

〈논 문〉 SAE NO. 98370004

상용차 배기계에서 액티브 머플러를 이용한 배기 소음 제어

Exhaust Noise Control with the Active Muffler in Exhaust System of Vehicle

김 홍 섭*, 홍 진 석**, 오 재 응***, 송 진 호****
H. S. Kim, J. S. Hong, J. E. Oh, J. H. Song

ABSTRACT

In this study, active muffler was designed and was manufactured for exhaust noise reduction of commercial vehicle, then experiment of real vehicle was conducted. In a manufactured active muffler, because the flow of exhaust noise in tail pipe outlet are become a plane wave, the global reduction of radiation noise from outlet and the placement of error microphone to avoid the exhaust gas of high temperature could be implemented. In control algorithm, reduction of noise of engine driving frequency and harmonic frequency can be achieved using the proposed reference signal including a fixed speed state(2,000rpm, 3,000rpm, 4,000rpm) and a run-up speed state(2,000rpm →4,000rpm) is accomplished with the active muffler installed in vehicle.

주요기술용어 : Active Muffler(액티브 머플러), plane Wave(평면파), Driving Frequency(구동 주파수), Harmonic Frequency(조화 주파수), Reference Signal Synthesized Method(참조 신호 합성법), *filtered-x* LMS Algorithm(FXLMS)

1. 서 론

지금까지의 자동차 배기 소음 대책은 수동형 소음기의 설계로 이루어져 왔는데, 수동형 소음기는 소음기 설치를 위하여 특별히 공간을 확보

해야 하고 또한 저주파 영역(500Hz 미만)에서는 소음 저감 효율이 작게 나타나고 있다. 특히 수동형 소음기 설치로 인해 발생하는 배압은 자동차의 성능과 직접적으로 관계되어 소음 저감만을 목적으로 한 소음기 설계를 어렵게 한다.^{1)~2)} 따라서 자동차 배기 소음의 저감과 성능 향상의 차원에서 액티브 머플러의 연구가 진행되었다.^{3)~7)} 액티브 머플러의 개발은 자동차 실내 소음 제어에 비해 간단한 구조이며 수동형 소음기와의 조

* 한양대학교 기계기술연구소

** 한양대학교 정밀기계공학과 대학원

*** 정회원, 한양대학교 공과대학 기계공학부

**** 기아기술센터 제1연구소

합을 통해 광대역 소음 제어가 가능하게 한다. 또한 배압의 감소로 인하여 연비를 향상시키고 출력의 증가를 가져온다.

지금까지의 능동형 머플러는 설치 비용이 고가인 이유로 산업용 대형 엔진을 대상으로 연구되어 왔으나,⁸⁾ 실시간 프로세서의 가격 하락과 배기 소음 규제의 강화, 고출력의 요구 등의 문제점을 해결하기 위하여 개발의 필요성이 높아지고 있다.

본 연구에서는 상용차의 배기 소음 저감을 위한 액티브 머플러를 설계·제작하고 실제로 차량에 장착하여 적용 가능성을 보였다. 제어 알고리즘에서 엔진 가속도 신호를 이용한 참조 신호 합성법을 개발하여 엔진 구동 주파수와 조화 주파수 성분까지 줄일 수 있도록 하였고, 액티브 머플러의 출구단에서 평면파 유동이 되도록 형상을 결정하여 오차 마이크로폰을 고온의 배기가스의 배출 부분을 피하여 배치할 수 있었고, 외부로 방사되는 소음의 전역적인 저감을 가능하게 하였다.⁹⁾ 이렇게 설계된 액티브 머플러를 상용차에 부착하여 정지 상태에서 제어 실험을 수행하였다. 고정된 rpm(2,000rpm, 3,000rpm, 4,000rpm)과 정지 중에 레이싱 상태(2,000rpm→4,000rpm)에서 참조 신호 합성법과 *filtered-x* LMS 알고리즘^{10)~11)}을 이용하여 제어를 수행하였다.

2. 능동 배기 소음 제어 이론

2.1 *filtered-x* LMS 알고리즘

오차 센서에서 계측된 신호는 각각 주음원, 이차 음원으로 인한 소음은 두 부분으로 구성된다.

$$e_k = P_k + y_k \tag{1}$$

k 번째에 오차 센서에서 계측된 제어 신호는 액추에이터의 특성 전달함수 A 에 의해 수정되어지고 액추에이터와 오차 센서 사이의 한정된 거리로 인해 n 샘플이 지연되어 진다. 또한, 전체 오차 신호는 오차 마이크로폰 전달함수 M 에 의해 수정되어 진다.

$$e_k = (P_k + W_{k-n}^T X_{k-n} A) M \tag{2}$$

만약 신호가 정현파이면 오차 마이크로폰과 제어 액추에이터의 부가경로 전달함수는 단순한 이득과 위상 이동으로, 광대역 소음의 경우에는 유한 임펄스 응답 필터 또는 벡터량으로 생각할 수 있다. 식(2)을 단순화하기 위해 k 번째의 필터링된 주음원 신호 G 그리고 필터링된 참조 신호 F 는 다음과 같이 정의한다.

$$G_k = p_k M, F_k = X_{k-n} A M \tag{3}$$

순간 오차 신호에 근거한 경사 예측치는 다음과 같다.

$$\nabla_k = \frac{\partial e_k^2}{\partial W_k} = 2e_k F_k \tag{4}$$

그러므로 최종적으로 적용 필터 계수 갱신은 다음과 같이 된다.

$$W_{k+1} = W_k - 2\mu e_k F_k \tag{5}$$

알고리즘 수행이 가능한 블록 선도는 Fig.1에서 보여 준다.

참조 신호 X 는 적응 알고리즘에서 사용되기

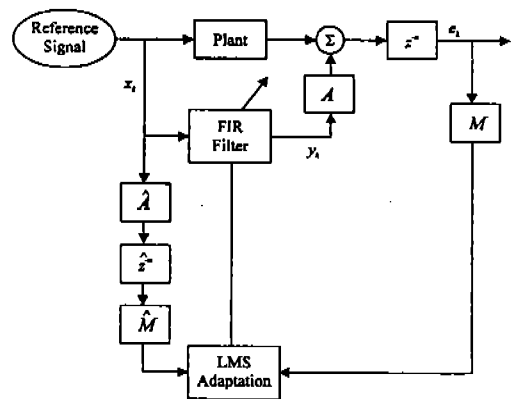


Fig.1 Block Diagram of the Practical Implementation of a Single Actuator, Single Error Sensor Active Control System

이전에 액츄에이터와 오차 센서 특성 함수의 예측치에서 포함된 n 샘플의 예측치에 의해 지연된다.

$$\widehat{F}_k = \widehat{X}_{k-n} \widehat{A} M \quad (6)$$

그러므로 알고리즘의 실제적인 수행은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} W_{k+1} &= W_k - 2\mu \epsilon_k \widehat{F}_k \\ &= W_k - 2\mu (\widehat{F}_k G_k + \widehat{F}_k F_k^T W_{k-n}) \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 참조 신호의 합성

자동차의 배기 소음 제어 알고리즘의 참조 신호로 이용된 엔진 블록 위에 설치된 가속도로부터 나온 신호는 엔진 구동 주파수 성분이 지배적인데 비하여 머플러 끝단에서의 오차 신호는 엔진 주파수 소음과 2, 3차 조화 주파수 소음이 동시에 나타남을 볼 수 있다. 따라서 이와 같은 상태에서 배기 소음 제어를 수행하게 되면 엔진 주파수 소음은 저감 되지만 조화 주파수 성분들은 저감 되지 않는다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 신호처리 방법에 의해 다음과 같이 참조 신호를 재합성하였다. 먼저 각 순간에서 참조 신호 $X'(f)$ 의 실효값을 예측하고 이것을 이용하여 순간에 입력되는 신호의 최대값을 계산한다. 이 최대값을 이용하여 참조 신호를 정규화시킨 이후에 사인 공식을 이용하여 순간에 입력되는 신호의 2차 조화 주파수 성분 $X'(2f)$ 을 만들 수 있다. 최종적인 참조 신호 X 는 엔진 구동 주파수 성분과 조화 주파수 성분의 합을 이용하게 된다.

$$\begin{aligned} X'(2f) &= \frac{X'(f)}{\sqrt{2} \times \text{실효치}} - 2 \times X'(f) \\ X &= X'(f) + X'(2f) \end{aligned} \quad (8)$$

3. 실차 장착용 플로토 타입의 설계

본 연구에서 제작한 실차 장착용 플로토 타입은 photo 1과 같은데 특징으로는 제어 스피커를

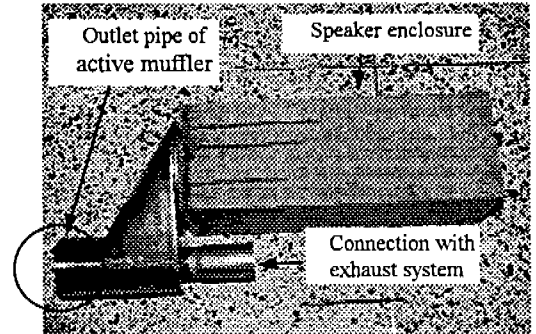


Photo 1 Prototype of the Active Muffler

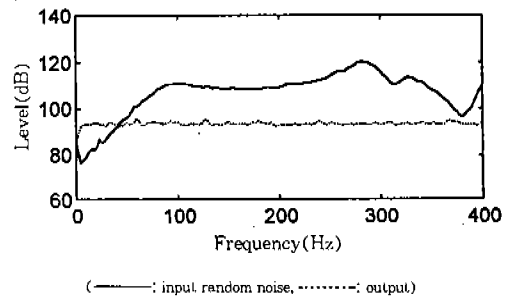


Fig.2 Transfer Function of Secondary Path in the Active Muffler Prototype

한 개 부착하는 1 phase 형태이고, 주음원이 방사되는 테일 파이프를 제어 스피커에서 발생하는 제어음이 둘러싸는 형태의 다이폴을 형성하도록 하였다. 또한 출구단을 파이프 처리하여 이곳을 통과하는 음의 유동 형태를 평면파가 되도록 하여 주음원과 제어음이 계속되는 마이크로폰의 위치를 자유롭게 하고 제어 효과를 높일 수 있도록 설계하였다. 오차 마이크로폰은 액티브 머플러의 출구 파이프($\phi 88\text{mm}$)의 중심에서 밑으로 40mm 떨어진 위치에 배치하였다. 실제 제어기에서 모델링하여 이용하는 부가경로 전달함수의 주파수 응답은 Fig.2와 같은데 공진 주파수는 290Hz이며 80Hz 이상에 평탄한 음압 특성을 가지는 것을 알 수 있다.

4. 실차 실험 결과 및 고찰

4.1 실험 방법과 장치

제안된 액티브 머플러 플로토 타입을 실차에

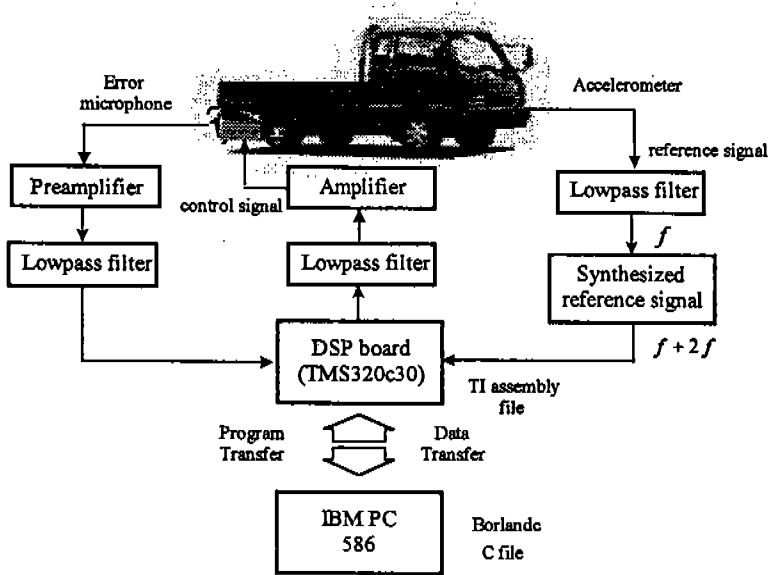


Fig.3 Experimental Setup for Controlling the Exhaust Noise of the Vehicle

부착하여 다음과 같은 제어 실험을 수행하였다. Fig.3에서 제어계의 참조 신호는 엔진 실린더 블록 위에 가속도계(Accelerometer, RION PV-44A)를 부착하여 얻은 가속도 신호를 저역 통과 필터(400Hz)를 통과시킨 다음에 참조 신호 합성법에 의해 조화 신호를 합성하여 제어기인 DSP 보드로 입력하였다. Photo 2에서 대상 차종으로는 상용차 J2(Kia Motors)를 사용하였으며 배기계의 끝단에 액티브 머플러를 부착한 상태로 액티브 머플러의 중앙 하단에 오차 신호를 측정하기 위해 마이크론을 설치하였다. Fig.3에서 실제 제어를 수행하기 위한 컴퓨터와 제어 데이터를 측정하기 위해 A/D 컨버터를 내장한 컴퓨터를 각각 이용하였다. 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)에 접근하여 데이터를 업로드(Up-Load)하는 Borlandc C 실행 파일을 작성하였다.¹²⁾

배기 소음의 제어 실험은 고정된 rpm 상태

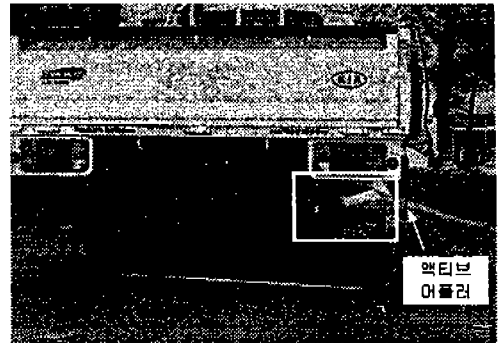
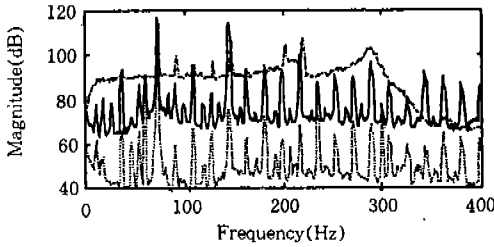


Photo 2 Active Muffler of Exhaust System in Vehicle

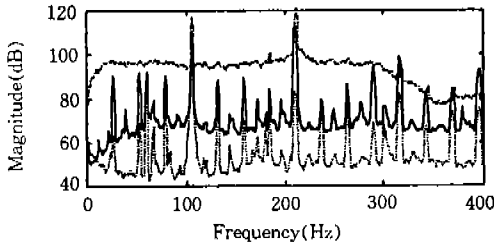
(2,000rpm, 3,000rpm, 4,000rpm)와 정지 중에 20초 동안 2,000~4,000rpm 구간을 레이싱하는 상태에서 수행하였다. 입력되는 참조 신호를 합성한 상태에서 *filtered-x* LMS 알고리즘을 이용하여 제어 실험을 수행하였다.

4.2 참조 신호 합성 결과

Fig.4(a)에서 2,000rpm일 경우 오차 신호는 대략 70, 140Hz 성분이 존재하지만 기존의 참조 신호에는 70Hz 만이 존재한다. 그러나 제안



(a) 2,000rpm



(b) 3,000rpm

(----- : reference signal, ——— : synthesized reference signal
 ----- : error signal)

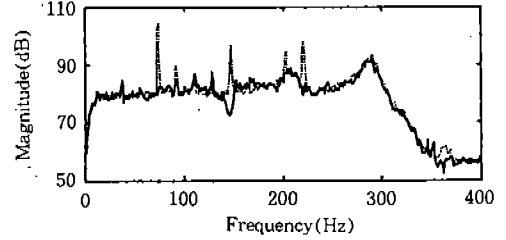
Fig.4 Synthesized Reference Signal Generated by Signal Processing Method

된 방식에 의해 참조 신호를 합성한 결과 참조 신호는 70, 140Hz의 주파수 성분이 동일한 레벨로 발생되는 것을 알 수 있다. 역시 Fig.4(b)에서 3,000rpm의 경우 오차 신호는 100, 200Hz 성분이 존재하지만 참조 신호에는 100Hz 성분만이 존재하는데 동일한 방식으로 합성한 결과 100, 200Hz 모두 발생하였다.

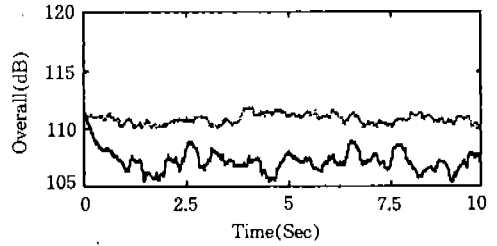
4.3 액티브 머플러를 이용한 배기 소음 저감

제한된 액티브 머플러의 플로토 타임을 실차에 장착하고 참조 신호 합성법과 *filtered-x* LMS을 이용하여 제어 실험을 수행하였다.

먼저 고정된 rpm 상태에서 제어 결과를 보면 2,000rpm, 3,000rpm에서는 엔진 구동 주파수와 2차 조화 주파수 성분이 모두 저감 되는 것을 확인할 수 있었고 1초 이후에 배기소음의 저감이 이루어짐을 알 수 있었다. 그러나 4,000rpm에서는 엔진 구동 주파수와 배기 가스의 배출 과정에서 발생하는 난류 소음과 소음 레벨의 차이가 크지 않아 저감 되는 정도가 작음을 알 수



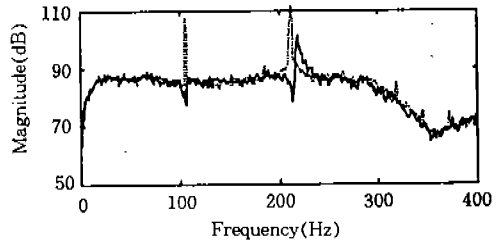
(a) Spectrum Data



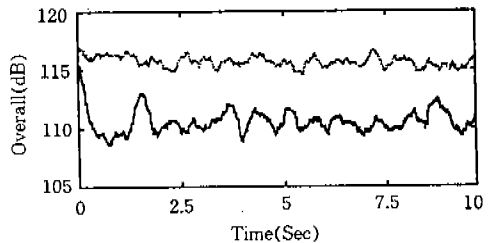
(b) Time Data

(----- : before control, ——— : after control)

Fig.5 Controlled Exhaust Noise at 2,000rpm



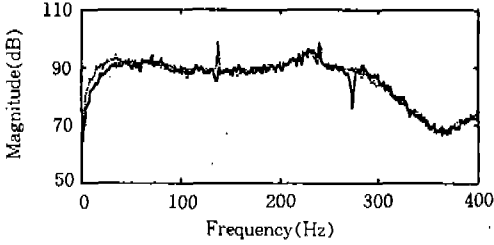
(a) Spectrum Data



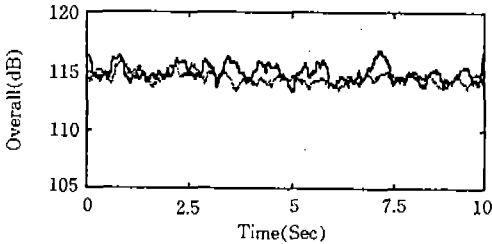
(b) Time Data

(----- : before control, ——— : after control)

Fig.6 Controlled Exhaust Noise at 3,000rpm



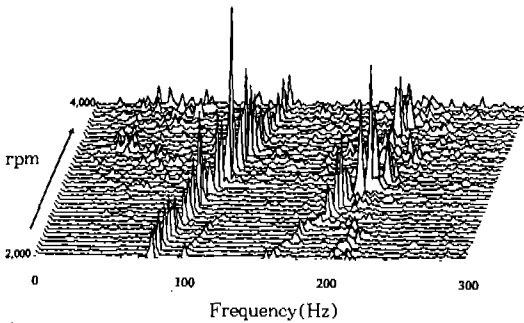
(a) Spectrum Data



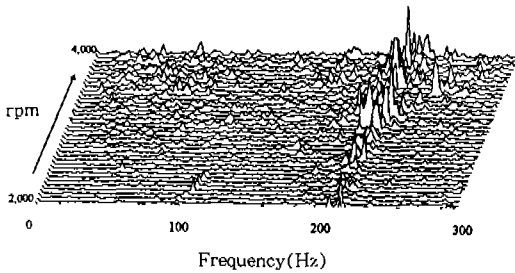
(b) Time Data

(----- : before control, ——— : after control)

Fig.7 Controlled Exhaust Noise at 4,000rpm



(a) before control



(b) after control

Fig.8 Controlled Exhaust Noise in the Run-Up State(2,000⇒4,000rpm)

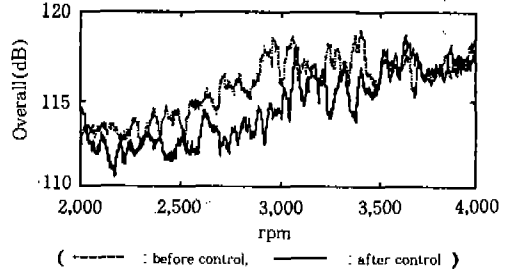


Fig.9 Controlled Exhaust Noise at Overall Sound Power Level in the Run-Up State(2,000⇒4,000rpm)

있었다.

다음으로 엔진 구동 rpm을 2,000rpm에서 4,000rpm으로 변경하면서 정지 중에 레이싱을 한 경우 제어 결과를 Fig.8에 나타내었다.

Fig.8에서 rpm이 변하여도 엔진 구동 주파수와 2차 조화 주파수에서 배기 소음이 동시에 저감 되는 것을 알 수 있다.

Fig.9은 오버올 레벨에서 제어 결과를 나타낸 것으로 2,000~3,000rpm 구간에서는 5dB 이상의 저감 효과를 가져오나 Fig.7와 같이 4,000rpm에서는 오버올 레벨에서 뚜렷한 저감 효과를 볼 수 없음을 알 수 있다.

결과적으로, 배기 소음 저감은 배기 소음의 배출 과정에서 발생하는 난류 소음이 배기 소음 제어의 한계에 밀접하게 관계되어 있어 2,000~3,000rpm 구간에서만 이루어짐을 알 수 있다.

5. 결 론

상용 자동차의 능동 배기 소음 제어에 대한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실차 배기 소음 제어를 위한 액티브 머플러의 형상을 결정하였으며 액티브 머플러의 끝단을 평면과 유동이 되게 함으로써 오차 마이크로폰을 고온의 배기 가스를 피하여 위치시킬 수 있었다.
- 2) 제안한 참조 신호 합성법에 의해 엔진 소음의 2차 조화 성분을 합성하여 새로운 기준 신호로 이용함으로써 제어 성능을 높였다.

- 3) 제작한 액티브 머플러를 상용차에 부착하여 정지 중 제어 실험을 수행한 결과 2,000rpm~3,500rpm 구간에서 배기소음 저감이 제대로 수행되지만 4,000rpm에서는 난류 소음으로 인하여 제어 효과가 작아지는 것을 알 수 있었다.

앞으로 향후 연구에서는 엔진 구동 rpm이 낮은 상태(2,000rpm 미만)와 4,000rpm 이상에서 제어 효과를 높이는 연구를 수행하고자 한다.

후 기

본 연구는 환경부 선도기술개발과제(G-7 프로젝트)의 일환으로 기아자동차(주)에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. M.L. Munjal, Acoustics of Ducts and Mufflers, John Wiley & Sons, New York, 1987.
2. 오재용, "S-Project의 배기 소음 저감에 관한 연구", 한양대학교 연구보고서, 1994.
3. 오재용, 김홍섭, 손동구, "능동 배기 소음 제어용 능동형 머플러의 개발 동향", 한국소음진동공학회, 제2권, 4호, pp. 23~29, 1995.
4. K.h. Eghtesadi, J.W. Gardner, "Design of Active Muffler for International Combustion Engines", Proceedings of Internoise, pp. 471~474, 1989.
5. M.C.J. Trinder, G.B.B. Chaplin, "Active Control of Commercial Vehicle Exhaust Noise", Proceedings of Internoise, pp. 611~616, 1986.
6. T.H. Hesse, "Commercial Consideration for the Implementation of Active Noise and Vibration Control", International Symposium on Active Control of Sound and Vibration, pp. 201~206, 1991.
7. 오재용, 김홍섭, 손동구, "능동배기소음제어용 능동형 머플러의 개발동향", 한국소음진동공학회, 제5권, 4호, pp. 23~29, 1995.
8. W.J.J. Hoge, Everett Arnold, "Development of a Prototype Active Muffler for the Detroit Diesel 6c-92 TA Industrial Engine", SAE 911045.
9. 오재용, "차량 Muffler용 능동소음제어 장치 개발", 한양대학교 연구보고서, 1996.
10. Widrow et al, Adaptive Signal Processing, Prentice-Hall Inc., England Cliffs, 1985.
11. S.M. Kuo, D.R. Morgan, Active Noise Control Systems, John Wiley & Sons, Inc, 1996.
12. TMS320c30 User's Guide, Texas Instruments, 1991.