

하이브리드 적응 필터를 이용한 공조 덕트에서의 능동소음제어

남 현 도, 김 덕 중, 성 대 현
단국대학교 전기공학과

Active Control of Noise In HVAC Ducts Using Hybrid Adaptive Filter

Hyun-Do Nam, Duck-Joong Kim, Dae-Hyun Sung
Dept. of Electrical Engineering, Dankook University

Abstract - In this paper, a new active noise control technique which combines a hybrid active noise control technique and a subband active noise control technique is presented.

To reduce the computational burden the active noise control system, a weighted hybrid control technique is applied. This algorithm shows higher stability and good noise attenuation property in either broad band or narrow band active noise control systems in HVAC ducts.

Computer simulations were performed to show the effectiveness of the proposed algorithm.

1. 서 론

소음제어기법은 흡음재를 사용하여 소음을 감쇄시키는 수동소음제어기법과 소음파와 크기는 같고 위상이 180도 차이 나는 상쇄파를 이용하여 소음을 감쇄시키는 능동소음제어(Active Noise Control; ANC)기법으로 나눌 수 있다[1].

ANC는 HVAC(central Heating, Ventilation and Air Conditioning) 시스템에서 사용되는 환풍 팬(fan)과 자동차 엔진 등과 같은 회전기에 의한 소음과 같이 500Hz 이하의 저주파의 소음을 감쇄시키는 데 있어서 종래의 수동적 방법보다 탁월한 효과를 보여주고 있다[2].

ANC는 제어 기법에 따라 전향제어기법과 궤환제어기법으로 나뉘어질 수 있는데, 전향제어기법은 광대역 및 협대역 소음저감에 효과적으로 적용되나 기준센서가 음향센서인 경우 2차음원에서 발생한 제어음파가 기준센서로 검출되는 음향궤환이 발생되어 제어기의 안정도가 파괴되거나 성능의 저하를 가져오는 문제점이 있다. 궤환제어기법은 기준센서를 제거하여 전향제어기법에서 발생되었던 음향궤환문제를 해결하였으나, 예측가능한 협대역의 소음신호만 제거가 가능하다.

본 논문에서는 전향제어기법과 궤환제어기법을 결합하여 두 가지 기법의 장점을 이용한 Hybrid 능동소음제어 기법과 Sub-band 제어 기법을 결합하여 기존의 하이브리드 제어 기법에 비해 계산량이 감소한 새로운 형태의 능동소음제어 알고리즘을 제안하였다.

2. 능동소음제어 기법

능동소음제어(Active Noise Control)는 소음신호와 크기가 같고 위상차가 180° 인 제어신호를 발생시켜 소음신호와 제어신호가 중첩의 원리에 의해 상쇄되도록 하는 기술이다. 그런데, 소음원에서 제어영역까지의 음향

적인 경로는 시간에 따라 변할 수 있으므로 적응필터링 기법이 적용되어야 한다.

능동소음제어 알고리즘으로는 최소 평균 자승(Least Mean Squares, LMS) 알고리즘이 널리 사용되고 있다 [3]. 그런데, 제어필터의 출력과 오차센서 사이에 2차경로 전달함수가 존재하므로 제어기의 안정도를 높이기 위한 방법으로 filtered-X LMS 알고리즘이 많이 사용되고 있다[1]. Filterd-X LMS 알고리즘은 가중치 갱신을 위한 기준입력신호로 입력신호를 2차경로 전달함수로 필터링한 신호를 사용해야 하므로 2차경로의 사전 정보가 필요하게 된다. 일반적으로 2차경로의 전달함수는 해석적으로 구하기 어렵기 때문에 파라미터 추정기법을 이용해서 구하게 된다.

능동소음제어기법은 제어기법에 따라 전향제어기법과 궤환제어기법으로 나눌 수 있다. 전향제어기법은 기준센서에서 감지된 소음신호와 오차신호의 상관관계를 이용해서 소음을 제거하는 방법으로 높은 안정성과 강인한 성능을 특징으로 하는 반면 느린 수렴속도와 상호 상관관계가 있는 기준입력신호를 필요로 하며 음향궤환 발생으로 인해 안정도가 파괴될 수 있다.

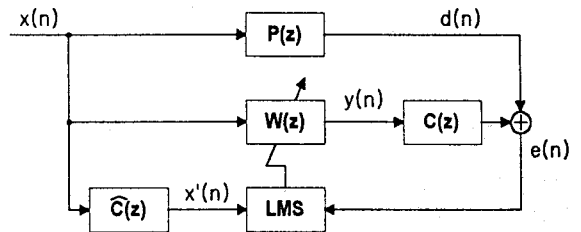


그림 1 전향제어기법을 이용한 filtered-X LMS 알고리즘

그림 1은 전향제어기법을 이용한 filtered-X LMS 알고리즘의 구조이다. 적응필터 $W(z)$ 는 오차센서에서 검출된 잔차소음 $e(n)$ 을 최소화하도록 필터가중치를 갱신하게 되며, 적응필터식은 식 (1)과 같다.

$$W(n+1) = W(n) - \mu x'(n) e(n) \quad (1)$$

$$x'(n) = \hat{C}(n) * x(n)$$

궤환제어기법은 기준입력신호를 필요로 하지 않고 오차센서 주위의 소음을 예측제거 하는 방법으로 음향궤환이 없으며 일반적으로 빠른 수렴속도를 갖지만 이득-대역폭 제한과 안정성 문제가 단점으로 알려져 있다. 그림 2는 궤환제어기법을 이용한 filtered-X LMS 알고리즘의 구조이다. 적응필터 $W(z)$ 를 적응시키기 위한 기준입력신호는

주소음신호 $d(n)$ 을 추정하여 사용한다. 추정된 주소음신호는 식 (2)와 같고, 케환제어기법의 적응필터식은 식 (3)과 같다.

$$\hat{d}(n) = e(n) - \hat{C}(n) * y(n) \quad (2)$$

$$W(n+1) = W(n) - \mu \hat{d}'(n) e(n) \quad (3)$$

$$\hat{d}'(n) = \hat{C}(n) * \hat{d}(n)$$

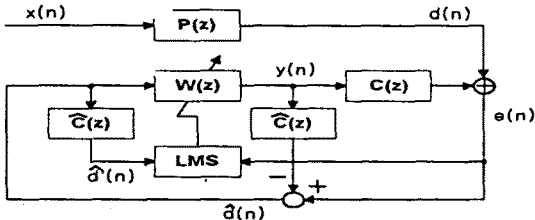


그림 2 케환제어기법을 이용한 filtered-X LMS 알고리즘

3. 적응 필터 알고리즘

3.1 가중치를 갖는 하이브리드 제어기법

가중치를 갖는 하이브리드 제어기법은 하나의 적응필터만을 사용하며 적응필터의 입력신호로 원래의 기준 입력신호와 추정된 주소음신호에 가중치를 두어 새로운 기준 입력신호로 사용하는 방법이다. 단일 전향 또는 케환 제어기법을 사용한 시스템과 거의 같은 계산량을 가지면서 보다 향상된 성능을 갖는다.

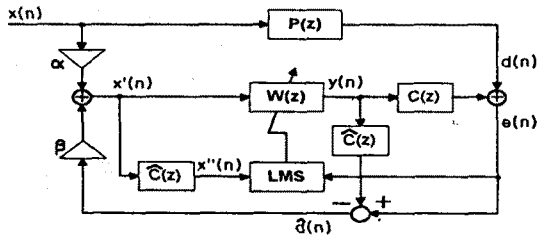


그림 3 가중치를 갖는 하이브리드 기법

그림 3은 가중치를 갖는 하이브리드 제어기법의 블록선도이다. 새로운 기준 입력신호 $x'(n)$ 은 다음과 같다.

$$x'(n) = \alpha x(n) + \beta \hat{d}(n) \quad (4)$$

적용필터의 적용식은 다음과 같다.

$$W(n+1) = W(n) - \mu x''(n) e(n) \quad (5)$$

$$x''(n) = \hat{C}(n) * x'(n)$$

여기서 $\alpha=0$ 이면 식 (5)는 케환제어기법의 적용식이 되고, $\beta=0$ 이면 식 (5)는 전향제어기법의 적용식이 된다.

표 1은 다중채널에서의 하이브리드 제어기법과 가중치를 갖는 하이브리드 제어기법의 계산량을 비교한 것이다. 여기서 B는 케환 필터의 차수, F는 전향 필터의 차수, L은 가중치가 있는 하이브리드 필터의 차수, J는 검출 센서의 개수, M은 오차 센서의 개수, Q는 2차 경로 모델 차수이고 K는 제어용 스피커의 개수이다.

표 1 하이브리드 제어기법과 가중치를 갖는 하이브리드 제어기법의 계산량 비교

구분	항목	곱셈량
하이브리드 제어기법 이용	Filtered-X	$K \times M \times Q \times (J+1)$
	주소음신호 추정	$K \times M \times Q$
	필터 출력 계수 갱신	$K \times (J \times F + B)$
	계	$K(MQ(J+2) + (JF+B)(M+1))$
가중치를 갖는 하이브리드 제어기법 이용	Filtered-X	$J \times (K \times M \times Q + 1)$
	주소음신호 추정	$K \times (M \times Q + 1)$
	필터 출력 계수 갱신	$J \times K \times L$
	계	$K(MQ(J+1) + JL(M+1)) + J + K$

3.2 서브밴드 제어기법

서브밴드 제어 기법은 신호의 주파수 대역을 몇 개의 서브밴드로 분할하고 각각의 주파수 대역에 대하여 적용 처리하는 것으로 능동소음제어에 이용할 경우 계산량의 감소와 더 우수한 성능을 얻을 수 있다. 본 장에서는 서브밴드 기법을 이용한 능동소음제어 알고리즘에 대해 기술한다. 적용 알고리즘으로는 가중치를 갖는 하이브리드 기법을 적용하였다.

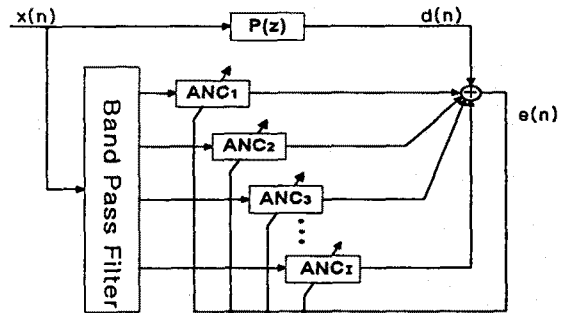


그림 4 서브밴드 기법을 이용한 능동소음제어

그림 4는 I 개의 서브밴드로 분할한 능동소음제어의 블록선도이다. 기준 입력신호 $x(n)$ 은 band pass filter를 통과해서 I개의 새로운 기준 입력신호로 분할된 뒤 각각 I개의 적용필터에 의해 적용된 후 하나의 출력신호로 합쳐져서 주 소음신호를 제거하게 된다. 적용필터 식과 적용필터의 출력은 다음과 같다.

$$W_i(n+1) = W_i(n) - \mu x'_i(n) e(n) \quad (6)$$

$$y(n) = \sum_{i=1}^I W_i(n) x_i(n)$$

가중치를 갖는 하이브리드 기법을 적용하면 식 (6)은 다음과 같이 된다.

$$W_i(n+1) = W_i(n) - \mu \hat{e}(n) x''_i(n) \quad (7)$$

$$x''_i(n) = \alpha x_i(n) + \beta \hat{d}(n)$$

$$y(n) = \sum_{i=1}^I W_i(n) x''_i(n)$$

4. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 전 장에서 제안한 서브밴드 적응 알고리즘과 기존의 알고리즘을 비교 분석하였다. 시뮬레이션에 사용된 덕트 능동소음제어 시스템의 구조는 그림 5와 같으며, 시뮬레이션에 사용된 덕트 파라미터는 표 2와 같다.

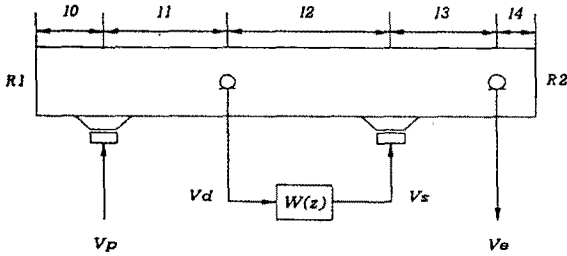


그림 5 덕트에 대한 능동 소음제어 시스템의 구조

여기서 R_1 과 R_2 는 덕트 상단 및 하단의 반사계수(reflection coefficient)이며, 센서 및 제어 스피커가 무지향의 특성을 보인다고 가정한다. 덕트내부를 전파하는 음파는 평면파이며 음원과 센서가 서로 영향을 미치지 않도록 충분히 이격되어 있다고 가정한다. V_d 와 V_s 는 소음원 및 제어 스피커를 구동하기 위한 전기적인 입력 신호이며, V_d 와 V_e 는 검출 및 오차센서에서 측정되는 전기적인 출력 신호를 나타내고 있다.

표 2 덕트 파라미터

변 수	기 호	값
반 사 계 수	R_1, R_2	0.1, 0.1
덕 트 치 수	l_0	1 [m]
	l_1	1.2 [m]
	l_2	1.6 [m]
	l_3	1.2 [m]
	l_4	1 [m]
	1	6 [m]

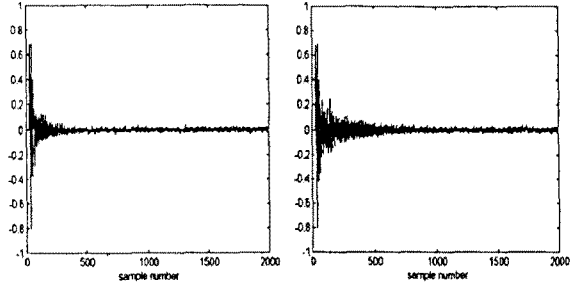
입력 소음 신호는 다음 식과 같이 120Hz와 300Hz의 주파수를 가지는 광대역 신호로 하였으며 샘플링 주파수는 2KHz로 하였다.

$$x(t) = \sin 2\pi f_1 t + 0.2 \sin 2\pi f_2 t + w(t) \quad (8)$$

$w(t)$: 평균이 0이고 분산이 0.01인 백색 잡음

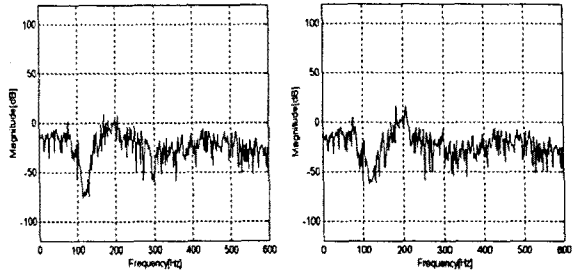
기존의 능동 소음 제어 알고리즘은 40차의 전향 제어 필터와 24차의 제환 제어 필터를 사용한 하이브리드 능동소음제어 (Hybrid ANC; HANC) 알고리즘을 사용하였으며, 제안된 서브 밴드 기법을 사용한 가중치를 갖는 하이브리드 능동소음제어 (Subband Hybrid ANC; SHANC) 알고리즘은 주파수 영역을 4개의 밴드로 나누고 각 밴드에서는 12차의 가중치를 갖는 하이브리드 적응 필터가 사용되었다.

제안된 SHANC 알고리즘은 시뮬레이션 결과에서 보듯이 적응 필터의 차수가 각각 64차의 전향 및 제환 필터에서 48차(12차 x 4)의 가중치를 갖는 하이브리드 필터로 줄어들었음에도 불구하고 기존의 알고리즘과 대등한 결과를 보였다.



(a) HANC 알고리즘 (b) SHANC 알고리즘

그림 6 오차 센서에서 측정된 소음 신호



(a) HANC 알고리즘 (b) SHANC 알고리즘

그림 7 오차 센서에서 측정된 소음 신호의 스펙트럼

5. 결론

본 논문에서는 전향 제어 기법과 제환 제어 기법을 결합하여 두 가지 기법의 장점을 이용한 Hybrid 능동소음제어 기법과 sub-band 제어 기법을 결합하여 기존의 하이브리드 제어 기법에 비해 계산량이 감소한 새로운 형태의 능동 소음 제어 알고리즘을 제안하였다.

제안된 알고리즘은 소음원을 여러 개의 주파수 밴드로 분할하여 각각의 주파수 대역에 대해 적응처리 함으로 기존의 알고리즘보다 낮은 차수의 적응필터를 사용할 수 있었으며, 각각의 밴드를 각각의 CPU로 나누어 처리할 수 있어 다중 프로세서를 갖는 DSP 보드에 적용이 용이하다. 기존의 전향제어기법 또는 제환제어기법의 단점을 보완하기 위해 가중치를 갖는 하이브리드 제어기법을 적용하였다. 가중치를 갖는 하이브리드 제어기법은 하나의 적응필터로 전향 및 제환 적응필터의 특성을 가중적으로 가질 수 있으므로 기존의 알고리즘보다 수렴성 및 안정성을 향상시킬 수 있었다.

2개의 주파수를 갖는 소음신호를 덕트의 소음 제어 시스템에 적용한 결과 제안된 알고리즘이 기존의 알고리즘보다 계산량이 감소했음에도 불구하고 대등한 결과를 보였다.

[참 고 문 헌]

- [1] R.R. Leitch and M.O. Tokhi, "Active noise control systems." IEE Proc., Vol.134, Pt.A, No.6, pp.525-546, 1987.
- [2] 남 현도 and S.J. Elliott, "Adaptive active attenuation of noise using multiple approaches." Journal of Mechanical Systems & Signal Processing, Vol.9, No.5, pp.555-567, 1993.
- [3] B. Widrow and S. D. Stearns, Adaptive Signal Processing, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985.
- [4] 권오상, 차일환, "능동소음제어를 위한 선택적 결합 알고리즘", 한국음향학회지, 제16권, 제5호, pp.18-25, 1997.