

# 하이브리드 제어 알고리즘을 이용한 덕트내 능동소음제어

## Active Noise Control in a Duct System Using the Hybrid Control Algorithm

이 유 엽\* · 박 상 길\*\* · 오 재 응†

You-Yub Lee, Sang-Gil Park and Jae-Eung Oh

(2008년 12월 26일 접수 ; 2009년 1월 13일 심사완료)

**Key Words** : ANC(능동소음제어), Secondary Path Transfer Function(부가경로전달함수), Feedforward Control(앞먹임 제어), Feedback Control(되먹임 제어), Hybrid Control(하이브리드 제어)

### ABSTRACT

This study presents the active noise control of duct noise. The duct was excited by a steady-state harmonic and white noise force and the control was performed by one control speaker attached to surface of the duct. An adaptive controller based on filtered x LMS(FXLMS) algorithm was used and controller was defined by minimizing the square of the response of the error microphone. The assemble controller, which is called a hybrid ANC(active noise control) system, was combined with feedforward and feedback controller. The feedforward ANC attenuates primary noise that is correlated with the reference signal, while the feedback ANC cancels the narrowband components of the primary noise that are not observed by the reference sensor. Furthermore, in many ANC applications, the periodic components of noise are the most intense and the feedback ANC system has the effect of reducing the spectral peaks of the primary noise, thus easing the burden of the feedforward ANC filter.

### 1. 서 론

일반적인 능동소음제어에서 주로 사용하고 있는 filtered x LMS(FXLMS) 알고리즘은 주로 앞먹임 제어(feedforward control)에 사용되는데, 이러한 앞먹임 제어가 효과적으로 작동하기 위해서는 가진 신호와 참조 신호의 상관 관계가 매우 높아야 하며 실제계에서는 이러한 조건이 완전히 충족되기가 쉽지 않다. 따라서 참조 신호의 설정이 용이하지 않거나 두 신호사이의 기여도 낮은 환경에서는 앞먹임 제어기의 적용이 어렵고, 실제 제어계의 오차 센서는 주음원에 의해 발생하는 소음 성분과 다른 외란

성분인 플랜트 소음을 모두 계측하게 되는데, 이러한 플랜트 소음은 제어계에 의해 제어되지 않고 오히려 제어계를 발산하게 하는 요인이 된다.

그러나 되먹임 제어(feedback control)에서는 제어계의 참조 신호를 두지 않아 오차 센서에서의 플랜트 소음의 영향을 받지 않게 된다<sup>(1-3)</sup>.

이 연구에서는 앞먹임 제어구조와 되먹임 제어구조의 결합인 하이브리드 제어계(hybrid control)를 구성하였는데, 앞먹임 제어계는 참조 신호와 상관 관계에 있는 가진원을 감쇠시키고, 되먹임 제어계는 참조 신호와 기여도 낮은 소음 성분을 주로 감쇠시킨다. 또한 하이브리드 제어계는 낮은 필터 차수의 제어 필터로도 같은 동일한 제어성능을 얻을 수 있어 실시간 제어시의 컴퓨터 연산의 부담을 감소시켜 제어 성능을 향상시킬 수 있다.

† 교신저자; 정회원, 한양대학교 기계공학부  
E-mail : jeoh@hanyang.ac.kr  
Tel : (02)2220-0452, Fax : (02)2229-3153

\* 정회원, 호원대학교 자동차기계공학부

\*\* 정회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

## 2. 하이브리드 능동소음제어 시스템

### 2.1 적응 되먹임 능동소음제어계<sup>(4)</sup>

되먹임 능동소음 제어계에서의 기본적인 원리는 원하는 신호  $d(n)$ 을 예측하여 그것을 ANC 필터의 참조신호  $x(n)$ 으로 사용하는 것이다. Fig. 1에서 원하는 신호는 다음과 같다.

$$D(z) = E(z) + S(z)Y(z) \quad (1)$$

만일 부가경로 전달함수  $S(z)$ 가 예측 가능하면 ( $\hat{S}(z) \approx S(z)$ ), 원하는 신호  $d(n)$ 도 예측할 수 있으며 참조신호  $x(n)$ 을 합성할 수 있다.

$$X(z) \equiv \hat{D}(z) = E(z) + \hat{S}(z)Y(z) \quad (2)$$

따라서 참조신호  $x(n)$ 은  $d(n)$ 의 예측치에 의해 합성될 수 있으며, 다음과 같이 표현된다.

$$x(n) \equiv \hat{d}(n) = e(n) + \sum_{m=0}^{M-1} \hat{s}_m y(n-m) \quad (3)$$

여기서,  $\hat{s}_m, m = 0, 1, \dots, M-1$ 는 부가경로의 예측치인  $M$ 차수의 FIR(finite impulse response) 필터  $\hat{S}(z)$ 의 계수이다. 제어신호  $y(n)$ 은 다음과 같이 구성된다.

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} w_l(n)x(n-l) \quad (4)$$

적응 필터 계수는 FXLMS 알고리즘에 의해서 다음과 같이 갱신된다.

$$w_l(n+1) = w_l(n) + \mu x'(n-l)e(n), \quad (5)$$

$$l = 0, 1, 2, \dots, L-1$$

여기서,  $\mu$ 는 수렴 계수이다. 또한 필터를 거친 참조신호는 다음과 같다

$$x'(n) \equiv \sum_{m=0}^{M-1} \hat{s}_m x(n-m) \quad (6)$$

### 2.2 하이브리드 능동소음제어계<sup>(5,6)</sup>

Fig. 2의 하이브리드 시스템은 FXLMS 알고리즘을 사용하는 앞먹임 제어기와 되먹임 제어기를 포함한다. 제어 신호는 앞먹임 주제어 필터와 되먹임

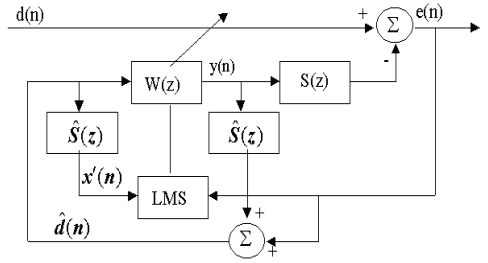


Fig. 1 Block diagram of adaptive feedback ANC system using FXLMS algorithm

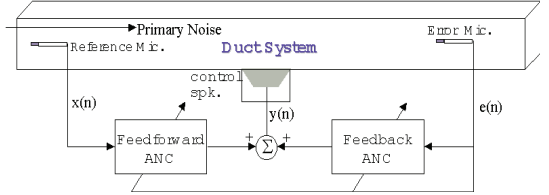


Fig. 2 Hybrid ANC system with combination of feedback ANC and feedforward ANC

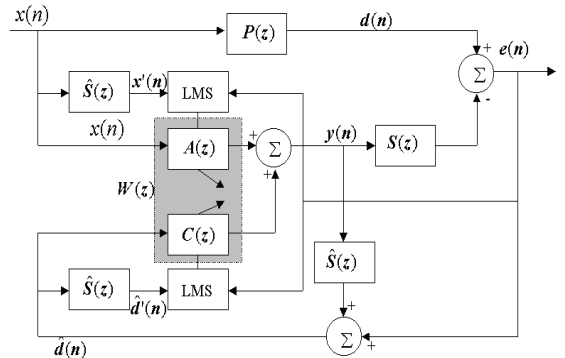


Fig. 3 Block diagram of hybrid ANC system

주제어 필터로부터 각각의 출력 신호의 합으로 구성되어 진다. 두개의 각각의 제어기는 두개의 참조신호를 사용하는데, 참조신호 센서로부터의  $x(n)$ 과 예측된 참조 신호인  $\hat{d}(n)$ 이다. Fig. 3에서 제어 신호  $y(n)$ 은 주제어 필터  $W(n)$ 로부터 발생하며,  $W(n)$ 은  $L$ 차의 크기를 갖는 두개의 FIR filter로 구성된다.

$$y(n) = a^T(n)x(n) + c^T(n)\hat{d}(n) \quad (7)$$

여기서,  $a(n) \equiv [a_0(n) a_1(n) \dots a_{L-1}(n)]^T$ ,

$$c(n) \equiv [c_0(n) c_1(n) \dots c_{L-1}(n)]^T$$

적응 제어필터 계수를 갱신하는 FXLMS 알고리즘은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$a(n+1) = a(n) + \mu x'(n)e(n)$$

$$c(n+1) = c(n) + \mu \hat{d}'(n)e(n) \tag{8}$$

여기서,  $x'(n)$ ,  $\hat{d}'(n)$ 는 예측되어진 부가경로 전달 함수를 통과한 참조 신호이다.

$$x'(n) \equiv \hat{s}(n) \cdot x(n)$$

$$\hat{d}'(n) \equiv \hat{s}(n) \cdot \hat{d}(n) \tag{9}$$

### 3. 하이브리드 능동소음제어 실험 장치

제안된 하이브리드 제어 알고리즘의 검증을 위하여 다음의 덕트 시스템에서 능동소음제어 실험을 수행하였다. Fig. 4는 덕트에 대한 능동소음제어 시스템의 구성 및 신호처리 흐름도를 나타내고 있다. 이 연구에서 이용된 덕트 시스템은 총 길이가 4.5 m이고 오차 센서는 제어 스피커에서 측정주파수를 고려하여 30 cm 떨어져 설치하였다. 또한 무한 덕트로 가정하기 위하여 끝 부분에 유리솜(glass wool)을 부착하였으며 오차 마이크는 제어 성능을 관찰하기 위하여 주파수 분석기에 연결하였다. 제어기로 이용된 DSP보드는 실시간 제어 프로세서 TMS320c30이 내장되어 있으며 4채널 입력과 2채널 출력이 가능한 A/D, D/A보드로 구성되어 있다<sup>(7)</sup>. 실시간 제어 프로세서에서 실행되는 제어 알고

리즘은 TMS전용 어셈블리로 되어 있으며 실행 제어 알고리즘을 제어 프로세서로 다운로드하거나 제어 파라미터(주제어 필터)의 실시간 모니터링을 위하여 Borland C로 PC상에서 실행하였다. 백색 잡음과 정현파 순음, 그리고 정현파 순음과 백색 잡음을 동시에 가진 경우에 각각 하이브리드 제어 알고리즘을 이용하여 능동소음제어 실험을 수행한 결과를 비교하였다. 또한 낮은 주제어 필터의 하이브리드 알고리즘의 제어 성능을 확인하기 위하여 일반적인 앞먹임 제어기의 차수보다 주제어 필터 차수를 줄인 상태에서 제어 실험을 수행하여 제어 현상을 관찰하였다.

### 4. 하이브리드 능동소음제어 결과 및 고찰

먼저 하이브리드 제어 알고리즘의 협대역 주파수 제어 성능을 확인하기 위해서는 정현파 순음을, 그리고 광대역 주파수 제어 성능을 확인하기 위해서는 백색 잡음을 가진하여 제어를 수행하였다. 백색 잡음은 500 Hz의 저주파 통과 필터를 거쳐 가졌었으며 오차 신호 또한 저주파 통과 필터를 거쳤다. 각각의 가진에 대하여 시간에 따른 오차 수렴 성과 주파수 영역 해석을 수행하였다.

하이브리드 제어 알고리즘은 앞먹임 제어계에서는 감쇠시키지 못하는 플랜트 잡음 제어기능을 갖고 있으므로 정현파 순음에 백색 잡음을 섞어 가졌하여 앞먹임 제어기의 거동과 비교, 분석하였다. 제어 실험에서는 각각의 알고리즘의 성능을 평가하는 것이 주목적이기 때문에 적응 필터의 수렴계수는

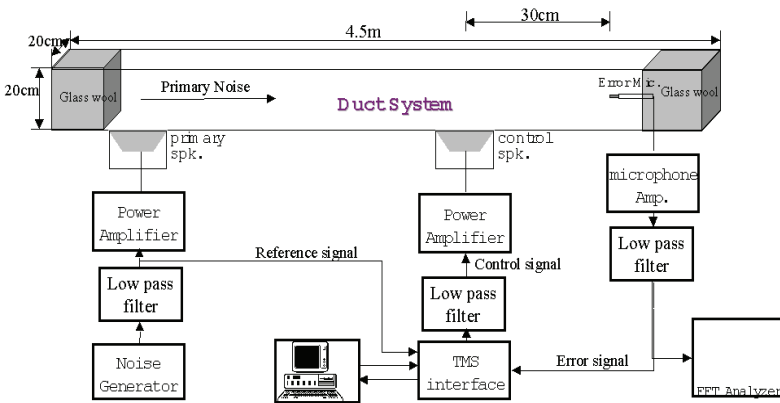


Fig. 4 Experimental diagram of hybrid ANC system

2.0e-5로, 주제어 필터는 100차 필터를 사용하는 같은 조건하에서 수행하였다. 다음으로 플랜트 잡음을 섞은 정현파와 순음 가진시에 낮은 차수의 주제어 필터를 이용한 하이브리드 제어 알고리즘과 고차의 주제어 필터를 이용한 앞먹임 제어의 경우를 비교하였다. Fig. 5는 정현파와 순음 가진(200 Hz)에 대한 앞먹임 제어와 하이브리드 제어계의 시간 영역에서의 수렴 성능을 비교한 것이다. 앞먹임 제어기와 하이브리드 제어기가 모두 0.5 sec 이내에 오차 소음을 저감시키는 것을 볼 수 있지만 하이브리드 제어기의 되먹임 제어기가 앞먹임 제어기의 불필요한 적응을 억제하여 안정된 수렴 형태를 보임을 알 수 있다<sup>(8)</sup>.

Fig. 6은 정현파와 순음에 대한 제어 결과를, Fig. 7은 백색 잡음에 대한 제어 결과를 주파수 영역에서 나타낸 것이다. 앞먹임 제어기와 하이브리드 제어기의 경우 모두 좋은 제어 성능을 보이고 있다. 200 Hz의 정현파와 순음 가진시에 앞먹임 제어의 경우 38.25 dB, 하이브리드 제어 경우 39.75 dB로 하이브리드 제어시에 오버울 레벨에서 1.5 dB이 더 저감된다. 또한 관심 주파수인 200 Hz부근에서 하이브리드 제어기는 앞먹임 제어기보다 좋은 저감 효과를 보인다. 백색잡음에 대한 경우도 오버울 레벨에서 앞먹임 제어는 24.5 dB, 하이브리드 제어의 경우 26.65 dB로 약 2 dB가 더 저감된다. 이렇게 증가한 저감 효과는 하이브리드 제어가 플랜트에 섞이

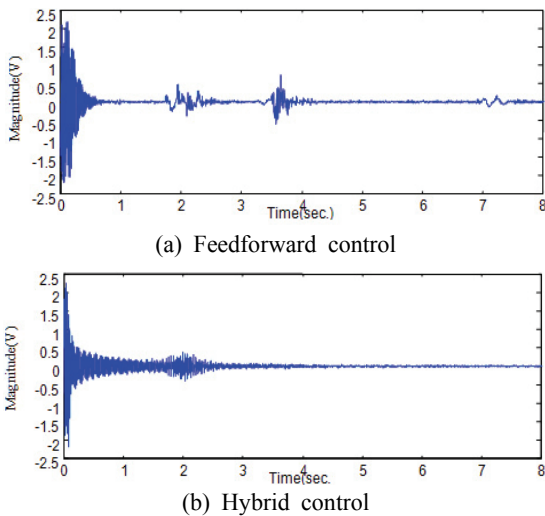


Fig. 5 Control results for sinwave(200 Hz)

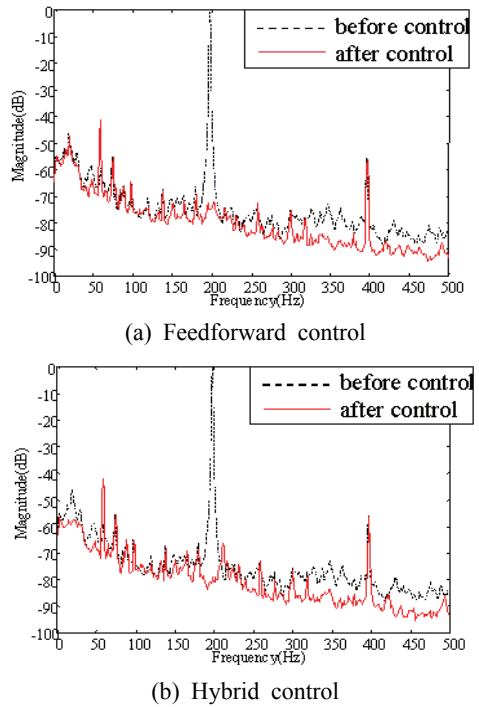


Fig. 6 Control results for sinewave in frequency domain

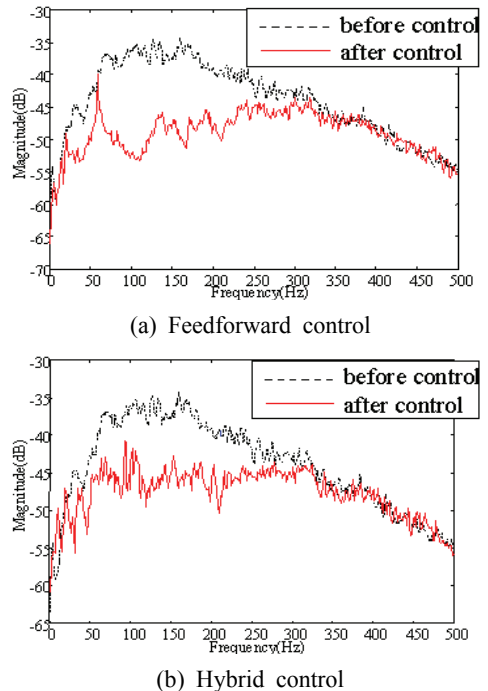
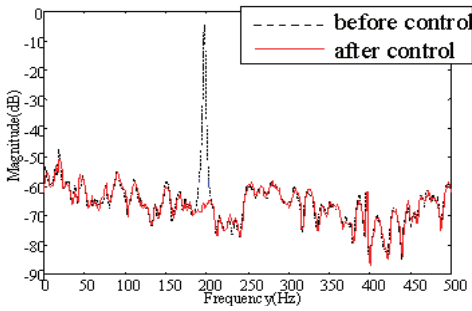
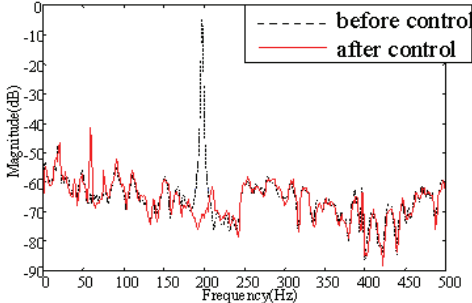


Fig. 7 Control results for white noise in frequency domain

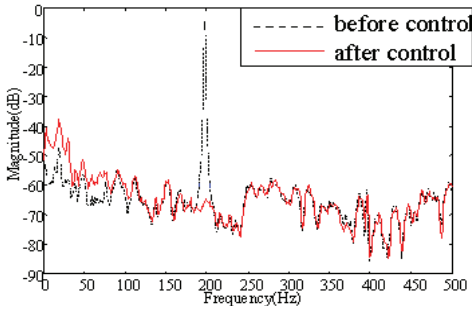


(a) Feedforward control

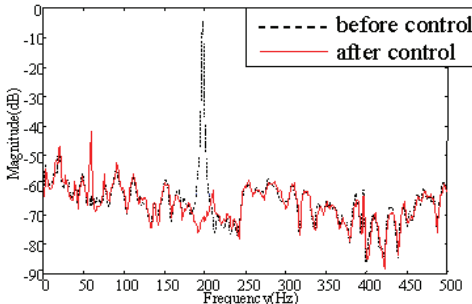


(b) Hybrid control

**Fig. 8** Control results for sinewave and white noise(100th order control filter)



(a) Feedforward control



(b) Hybrid control

**Fig. 9** Control results for sine wave and white noise(50th order control filter)

게 되는 잡음에 대해서도 제어하기 때문이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 지금까지의 실험 조건과 같은 조건에서 100차의 제어필터를 사용했을 때의 제어 결과와 실시간 제어연산 부담을 줄이기 위해 50차의 제어필터를 사용했을 때의 제어 결과를 각각 나타낸 것이다. 가진은 플랜트 잡음을 삽입하기 위해 200 Hz정현파 순음에 500 Hz 미만의 백색잡음을 섞었다. 이와 같은 조건에서는 앞먹임 제어의 경우 플랜트 잡음이 제어되지 않고 오차 센서에 쌓이게 되어 제어계는 결국 발산한다. 그러나 하이브리드 제어의 경우에는 주 제어 대상인 200 Hz 순음은 앞먹임 제어에서 감쇠되어지고 앞먹임 제어가 저감시키지 못한 플랜트 잡음은 뒤먹임 제어에서 감쇠되어진다. 따라서 Fig. 8의 경우 음압 레벨에서 앞먹임 제어는 36.48 dB, 하이브리드 제어는 38.53 dB로 오버울 레벨에서 2 dB 이상의 저감 효과를 가져온다. 제어필터 차수를 줄였을 때의 Fig. 9를 보면 앞먹임 제어의 경우에는 그 제어 성능이 30.44 dB로서 오버울 레벨에서 6 dB 정도의 성능 감소를 초래하며 100 Hz 미만의 구간에서는 제어전보다 음압 레벨이 높아지는 결과를 가져왔다, 한편 하이브리드 제어시는 총 레벨이 38.35 dB로 100차 제어 필터를 사용했을 때와 비교하여 별 차이가 없다. 따라서 필터 차수를 어느 정도 적게 하여도 하이브리드 제어기는 거의 동등한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

하이브리드 제어계를 이용한 덕트에서의 능동소음제어 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 제어계내에 적절한 참조 신호를 얻을 수 없거나 참조 신호외에 다른 주파수 성분이 존재할 경우 능동소음제어는 앞먹임, 뒤먹임제어를 동시에 적용한 하이브리드 제어를 적용하는 것이 적절하다.

(2) 참조 신호와 플랜트 잡음이 존재할 경우 앞먹임 제어계는 오차 신호가 수렴정도가 불안하지만 하이브리드 제어계는 참조신호 뿐만 아니라 존재하는 잡음에 대해 제어가 가능하여 안정적이다.

(3) 하이브리드 제어계는 제어필터차수를 감소시켜도 동일한 성능을 보여 실시간 제어시의 연산부담을 줄여 효과적이고 신속한 제어가 가능하다.

(4) 이상의 결과를 토대로 향후 자동차 흡·배기

계에 대한 능동소음제어에도 적용할 수 있다.

## 후 기

이 연구는 호원대학교 교내학술연구비에 의해 연구되었습니다.

## 참 고 문 헌

(1) Hall, H. R. and Bernhard, R. J., 1992, "Active Control of Radiated Sound From Ducts," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 114, pp. 338~346.

(2) Nelson, P. A. and Elliot, S. J., 1992, "Active Control of Sound," Academic Press,

(3) Bernard, W. and Samuel, D. S., 1985, "Adaptive Signal Processing," Prentice Hall Inc.,

Englewood Cliffs.

(4) Trinder, M. C. and Nelson, P. A., 1983, "Active Noise Control in Finite Length Duct," *Journal of sound and vibration*, Vol. 89, pp. 95~105.

(5) Kim, I. S., Kim, Y. S., Hong, S. Y. and Heo, H. M., 1994, "Active Control of the Noise Fields in the Enclosure Using the Feedforward and Feedback Controller," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 4, No. 4, pp. 497~505.

(6) Kuo, S. M. and Morgan, D. R., 1996, "Active Noise Control Systems," John Wiley & Sons Inc.

(7) Texas Instrument, 1993, "TMS320c30 User's Guide".

(8) Elliot, S. J. and Nelson, P. A., 1993, "Active Noise Control," *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 12~35.