

개선된 SLMS 알고리즘을 이용한 덕트 내에서의 능동소음제어

서성대*, 남주형**, 안동준***, 남현도*

*단국대학교 전자전기공학부, **서울대학교 전기공학부, ***아주자동차대학

Adaptive Active Noise Control in a Duct Using Improved SLMS Algorithms

Sung Dae Seo*, Ju Hyung Nam**, Dong Jun Ahn***, Hyun Do Nam*

*Dankook University, **Seoul National University, ***Ajou Motor College

ABSTRACT - In this paper, active control of noise in a HVAC duct is considered. Most adaptive control filters have used FIR structures based on filtered-x LMS algorithms. But, the IIR structures are more desirable for the active control of duct noise in order to remove the poles introduced by the acoustic feedback and presented an algorithm to adjust the coefficients of an IIR filter using the recursive least mean square (RLMS) algorithm.

A smoothed LMS algorithm is proposed to improve a convergent speed of filter parameters when the noise is wide band and power of input is time varying. And computer simulations have performed to show the effectiveness of the proposed algorithm.

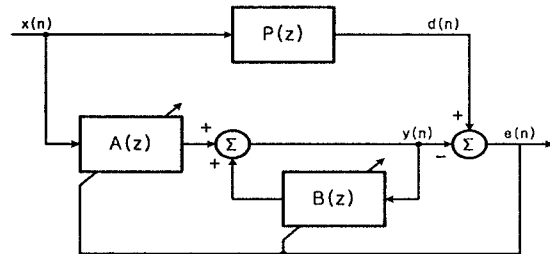


그림 1. IIR LMS 알고리즘 블록 다이어그램

1. 서론

소음제어 기법은 흡음재를 사용하는 수동제어기법과 음의 간섭현상을 이용한 능동제어기법 (Active Noise Control; ANC)으로 나눌 수 있는데 500[Hz] 이하의 저주파 소음은 이를 제어하기 위하여 두꺼운 흡음재나 차음재를 사용해야 하므로 실현이 어려워 능동소음제어기법을 사용하여 제어하는 것이 효과적이다[1-2].

능동소음제어 기법은 소리의 특성인 파(Wave)의 중첩의 원리를 이용하여 소음파를 상쇄시키는 것이 그 원리이며 소음이 유입되는 곳에서 전자제어장치를 두고 음의 파형을 실시간으로 분석하여 제어음을 발생시켜 음파를 상쇄시키는 방법으로 소음을 차단하는 것이다[3].

공장, 사무실 등의 실내 공기조화를 위해 사용되는 HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) 시스템은 운전 중에 여러 가지 소음을 방사하게 된다. 풍량을 발생시키는 중요 장치인 Blower용 DC Motor는 회전수가 낮은 저단에서는 주로 Brush에 의한 소음이 주를 이루고 Motor의 회전수가 높아지게 되는 고단에서는 Motor 회전수의 12배의 주파수를 가지는 소음이 주를 이루게 된다. HVAC에서 발생하는 Blower DC Motor Noise를 제거하여 자동차의 실내 공간을 쾌적하고 안락하게 유지하기 위하여 능동소음제어 기법을 적용한 HVAC을 구현한다[4].

본 논문에서는 소음이 광대역이고 입력의 파위가 시변인 경우 수렴 속도와 성능을 개선한 Smoothed LMS 알고리즘을 이용하여 자동차의 HVAC 소음을 제거하는 능동소음 제어를 구현 하였다[3].

2. IIR LMS 알고리즘

IIR 필터구조를 이용한 적응 필터는 1976년 Feintuch 에 의해서 소개 되었으나[5] 능동소음제어를 위한 IIR LMS 알고리즘은 1985년 Eriksson에 의해 제안 되었다. IIR LMS 알고리즘을 위한 간단한 블록 다이어그램은 아래의 그림1과 같이 나타낼수 있다. 여기서 $x(n)$ 과 $y(n)$ 은 각각 기준 입력값과 제어필터의 출력값이고, $d(n)$ 과 $e(n)$ 은 각각 제어할 하지않을때의 소음신호와 제어시 의 오차값을 의미한다.

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

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

이 되며, L,M차의 $A(z)$ 과 $B(z)$ 이라 하면

$$H(z) = \frac{a_0(n) + a_1(n)z^{-1} + a_2(n)z^{-2} + \dots + a_{L-1}(n)z^{L-1}}{1 - [b_1(n)z^{-1} + b_2(n)z^{-2} + \dots + b_{L-1}(n)z^{M}]} \tag{2}$$

라고 할수 있다.

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

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

이 되며, L,M차의 $A(z)$ 과 $B(z)$ 이라 하면

$$H(z) = \frac{a_0(n) + a_1(n)z^{-1} + a_2(n)z^{-2} + \dots + a_{L-1}(n)z^{L-1}}{1 - [b_1(n)z^{-1} + b_2(n)z^{-2} + \dots + b_{L-1}(n)z^M]} \tag{2}$$

라고 할수 있다.

또한, IIR 필터의 계수 벡터 $A(n)$ 과 $B(n)$ 를

$$A(n) \equiv [a_0(n) a_1(n) \dots a_{L-1}(n)]^T \tag{3}$$

$$B(n) \equiv [b_1(n) b_2(n) \dots b_M(n)]^T \tag{4}$$

라고 한다면,

실제 시스템의 출력값은 아래와 같이 나타낼수 있다.

$$y(n) = W^T(n)U(n) \tag{5}$$

$$W(n) \equiv \begin{bmatrix} A(n) \\ B(n) \end{bmatrix}, U(n) = \begin{bmatrix} X(n) \\ Y(n-1) \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$X(n) = [x(n) x(n-1) x(n-2) \dots x(n-L+1)] \tag{7}$$

$$Y(n-1) \equiv [y(n-1) y(n-2) \dots y(n-M)]^T \tag{8}$$

최소제곱법을 이용하여 계수들의 업데이트식을 구하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W(n+1) = W(n) + \mu U(n)e(n) \tag{9}$$

3. Smoothed LMS 알고리즘

LMS 알고리즘은 샘플 추정기를 이용하여 경사벡터를 추정하는 방식으로 적용 필터구현이 간단하다는 장점이 있기는 하지만 필터 차수의 증가에 비례하여 성능은 향상되나 수렴속도가 느려지는 단점을 가진다. 특히 ANC 시스템의 성능은 수렴계수에 민감하게 좌우되므로 소음 입력이 광대역이고 소음의 파위가 시변 될 때 수렴 계수를 크게 할 경우 시스템이 불안정해지며 작게 할 경우 수렴 속도가 느리게 한다. 따라서 식(12)와 같이 샘플 추정값을 Smoothing 하여 보다 안정된 시간 평균 추정값을 사용하여 과거 값을 평균하는 효과를 반영함으로써 성능개선이 가능하다. 또한 입력 소음이 정현파의 경우와 주파수 분포가 광대역이며 파위의 시변의 정도에 따라서 β 값을 조종함으로써 시스템의 효율을 개선된 Smoothed LMS 알고리즘을 제안하였다. 즉 입력소음의 복잡성에 비례하여 수렴계수가 시변 함으로서 그 효과를 통하여 시스템을 안정하게 성능을 개선 할 수 있다.

$$w(n+1) = w(n) + \mu(n)U(n)e(n) \quad (10)$$

$$\mu(n+1) = \rho(n) \quad (11)$$

$$\rho(n) = \beta\rho(n-1) + (1+\beta)U(n)e(n) \quad (12)$$

$$E[e(n)x(n)] \cong \rho(n) = \beta\rho(n-1) + (1-\beta)e(n)x(n) \quad (13)$$

LMS알고리즘에서 최적값으로 수렴 시 $\rho = e[x(n)e(n)] = 0$ 가 된다. β 는 smoothing factor 또는 forgetting factor 이며, 일반적으로 $0 < \beta \leq 0.9$ 범위의 값을 사용한다. 따라서 β 가 클수록 더 많이 smoothing되며, 또 다른 표현으로는 과거 값이 덜 망각(forgetting)되기 때문에 시간 평균 관점에서 보면 과거 값들의 영향력이 커진다고 할 수 있다. 식(12), 식(13)의 추정기를 사용하는 알고리즘을 smoothed LMS(SLMS) 알고리즘이라고 부른다[6].

SLMS 알고리즘이 수렴하기 위한 수렴인자 μ 의 범위와 오조정률(misadjustment) M 은 다음과 같다.

$$0 < \mu < \frac{1+\beta}{1-\beta} \frac{2}{trR_x} \quad (14)$$

$$M = \frac{\xi_{\Delta}}{\xi_{\min}} \cong \frac{1}{2} \frac{1-\beta}{1+\beta} \mu trR_x \quad (15)$$

식(14)에 의하면 SLMS 알고리즘은 LMS 알고리즘에 비하여 수렴하기 위한 μ 값의 범위가 커지며, 식(15)로부터 $\beta > 0$ 이기 때문에 같은 μ 값에 대하여 오조정률이 작아짐을 알 수 있다. 한편, $\beta=0$ 이 되면 SLMS알고리즘은 LMS 알고리즘과 같아지는데, 식(14)와 식(15)도 각각 LMS 알고리즘에 해당하는 식(16) 및 식 (17)과 같아지게 된다.

$$0 < \mu < \frac{2}{trR_x} = \frac{2}{N\sigma_x^2} \quad (16)$$

$$M = \frac{\xi_{\Delta}}{\xi_{\min}} \cong \frac{1}{2} \mu trR_x = \frac{1}{2} \mu N\sigma_x^2 \quad (17)$$

SLMS 알고리즘은 $0 < \beta \leq 0.9$ 범위의 β 값을 사용할 때, LMS알고리즘과 동일한 수렴속도를 가지면서도 오조정률이 작아진다. 반면, LMS알고리즘은 수렴속도가 빠르면 수렴 후 성능이 떨어지며, 수렴속도가 느릴 경우에는 수렴 후 성능이 향상된다. 즉, LMS알고리즘으로는 $\mu = 0.0006$ 에 해당하는 수렴속도를 가지면서 $\mu = 0.0005$ 에 해당하는 수렴 후 성능을 얻을 수 없다.

개선된 SLMS알고리즘은 수렴하는 동안 에러 값을 계속 관측하여 에러값이 일정하게 유지되면 β 값을 0.1에 근접하게 유지시켜 과거 값을 적게 반영하며 오차 값이 변화가 심할 때는 β 값을 0.8 가까이 유지하여 과거 값의 영향을 크게 하여 평균한다. 따라서 입력 소음의 주파수 특성에 따라서 β 값을 조정하여 최적의 수렴특성과 시스템의 입력 소음의 시변에 대한 발산을 방지하여 안정도를 높인다. 수렴계수는 ANC 시스템의 수렴속도, 성능, 안정도 등 전반적으로 관계한다. 본 논문에서는 오차 값의 상태를 감시하여 입력 소음의 상태를 평가하고 이것을 과거 값을 반영하는 방식으로 수렴 계수를 조정하여 수렴속도 대비 성능과 안정도를 개선했다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션

그림 1은 정현파 소음(300+200Hz)을 입력 했을 때 에러의 안정 값을 기준으로 자동 β 값을 설정한, SLMS알고리즘을 적용한 결과이며 그림 2는 정현파 입력시 FXLMS알고리즘을 사용 하였을 때 결과이다. 그림3은 광대역 모터 소음(2500rpm)을 입력 했을 때 자동 설정 값이 0.8일 때 SLMS알고리즘의 결과이며 그림4는 FXLMS알고리즘을 사용한 결과이다. 이때 필터 차수는 모두 96차를 설정 했으며 수렴계수는 모두 0.0005이다.

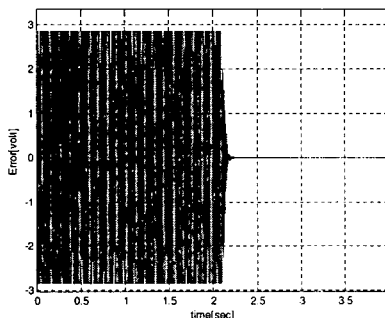


그림1 정현파 입력 SLMS 알고리즘 $\beta=0.8$

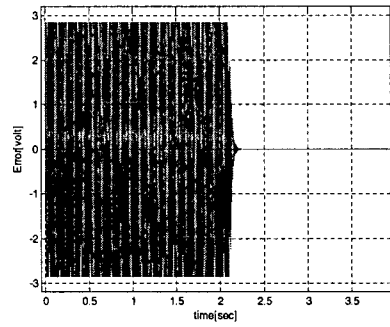


그림2 정현파 소음역 FXLMS알고리즘($\beta=0.0$)

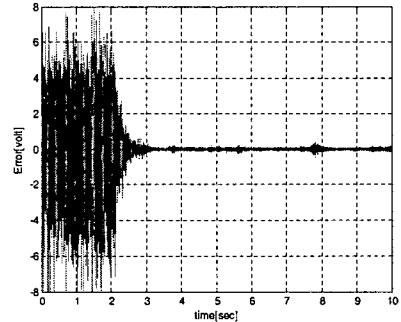


그림 3 광대역 소음 SLMS 알고리즘 $\beta=0.8$

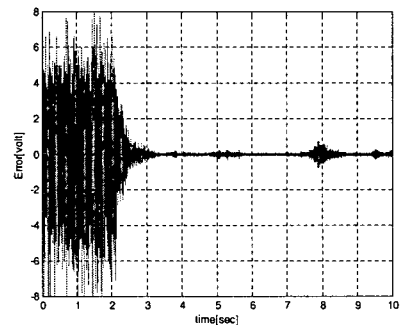


그림4 광대역 소음 FXLMS알고리즘($\beta=0.0$)

5. 결 론

컴퓨터 시뮬레이션 결과 정현파 입력의 경우는 SLMS 알고리즘을 적용한 능동소음제어 시스템과 FXLMS알고리즘을 적용한 능동소음제어 시스템이 유사한 결과를 보였으나, 광대역 소음(모터 소음, 2500rpm)의 경우에는 수렴속도, 성능, 안정도 등에서 SLMS알고리즘이 일반 FXLMS알고리즘에 비하여 모두 우수함을 알 수 있었다.

[참고문헌]

- [1] S.J. Elliott, C.C Boucher and P.A Nelson, "The behavior of a multife channel active control system", IEEE Trans. Acoust, pp.1041-1051, 1992
- [2] R.R. Leitch and M.O. Tokhi, "Active Noise Control System", IEEE Proc., Vol. 134, Pt.A, No6, pp. 525-546, 1987.
- [3] S.M. Kuo and D.Morgan, *Active Noise Control System*, John Wiley and Sons. Inc., New York, 1996.
- [4] E.C. Ifeachor and B.W Jervis, *Digital Signal Processing*, Addison-Wesley, 1996.
- [5] P.L Feintuch, "An adaptive recursive LMS filter.", Proc.IEEE, vol.64, no.11, pp.1622-1624, 1976.
- [6] 정영주, *실시간 디지털 신호처리*, pp. 660-665, 2006