

급가속시 자동차 흡기계의 능동소음제어 성능향상을 위한 Correlation FXLMS 알고리즘 개발

Development of Correlation FXLMS Algorithm for the Performance Improvement in the Active Noise Control of Automotive Intake System under Rapid Acceleration

이경태† · 심현진* · 아미누딘 빈 아부* · 이정윤** · 오재응***

Kyeong-Tae Lee† · Hyoun-Jin Sim* · Aminudin bin Abu* · Jung-Yoon Lee** · Jae-Eung Oh***

Key Words : Automotive Intake System(자동차 흡기계), Noise Reduction(소음저감), Active Noise Control(능동소음제어), Rapid Acceleration(급가속), FXLMS, Normalized FXLMS, Correlation FXLMS

ABSTRACT

The method of the reduction of the automotive induction noise can be classified by the method of passive control and the method of active control. However, the passive control method has a demerit to reduce the effect of noise reduction at low frequency (below 500Hz) range and to be limited by a space of the engine room. Whereas, the active control method can overcome the demerit of passive control method. The algorithm of active control is mostly used the LMS (Least-Mean-Square) algorithm because the LMS algorithm can easily obtain the complex transfer function in real-time. Especially, When the Filtered-X LMS (FXLMS) algorithm is applied to an ANC system. However, the convergence performance of LMS algorithm goes bad when the FXLMS algorithm is applied to an active control of the induction noise under rapidly accelerated driving conditions. Thus Normalized FXLMS algorithm was developed to improve the control performance under the rapid acceleration. The advantage of Normalized FXLMS algorithm is that the step size is no longer constant. Instead, it varies with time. But there is one additional practical difficulty that can arise when a nonstationary input is used. If the input is zero for consecutive samples, then the step size becomes unbounded. So, in order to solve this problem, the Correlation FXLMS algorithm was developed. The Correlation FXLMS algorithm is realized by using an estimate of the cross correlation between the adaptation error and the filtered input signal to control the step size. In this paper, the performance of the Correlation FXLMS is presented in comparison with that of the other FXLMS algorithms based on computer simulations.

1. 서 론

자동차 실내 소음은 타이어 소음, 노면 소음, 엔진 폭발 소음, 엔진이나 판넬 진동에 의한 구조 소음, 배기소음, 흡기소음 등의 다양한 원인에 의해 발생한다. 이에 자동차의 실내소음 저감에 관한 연구가 많이 진행되면서 과거에 비해 자동차의 실내소음이 상대적으로 많이 개선되었다. 그러나 엔진 구동 중 발생하는 흡기계소음은 실내 소음의 주된 소음원으로 연구대상이 되고 있다. 일반적으로 자동차 흡기계의 주요 역할은 엔진 내의 연소에 필요한 신선한 공기를 공급하는 것이 주요 목적이다. 흡기소음은 엔진 구동시 발생하는 공기 전달음으로서 가속시 특히, 500 Hz 이하의 저주파 대역에서 나타나며 엔진룸에서 발생하여 차음재를 통과, 차실내의 부밍음이 되어 불쾌감을 주

기 때문에 이에 대한 대책이 필요하다. 이러한 흡기소음의 문제점을 개선하기 위해서 다양한 방법들이 제시되었는데 크게 수동적인 소음제어 방법과 능동적인 소음제어 방법이 있다. 수동적인 방법은 흡음재와 차음재를 이용하는 방법과 흡기덕트에 음향 공진 주파수에 해당하는 공명기를 사용하는 방법이 있다. 그러나 흡음재와 차음재는 500 Hz 이하의 저주파 대역에서는 소음제어 효과가 미미하고, 공명기는 엔진 룸의 크기가 제한되어 있기 때문에 여러 개를 장착할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서 설치공간이 공명기에 비해 작고 500 Hz 이하의 넓은 주파수 대역을 제어할 수 있는 능동소음제어가 부각되었다.

현재 능동소음제어 알고리즘 중에서 많이 사용되고 있는 LMS 알고리즘은 복잡한 전달함수를 실시간으로 구할 수 있기 때문에 소음의 특성 변화와 시스템의 환경변화 등에 대해서도 성능을 유지해야 하는 능동소음제어 시스템에서 주로 사용되어 왔다. 이 LMS 알고리즘의 성능을 보완하기 위한 여러 알고리즘이 개발되었는데, 그 중에서 FXLMS 알고리즘이 차량의 진동·소음 제어에 많이 적용되고 있다. 그러나 FXLMS 알고리즘을 급가속시 흡기소음제어에 적용할 경우 흡기소음의

† 한양대학교 대학원 자동차공학과
E-mail : al411119@naver.com
Tel : (02) 2294-8294, Fax : (02) 2299-3153

* 한양대학교 대학원 자동차공학과

** 경기대학교 기계시스템디자인공학부

*** 한양대학교 기계공학부

주파수와 크기가 급변하므로 제어성능이 저하된다.

그러므로 본 논문에서는 급가속시 흡기소음 제어의 제어 성능을 향상시키고, 안정성을 보장할 수 있도록 새로운 적응제어기법, 즉 시간에 따라 변화하는 수렴계수를 고려한 Normalized FXLMS를 제안하였고, 이를 더욱 향상시켜 오차신호와 부가경로가 보상된 참조신호의 상호상관을 고려한 알고리즘인 Correlation FXLMS를 제안하였다. 그리고 이 새로운 알고리즘을 급가속시 흡기소음 데이터에 적용한 후 기존의 FXLMS와 비교 분석하여 실차적용의 가능성을 검토하였다.

2. 이론

2.1 FXLMS 알고리즘⁽¹⁾⁽²⁾

앞먹임 FXLMS 알고리즘의 블록선도는 Fig. 1과 같다.

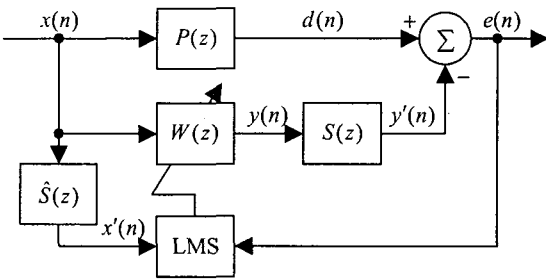


Fig. 1 Block diagram of FXLMS algorithm

오차 센서와 제어 액추에이터 사이에 있는 부가경로 전달함수 $S(z)$ 는 오프라인으로 모델링 되도록 하며 그 예측치는 $\hat{S}(z)$ 로 표시한다. 주 음원으로부터의 원하지 않는 신호는 참조신호 센서에 의해 관측된다. 이 참조신호 $x(n)$ 은 적응 필터 $W(z)$ 와 부가경로 전달함수 $S(z)$ 를 통과하여 오차신호 $e(n)$ 을 최소화하기 위한 제어신호 $y'(n)$ 을 발생시키기 위해서 사용된다. 참조신호 $x(n)$ 은 또한 적응필터 $W(z)$ 의 계수를 갱신하기 위해 사용되는 부가경로가 보상된 참조신호 $x'(n)$ 을 얻기 위해서 부가경로 전달함수의 예측치 $\hat{S}(z)$ 에 의해 필터링된다. 부가경로 전달함수 예측치 $\hat{S}(z)$ 와 함께 적응필터 $W(z)$ 는 유한응답필터로 구현된다. 시간 n 에서의 오차신호 $e(n)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} e(n) &= d(n) - y'(n) = d(n) - s(n) * y(n) \\ &= d(n) - s(n) * [w^T(n)x(n)] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $s(n)$ 은 시간 n 에서의 부가경로 전달함수 $S(z)$ 의 임펄스응답이다. 시간 n 에서 참조신호

$x(n)$ 의 벡터와 적응필터 $W(z)$ 의 계수 벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{x}(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-L+1)] \quad (2)$$

$$\mathbf{w}(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \ \dots \ w_{L-1}(n)] \quad (3)$$

여기서, L 은 적응필터 $W(z)$ 의 차수이다. 적응필터의 목적은 순간 평균자승오차(instantaneous mean square error)인 $\hat{\xi}(n) = e^2(n)$ 을 최소화시키는 것이며, 이 목적을 실현시키기 위한 steepest descent algorithm은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \frac{\mu}{2} \nabla \hat{\xi}(n) \quad (4)$$

여기서, $\nabla \hat{\xi}(n)$ 는 시간 n 에서의 평균자승오차 gradient의 순간 추정치이며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \nabla \hat{\xi}(n) &= \nabla e^2(n) = 2[\nabla e(n)]e(n) \\ &= 2[-s(n) * \mathbf{x}(n)]e(n) = -2\mathbf{x}'(n)e(n) \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입하면 FXLMS 알고리즘을 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{x}'(n)e(n) \quad (6)$$

여기서, μ 는 수렴계수이며, 적응필터 $W(z)$ 가 안정적으로 수렴하려면 μ 는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$0 < \mu < \frac{2}{LP_x}, \quad P_x = E[x^2(n)] \quad (7)$$

여기서, P_x 는 참조신호의 파워이다.

2.2 Normalized FXLMS 알고리즘

식(6)에 나타나 있듯이 FXLMS 알고리즘의 적응과정에서 수렴시간과 안정성은 μ 와 $\mathbf{x}'(n)$ 에 의존한다. 또한 FXLMS 알고리즘에서는 고정된 수렴계수를 사용하므로 참조신호의 파워가 작은 경우에는 필터차수 L 을 크게 선정해야 하며 참조신호의 파워가 큰 경우에는 필터차수 L 을 작게 선정해야 한다. 그러나 참조신호의 파워가 시간에 따라 변하는 경우 고정된 수렴계수로는 정상적인 제어 성능을 나타내지 못한다. 이러한 점을 보완하기 위해 본 논문에서는 부가경로가 보상된 참조신호 $x'(n)$ 의 파워에 대해 수렴계수를 정규화하는 알고리즘인 Normalized FXLMS 알고리즘을 제안하였고, 수렴계수는 다음과 같다.

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{L\hat{P}'_x}, \quad (0 < \alpha < 2) \quad (8)$$

여기서, α 는 정규화된 수렴계수이고, \hat{P}'_x 는 $x'(n)$ 의 파워에 대한 추정치이다. \hat{P}'_x 를 추정하는 가장 간단한 방법은 $x'^2(n)$ 에 대한 running-average 필터를 사용하는 것이다. 다음은 $x'^2(n)$

에 대한 M 차 running-average 필터이다.

$$\hat{P}_x'(n) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x'^2(n-i) \quad (9)$$

만약 running-average 필터의 차수가 적응 필터의 차수와 같다면 즉, $L=M$ 이면 다음과 같다.

$$\hat{P}_x' = \frac{\mathbf{x}'^T(n)\mathbf{x}'(n)}{L} \quad (10)$$

식(10)을 식(8)에 대입하면 다음과 같다.

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{\mathbf{x}'^T(n)\mathbf{x}'(n)} \quad (11)$$

식(11)에서 수렴계수는 $\mathbf{x}'(n)=0$ 일 경우 적응 필터 $W(z)$ 가 발산하므로 미소량 δ 를 식(11)의 분모에 더해지면 다음과 같이 Normalized FXLMS 알고리즘을 구할 수 있다.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \frac{\alpha}{\delta + \mathbf{x}'^T(n)\mathbf{x}'(n)} \mathbf{x}'(n)e(n) \quad (12)$$

2.3 Correlation FXLMS 알고리즘

적용필터 $W(z)$ 의 계수 벡터인 $\mathbf{w}(n)$ 이 최적의 계수 벡터 \mathbf{w}^o 로 수렴하면 오차신호 $e(n)$ 과 부가경로가 보상된 참조신호 $x'(n)$ 의 상호상관 $R(n)$ 은 0 이 된다는 것이 Correlation FXLMS 알고리즘의 기본 개념이며 다음과 같이 표현된다.

$$R(n) = E[e(n)x'(n)] = 0 \quad (13)$$

식(13)의 상호상관 $R(n)$ 은 $e(n)x'(n)$ 의 기대값과 같으며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E[e(n)x'(n)] &\approx E\{[d(n) - \mathbf{w}(n)\mathbf{x}'(n)]x'(n)\} \\ &= E[d(n)x'(n) - \mathbf{x}'(n)\mathbf{x}'^T(n)\mathbf{w}(n)] \\ &= E[d(n)x'(n)] - E[\mathbf{x}'(n)\mathbf{x}'^T(n)]\mathbf{w}(n) \end{aligned} \quad (14)$$

식(14)에서 벡터 $\mathbf{w}(n)$ 이 최적 벡터 \mathbf{w}^o 로 수렴하면 $E[e(n)x'(n)]$ 은 0 이 되기 때문에 Correlation FXLMS 알고리즘의 기본 개념이 증명된다. 만약 $\mathbf{w}(n)$ 이 \mathbf{w}^o 에서 멀리 떨어져 있다면 상호상관과 수렴계수는 상대적으로 커지고, $\mathbf{w}(n)$ 이 \mathbf{w}^o 에 점점 다가갈수록 상호상관과 수렴계수는 상대적으로 작아질 것이기 때문에 상호상관 $R(n)$ 과 수렴계수 $\mu(n)$ 은 서로 비례한다고 볼 수 있다. 따라서 식(12)의 수렴계수를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu(n) = \frac{C}{\delta + \mathbf{x}'^T(n)\mathbf{x}'(n)} R(n) \quad (15)$$

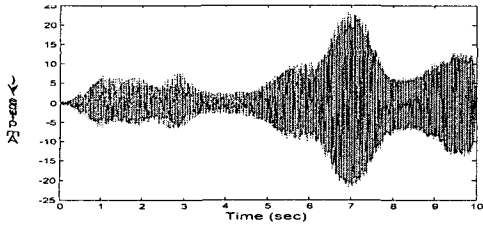
$$R(n) = \lambda R(n-1) + (1-\lambda)x'(n)e(n) \quad (16)$$

여기서, C 는 상수이고 λ 은 0 에서 1 사이의 상수이다. 그러므로 Correlation FXLMS 알고리즘은 다음과 같다.

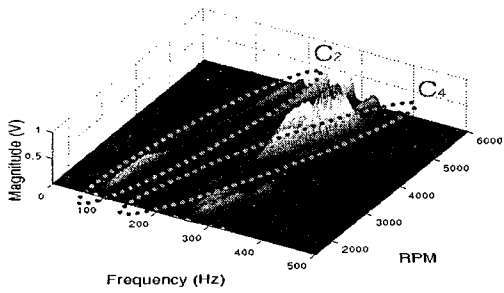
$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \frac{CR(n)}{\delta + \mathbf{x}'^T(n)\mathbf{x}'(n)} \mathbf{x}'(n)e(n) \quad (17)$$

3. 능동흡기소음제어 시뮬레이션 결과

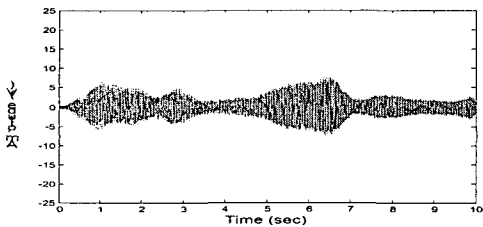
시뮬레이션에 사용된 데이터는 4 기통 엔진, 2400cc 급의 승용차를 기어 2 단인 상태에서 최대로 가속한 신호의 데이터이다. Fig. 2 는 급가속시 흡기소음의 신호이며 흡기소음의 주요 성분이 엔진폭발주파수(C_2)와 조화주파수(C_4)로 구성되어 있음을 확인할 수 있다. 엔진폭발주파수(C_2)는 90 Hz~190Hz로 변하며 초당 10 Hz의 변화율을 갖고, 조화주파수(C_4)는 180 Hz~380 Hz로 변하며 초당 20 Hz의 변화율을 갖는 것을 볼 수 있다. Fig. 3 은 급가속시 흡기소음의 데이터에 대해 FXLMS 알고리즘으로 능동소음제어 시뮬레이션을 실행한 결과이다. 그리고 Fig. 4 와 Fig. 5 는 Normalized FXLMS 알고리즘과 Correlation FXLMS 알고리즘으로 능동소음제어 시뮬레이션을 실행한 결과이다. FXLMS 알고리즘을 적용한 경우 엔진폭발주파수(C_2)는 52% 저감되었고, 조화주파수(C_4)는 68% 저감되었다. Normalized FXLMS 알고리즘을 적용한 경우 수렴계수가 부가경로가 보상된 참조신호 $x'(n)$ 의 파워에 대해 정규화 되기 때문에 FXLMS 알고리즘으로 능동소음제어 된 결과보다 안정성을 유지하면서 더 빠른 수렴성능을 보이며, 엔진폭발주파수(C_2)가 75% 저감되었고, 조화주파수(C_4)가 88% 저감되었다. Correlation FXLMS 알고리즘을 적용한 경우 제어 시작되는 초기에는 $e(n)$ 과 $x'(n)$ 의 상호상관이 크므로 수렴계수는 상대적으로 커지고, 제어가 진행되면서 $e(n)$ 과 $x'(n)$ 의 상호상관이 작아지므로 수렴계수가 작아지기 때문에 Normalized FXLMS 알고리즘 보다 더 빠른 수렴성능과 더 나은 안정성을 보장할 수 있는 것을 확인할 수 있으며, 엔진폭발주파수(C_2)는 81% 저감되었고, 조화주파수(C_4)는 93% 저감되었다. 결과적으로 급가속시 흡기소음을 능동소음제어 시뮬레이션 할 경우 Normalized FXLMS 알고리즘이 FXLMS 알고리즘에 비해 더 빠른 수렴성능을 보였으며, Correlation FXLMS 알고리즘이 Normalized FXLMS 알고리즘에 비해 더욱 안정적이면서도 향상된 제어성능을 보였다. 따라서 Correlation FXLMS 알고리즘을 이용한 능동소음제어의 실차 적용 가능성을 충분히 확인할 수 있었다.



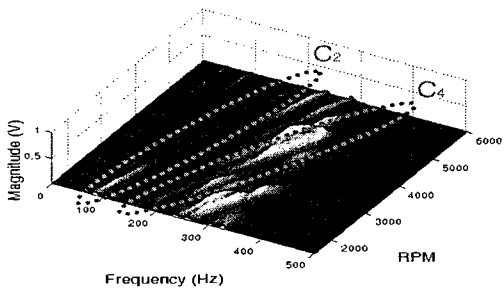
(a) Time domain



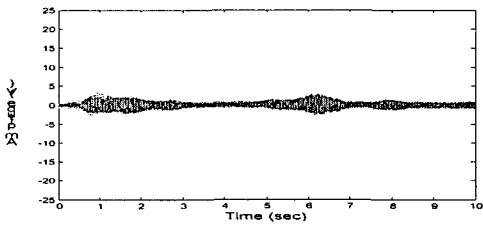
(b) Frequency domain
Fig. 2 Before ANC simulation



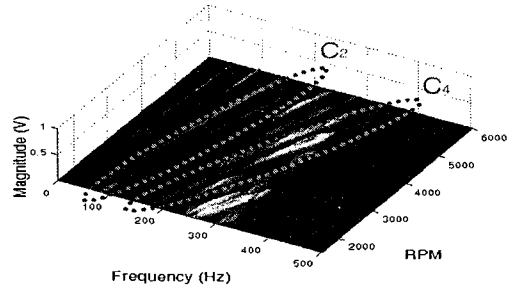
(a) Time domain



(b) Frequency domain
Fig. 3 After ANC simulation using FXLMS

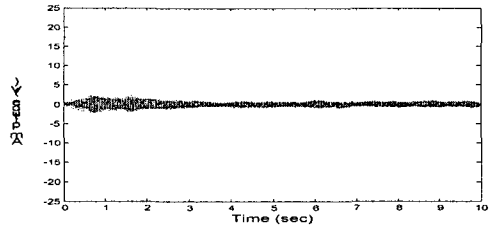


(a) Time domain

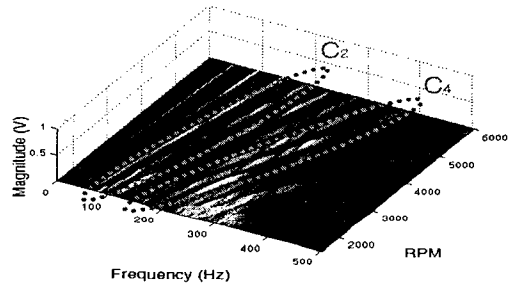


(b) Frequency domain

Fig. 4 After ANC simulation using Normalized FXLMS



(a) Time domain



(b) Frequency domain

Fig. 5 After ANC simulation using Correlation FXLMS

4. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 첫째, 급가속시 흡기소음은 엔진폭발주파수(C_2)와 그 조화주파수(C_4)가 주요함을 확인하였다. 둘째, 급가속시 흡기소음의 능동제어 시뮬레이션을 수행한 결과 기존의 FXLMS 알고리즘에 비해 Correlation FXLMS 알고리즘이 능동소음제어의 안정성과 제어성능을 향상시켰으며 실차적용 가능성을 보여주었다.

참고문헌

- (1) Sen M. Kuo, Dennis R. Morgan, "Active Noise Control Systems, Algorithms and DSP implementations", John Wiley & Sons, New York, 1996
- (2) T. J. Shan, T. Kailath, "Adaptive algorithm with an automatic gain control feature", IEEE Trans. Circuits Syst., CAS-35, 122-127, Jan. 1988