

# L-Point Running Average Filter 를 이용한 급가속 흡기계의 능동소음제어 성능향상을 위한 알고리즘 개발

## Development of Active Intake Noise Control Algorithm for Improvement Control Performance under Rapid Acceleration and Disturbance

전기원\*·조용구\*·오재응\*\*·이정윤\*\*\*

Ki-won Jeon\*·Yong-goo Joe\*·Jae-Eung Oh\*\*·Jung yoon Lee\*\*\*

**Key Words :** Intake System(흡기계), Active Noise Control(능동소음제어), Noise Reduction(소음저감),  
Filtered-x LMS Algorithm(FXLMS), L-Point Running Average Filter.

### ABSTRACT

Recently Intake noise has been extensively studied to reduce the engine noise. In order to diminish intake noise several resonators were added to the intake system. However this can cause a reduction of engine output power and an increase of fuel consumption. In this study, active noise control simulation of the Filtered-x LMS algorithm is applied real instrumentation intake noise data under rapid acceleration because intake noise is more excessively increased under the such a harsh condition. But the FXLMS algorithm has poor control performance when the system is disturbed. Thus modified FXLMS algorithm using L-point running average filter is developed to improve the control performance under the rapid acceleration and disturbance. The noise reduction quantity of modified Filtered-x LMS algorithm is more than original one in two cases. In the case of control for real instrumentation intake noise data, maximum residual noise of modified FXLMS algorithm is 2.5 times less than applied the FXLMS and also in the case of disturbed, the modified FXLMS algorithm shows excellent control performance but FXLMS algorithm can not control.

### 1. 서 론

자동차 소음의 주요원인은 엔진소음이기 때문에 지금까지의 자동차 소음 저감에 관한 연구는 엔진소음에 집중되어 왔다. 하지만, 최근에 엔진소음에 대한 연구와 함께 흡·배기계 소음저감에 대한 연구가 부각되면서 자동차 소음저감뿐 아니라 엔진성능향상도 기대할 수 있게 되었다. 흡기계의 소음을 저감하는 방식에는 흡·차음재 또는 공명기(Resonator)를 이용하여 흡기계의 형상을 변경하는 방식과 부가음원(Secondary Source)를 이용하는 능동제어방식이 있다. 흡·차음재는 500Hz 미만의 저주파 대역에서는 소음저감 효과가 미비하며 공명기의 경우 엔진 룸의 크기가 제한되어 형상변경이 용이하지 못하기 때문에 흡기계의 설계는 엔진 룸 설계이전에 선행되어 공명기의 크기, 위치 등이 결정되어야 한다. 따라서 공명기에 비해 설치공간이 비교적 작으며 다수의 공명주파

수의 소음을 제어 할 수 있는 능동소음제어에 최근 관심이 집중되고 있다.

능동소음제어에 주로 사용되는 LMS 알고리즘은 복잡한 전달함수를 실시간으로 구할 수 있기 때문에 소음의 특성변화와 시스템의 환경변화 등에 대해서도 성능을 유지해야 하는 시스템에서 주로 사용되어 왔다. 현재 차량의 진동·소음 제어 분야에는 제어성능이 보장된 filtered-x LMS(FXLMS) 알고리즘이 적용되고 있다.

급가속시의 흡기 소음은 감속이나 정상주행 시보다 현저히 크기 때문에 이 경우에 주목할 필요가 있다. 또한 자동차의 주행 중에는 여러 가지 왜란이 발생할 확률이 높으며 이러한 왜란은 LMS 알고리즘의 안정성에 큰 영향을 미친다. 이 논문에서는 급가속시 발생하는 흡기계의 실측 소음을 제어성능을 향상시키고, 랜덤하게 발생하는 왜란에 대한 안정성과 제어성능을 동시에 보장할 수 있도록 L-Point Running Average 필터를 이용한 Modified-FXLMS 알고리즘을 제안하고 이를 FXLMS 알고리즘과 비교하였다. 소음 제어 시뮬레이션 결과 비교를 통해 modified FXLMS 알고리즘이 실측 소음 신호와 합성 소음 신호 모두 FXLMS 알고리즘보다 뛰어난 성능을 발휘 하는

\* 한양대학교 대학원 자동차공학과  
E-mail : jk1464@hanmail.net  
Tel : (02) 2294-8294, Fax : (02) 2299-3153  
\*\* 한양대학교 기계공학부  
\*\*\* 경기대학교 기계시스템디자인공학부

것을 확인 할 수 있었다. 특히 FXLMS 알고리즘이 랜덤 소음 성분에 대해 한계성을 규명하고 이 경우에 대한 modified FXLMS 알고리즘의 우수성을 입증하였다.

## 2. 이론

### 2.1 Filtered-x LMS 알고리즘

여기에 2.1 절의 내용을 입력하십시오  
 앞먹임 FXLMS 알고리즘의 블록선도는 Fig.1 과 같다. 부가경로 전달함수 (오차 센서와 제어 액츄에이터 사이의 전달함수)는 오프라인(off-line)으로 모델링 되도록 하며 그 예측치는  $\hat{s}_k$  로 표시한다. 주 음원(primary noise)으로부터의 원하지 않는 신호는 참조 신호 센서에 의해 관측되고 적응 필터를 통하여 필터링되어 오차 센서 신호를 최소화하기 위하여 제어음을 구동시키기 위하여 사용된다. 참조신호는 또한 적응필터의 계수를 갱신하기 위해 사용되는 부가경로가 보상된 참조신호를 얻기 위하여 부가경로 전달함수의 예측치에 의해 필터링 된다. 부가경로 전달함수 예측치와 함께 적응필터는 유한응답필터(FIR filter)로 구현된다. 시간  $k$  에서의 오차신호는 다음과 같이 표현된다

$$e_k = d_k - y'_k = d_k - s_k * y_k \quad (1)$$

$$= d_k - s_k * [w_k^T x_k]$$

는 시간에서의 부가경로 전달함수  $s_k$  의 충격응답이다.  $s_k$  는 제어신호로서 참조 신호를 주제어필터에 통과시킴으로써 발생된다. 시간  $k$  에서 주제어 필터의 계수 벡터와 참조신호는 다음과 같다.

$$w_k = [w_{0k} \ w_{1k} \ w_{2k} \ \dots \ w_{L-1k}]^T \quad (2)$$

$$x_k = [x_k \ x_{k-1} \ x_{k-2} \ \dots \ x_{k-L+1}]^T \quad (3)$$

여기서,  $L$  은 주제어 필터의 차수이다.  $\hat{\xi}_k = e_k^2$  를 최소화시키기 위해 사용되는 LMS 알고리즘은 다음과 같이 정의 된다.

$$w_{k+1} = w_k - \frac{\mu}{2} \nabla \hat{\xi}_k \quad (4)$$

$\nabla \hat{\xi}_k$  는 시간  $k$  에서의 평균 자승 오차의 순간 예측치 값이며 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \hat{\xi}_k = \nabla e_k^2 = 2[\nabla e_k] e_k = -2x'_k e_k \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입하면 FXLMS 알고리즘의 필터계수 갱신식은 다음과 같다.

$$w_{k+1} = w_k + \mu x'_k e_k \quad (6)$$

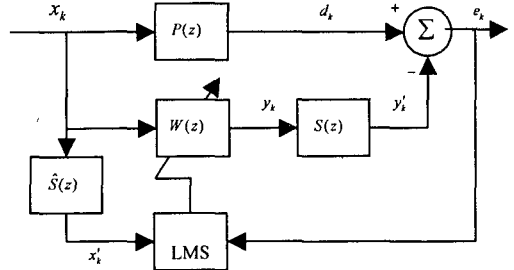


Fig.1 Block diagram of adaptive feedforward control system.

### 2.2 L-Point Running Average Filter

식(7)은 L-Point Running Average Filter 를 나타낸다. 이 필터는 필터길이  $L$  에 해당하는 값들의 평균을  $e_k$  로 출력하는 디지털 필터이다. 이 필터를 이용하면 필터길이  $L$  만큼 원소들의 평균을 취하게 되므로 왜란에 의한 영향을 줄일 수 있다.

$$e_k = \frac{1}{L} \sum_{k=L/2}^{L/2} x[k-L] = x[k] * h[k] \quad (7)$$

여기서  $h[k]$  는 필터의 충격응답이다.

### 2.3 Modified FXLMS Algorithm

식(1)에서 계산된 오차신호는 식(5)와 (6)에서 필터계수와 필터의 출력을 계산하는 중요한 신호이다. 그러나 자동차가 급가속, 충격, 스파크(Spark), 썬지(Surge), EMI(Electromagnetic Interference) 상황 등 각종 왜란에 노출되면 참조신호에 왜란 성분이 첨가되게 되므로 이 참조신호를 가지고 출력을 만들어 내는 FXLMS 알고리즘은 제어 성능뿐만 아니라 안정성에 심각한 영향을 받게 된다. 따라서 시스템이 왜란을 받을 때 신호의 안정성이 확보되어야 하는데  $e_k$  를 왜란에 강하게 만든다면 식(5)와 (6)에서 필터계수를 만들 때 왜란에 영향을 덜 받는 신호를 만들어 낼 수 있다.

$e_k$  를  $L$ -point running average 하여 사용하면  $e_k$  를 왜란에 대해 강하게 만들 수 있다. 따라서 시스템의 안정성과 제어 성능을 보장할 수 있다.  $e_k$  의  $L$ -point running average 는 식(7)로 얻을 수 있다.

Fig. 2 는 L-point running average filter 가 첨가된 modified FXLMS 알고리즘의 블록선도이다. 여기서  $E(z)$  는 L-point running average filter 출력의 Z 변환이다.

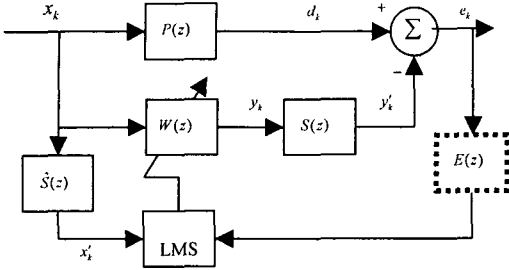


Fig. 2 Block diagram of adaptive feedforward control system with L-point running average filter.

### 3. 급가속시의 시뮬레이션 결과

#### 3.1 흡기계 실측데이터의 소음제어 시뮬레이션

Fig.3 은 2 단 급가속시 주파수 와 크기의 급격한 변화를 보이는 실측 데이터이고 Fig.4 는 Fig.3 을 FFT(Fast Fourier Transform)한 결과이다. 급가속시 흡기계의 소음 신호는 1 차 고주파 성분이 10 초 동안 70Hz~170Hz 으로 변화한다. 이는 초당 10Hz 의 주파수 변화율이다. 또한 Fig.4 는 급가속시 흡기계 실측 데이터를 FXLMS 알고리즘으로 소음 제어시뮬레이션을 수행 한 결과이고 Fig.5 는 본 연구에서 제시한 modified FXLMS 알고리즘을 이용하여 소음제어 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 두 알고리즘 모두 좋은 소음제어 성능을 보이는 것을 확인 할 수 있고 흡기 소음이 급격하게 커지는 2.5 초부터 7 초 사이에서 다른 시간 구간 보다 많은 잔여 소음이 있음을 확인할 수 있다. 두 알고리즘의 소음제어 후 잔여 소음의 양이 FXLMS 알고리즘이 modified FXLMS 알고리즘 보다 최대 값이 2.5 배 크다. 두 알고리즘의 제어 결과를 보면 FXLMS 알고리즘은 제어 초기에 잔여 소음이 크고 modified FXLMS 알고리즘은 흡기 소음이 급격히 작아질 때 잔여 소음이 큰 것을 확인 할 수 있다. 이는 L-point running average filter 의 출력이 현 시점에서 샘플링 된 신호와 과거에 샘플링 된 신호를 가지고 필터 길이 L 에 따라 결정되기 때문이다. 또한 잔여 소음에 형태에서 FXLMS 알고리즘은 고주파 성분이 modified FXLMS 알고리즘 보다 많이 섞여 있음을 알 수 있다. 이는 L-point running average filter 가 일종의 저주파 통과 필터 역할을 하기 때문이다. 이 성질은 신호중에 섞여있는 왜란은 대부분이 고주파 신호이므로는 L-point running average filter 를 사용하

면 왜란의 성분을 필터링시키기 때문에 왜란이 섞여있는 신호의 소음제어에서 커다란 장점이 된다.

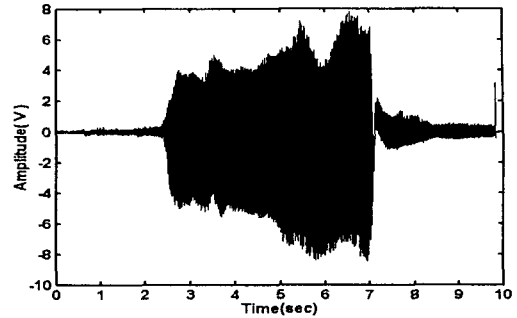


Fig.3 Reference signal of acceleration signal

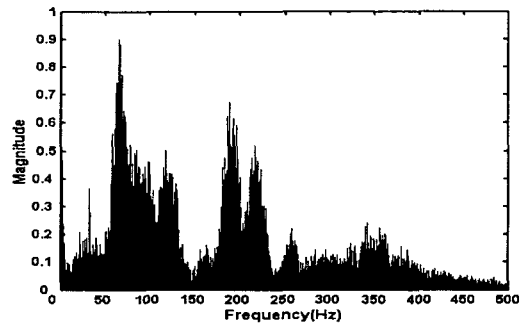


Fig. 4 Reference signal in frequency domain

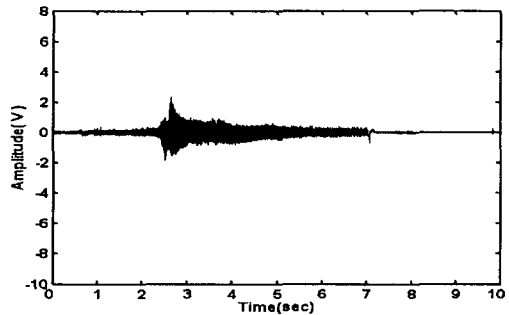


Fig. 5 After control using FXLMS

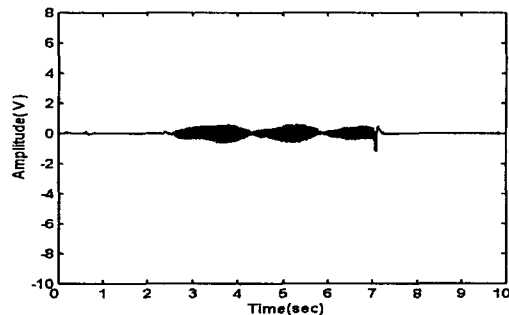


Fig. 6 After control using modified FXLMS

3.2 (1) 흡기계의 소음 데이터에 랜덤 소음을 더한 신호의 소음제어 시뮬레이션

Fig.7 은 급가속시 흡기계의 실측 소음데이터에 랜덤 신호를 더해준 신호로 충격, EMI, 스파크, 써지 등 각종 왜란의 영향을 시뮬레이션 할 수 있도록 하기 위해 합성해낸 신호이다. 더해준 랜덤 신호는 실제보다 훨씬 가혹한 상황을 만들어 준 것으로 랜덤 소음 신호의 크기를 5V 로 하여 합성하였다. 이 합성 신호에 대한 결과가 Fig.8 과 Fig.9 에 나타나 있다. Fig.8 은 FXLMS 알고리즘을 사용하여 소음제어 시뮬레이션을 수행한 결과이고 Fig.9 은 본 논문에서 제시한 modified FXLMS 알고리즘을 사용하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다.

Fig.8 에서 확인할 수 있듯이 FXLMS 알고리즘은 랜덤 소음에 대해서는 거의 제어 효과가 없음을 알 수 있다. 이는 FXLMS 알고리즘이 앞먹임 제어계를 구성하기 때문이다. 앞먹임 제어계는 참조 신호를 가지고 제어신호를 만들어내기 때문에 왜란은 이 과정에서 참조신호와 제어 스피커가 있는 지점에서 요구되는 신호간의 상관관계를 떨어뜨려 랜덤 소음 신호가 섞여 있을 때는 효과적인 제어를 할 수 없다. 또한 실제 시스템에서는 이러한 왜란 성분이 궤환으로 인해 증폭되어 시스템이 불안정해질 수 있다. 이것은 FXLMS 알고리즘이 제어스피커가 설치된 위치에서 요구되는 신호와 상관관계가 높은 참조신호를 얻을 수 있고 왜란이 적은 곳에서만 사용될 수 있음을 말한다.

Fig.9 에서 합성된 소음 신호에 대해 modified FXLMS 알고리즘은 FXLMS 알고리즘이 제어하지 못하는 랜덤 소음신호에 대해서도 제어 성능이 뛰어난 것을 알 수 있다. 이것은 L-point running average filter 가 FXLMS 알고리즘의 랜덤 소음 신호에 대한 민감성을 줄여 주기 때문이다. 따라서 제어시스템의 안정도가 보장되므로 제어스피커가 설치된 지점에서 요구되는 신호와 참조 신호의 상관관계가 떨어져도 사용할 수 있는 장점을 가진다. 또한 마이 마이크로폰으로 오차 신호를 측정 한 신호 자체에 EMI 나 써지, 스파크 등에 의한 영향으로 측정신호가 왜곡이 되었을 때에도 안정적인 제어 성능을 보장할 수 있게 된다.

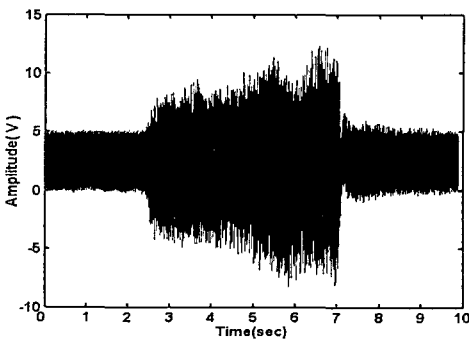


Fig.7 Reference signal of acceleration signal summing random noise.

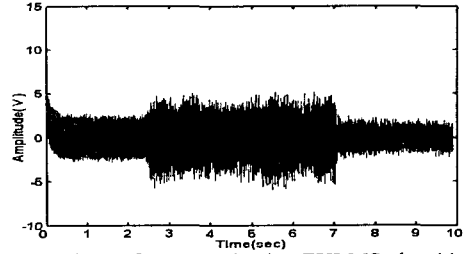


Fig.8 After control using FXLMS algorithm

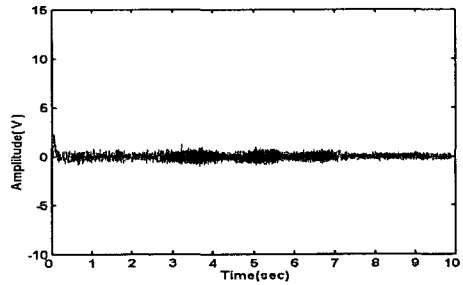


Fig.9 After control using modified FXLMS

#### 4. 결론

본 연구에서는 L-point running average filter 를 사용하여 개발된 소음제어 알고리즘의 소음제어 시뮬레이션 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

첫째, modified FXLMS 알고리즘은 사용하여 급가속 시 주파수와 그 크기가 변하는 실측 흡기 소음의 제어 시뮬레이션에서 FXLMS 보다 최대 잔여 소음 량이 2.5 배 줄었다.

둘째, 여러 가지 왜란을 가정하여 급가속시 흡기계의 실측 소음데이터에 랜덤신호를 더한 신호의 제어 시뮬레이션에서 에서 FXLMS 알고리즘은 랜덤신호 성분을 제어하지 못하는 것을 알 수 있다. 반면 L-point running average filter 를 사용한 modified FXLMS 알고리즘은 랜덤한 왜란이 섞인 소음 신호를 제어할 수 있었으며 그 제어 성능 역시 우수하였다.

#### 참고 문헌

- (1) 이충휘, 오재웅, 심현진, 이유엽, "능동흡기소음제어 시스템의 성능향상에 관한 연구," 한국 정밀공학회 지 춘계학술대회 논문집 pp.326~329 2002-05.17.
- (2) 김영식, "급가속 흡기계의 능동소음제어의 성능향상에 관한 연구," 한양대학교 2002
- (3) James H. McClellan, Ronald W. Schafer, Mark A. Yoder, "DSP FIRST A Multimedia Approach".
- (4) Sen M. Kuo, Dennis R. Morgan, " Active Noise Control Systems"