

< 논 문 >

액티브 머플러를 이용한 자동차 배기계의 능동소음제어

김흥섭* · 홍진석** · 오재음***

(1996년 12월 27일 접수)

Active Noise Control with the Active Muffler in Automotive Exhaust System

Heung Seob Kim, Jin Seok Hong and Jae-Eung Oh

Key Words : Active Muffler(액티브 머플러), Inverse Modeling(인버스 모델링), Adaptive Line Enhancer(적응선형 증진기), Secondary Path Transfer Functions(부가경로 전달함수)

Abstract

This study experimentally demonstrates the use of active muffler attached to the automotive exhaust system to reduce exhaust noise. For improving the signal to noise ratio in the process of estimation of secondary path transfer functions, the on-line algorithm that conventional inverse modeling is combined with adaptive line enhancer is used as the control algorithm. Active muffler is designed that the primary noise and the control sound are propagated as a plane wave in the outlet. Therefore, the error microphone could be placed out of the tail pipe center of a high temperature and the radiation noise to the outside could be reduced in the whole area around the outlet. The control experiment for reducing exhaust noise with active muffler is implemented during run-up at no load. From the experimental results presented, compared with the conventional off-line method, the proposed on-line method is capable to acquire a reduction of exhaust noise above 5 dB in overall sound power level.

1. 서 론

지금까지의 자동차 배기소음 대책은 수동형 소음기의 설계로 이루어져 왔는데, 수동형 소음기는 소음기 설치를 위하여 특별히 공간을 확보해야 하며, 저주파영역(500 Hz 미만)에서는 낮은 효율을 나타내고 있다. 특히 수동형 소음기 설치로 인해 발생하는 배압은 자동차의 성능과 직접적으로 관계되어 소음저감을 목적으로 한 소음기 설계를 어렵게 한

다.⁽¹⁾ 액티브 머플러의 개발은 자동차 실내 소음제어에 비해 간단한 구조이며, 수동형 소음기와의 조합을 통해 광대역 소음제어가 가능하게 한다. 또한 배압의 감소로 인하여 연비를 향상시키고 출력의 증가를 가져온다.⁽²⁾ 지금까지 액티브 머플러는 설치비용의 고가로 인하여 산업용 대형 엔진을 대상으로 연구되어 왔으나 실시간 프로세서의 가격하락과 배기소음 규제의 강화, 고출력의 요구 등의 문제점을 해결하기 위하여 개발의 필요성이 높아지고 있다.^(3,4)

액티브 머플러의 개발에서 참조신호의 설정, 고온의 배기가스에 대비한 변환기의 설계 그리고 자동차 rpm 변경에 따른 참조신호 파워의 커다란 변

*한양대학교 기계기술연구소

**한양대학교 정밀기계공학과

***회원, 한양대학교 자동차공학과

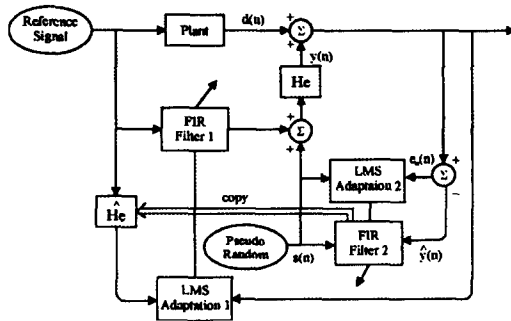


Fig. 1 Block diagram of the on-line identification in the *filtered-x* LMS adaptation

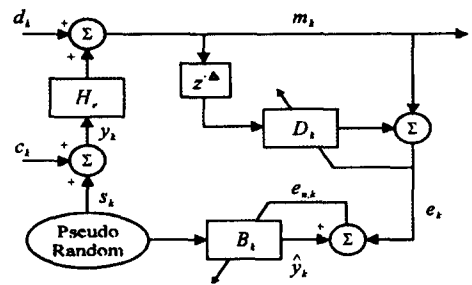


Fig. 2 Adaptive line enhancer for removing the plant noise in the inverse modeling

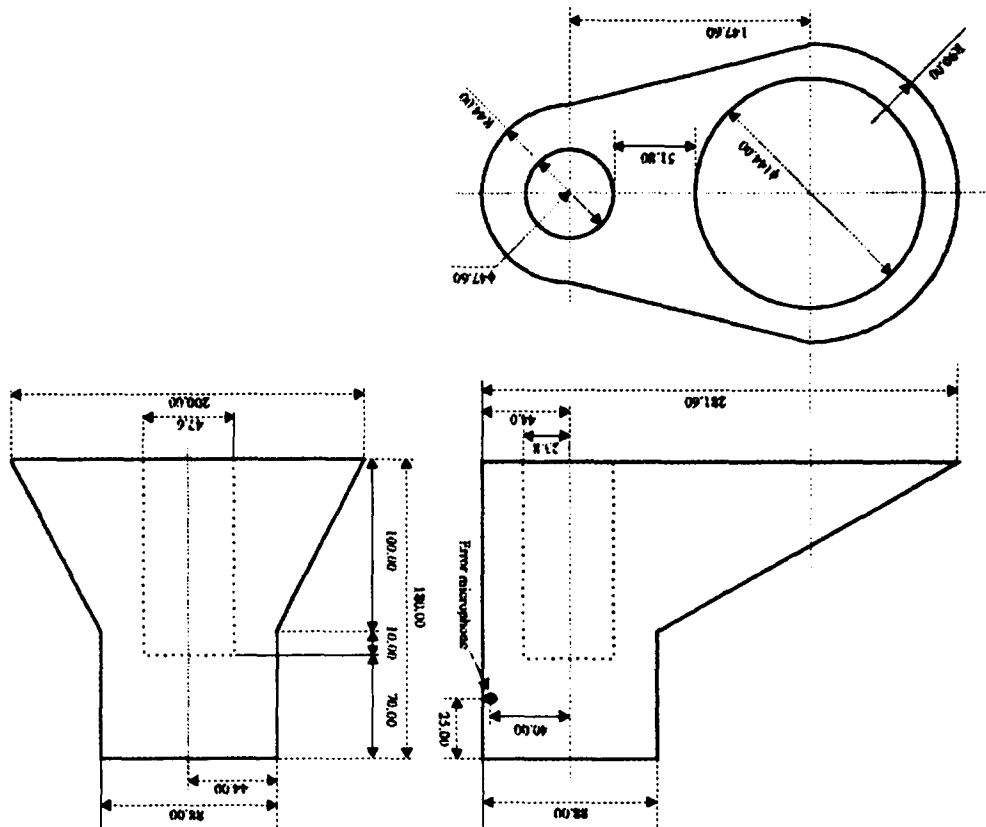


Fig. 3 Design of the active muffler prototype

화가 어려운 문제점으로 제시된다. 일반적으로 액티브 머플러에서 참조신호로 이용되는 엔진 가속도 신호, 엔진 타코신호, 엔진 점화신호(ignition signal) 등은 엔진 구동주파수만을 가지고 있어 배기 소음의 조화주파수 성분을 저장하기 어렵다.⁽⁵⁾ 따라서 엔진 구동주파수 성분을 이용하여 신호처리 기법에 의해 조화주파수를 합성하여 엔진 구동주파수

뿐만 아니라 조화주파수까지 줄일 수 있도록 하였다. 또한 액티브 머플러의 플로토타입에서 출구단의 형상을 평면과 유동이 되도록 설계하여 오차 마이크로폰의 위치를 고열의 배기가스의 배출부분을 피해 선정하는 것을 가능하게 하였으며, 오차 마이크로폰에서 소음을 전역적으로 저장하는 것을 가능하게 하였다. 그리고 입력되는 참조신호에 파워에

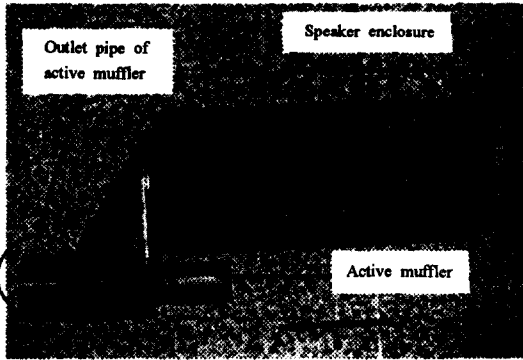


Photo 1 Prototype of the active muffler

관제없이 정상상태를 유지하면서 최적한 수렴속도를 가지기 위해 정규화된(normalized) *filtered-x* LMS을 이용하였다.

본 연구에서는 자동차의 배기소음제어 실험을 위하여 1 phase 타입의 액티브 머플러 프로토타입을 제작하였다. 자동차에 제작한 액티브 머플러의 프로토타입을 부착하여 제어알고리즘으로 기존의 *filtered-x* LMS 알고리즘을 이용한 경우, 인버스 알고리즘과 적응선형 증진기를 이용한 경우의 제어 실험을 수행하였는데, 각각 고정 rpm(3,000 rpm)과 정지중 레이싱상태(2,500 → 4,500 rpm)에서의 제어결과를 비교하였다.

2. 부가경로 전달함수 온라인 예측

2.1 인버스 모델링에 의한 부가경로 전달함수의 예측⁽⁶⁾

기존의 *Filtered-x* LMS 알고리즘은 내부에 부가경로 전달함수를 필요로 하는데 이 전달함수는 시변적이고 오프라인에 기초하여 구성되어진다. 그러나 많은 경우에 있어 이 전달함수는 시변적이어서 수집도의 위상변화를 가져올 수 있으므로 온라인으로 구성되어야만 한다. 따라서 인버스 모델링에서는 주유원과 무관한 임의의 랜덤소음을 시스템 구멍의 목적으로 제어력에 더해 준다.

Fig. 1에서 B_k 는 예측부분의 FIR 필터의 계수이고, s_k 는 임의의 랜덤신호, y_k 는 제어력과 랜덤신호의 합성한 신호, \hat{y}_k 는 예측 FIR 필터의 출력, 그리고 m_k 는 주유원과 제어신호, 그리고 랜덤신호의 파괴간섭으로 발생한 오차신호를 나타낸다.

Fig. 1에서 주유원과 제어신호의 간섭으로 발생한 플랫폼 잡음의 존재하에서 부가경로 전달함수의

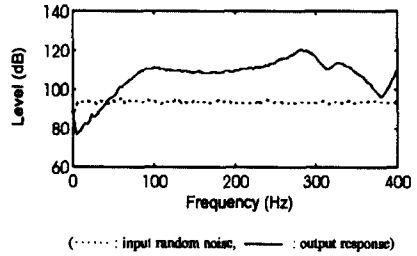
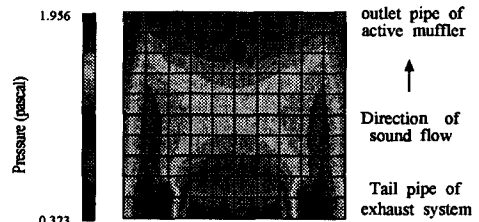
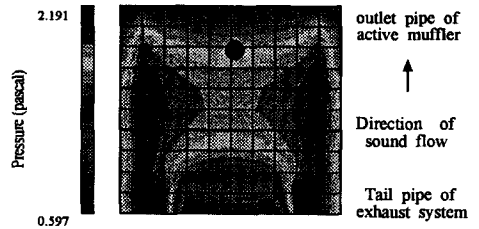


Fig. 4 Transfer function of secondary path in the active muffler prototype



(a) Sound field pattern of 200 Hz



(b) Sound field pattern of 400 Hz

(● : Position of the error microphone)

Fig. 5 Sound field pattern of outlet pipe in the active muffler prototype

규명을 위한 적응필터의 수행은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 B_{k+1} &= B_k + 2\mu_k e_{n,k} s_k \\
 &= B_k + 2\mu_k [m_k - \hat{y}_k] s_k \\
 &= B_k + 2\mu_k [d_k + y_k \cdot h_{e,k} - \hat{y}_k] s_k \\
 &= B_k + 2\mu_k [y_k \cdot h_{e,k} - \hat{y}_k] s_k + 2\mu_k d_k s_k \quad (1)
 \end{aligned}$$

d_k 는 $e_{n,k}$ 속에 존재하는 주유원 소음으로 $2\mu_k d_k s_k$ 항은 예측을 위한 적응필터, B_k 의 성능을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 B_k 이 최적치로의 수렴을 위해서는 식 (1)에서 이 항을 제거해야 하는데 적응선형 증진기나 적응 잡음제거기가 큰 주유원이 존재하는 환경에서 부가경로 전달함수를 모델링하는 랜덤신호를 분리하는 기법으로 유용하다.

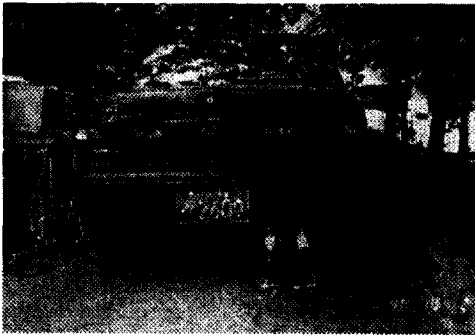


Photo 2 Active muffler of exhaust system in automobile

2.2 적응선형 증진기에 의한 플랜트 잡음제거⁽⁷⁾
 적응선형 증진기는 입력신호가 정현파 신호와 랜덤신호의 합으로 구성되어 있는 경우에 비상관 지연(uncorrelation delay)을 이용하여 두 성분을 분리하는데 유용하다.

Fig. 2에서 오차 마이크로폰에서의 오차신호 m_k 은

$$\begin{aligned} m_k &= d_k + [c_k + s_k] * h_{e,k} \\ &= f_k + s_k * h_{e,k} \\ &= f_k + \sum_{j=0}^{N-1} h_{e,j,k} s_{k-j} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, f_k 는 주음원과 제어력의 간섭에서 발생한 플랜트 잡음신호, $h_{e,j,k}$ 은 부가경로의 j 차 임펄스함수를 나타내고, N 은 $h_{e,j,k}$ 의 차수이다. 백색잡음 s_k 과 플랜트 잡음신호 f_k 는 전혀 상관관계가 없으므로 $E[f_k s_k] = 0$ 이다.

$$\begin{aligned} E[m_k m_{k-\Delta}] &= E[f_k f_{k-\Delta}] \\ &+ \sum_{j=0}^{N-1} h_{e,j,k} \sum_{i=0}^{N-1} h_{e,i,k} E[s_{k-j} s_{k-i-\Delta}] \end{aligned} \quad (3)$$

사용된 백색잡음의 평균이 0이면

$$E[s_{k-j} s_{k-i-\Delta}] = 0, \quad 0 \leq i, j \leq N, \text{ if } \Delta > N \quad (4)$$

시간지연 Δ 이 부가경로 임펄스함수의 차수 N 보다 크다면, m_k 에서 백색잡음으로 인한 항이 사라지게 된다. 따라서 플랜트신호 f_k 만이 필터 D 의 출력에 의해 제거되고 적응선형 증진기의 최종 잔여오차는 다음과 같이 된다.

$$e_k \approx s_k * h_{e,k} \quad (5)$$

따라서 적응선형 증진기를 이용하면 플랜트 잡음신호 f_k 의 영향을 배제하여 온라인 모델링에서의

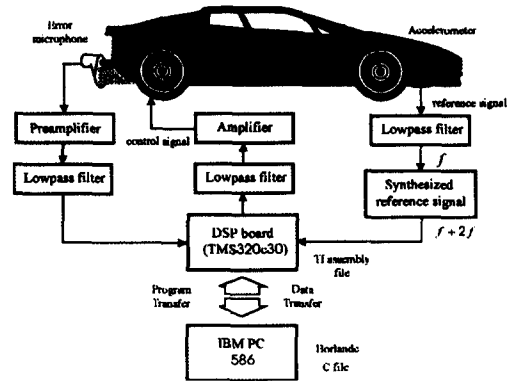


Fig. 6 Experiment setup for the active exhaust noise control of the automobile

신호대 잡음비를 개선할 수 있다.

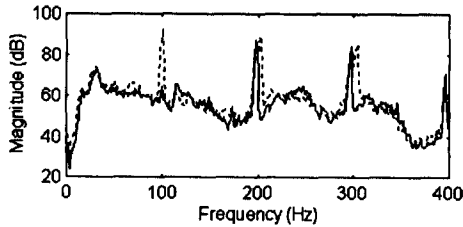
3. 실차 장착용 플로토타입의 설계

본 연구에서 제작한 실차 장착용 액티브 머플러 플로토타입의 특징으로는 제어스피커를 한 개를 부착하는 1 phase 형태이고, 주음원이 방사되는 테일 파이프를 제어스피커에서 발생되는 제어음이 둘러싸는 형태의 다이폴을 형성하도록 하였다. 또한 출구단을 파이프처리하여 이 곳을 통과하는 음의 운동형태를 평면파가 되도록 하여 주음원과 제어음을 계속하는 오차 마이크로폰의 위치를 자유롭게 하고 외부로 방사되는 소음의 전역적인 제어가 가능하도록 설계하였다.⁽⁸⁾ Photo 1은 실차실험을 위해 제작한 액티브 머플러의 플로토타입이다.

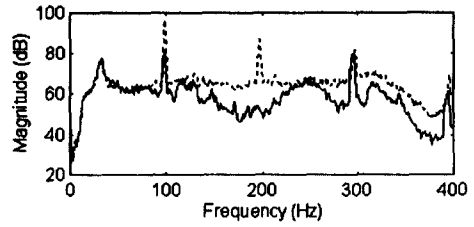
Fig. 3의 플로토타입 설계도에서 미관 출구단은 지름 88 mm, 길이 80 mm의 파이프로 되어 있는데, 오차 마이크로폰은 이 파이프의 중심으로부터 40 mm 밑에 배치시켰다. 능동형 소음기에서 배기소음과 제어음이 이 파이프를 평면파로 통과한다.

Fig. 4은 사용된 플로토타입에서 제어스피커와 오차 마이크로폰 사이의 부가경로 전달함수를 나타낸다. 이 전달함수에서 공진주파수는 310 Hz에서 발생하는데 이것은 입구단의 길이($\phi 281.6$ mm)에 의해 결정되고, 관심주파수 영역인 80~300 Hz에서 평탄한 유압특성을 갖는 것을 알 수 있다.

액티브 머플러의 플로토타입에서 출구단 파이프의 소음 전파유동이 평면파로 전개되는 것을 알아보기 위하여 photo 1에서 출구단 파이프의 중앙 단면에 해석 필드영역(field point)을 설정하고 제어



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



(b) On-line algorithm : inverse + ALE

Fig. 7 Controlled exhaust noise with off-line and on-line control algorithm in 3,000 rpm

스피커에서 가진시에 필드영역의 음압의 분포를 분석하였다. 음향해석은 84×80 mm 영역을 100개의 요소로 분해하여 수행하였는데, Fig. 5(a)는 공진 주파수 이전인 200 Hz로 가진시에 해석영역의 음압분포로 오차 마이크로폰의 위치에서 파면이 평면으로 전개되는 것을 볼 수 있다. Fig. 5(b)는 공진 주파수 이후인 400 Hz로 가진시에 음압분포로 파면이 테일 파이프 전면에서는 분리되나 음이 진행되면서 평면파로 전개되는 것을 볼 수 있다. 위의 결과로부터 제어스피커에서 부가경로 전달함수의 1차 공진주파수 이상으로 가진하는 경우에도 해석영역에서는 소음전파가 평면파로 이루어지는 것을 알 수 있다.

4. 온라인 적응알고리즘을 이용한 실차실험

4.1 실험방법과 장치

본 연구에서 제안된 온라인 알고리즘을 이용하여 자동차 배기계의 능동 소음저감을 위하여 다음과 같이 제어실험을 수행하였다. 제어계의 참조신호는 엔진 실린더 블록위에 가속도계(accelerometer, RI-ON PV-44A)를 부착하여 얻은 가속도신호를 저역 통과필터(400 Hz)를 통하여 제어기인 DSP 보드로 입력하였다. Photo 2는 자동차 배기계의 끝단에 액티브 머플러를 부착한 상태로 액티브 머플러의 중앙 하단에 오차신호를 계속하기 위해 마이크로폰을 설치하였다. 제어대상인 자동차는 세피아 오토(1500 cc)를 이용하였으며, 실제 제어를 수행하기 위한 컴퓨터와 제어데이터를 계속하기 위해 A/D 컨버터를 내장한 컴퓨터를 각각 작동하였다. 제어를 수행하는 컴퓨터상에는 실시간제어를 수행하기 위한 DSP 보드(TMS320c30)가 내장되어 있는데, 실제 제어를 수행하는 어셈블리 실행파일과 이것을 DSP 보드로 다운로드(down-load)하고 실시간으로

제어파라미터를 모니터링하기 위해 DSP 보드의 DPRAM(dual-port RAM)를 접근하여 데이터를 업로드(up-load)하는 Borland C 실행파일을 작성하였다. Fig. 6은 이와 같은 실험 장치도를 나타낸다. 배기소음의 제어실험은 고정된 rpm 상태(3000 rpm)와 정지중에 10초 동안 2,500~4,500 rpm 구간을 레이싱하는 상태에서 수행하였다. 먼저 오프라인으로 부가경로 전달함수를 모델링한 이후에 기존의 *filtered-x* LMS 알고리즘에 의한 제어실험을 수행하였다. 그 이후에 부가경로 전달함수를 제안된 방법으로 온라인으로 예측하는 경우의 제어실험을 수행하였다.

4.2 참조신호의 합성

자동차의 배기소음 제어알고리즘의 참조신호는 엔진블럭 위에 설치된 가속도로부터 계속한 신호를 이용하였는데, 참조신호에서는 엔진 구동주파수 성분이 지배적인데 비하여 오차신호에서는 엔진 구동주파수 소음과 2,3차 조화주파수 소음이 동시에 계속된다.

따라서 이와 같은 상태에서 배기소음제어를 수행하게 되면 엔진주파수 소음은 저감되지만 조화주파수 성분들은 저감되지 않는다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다음의 신호처리방법에 의해 참조신호를 재합성하였다. 먼저 각 순간에서 참조신호의 실효값을 예측하고 이것을 이용하여 순간에 입력되는 신호의 최대값을 계산한다. 이 최대값을 이용하여 참조신호를 정규화시킨 이후에 사인공식을 이용하여 순간에 입력되는 신호의 2차 조화주파수 성분을 만들 수 있다. 최종적인 참조신호는 엔진 구동주파수 성분과 조화주파수 성분의 합을 이용하게 된다.

$$x_k(2f) = 1 - \frac{2x_k(f)}{\sqrt{2} \times \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N x_{k-i}^2(f)}$$

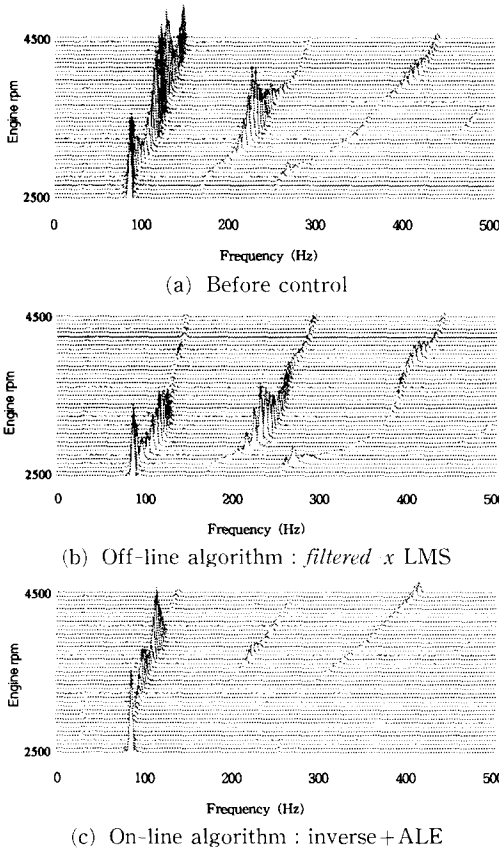


Fig. 8 Controlled exhaust noise in acceleration event (2,500 → 4,500 rpm)

$$x_k = x_k(f) + x_k(2f) \tag{6}$$

4.3 온라인 예측에 의한 능동 배기소음저감

본 연구에서는 부가경로 전달함수의 오프라인 예측(기존의 *filtered-x LMS*)에 의한 제어실험과 온라인 예측에 의한 제어실험을 수행하였다. 부가경로 전달함수를 온라인 모델링하기 위해 사용한 랜덤잡음과 주음원으로 작용하는 배기소음과의 신호대 잡음비는 엔진 구동 rpm에 따라 변동되나 평균적으로 -15 ~ -25 dB의 범위를 유지하였다. 먼저 고정된 rpm 상태에서 제어실험한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)의 경우 엔진 구동주파수만 저감되지만 Fig. 7(b)의 경우에는 엔진 구동주파수와 2차 조화주파수에서 모두 저감되는 것을 알 수 있었다. 엔진 구동 rpm을 2,500 → 4,500 rpm으로 변경하면서 정지중에 레이싱을 한 경우에 제어전후의 위터폴을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(b)의 경

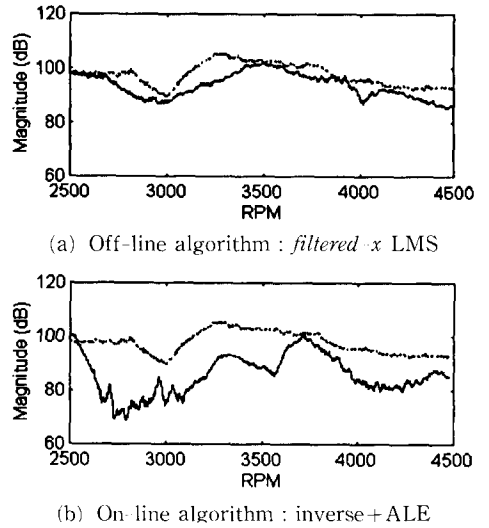


Fig. 9 Controlled exhaust noise in overall level

우 엔진 구동주파수만 감소하지만 Fig. 8(c)의 경우에는 엔진 구동주파수와 2차 조화주파수에서 배기소음이 저감되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 2차 조화주파수 소음은 오프라인 알고리즘을 이용하는 경우보다 제어효과가 크게 나타남을 볼 수 있다. 이것은 오프라인으로 모델링하여 제어를 수행하는 경우 배기소음에 부가경로 전달함수에 모델링 오차가 발생하면 제어대상의 주파수가 높을수록 모델링 오차의 영향을 많이 받기 때문이다.⁽⁷⁾

오버울 레벨에서 제어결과를 Fig. 9에 나타내었는데 오프라인을 이용하여 제어한 결과에 비하여 전 구동 rpm 영역에서 제어효과가 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9에서 제어 초기에 부가경로 전달함수의 모델링과정에서 오차가 커지는 것을 볼 수 있으나 전반적으로 오버울 레벨에서 5 dB 이상의 저감효과를 가져올 수 있다.

8. 결 론

온라인 알고리즘을 자동차 배기계의 배기소음의 저감을 위한 연구에 적용하여 제어실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 액티브 머플러의 설계, 제작에서 테일 파이프 끝단에서 배기소음이 평면과 유동으로 전파되게 함으로써 고온의 배기가스를 피해 테일 파이프 하단에 오차 마이크로폰을 위치시키는 것이 가능하였

으며 엔진 소음의 2차 조화성분을 합성하여 제어 성능을 높였다.

(2) 배기소음제어와 같이 부가경로 전달함수가 변화하는 계에서는 기존의 오프라인방법에 의한 제어 결과에 비해 온라인방법에 의해 제어한 결과가 오버울 레벨에서 5 dB 이상 제어효과가 크고 2차 조화 소음의 저감이 잘 이루어지는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 선도기술개발과제(G-7 프로젝트)의 일환으로 기아자동차(주)의 주관하에 이루어지고 있는 연구입니다.

참고문헌

- (1) 오재응, 1994, "S-Project의 배기소음저감에 관한 연구," 한양대학교 연구보고서.
- (2) Trinder, M. C. J. and Chaplin, G. B. B., 1986, "Active Control of Commercial Vehicle Exhaust Noise," Proceedings of Internoise 1986, pp. 611~616.
- (3) Hoge, and W. J. J. Everett Arnold, 1991, "Development of a Prototype Active Muffler for the Detroit Diesel 6V-92 TA Industrial Engine," SAE 911045.
- (4) Eghtesadi, Kh. and Gardner, J. W. 1989, "Design of Active Muffler for International Combustion Engines," Proceedings of Internoise 1989, pp. 471~474.
- (5) 오재응, 1996, "차량 Muffler용 능동소음제어 필터 개발" 한양대학교 연구보고서.
- (6) Eriksson, L. J. and Allie, M. C., 1989, "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.
- (7) 김홍섭, 손동구, 오재응, 1997, "부가경로 전달함수의 온라인화를 이용한 능동소음제어의 성능향상," 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제2호, pp. 281~287.
- (8) 김홍섭, 손동구, 박수홍, 오재응, 1997, "능동 배기소음제어용 능동형 머플러의 개발," 한국자동차공학회 논문집, 제5권, 제1호, pp. 79~88.