

## 능동흡기소음제어 시스템의 개발 및 성능향상에 관한 연구

이충휘\*(한양대 대학원 자동차공학과), 오재응(한양대 기계공학부),  
심현진\*(한양대 대학원 자동차공학과), 이유엽\*(한양대 대학원 자동차공학과)

### The Study on the Performance Improvement and the Development of Active Intake Noise Control System

Choong-Hwi Lee(Automotive Eng. Dept., HYU), Jae-Eung Oh(School of Mechanical Eng., HYU),  
Hyoun-Jin Sim(Automotive Eng. Dept., HYU), You-Yub Lee(Automotive Eng. Dept., HYU)

#### ABSTRACT

Engine noise is one of the major causes of the interior noise, and so has been studied in various ways in recent days. Recently Intake noise has been extensively studied to reduce the engine noise. Conventional method to reduce the noise is adding several resonators to the induction system. However this causes a reduction of engine output power and an increase of fuel consumption. In this study, the prototype of Active Intake Noise Control System is developed by using the *Filtered-x* LMS algorithm to reduce the Intake noise during acceleration. Intake noise is more excessively increased when the engine is rapidly accelerated. So, Normalized LMS algorithm is applied to improve the control performance under the rapid acceleration.

**Key Words** : Intake System(흡기계), Active Noise Control(능동소음제어), Sound Reduction(소음저감), Filtered-x LMS Algorithm(FXLMS), Normalized LMS Algorithm

#### 1. 서론

자동차 소음의 주요원인은 엔진소음이기 때문에 지금까지의 자동차 소음 저감에 관한 연구는 엔진 소음에 집중되어 왔다. 하지만, 최근에 엔진소음에 대한 연구와 함께 흡·배기계 소음저감에 대한 연구가 부각되면서 자동차 소음저감뿐 아니라 엔진성능 향상도 기대할 수 있게 되었다. 흡기계의 소음을 저감하는 방식에는 흡·차음재 또는 공명기(Resonator)를 이용하여 흡기계의 형상을 변경하는 방식과 부가음원(Secondary Source)를 이용하는 능동 제어방식이 있다. 흡·차음재는 500Hz 미만의 저주파대역에서는 소음저감 효과가 미비하며 공명기의 경우 엔진 룸의 크기가 제한되어 형상변경이 용이하지 못하기 때문에 흡기계의 설계는 엔진 룸 설계 이전에 선행되어 공명기(Resonator)의 크기, 위치 등이 결정되어야 한다. 따라서, 공명기에 비해 설치공간이 비교적 작으며 다수의 공명주파수(Resonant frequency)의 소음을 제어할 수 있는 능동소음제어에 최근 관심이 집중되고 있다.<sup>2),4)</sup>

능동소음제어에 주로 사용되는 LMS 알고리즘은 복잡한 전달함수를 실시간으로 구할 수 있기 때문에 소음의 특성 변화와 시스템의 환경변화 등에 대해서도 성능을 유지해야 하는 시스템에서 주로 사용되어 왔다. 이 LMS 알고리즘의 성능을 보완하기 위한 여러 알고리즘이 개발되었는데, 차량의 진동·소음 제어 분야에 *filtered-x* LMS(FXLMS) 알고리즘이 많이 적용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 FXLMS 알고리즘과 DSP(Digital Signal Processor)를 이용하여 흡기 소음 제어를 위한 능동흡기소음 제어기의 프로토타입을 개발하였고, 흡기 시뮬레이터에 장착하여 다양한 입력신호에 대한 제어 실험을 통하여 제어 성능을 평가하였다.

흡기 소음은 엔진의 흡입 행정시 피스톤 및 밸브류의 충격음이 흡기관을 타고 외부로 방사되는 성분과 그 조화성분의 조합으로 이루어져 있는 소음으로 주파수 변화와 진폭변화를 보이는 복잡한 신호이다. 특히 급가속시에는 피스톤의 압축가스 압력이 2~3 배 커지게 되므로 폭발음과 밸브 개폐

의 충격음이 매우 커지게 된다. 더구나 흡기관이나 실내 음장의 공명주파수와 공진을 일으켜 가속 소음의 원인이 되기도 한다. 실제로 급가속시의 흡기 소음이 감속이나 정상주행 시 보다 현저히 크기 때문에 이 경우에 주목할 필요가 있다.<sup>3)</sup>

일반적인 FXLMS 알고리즘으로 급가속시 흡기 소음을 제어하는 것은 한계가 있다. 따라서 이 논문에서는 Normalized FXLMS 알고리즘을 적용하여 급가속시 흡기소음의 제어성능을 향상시켰다.

## 2. 이론

### 2.1 Filtered-x LMS Algorithm<sup>2)</sup>

앞먹임 FXLMS 알고리즘의 블록선도는 Fig. 2.1에 보여진다. 부가경로 전달함수  $S(z)$  (오차 센서와 제어 액츄에이터 사이의 전달함수)는 오프라인(off-line)으로 모델링 되도록 하며 그 예측치는  $\hat{S}(z)$ 로 표시한다. Fig. 1에 보여진 것처럼 제어기는 제어 신호  $y_k$ 을 발생시키기 위하여 참조 신호  $x_k$ 을 필요로 한다. 주음원(primary noise)으로부터의 원하지 않는 신호는 참조 신호 센서에 의해 관측되고 적응 필터  $W(z)$ 를 통하여 필터링되어 오차 센서 신호  $e_k$ 을 최소화하기 위하여 이차음(secondary noise), 즉 제어음을 구동시키기 위하여 사용된다. 참조신호는 또한 적응필터  $W(z)$ 의 계수를 갱신하기 위해 사용되는 부가경로가 보상된 참조신호  $x'_k$ 을 얻기 위하여 부가경로 전달함수의 예측치  $\hat{S}(z)$ 에 의해 필터링 된다. 부가경로 전달함수 예측치  $\hat{S}(z)$ 와 함께 적응필터  $W(z)$ 는 유한응답필터(FIR filter)로 구현 된다. 시간  $k$ 에서의 오차신호는 다음과 같이 표현 된다

$$e_k = d_k - y'_k = d_k - s_k * y_k = d_k - s_k * [w_k^T x_k] \quad (1)$$

$s_k$ 는 시간  $k$ 에서의 부가경로 전달함수  $S(z)$ 의 충격응답이며 \*은 선형 중첩(convolution)을 나타낸다.  $y'_k$ 는 제어신호로서 참조 신호를 주제어필터  $W(z)$ 에 통과시킴으로써 발생된다.

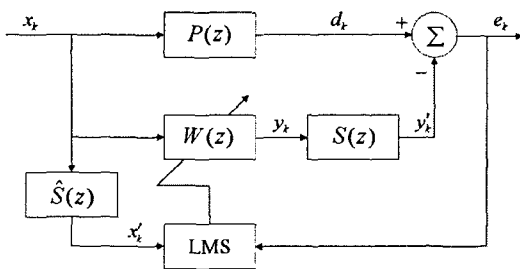


Fig. 1 Block diagram of adaptive feedforward control system

시간  $k$ 에서 주제어 필터  $W(z)$ 의 계수 벡터와 참조신호는 다음과 같다.

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

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

여기서,  $L$ 은 주제어 필터의 차수이다.

적응 필터의 목적은 순간 자승오차( $\hat{\xi}_k = e_k^2$ )를 최소화시키는데 있다. 이 목적을 달성하기 위하여 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.

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

여기서,  $\mu$ 는 수렴 계수이며 이론적으로 안정하기 위해 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$0 < \mu < \frac{2}{LP_x} \quad (7)$$

### 2.2 Normalized LMS Algorithm<sup>2)</sup>

식(7)에서 볼 수 있듯이 LMS 알고리즘에서 수렴 계수는 참조신호의 파워와 필터차수에 의해 결정되고 안정성(stability)과 수렴시간(convergence times)에 밀접한 관계가 있다. 일반적인 LMS 알고리즘에서는 고정된 수렴계수를 사용하므로 참조신호의 파워가 강한 경우에 수렴계수를 작게 하고, 약한 경우에 수렴계수를 크게 함으로써 안정성을 유지한다. 그러나 참조신호의 파워가 시간에 따라 급하게 변하는 경우 고정된 수렴계수로는 제어의 안정성을 보장할 수 없다. 이러한 점을 보완하기 위해 입력 신호의 파워에 대해 수렴계수를 정규화(normalize)하는 알고리즘이 normalized LMS 알고리즘이다.

Normalized LMS 알고리즘은 참조신호의 변화에 따라서 수렴계수를 변화시킴으로써 안정성을 유지하면서 수렴속도를 최적화 시키는 방법으로 필터 계수의 갱신식은 다음과 같다.

$$w(n+1) = w(n) + \mu(n)x(n)e(n) \quad (8)$$

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{L\hat{P}_x} \quad (9)$$

여기서,  $\hat{P}_x$ 는 참조신호  $x(n)$ 의 파워의 추정치이고  $\alpha$ 는 0에서 2사이의 값이다.

$$\hat{P}_x(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} x^2(n-m) = \hat{P}_x(n-1) + \frac{x^2(n) - x^2(n-M)}{M} \quad (10)$$

여기서,  $M$  은 moving window 의 길이이다. 특별한 경우로서  $M=L$  인 경우에  $\hat{P}_x(n)$  과  $\mu(n)$  은 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$\hat{P}_x(n) = \frac{\mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n)}{M} = E[x^2(n)] \quad (11)$$

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{\mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n)} \quad (12)$$

### 2.3 능동흡기소음 시뮬레이터

능동흡기소음 시뮬레이터는 능동흡기소음 제어기의 프로토타입과 실제 흡기계로 구성된다. Fig. 2 에 실제 흡기계를 나타내었다. 이 흡기계는 Air Intake hose assy 에 230Hz 성분의 공명기와 Extension duct assy 에 90Hz 성분의 공명기를 가지고 있다.

능동흡기소음 제어기의 프로토타입은 실제 흡기계 형상과 엔진룸의 크기에 제한을 받기 때문에 90Hz 성분의 공명기를 제거하고 장착하기 위해 공명기의 부피와 거의 같도록 구성하였으며 제어기의 형상을 com 형상으로 하여 되도록 음향모드가 발생하는 것을 방지하였다. 또한 능동흡기소음 제어기 내부의 제어 스피커 유닛은 저주파 대역의 제어를 위해 우퍼형 라우드 스피커 6 인치 유닛을 사용하였다. 능동흡기소음 시뮬레이터를 Fig. 3 에 나타내었다.

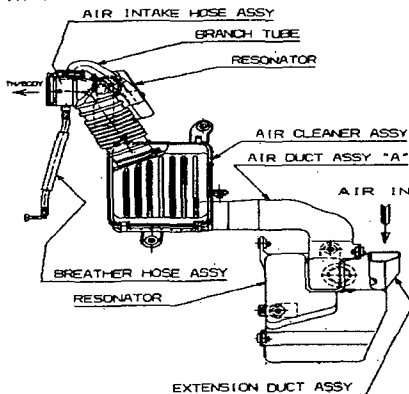


Fig. 2 scheme of Intake System

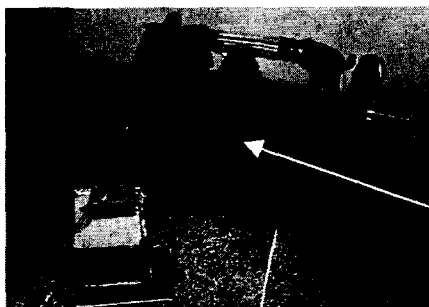


Fig. 3 scheme of Active Intake Noise Control Simulator

능동흡기소음 제어기의 프로토타입

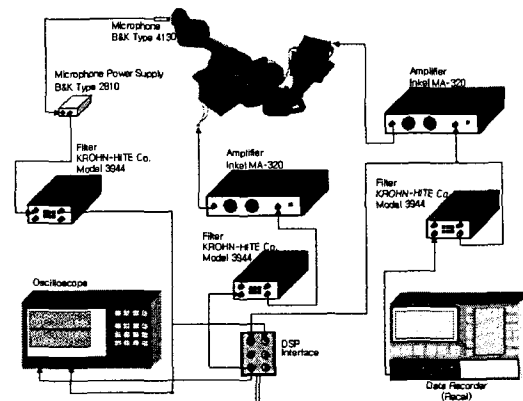


Fig. 4 Experimental Setup for Active Intake Noise Control

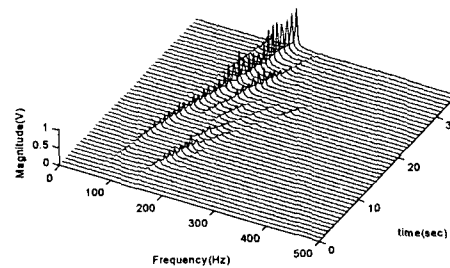
## 3. 실험 및 시뮬레이션 결과

### 3.1 능동흡기소음제어 실험

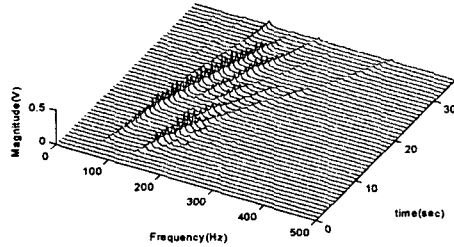
Fig. 4 는 능동 흡기소음제어 실험을 위한 실험 장치도이다. 흡기신호는 Data Recorder(RACAL)을 이용하여 실제 차량에서 참조신호를 계측하여 사용하였다. 여기서 사용한 신호는 1000rpm 에서 6000rpm 까지 가속하는데 약 30 초 걸린 가속 조건의 신호로서 흡기계의 Air Intake hose assy 에 microphone 을 설치하여 계측하였다.

Error microphone 은 Extension duct assy 맨 끝에 위치하였으며 B&K type 4130 을 사용하였고 power supply 는 type 2810 을, Amplifier 는 Inkel MA-320 을, Low pass filter 는 KROHN-HITE 社의 model 3944 를 사용했다. Low pass filter 의 cut off frequency 는 400Hz 로 하였다. 제어를 수행하는 컴퓨터 상에는 실시간 제어를 수행하기 위한 DSP 보드(TMS320c32)와 신호를 계측하기 위한 A/D 보드가 내장되어 있는데, 제어를 수행하는 C 실행 파일과 이것을 DSP 보드로 다운로드(down-load)하고 실시간으로 제어 파라미터를 모니터링하기 위해 데이터를 업로드(up-load)하는 Visual C 실행 파일을 작성하였다.

Fig. 5 에 능동흡기소음 제어 결과를 나타내었다.



(a) Before Control



(b) After Control  
Fig. 5 Control Result for Acceleration

능동흡기소음제어 실험시에 FXLMS 알고리즘의 필터계수의 차수는 100 차로 하였으며 수렴계수는 안정성을 유지하면서 수렴속도가 가장 빠른 값으로 선정하였다. Fig. 5 (a) 볼 수 있듯이 가속시의 흡기소음은 엔진 폭발 주파수의 2 차 성분과 4 차 성분이 주를 이루고 있음을 알 수 있다. 가속시에 흡기소음은 약 10 dB 정도의 저감되었다.

### 3.2 제어성능 향상을 위한 시뮬레이션

흡기소음 신호는 급가속되면서 주파수와 크기가 현저히 증가하는 특징이 있다. 따라서 고정된 수렴계수를 사용해서는 제어의 안정성이나 빠른 수렴속도를 만족 할 수 없기 때문에 참조신호에 따라 수렴계수도 변해야 한다. Fig. 6 은 급가속시 흡기계로부터 참조신호(입력신호)를 계측한 것이다. Fig. 6 에서 1~3 초간은 자동차의 Idle 상태이고 3~15 초간은 급가속 상태, 15~23 초 까지는 감속 상태이다.

Fig. 7 은 FXLMS 알고리즘을 이용하여 제어 시뮬레이션을 수행한 결과로 참조신호의 10~11 초 사이의 데이터로부터 계산한 수렴계수를 사용하였기 때문에 13 초 이후에는 참조신호의 파워의 증가 때문에 발산하는 것을 보여주고 있다.

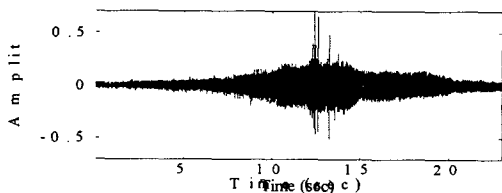


Fig. 6 Reference signal when the engine is accelerated

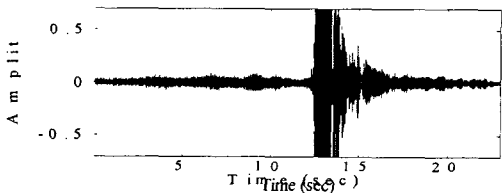


Fig. 7 Control Result with fixed convergence coefficient between 10sec and 11sec

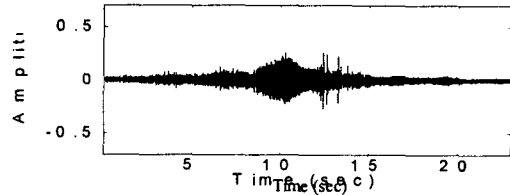


Fig. 8 Control Result with fixed convergence coefficient between 12sec and 13sec

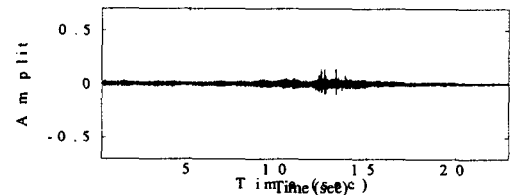


Fig. 9 Control Result for Normalized LMS algorithm

Fig. 8 은 참조신호의 12~13 초 사이에서 계산한 수렴계수를 사용한 결과로 10 초 까지는 제어 효과가 미비하였지만 10 초 이후부터는 제어가 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 9 는 Normalized LMS 알고리즘을 사용하여 제어 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 입력의 변화에 따라 수렴계수가 바뀌기 때문에 고정된 수렴계수를 사용하는 Fig. 8 보다 제어 결과가 효과적이다.

## 4. 결론

위의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 첫째, 능동흡기소음제어 시스템의 프로토타입을 개발하였고 실차 신호를 이용하여 실험한 결과 가속시의 흡기소음을 10dB 정도 줄일 수 있었다. 둘째, 급가속 흡기소음의 제어 성능을 향상시키기 위해 Normalized LMS 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션한 결과 효과적인 소음저감 결과를 얻을 수 있었다.

## 참고문헌

1. Yoshitaka Nishio, Tokio Kohama, "New Approach to Low-Noise Air Intake System Development", SAE paper 911042, 1991.
2. Sen M. Kuo, Dennis R. Morgan, "Active Noise Control Systems algorithms and DSP implementations", John Wiley & Sons, NewYork, 1996
3. 김태정, 홍상범, "4 기통 엔진의 흡기계 소음제어," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 77-83, 1996.
4. 김홍섭, "온라인 적응 알고리즘을 이용한 자동차 배기계의 능동 소음 제어", 한양대학교, 1996