

배기소음 제어용 능동형 소음기의 제어 성능평가에 관한 연구

김흥섭* · 손동구** · 오재음***

(1996년 8월 28일 접수)

A Study on the Evaluation of Control Performance of Active Muffler for Exhaust Noise Control

Heung Seob Kim, Dong Gu Shon and Jae-Eung Oh

Key Words : Active Muffler(능동형 소음기), Secondary Path Transfer Function(부가경로 전달함수), Fundamental Frequency(기본주파수), Harmonic Frequency(조화주파수), Tail Pipe(미관)

Abstract

Active mufflers have been mainly applied in the large industrial engine due to considerable expense for implementation, but a necessity of development has been increased by the tightened regulation of exhaust noise and the request of high power. In this study, the active muffler prototype for installing in an automobile is designed and constructed. The active muffler is designed so that the primary noise and the control sound are propagated as a plane wave in the outlet. Therefore, the error microphone could be placed outside the high temperature centers of the tail pipe, and the noise radiating to the outside could be reduced in the whole areas around the outlet. For evaluating the control performance of the prototype, the control experiments of band-pass filtered random signal and the modulation of sinusoidal signal which are generated from the primary noise speaker as practical exhaust sound level are implemented. And to investigate the radiation pattern from the outlet of tail pipe and the noise reduction level of points placed adjacent to the outlet, the sound level of adjacent points of thirty is measured.

1. 서 론

지금까지의 자동차 배기소음 대책은 수동형 소음기의 설계로 이루어져 왔는데, 수동형 소음기는 소음기 설치를 위하여 특별히 공간을 확보해야 하며, 제한된 크기에서 저주파 소음을 저감하기 위해서

는 일반적으로 역류형요소(flow-reversing element)를 많이 사용하는데, 이러한 요소를 사용한 수동형 소음기 설치로 인해 발생하는 배압은 자동차의 성능과 직접적으로 관계되어 소음저감만을 목적으로 한 소음기 설계를 어렵게 한다.^(1,2) 따라서 단순 확장형요소를 사용한 수동형 소음기와 능동형 소음기를 결합시켜 광대역 소음저감과 저배압이 가능한 조합형 소음기에 대한 연구가 진행되고 있다.^(3,4)

지금까지의 능동형 소음기는 설치 비용의 고가로 인하여 산업용 대형 엔진을 대상으로 연구되어 왔

*한양대학교 기계기술연구소
**한양대학교 정밀기계공학과
***회원, 한양대학교 기계공학부

으나 실시간 프로세서의 가격하락과 배기소음 규제 의 강화, 고출력의 요구 등의 문제점을 해결하기 위하여 승용차에 적용을 목적으로 하는 개발의 필요성이 높아지고 있다.⁽⁵⁾

능동형 소음기는 액츄에이터(일반적으로 스피커 또는 기계식 실린더), 센서, (마이크로폰) 그리고 제어기(DSP 보드)로 구성되어진다. 자동차 실내 소음제어와는 다르게 액츄에이터, 센서 등이 배기 소음에 노출되어 있기 때문에 각각의 유닛들은 내구성, 내열성 등을 가지도록 설계되어야 한다.

액츄에이터는 소형이면서도 평탄한 음압특성, 선형위상, 작은 왜곡 등의 특성을 가져야 한다. 미쓰비시 전기에서는 200°C에서도 좋은 특성을 가지고 최고 100 dB/W·m의 출력을 내는 스피커를 제작하였고,⁽⁶⁾ A.N.V.T에서는 KEVLAR 합금을 이용하여 기존 스피커보다 2, 3배 작은 소형 크기에서도 동일한 출력을 내는 스피커를 능동형 소음기에 적용하였다.⁽⁷⁾

N.C.T에서는 산업용 엔진에 능동형 소음기를 적용하여 연비를 2% 증가시키고 가용면적은 8% 감소시킨 사례를 발표하였다. N.C.T 연구의 특징은 3개의 제어 스피커 드라이버를 가진 능동형 소음기에 엔진 폭발주파수의 1/2, 1/4 파장에 해당하는 튜너(tuner)를 부착하여 광대역의 소음제어가 가능하게 하였다.⁽⁴⁾ A.N.V.T에서는 각각의 rpm에서 미리 저장해 놓은 배기소음 특성 데이터틀 제어 파라미터의 시작점으로 이용하는 학습 기반 시스템을 개발하였다.⁽⁷⁾

미쓰비시 중공업에서는 정속회전을 하는 산업용 디젤엔진의 미관에서 4개의 제어 스피커 드라이버를 배치하고 모니터링 마이크로폰에서 가장 큰 배기소음의 저감을 가져올 수 있는 오차 마이크로폰의 위치결정을 위하여 미관에서 각각 0 cm, 25 cm, 50 cm 씩 거리를 두면서 배기소음 제어를 수행하였다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 1상(phase) 형태의 실차 장착을 위한 능동형 소음기의 초도 시작품을 제작하였다. 제작한 시작품은 출구에서 주음원과 제어음이 평면파로 전파되도록 설계하였다. 이와 같은 설계는 고온의 미관 중심을 피해서 오차 마이크로폰을 배치시키고, 오차 마이크로폰에서 제어가 수행된 이후에 외부로 방사되는 소음을 미관 주변에서 전역적으로 저감하기 위함이다.^(9, 10)

이러한 시작품의 제어 성능평가를 위하여 필터링 된 랜덤소음(80~300 Hz)에 대한 제어와 실제 차

동차에서 발생하는 가감속상태를 가정한 실험으로 주음원주파수를 가속시에는 80 → 230 Hz으로, 감속시에는 230 → 80 Hz으로 변조시키는 상태에서 제어실험을 수행하였다. 또한 제어를 수행한 전후에 미관에서 배기소음이 방사되는 형태와 전역적인 저감이 이루어지는 것을 알아보기 위하여 미관 부근의 30개 지점에서 소음을 측정하여 소음 레벨을 2차원 등고선도로 나타내었다.

2. 능동 소음제어 이론

오차센서에서 계측된 소음신호는 각각 주음원과 이차음원으로 인한 소음의 파피간섭으로 구성된다.

$$e_k = p_k + s_k \quad (1)$$

k 번째에 오차센서에서 계측된 제어신호는 액츄에이터의 특성전달함수 A 에 의해 수정되어지고 액츄에이터와 오차센서 사이의 한정된 거리로 인해 n 샘플이 지연되어 진다. 또한, 전체 오차신호는 오차 마이크로폰 전달함수 M 에 의해 수정되어 진다.

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

여기서, W 는 주제어필터, X 는 참조신호를 의미한다. 만약 신호가 정현파이라면 오차 마이크로폰과 제어 액츄에이터의 부가경로 전달함수는 단순한 이득과 위상이동으로, 광대역 소음의 경우에는 유한 임펄스 응답필터 또는 벡터량으로 생각할 수 있다. 식 (2)을 단순화하기 위해 k 번째의 필터링된 주음원신호 g_k 그리고 필터링된 참조신호 F_k 는 다음과 같이 정의한다.

$$g_k = p_k M, \quad F_k = X_{k-n} A M \quad (3)$$

순간 오차신호에 근거한 경사 예측치는 다음과 같다.

$$\bar{V}_k = \frac{\partial e_k^2}{\partial W} = 2e_k F_k \quad (4)$$

그러므로 최종적으로 적응필터계수 갱신은 다음과 같이 된다.

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

알고리즘 수행이 가능한 블록선도는 Fig. 1에서 보여 준다.

참조신호 X 는 적응 알고리즘에서 사용되기 이전에 액추에이터와 오차센서 특성함수의 예측치에서 포함된 n 샘플의 예측치에 의해 지연된다.

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

그러므로 알고리즘의 실제적인 수행은 다음과 같다.

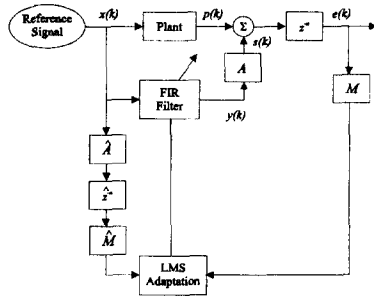


Fig. 1 Block diagram of the practical implementation of a single actuator, single error sensor active control system.

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

3. 능동 소음배기 제어실험

본 연구에서는 시작품의 형상 제안을 바탕으로 Photo 1의 초도 시작품을 제작하였다. 시작품의

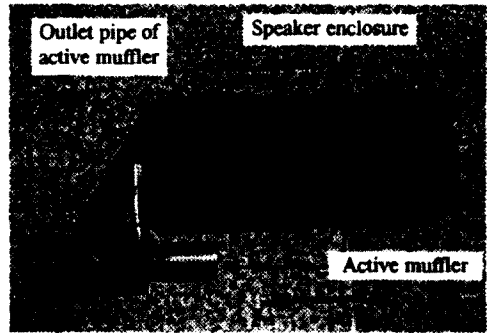


Photo 1 Prototype of the active muffler.

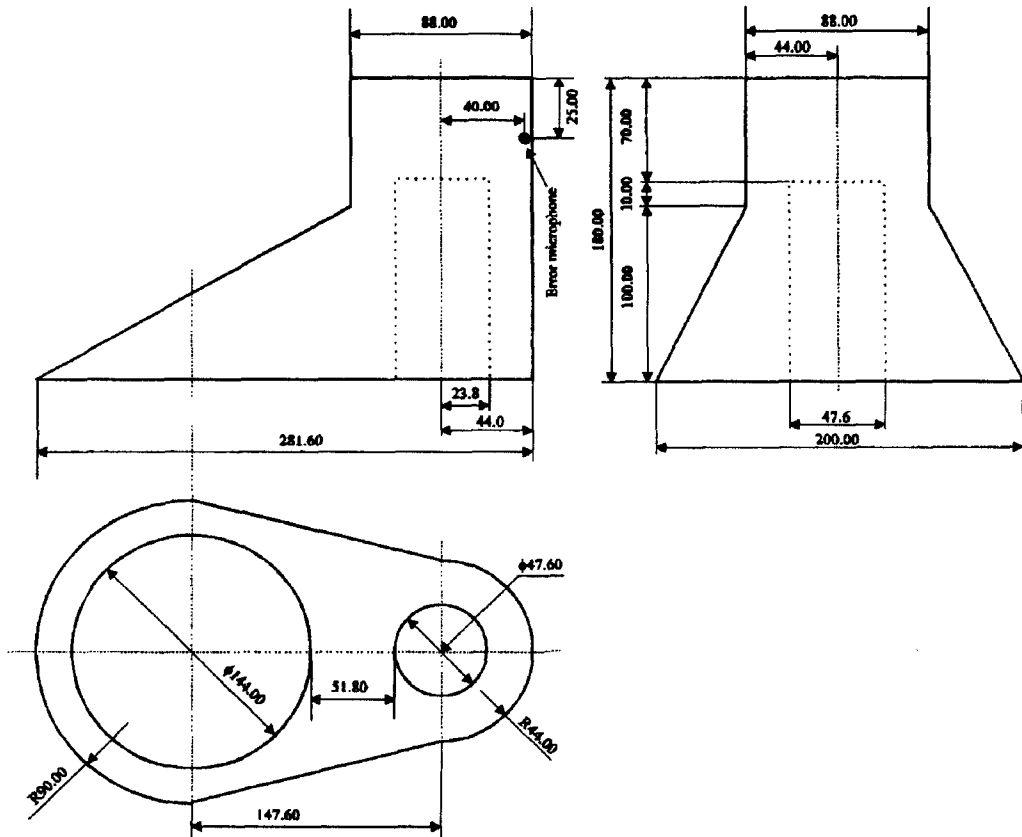


Fig. 2 Design of the active muffler prototype.

특징으로는 한 개의 제어 스피커를 부착하는 1상 형태이고, 미관은 제어 스피커로부터 발생하는 제어음이 주음원으로부터 방사되는 배기소음을 둘러싸는 형태로 되어 있다. 또한 미관의 출구단을 파이프 처리하여 이곳을 통과하는 배기소음의 전파 형태가 목적하는 300 Hz 미만에서 평면파로 되게 하였다. 이와 같은 능동형 소음기의 설계는 주음원과 제어음을 계속하는 오차 마이크로폰의 위치를 고온의 파이프 중심을 피할 수 있도록 하여, 고온의 배기가스로부터 마이크로폰을 보호하고 배기소음의 측정과정에서 직접적으로 배기가스에 접촉되는 것을 피할 수 있게 하였으며 오차 마이크로폰에서 저감이 수행된 이후에 외부 방사소음을 미관 주변에서 전역적으로 저감되게 하였다. 시작품에서 제어 스피커는 실제 배기소음 출력을 충분히 제어할 수 있도록 6 in 우퍼에 밀폐계(enclosure)를 부착하여 사용하였다. Photo 1은 능동형 소음기의 시작품을 나타낸다.

Fig. 2의 시작품 설계도에서 미관 출구단은 지름 88 mm, 길이 80 mm의 파이프로 되어 있는데, 오차 마이크로폰은 이 파이프의 중심으로부터 상방향

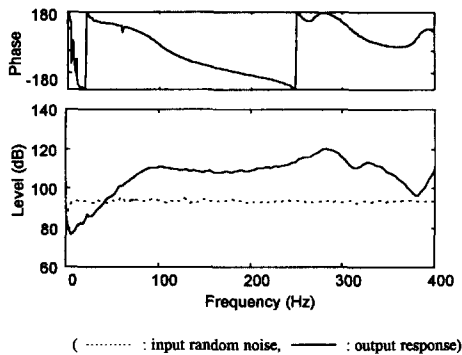


Fig. 3 Transfer function of secondary path in the prototype

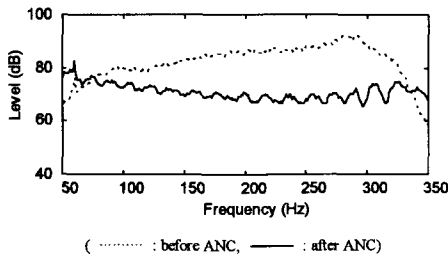


Fig. 4 Controlled random noise of 80~300 Hz frequency range.

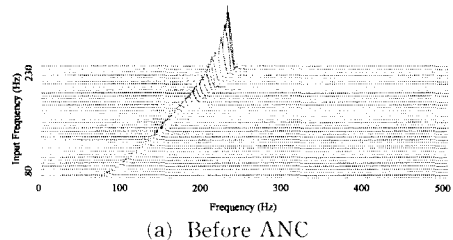
40 mm 위에 배치시켰다. 능동형 소음기에서 배기소음과 제어음은 이 파이프를 평면파로 통과한다.

Fig. 3은 사용된 시작품에서 제어 스피커와 오차 마이크로폰 사이의 부가경로 전달함수를 나타낸다.⁽¹¹⁾ 이 전달함수에서 공진주파수는 310 Hz에서 발생하는데, 이것은 입구단의 길이($\phi 281.6$ mm)에 의해 결정되고, 관심주파수 영역인 80~300 Hz에서 평탄한 음압특성을 갖는 것을 알 수 있다.

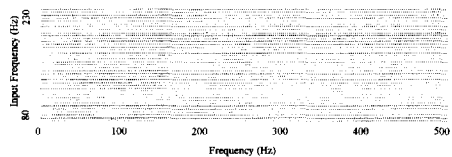
시작품의 성능평가를 위하여 랜덤소음과 정현파 변조에 대한 제어실험을 수행하였다. 본 연구의 관심 주파수영역인 80~300 Hz 주파수 범위의 랜덤소음과 실차의 가속속형태를 가정하여 가속인 경우에는 80~230 Hz 범위의 정현파 변조, 감속의 경우 230~80 Hz 범위의 정현파 변조를 5초간 시키면서 제어실험을 수행하였다.

시작품에서 랜덤소음의 제어결과는 전 저주파 대역에서 10 dB 이상의 저감효과를 가져옴을 Fig. 4에서 볼 수 있다. 실험에서 필터차수는 100 차이고, 샘플링은 2 kHz로 수행하였다.

Fig. 5, Fig. 6에서 빠른 가·감속시에도 엔진 2차 주파수 성분이 빠르게 저감되는 것을 볼 수 있다. 실제 배기계에서도 엔진 2차 주파수 성분이 가장 지배적인데 이러한 상황에서도 본 연구에서 사용된 제어 알고리즘은 충분히 배기소음을 저감할 수 있을 것이다. 또한, 시작품의 오차 마이크로폰 위치에서 이러한 소음저감이 이루어졌을 경우에 미관을 중심으로 소음이 방사되는 형태가 어떻게 변화되는 것을 관찰하기 위하여 30개 위치에서의 음



(a) Before ANC



(b) After ANC

Fig. 5 Controlled exhaust noise in the acceleration event. (Modulation of sinusoidal signal : 80 → 230 Hz).

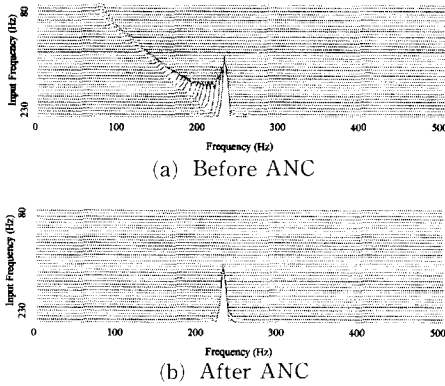
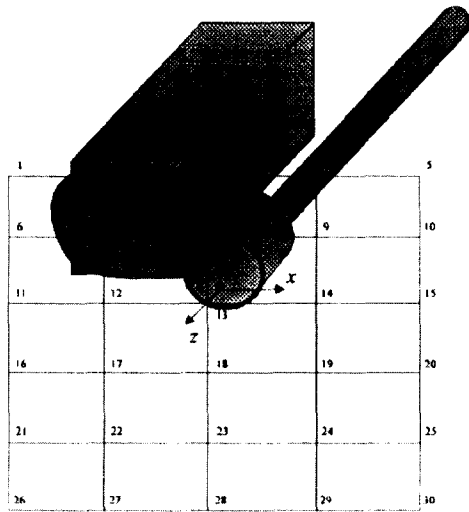


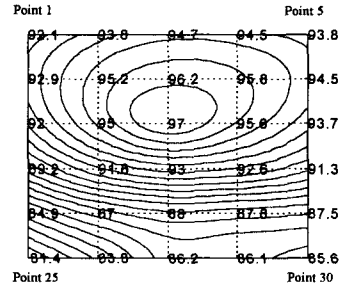
Fig. 6 Controlled exhaust noise in the deceleration event. (Modulation of sinusoidal signal : 230 → 80 Hz).



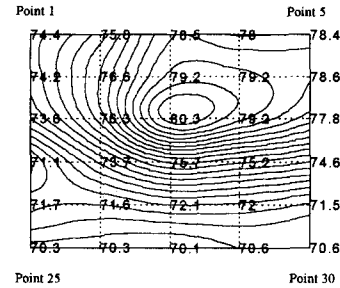
Error microphone : (0, 0, 0),
 3 : (0, 17.5, 35), 13 : (0, 0, 35)

Fig. 7 Measuring points for evaluating the radiation pattern.

압을 측정하였다. Fig. 7은 미관에서 전면으로 350 mm 떨어진 수직평면에서 측정간격 175 mm로 30개 위치에서의 음압을 측정하였다. 13번 위치는 오차 마이크로폰의 전방위치이고, 3번 위치는 배기소음의 평가 기준 음압을 측정하는 모니터링 마이크로폰의 위치이다. Fig. 9는 미관과 동일한 높이의 수평평면으로 3번 위치가 미관의 출구가 된다. 사용된 주음원은 160 Hz의 순음이며, 오차 마이크로폰에서 실제의 배기소음 레벨과 유사하게 오버울 소음 레벨 110 dB의 크기로 소음을 발생시켰다. 30개의 위치에서 사운드 레벨미터를 이용하여 음압

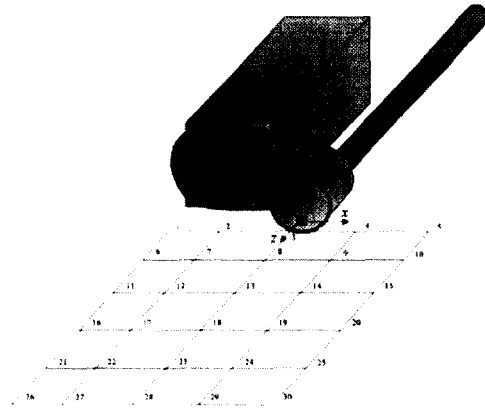


(a) Before ANC



(b) After ANC

Fig. 8 Sound radiation pattern from the tail pipe of the prototype.



3 : (0, 0, 0), 8 : (0, 0, 17.5)

Fig. 9 Measuring points for evaluating the propagation pattern.

을 측정하였고, 측정된 소음 레벨을 2차원 등고선도를 이용하여 제어전후의 방사형태를 Fig. 8, Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 8(a), (b)에서 미관에서 직접 방사되는 위치인 13번 위치가 가장 음압이 높으며, 좌우대칭으로 소음이 전파되는 형태를 볼 수 있다. 제어 수행한 이후 모든 측정위치에서 15 dB 이상의 소음저

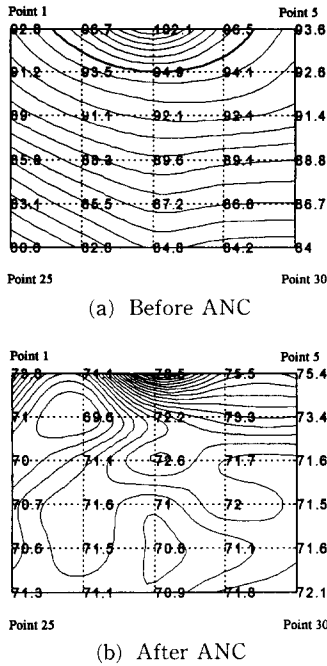


Fig. 10 Sound propagation pattern from the tail pipe of the prototype.

감이 이루어짐을 알 수 있다. 따라서 시작품의 출구단 파이프에서 배기소음이 평면파로 전파되도록 설계한 결과 마이크로폰에서 저감이 이루어지면 외부로 방사되는 소음도 전역적으로 저감되는 것을 알 수 있다.

Fig. 10(a)은 오차 마이크로폰의 소음 레벨이 110 dB인 경우에 밖으로 방사되는 소음 레벨을 나타내는데 미관 출구점에 해당하는 3번 지점이 102 dB로 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 소음 제어를 수행한 이후 미관 출구점에 가까운 2, 3, 4지점에서 20 dB 이상의 소음저감을 가져왔으며, 미관에서 멀리 떨어진 측정점에서는 제어후에 연구실 암소음 레벨과 유사하여 복잡한 등고선도를 나타내는 것을 볼 수 있다.

따라서, Fig. 8, Fig. 10의 결과에서 실차실험을 위해 제작한 실차용 시작품에서 오차 마이크로폰에서의 소음저감이 수행되어지면 외부로 방사되는 소음이 전역적으로 저감된다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

배기소음 제어를 위한 능동형 소음기의 기본 설계에 대한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을

수 있었다.

(1) 능동형 소음기의 시작품 출구에서 배기소음이 평면파로 전파되게 한 결과, 오차 마이크로폰의 위치선정을 용이하게 하였으며 방사소음에 대한 전역적인 저감을 가능하게 할 수 있었다.

(2) 랜덤소음과 정현파 변조에 대한 제어실험을 수행한 결과, 제작한 시작품의 제어성능이 우수하고 제어이후에 방사되는 배기소음이 미관 주변에서 전체적으로 저감되는 것을 알 수 있었다.

향후 연구에서는 제작한 시작품을 이용한 실차 실험과 배기소음의 시변화에 따른 알고리즘의 개선에 대해 연구를 계속적으로 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 환경부 주관의 선도기술개발과제(G7 프로젝트) 연구활동의 일환으로 기아자동차(주) 부설 기아기술센터의 주관아래 연구가 진행되고 있다.

참고문헌

- (1) 오재응, 1994, "S-project의 배기소음 저감에 관한 연구," 한양대학교.
- (2) 소음·진동편람, 1995, 한국소음진동공학회.
- (3) Eghtesadi, K. and Gardner, J. W., 1989, "Design of Active Muffler for International Combustion Engines," Proceedings of Internoise pp. 471~474.
- (4) Trinder, M. C. J., Chaplin, G. B. B. and Nelson, P. M., 1986, "Active Control of Commercial Vehicle Exhaust Noise," Proceedings of Internoise pp. 611~616.
- (5) Hoge, W. J. J. and Arnold, E., "Development of a Prototype Active Muffler for the Detroit Diesel 6V-92V TA Industrial Engines," SAE papers 911045.
- (6) Himori, S. and Saito, H., 1991, "Loudspeaker for High Temperature Environment," International Symposium on Active Control of Sound and Vibration, pp. 449~453.
- (7) Esse, T. H., 1991, "Commercial Considerations for the Implementation of Active Noise and Vibration Control," International Symposium on the Active Control of Sound and Vibration, pp.

- 201~206.
- (8) Ohnuma, T. and Sugimura, J., 1991, "Active Control of Exhaust Noise of Diesel Engine by Wave Synthesis Method," International Symposium on the Active Control of Sound and Vibration, pp. 267~272.
- (9) 김홍섭, 손동구, 오재응, 1997, "능동 배기소음제어용 제어기 개발에 관한 연구," 한국자동차공학회논문집, 제5권, 제1호, pp. 79~88.
- (10) Hall, H. R. and Bernhard, R. J., 1992, "Active Control of Radiated Sound from Ducts," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 114, pp. 338~346.
- (11) 김홍섭, 손동구, 오재응, 1997, "부가경로 전달함수의 온라인 예측에 의한 능동 소음제어의 성능향상," 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제2호, pp. 281~287.