

# 액티브 머플러를 이용한 실차 배기 소음 저감에 관한 연구

## A study on the exhaust noise reduction of automobile with the active muffler

홍진석(한양대 대학원)\*, 신준(국립 원주 전문대), 김흥섭(한양대 대학원),  
송진호(기아 자동차), 오재응(한양대 자동차공학과)

Jin Seok Hong(Graduate School, Hanyang Univ), Joon Shin(Won Joo National Junior College),

Heung Seob Kim(Graduate School, Hanyang Univ),

Jin Ho Song(Kia Motor Corporation), Jae-Eung Oh(Hanyang Univ)

### ABSTRACT

The exhaust noise reduction of automobile with the active muffler is experimentally investigated. The control algorithm is the *filtered-x* LMS algorithm and the inverse algorithm with the adaptive line enhancer. Also, the control efficiency is increased with synthesized second harmonic engine frequency. In the experiment, the active muffler is applied to the end of exhaust system in automobile and the control with on-line secondary path modeling method(inverse algorithm) is compared the control of off-line secondary path modeling method. As secondary path transfer functions are changed, the experimental results show that the control performance with on-line method is more efficient than that with off-line method in the exhaust noise reduction of automobile.

Key word : Active muffler(능동 소음기), Inverse modeling(인버스 모델링), Adaptive line enhancer(적응 선형 증진기), Secondary path transfer function(부가 경로 전달함수)

### 1. 서론

자동차에 대한 능동 소음 제어 기술의 도입은 여러 부분에서 이루어지고 있는데<sup>[1]</sup>, 일반적으로 엔진 소음, 배기 소음 그리고 노면 소음 문제에 주로 적용되고 있다. 지금까지의 자동차 배기 소음 대책은 수동형 소음기의 설계로 이루어져 왔는데, 수동형 소음기는 소음기 설치를 위하여 특별히 공간을 확보해야 하며 저주파 영역(500 Hz 미만)에서는 낮은 효율을 나타내고 있다. 특히 수동형 소음기 설치로 인해 발생하는 배압은 자동차의 성능과 직접적으로 관계되어 소음 저감을 목적으로한 소음기 설계를 어렵게 한다.<sup>[2]</sup> 액티브 머플러의 개발은 자동차 실내 소음제어에 비해 간단한 구조이며 수동형 소음기와 조합을 통해 광대역 소음 제어가 가능하게 한다. 또한 배압의 감소로 인하여 연비를 향상시키고 출력의 증가를 가져온다.<sup>[3]</sup> 지금까지의 액티브 머플러는 설치 비용의 고가로 인하여 산업용 대형 엔진을

대상으로 연구되어 왔으나<sup>[4]</sup> 실시간 프로세서의 가격 하락과 배기 소음 규제의 강화, 고출력의 요구 등의 문제점을 해결하기 위하여 개발의 필요성이 높아지고 있다. 한편, 일반적인 참조 신호는 엔진 가속도 신호, 엔진 타코 신호, 엔진 점화 신호(ignition signal)등을 이용하나 이 신호들은 엔진 주파수만을 가지고 있어 배기 소음의 조화 주파수 성분을 저감하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 엔진 가속도 신호를 이용하여 신호처리 기법에 의하여 엔진 2차 주파수를 합성하는 파형 합성법을 개발하여 엔진 주파수뿐만 아니라 조화 주파수까지 줄일 수 있도록 하였다. 액티브 머플러의 플로토 타입에서 출구단의 형상을 평면파 유동이 되도록 하여 오차 마이크로폰의 위치를 고열의 배기 가스의 배출 부분을 피해 선정하는 것을 가능하게 하였으며 또한 제어 스피커와 테일 파이프가 다이폴을 형성하도록 하여 오차 마이크로폰에서 소음을 전역적으로 저감하는 것을 가능하게 하였다. 본 연구에서는 실차 장착용 1 phase

액티브 머플러 플로토 타입을 제작하여 실험하였다. 제어 스피커는 배기 소음의 출력 파워를 측정하여 6 in 우퍼를 이용하였다. 실차에 액티브 머플러의 플로토 타입을 부착하여 기존의 *filtered-x* LMS 알고리즘을 이용한 경우, 인버스 알고리즘<sup>[5]</sup>과 적응 선형 증진기를 이용한 경우를 비교하는 제어 실험을 수행하였는데, 각각 고정 RPM에서의 제어 결과와 레이싱 상태(2,500 → 4,500 RPM)에서의 제어 결과를 비교하였다

## 2. 부가경로 전달함수 온라인 예측

### 2.1 인버스 모델링에 의한 부가경로 전달함수의 예측

기존의 *filtered-x* LMS 알고리즘은 내부에 부가경로 전달함수를 필요로 하는데 이 전달함수는 시불변적이고 오프라인에 기초하여 구성된다. 그러나 많은 경우에 있어 이 전달함수는 시변적이어서 수십도의 위상 변화를 가져올 수 있어 온라인으로 구성되어야만 한다. 따라서 인버스 모델링에서는 주음원과 무관한 임의의 랜덤 소음이 시스템 규명을 목적으로 제어력에 더해진다.

Fig.1에서  $B(n)$ 는 예측 부분의 FIR 필터의 계수이고,  $s(n)$ 는 임의의 랜덤 신호,  $y(n)$ 는 예측하고자 하는 전달함수의 출력,  $\hat{y}(n)$ 는 예측 FIR 필터의 출력이다.

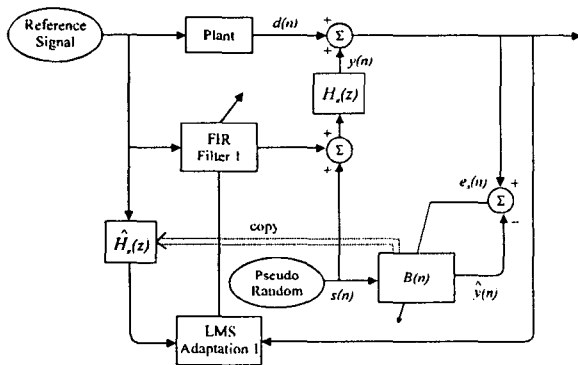


Fig.1 Block diagram of the on-line identification in the filtered-x LMS adaptation

Fig.1에서 주음원과 제어 신호의 간섭으로 발생한 플랜트 잡음의 존재하에서 부가경로 전달함수의 규명을 위한 적응 필터의 수행은 다음과 같이 된다.  $d(n)$ 는 주음원과 제어력의 간섭으로 발생한  $e_n(n)$  속에 존재하는 플랜트 소음으로  $2\mu_n d(n)s(n)$ 항은

$$\begin{aligned} B(n+1) &= B(n) + 2\mu_n e_n(n)s(n) \\ &= B(n) + 2\mu_n [y(n) - \hat{y}(n) + d(n)]s(n) \\ &= B(n) + 2\mu_n [y(n) - \hat{y}(n)]s(n) \\ &\quad + 2\mu_n d(n)s(n) \end{aligned} \quad (1)$$

예측을 위한 적응 필터,  $B(n)$ 의 성능을 저하시키는 요인이 된다. 따라서  $B(n)$ 이 최적치로의 수렴을 위해서는 식(1)에서 이 항을 제거해야 하는데 적응 선형 증진기나 적응 잡음 제거기가 큰 플랜트 잡음 속에서 부가경로 전달함수를 모델링하는 랜덤 신호를 분리하는 기법으로 유용하다.

### 2.2 적응 선형 증진기(ALE: Adaptive line enhancer)에 의한 플랜트 잡음 제거

적응 선형 증진기는 입력 신호가 정현파 신호와 랜덤 신호의 합으로 구성되어 있는 경우에 비상관 지연(uncorrelation delay)을 이용하여 두 성분을 분리하는데 유용하다.

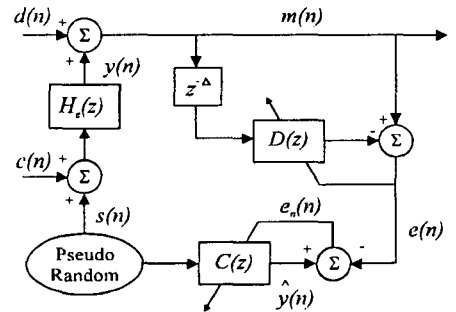


Fig.2 Adaptive line enhancer in on-line modeling

Fig.2에서 에러 마이크로폰에서의 오차 신호  $m(n)$ 은

$$\begin{aligned} m(n) &= d(n) + [c(n) + s(n)] * h_e(n) \\ &= f(n) + s(n) * h_e(n) \\ &= f(n) + \sum_{j=0}^{M-1} h_{ej}(n)s(n-j) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $h_{ej}(n)$ 은 부가경로의  $j$  차 임펄스 함수를 나타내고,  $M$ 은  $h_{ej}(n)$ 의 차수이다. 백색잡음  $s(n)$ 과 플랜트 잡음 신호  $f(n)$ 은 전혀 상관 관계가 없

따라서  $E[f(n)s(n)] = 0$ 이다.

$$E[m(n) m(n-\Delta)] = E[f(n)f(n-\Delta)] + \sum_{j=0}^{M-1} h_{ej}(n) \sum_{i=0}^{M-1} E[s(n-j)s(n-i-\Delta)] \quad (3)$$

사용된 백색 잡음의 평균이 0 이면

$$E[s(n-j) s(n-i-\Delta)] = 0, \quad (4)$$

$$0 \leq i, j < M, \text{ if } \Delta \geq M$$

시간 지연  $\Delta$ 이 부가경로 임펄스 함수의 차수  $M$ 보다 크다면,  $m(n)$ 에서 백색 잡음으로 인한 항이 사라지게 된다. 따라서 플랜트 신호  $f(n)$ 만이 필터  $D(n)$ 의 출력에 의해 제거되고 적응 선형 증진기의 최종 잔여 오차는 다음과 같이 된다.

$$e(n) \approx s(n) * h_e(n) \quad (5)$$

따라서 적응 선형 증진기를 이용하면 플랜트 잡음 신호  $f(n)$ 의 영향을 배제하여 온라인 모델링에서의 신호대 잡음비를 개선할 수 있다.

### 3. 실차 장착용 플로토 타입의 설계

본 연구에서 제작한 실차 장착용 플로토 타입의 특징으로는 제어 스피커를 한 개를 부착하는 1 phase 형태이고, 주음원이 방사되는 테일 파이프를 제어 스피커에서 발생하는 제어음이 둘러싸는 형태의 다이폴을 형성하도록 하였다. 또한 출구단을 파이프 처리하여 이 곳을 통과하는 음의 유동 형태를 평면파가 되도록 하여 주음원과 제어음이 계측하는 마이크로폰의 위치를 자유롭게 하고 제어 효과를 높일 수 있도록 설계하였다. 오차 마이크로폰은 액티브 머플러의 출구 파이프( $\phi 8.8$ )의 중심에서 밑으로 4 cm 떨어진 위치에 배치하였다. 실제 제어기에서 모델링하여 이용하는 부가경로 전달함수의 주파수 응답은 Fig.3와 같고 제작한 액티브 머플러의 플로토 타입은 photo.1와 같다. Fig.3에서 부가경로 전달함수의 공진 주파수는 290 Hz 이며 80 Hz 이상에 평탄한 음압 특성을 가지는 것을 알 수 있다.

### 4. 온라인 적응 알고리즘을 이용한 실차 실험

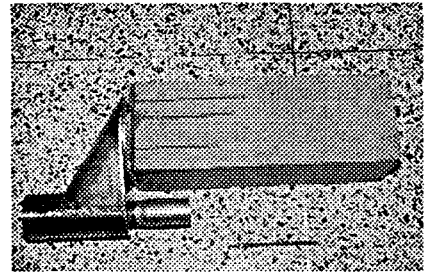


Photo.1 Prototype of active muffler

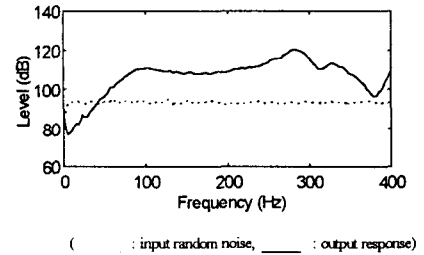


Fig.3 Transfer function of secondary path in the active muffler prototype

### 4.1 실험 방법과 장치

본 연구에서 제안된 온라인 알고리즘을 이용하여 자동차 배기계의 능동 소음 저감을 위하여 다음과 같이 제어 실험을 수행하였다. 제어계의 참조 신호는 엔진 실린더 블록 위에 가속도계(accelerometer, RION PV-44A)를 부착하여 얻은 가속도 신호를 저역 통과 필터(400 Hz)을 통하여 제어기인 DSP 보드로 입력하였다. Photo.2는 자동차 배기계의 끝단에 액티브 머플러를 부착한 상태로 액티브 머플러의 중앙 하단에 오차 신호를 계측하기 위해 마이크로폰을 설치하였다. 제어 대상인 자동차는 세피아 오토(1500 cc)를 이용하였으며 실제 제어를 수행하기 위한 컴퓨터와 제어 데이터를 계측하기 위해 A/D 컨버터를 내장한 컴퓨터를 각각 작동하였다. 제어를 수행하는 컴퓨터 상에는 실시간 제어를 수행하기 위한 DSP 보드(TMS320c30)가 내장되어 있는데, 실제 제어를 수행하는 어셈블리 실행 파일과 이것을 DSP 보드로 다운 로드(down-load)하고 실시간으로 제어 파라미터를 모니터링하기 위해 DSP 보드의 DPRAM (dual-port RAM)를 접근하여 데이터를 업로드(up-load)하는 Borland C 실행 파일을 작성하였다.

배기 소음의 제어 실험은 고정된 RPM 상태(3000 RPM)와 정지 중에 10초 동안 2,500~4,500 RPM 구간을 레이싱하는 상태에서 수행하였다. 먼저 오프라인으로 부가경로 전달함수를 모델링한 이후에 기존의 *filtered-x* LMS 알고리즘에 의한 제어 실험을 행하였다. 그 다음 부가경로 전달함수를 제안된 방법으로 온라인으로 예측하는 경우의 제어 실험을 수행하였다.

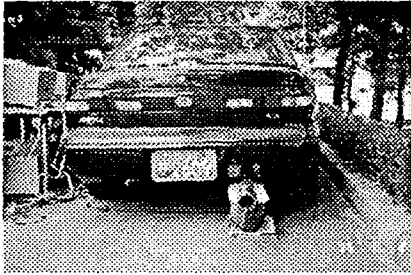


Photo.2 Active muffler of exhaust system in automobile

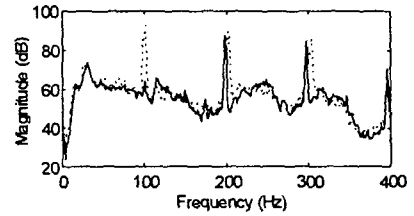
#### 4.2 참조 신호의 합성

제어 알고리즘의 참조 신호로 이용되어지는 가속도 신호는 엔진 2차 주파수 성분이 지배적인데 비하여 오차 신호는 엔진 주파수 소음과 2, 3차 조화 주파수 소음이 동시에 나타남을 볼 수 있다. 따라서 배기 소음 제어를 수행하게 되면 엔진 주파수 소음은 저감되지만 조화 주파수 성분들은 저감되지 않는다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 신호처리 방법에 의해 다음과 같이 참조 신호를 합성하였다. 먼저 각 순간에서 참조 신호의 실효값을 예측하고 순간에 입력되는 신호의 최대값을 계산한다. 이 최대값을 정규화시킨 이후에 사인 공식을 적용하면 순간에 입력되는 신호의 2차 조화 주파수 성분을 만들 수 있다.

#### 4.3 온라인 예측에 의한 능동 배기 소음 저감

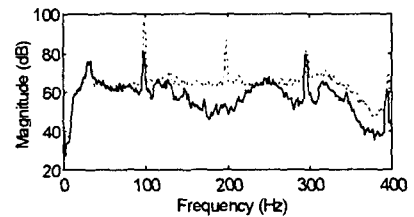
부가경로 전달함수의 off-line예측( 기존의 *filtered-x* LMS)에 의한 실험과 온라인 예측에 의한 제어 실험을 수행하였다. 주음원으로 작용하는 배기 소음과 부가경로 전달함수를 온라인 모델링하기 위해 사용한 랜덤 잡음과의 신호대 잡음비는 엔진 구동 RPM에 따라 -15 ~ -25dB 의 범위를 유지하였다. 먼저 고정된 RPM 상태에서 제어 실험한 결과를 Fig.4에 나타내었다. (a)의 경우 엔진 구동 주파수

만 저감 되지만 (b)의 경우 엔진 구동 주파수와 2차 조화 주파수에서 모두 저감되는 것을 확인할 수 있었다. 엔진 구동 RPM을 2,500 → 4,500 RPM으로 변경하면서 정지중에 레이싱을 한 경우에 제어 전후의 워터폴을 Fig.4.2에 나타내었다. Fig.5의 (b)의 경우 엔진 구동 주파수만 감소하지만 (c)의 경우 엔진 구동 주파수와 2차 조화 주파수에서 배기 소음이 저감되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 2차 조화 소음은 오프 라인 알고리즘을 이용하는 경우보다 제어 효과가 크게 나타남을 볼 수 있다. 이것은 오프 라



( ..... : without ANC, \_\_\_\_\_ : with ANC)

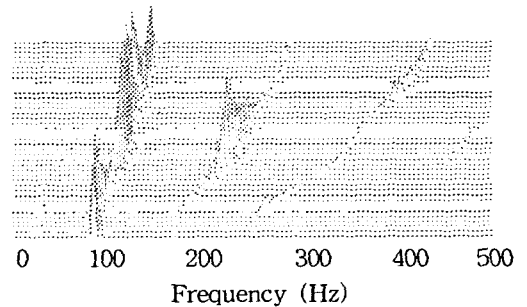
(a) off-line algorithm: *filtered-x* LMS



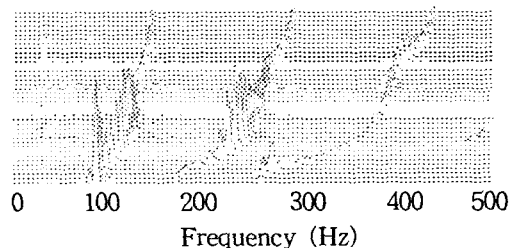
( ..... : without ANC, \_\_\_\_\_ : with ANC)

(b) on-line algorithm : inverse+ALE

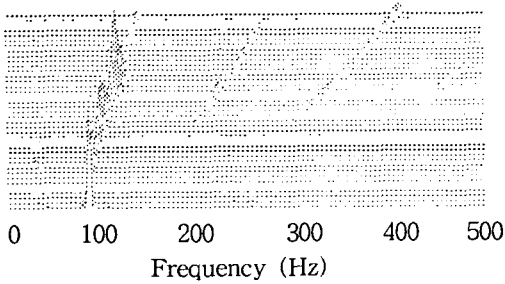
Fig.4 Control results in 3,000 RPM



(a) before control



(b) off-line algorithm: filtered-x LMS

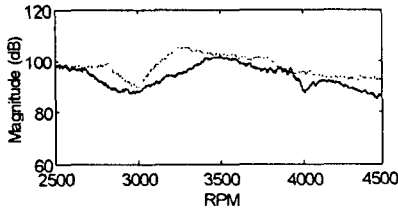


(c) on-line algorithm : inverse+ALE

Fig.5 Control results of acceleration event in racing (2,500 → 4,500 RPM)

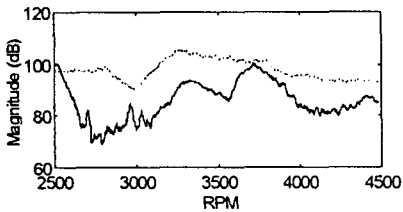
인으로 모델링하여 제어를 수행하는 경우 배기 소음에 부가경로 전달함수에 모델링 오차가 발생하면 제어 대상의 주파수가 높을수록 모델링 오차의 영향을 많이 받기 때문이다.

오버올 레벨에서 제어 결과를 Fig.6에 나타내었는데 오프 라인을 이용하여 제어한 결과에 비하여 전 구동 RPM 영역에서 제어 효과가 크다는 것을 알 수 있다.



(..... : without ANC, \_\_\_\_\_ : with ANC)

(a) off-line algorithm: filtered-x LMS



(..... : without ANC, \_\_\_\_\_ : with ANC)

(b) on-line algorithm : inverse+ALE

Fig.6 Control results in overall level

Fig.6 에서 제어 초기에 부가경로 전달함수의 모델링 과정에서 오차가 커지는 것을 볼 수 있으나 전반적으로 오버올 레벨에서 5 dB 이상의 저감 효과를 가져올 수 있다.

후기 : 본 연구는 선도 기술 개발 과제 (G-7 프로젝트)의 일환으로 기아자동차의 주관하에 이루어지고 있는 연구입니다.

## 5. 결론

온라인 알고리즘을 자동차 배기 계의 배기 소음의 저감을 위한 연구에 적용하여 제어 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 액티브 머플러의 설계, 제작에서 테일 파이프 끝단에서 배기 소음이 평면파 유동으로 전파되게 함으로써 고온의 배기 가스를 피해 테일 파이프 하단에 오차 마이크로폰을 위치시키는 것이 가능하였으며 엔진 소음의 2차 조화 성분을 합성하여 제어 성능을 높였다.
2. 배기 소음 제어와 같이 부가경로 전달함수가 변화하는 제어에서는 기존의 오프 라인 방법에 의한 제어 결과에 비해 온라인 방법에 의해 제어한 결과가 오버올 레벨에서 5 dB 이상 제어 효과가 크고 2차 조화 소음의 저감이 잘 이루어지는 것을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] Hiroshi Vchida, Norhiko Nakao, "Development of active noise control technique of engine noise in a cabine", 일본 자동차 기술 논문집, Vol.48, No.6, 1994
- [2] 오재응, "차량 Muffler용 능동소음제어 필터 개발" 한양대학교 연구보고서, 1996
- [3] 오재응, 김홍섭, 손동구, "능동 배기 소음 제어용 능동형 머플러의 개발동향", 한국 소음 진동 공학회, 제 5권, 4호, pp.23 ~29, 1995
- [4] W.J.J.Hoge, Ererett Arnold, "Development of a prototype active muffler for the detroit diesel 6V-92 TA industrial engine" SAE 911045
- [5] L.J.Erikson and M.C.Allie, "Use of random noise for on-line transducer modeling in an adaptive active attenuation system", J. Acoust. Soc. Am. Vol.85, No.2, pp.797 ~802, 1989