덕트의 파라미터를 동일하게 설정하였으나 반사 계수는 정확하게 측정하기 어려우므로 일단 덕트 양단을 밀폐시켜 실험을 수행하였는데, 실험을 수행하기 위해서는 먼저 2층 경로를 미리 알고 있거나 실시간으로 추정을 해야 하며 본 실험에서는 2차 경로의 전달함수를 시불법 특성을 가진다고 가정하고 순수한 지연 요소로 설정하여 filtered-X LMS 알고리즘에 적용하였다. 또한 실제의 소음은 100[Hz]와 150[Hz]의 주파수 특성을 가지는 소음을 사용하였으며, 샘플링 주파수는 2[Hz]로 설정하여 실험을 수행하였다.

그림 7은 32-32차 IIR 필터를 사용한 FANC 시스템에 대한 실험 결과이며, 그림 8는 32차의 전향 필터, 8차의 계환 필터를 사용한 HANC 시스템에 대한 실험 결과이다. 실험의 결과로부터 FANC 시스템에 비해서 HANC 시스템이 감쇄성능 및 수렴 속도에서 우수한 성능을 보였으며, 하드웨어 구현시 계산량이 상당히 감소하였음을 알 수 있다.

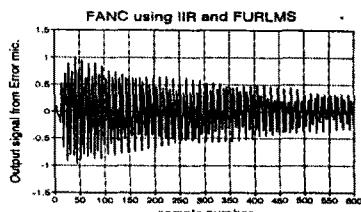


그림 7. FXLMS 알고리즘을 이용한 FANC 시스템의 감쇄성능
(60차 전향 필터와 34차 계환 필터를 사용한 경우)

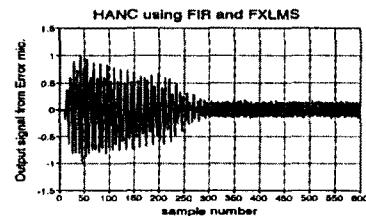


그림 8. FXLMS 알고리즘을 이용한 HANC 시스템의 감쇄성능
(60차 전향 필터와 34차 계환 필터를 사용한 경우)

5. 결론

본 논문에서는 전향 제어기와 계환 제어기를 혼합함으로써 세로운 구조를 갖는 하이브리드형 능동 소음제어 시스템을 제시하고, 이의 유통성을 증명하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션 및 모의 공조용 덕트에 대한 실제의 실험을 수행하여 다음의 결과를 얻었다.

HANC 시스템은 FXLMS 및 FURLMS 알고리즘을 이용한 FANC 시스템 보다 소음의 감쇄성이 우수하고 수렴 속도도 빠르며, 기존에는 제어기에 비해 낮은 차수의 적응 필터를 사용하므로 하드웨어로 구현시 계산 부담이 감소되었으며, 광대역뿐만 아니라 광대역 소음에 대한 제어 특성도 우수하였다.

참고 문헌

- [1] Elliott S. J. and Nelson P. A., "The active control of sounds," *Electronics and Communication Eng. Jour.*, pp. 127-136, 1990.
- [2] Kido K., "Active noise cancellation," *Text for Sing. acoustic conference 85*, Singapore, Aug.1985.
- [3] Leitch R. R. and Tokhi M. O., "Active noise control system," *IEE Proc.*, vol. 134, Pt. A, No. 6, pp. 525-546, 1987.
- [4] Tsujino M. and Elliott S. J., "An optimal feedback control strategy for active sound control," *ISVR Mem.* no. 700, University of Southampton, U. K., 1990.
- [5] Elliott S. J., "The applications of back-propagation in feedforward active control systems," *ISVR Memorandum no. 707*, University of Southampton, U. K., 1990.
- [6] Ross C. F., "An adaptive digital filter for broadband active control system," *Journal of Sound Vibration*, 80(3), pp. 381-388, 1982.
- [7] Elliott S. J. and Nelson P. A., "An adaptive algorithm for IIR filters used in multichannel active sound control systems," *ISVR Memorandum No. 681*, University of Southampton, U. K., 1988.
- [8] Eriksson L. J., "Development of the filtered-U algorithm for active noise control," *J. Acoust. Soc. Am.*, 89(1), pp. 257-264, 1990.
- [9] Eriksson L. J., Allie M. C. and Greiner R. A., "The selection and application of an IIR adaptive filter for use in active sound attenuation," *IEEE Trans. on Acoust. Sound and Signal Processing*, vol. ASSP-35, No. 4, pp. 433-437, 1987.
- [10] Ross C. F., "An algorithm for designing a broadband active sound control system," *Journal of Sound and Vibration*, 80(3), pp. 373-380, 1982.
- [11] Burgess C., "Active adaptive sound control in a duct : A computer simulation," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 70, no. 3, pp. 715-726, Sept. 1981.
- [12] Kuo S. M. and Vijayan D., "Adaptive algorithms and experimental verification of feedback active noise control systems," *Noise Control Eng. J.* vol. 42, No. 2, 1994.