

〈논 문〉 SAE NO. 97370009

능동배기소음 제어기 개발에 관한 연구

A Study on the Development of Active Exhaust Noise Controller

김 홍 섭*, 손 동 구*, 박 수 흥*, 오 재 응**
H. S. Kim, D. G. Shon, S. H. Park, J. E. Oh

ABSTRACT

The need for an active exhaust noise controller has been growing as a reinforcement of exhaust noise regulation, high power output and improvement of average fuel economy.

In this study, for development of this active exhaust noise controller, The implementation of a composition of realtime control algorithm for active exhaust noise control and the construction of simulator for active exhaust noise control has been investigated. Also, in order to implement active exhaust noise control with this simulator, the feasibility model for control of vehicle exhaust noise control is suggested.

주요기술용어 : Active exhaust noise controller(능동배기소음 제어기), Dipole(다이폴), Coherence(기여도), Fundamental frequency(기본 주파수), harmonic frequency(조화 주파수)

1. 서 론

우리 나라에서는 자동차가 중요한 수출 품목으로 부상하고 있어 현재의 시점에서 선진각국의 엄격한 소음 기준을 만족시킬 수 있는 배기 소음기의 독자적인 설계 및 성능 개선이 요구된다. 기존의 배기 소음기의 소음 대책은 흡음재를 내부에 장착한 수동형 소음기로 배기 소음을 흡수,

차단시키는 방법이었다. 이러한 수동적인 소음 대책은 소음기 설치를 위해 특별히 공간을 확보해야 하며 저주파 영역(500Hz 미만)에서는 작은 효율을 나타내고 있다. 특히 수동형 소음기의 설치로 인해 발생하는 배압은 자동차의 성능과 직접적으로 관계되어 소음 저감만을 목적으로한 소음기 설계를 어렵게 한다.

최근 원래의 소음과 부가 소음과의 파괴 간섭을 이용하여 특정 지역의 소음을 저감시키는 능동소음제어 기법이 자동차 배기소음 저감에 적용하는 연구가 진행되고 있다. 이와 같은 능동배기

* 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과 대학원

** 정회원, 한양대학교 공과대학 자동차공학과 교수

소음 저감 기법은 저주파 소음의 저감에 용이하고 설치를 위한 공간이 작으며, 배압을 발생시키지 않는 장점이 있다.¹⁾

지금까지의 능동형 배기계의 개발은 산업용 대형 엔진의 배기소음제어에 관심을 두고 이루어지고 있다. 그 이유는 일반 자동차보다 입력 신호의 주파수 변조가 심하지 않고, 능동형 배기계의 설치가 용이하기 때문이다.^{2),3)} N.C.T(Noise Cancellation Technologies)에서는 산업용 디젤 엔진(6V-92)에 능동형 배기계 시뮬레이터 실험을 통해 시뮬레이터 형상, 제어 스피커 파워 등에 관한 연구 사례를 발표하였다.⁴⁾ 미쓰비시 중공업에서는 능동형 배기계 시뮬레이터를 S6U 디젤 엔진에 장착하여 제어 실험을 수행하였는데, 주목할 만한 특징은 제어 알고리즘으로 파형 합성법을 이용하여 PC를 통해 제어를 구성하였고, 주로 오차 마이크로폰의 위치 선정에 대한 연구를 수행하였다.⁵⁾ 또한 미쓰비시 중공업에서는 이러한 능동형 배기계 시뮬레이터에서 사용되어지는 특수한 제어 스피커 개발에 대한 연구를 통해 200°C에서도 작동되고 100dB/W·m의 출력을 내는 제품을 발표하였다.⁶⁾

본 연구에서의 연구 목표는 다음의 두 가지를 두고 있다. 첫째는 능동배기소음 제어기에서 이용되는 실시간 제어 알고리즘의 구성이다. 배기소음제어에 사용되어질 알고리즘은 배기계 음향 환경에서도 여러 특성을 만족해야 하므로 가속, 감속에 따른 배기 소음 주파수의 빠른 변조에 대처할 수 있는 강력한 수렴 성능과 배기 소음에 나타나는 엔진 기본 주파수의 2, 3차 조화 성분까지 제어할 수 있어야 한다. 둘째는 능동형 배기소음 제어기 시뮬레이터를 제작하여 다양한 소음 환경에서 제어 실험을 통해 제어 알고리즘의 성능 분석과 향후 실차 장착용 능동형 배기소음기의 형상을 결정하는 것이다.⁷⁾

2. 능동소음제어 이론^{8),9)}

오차 센서에서 계측된 신호는 각각 주음원으로 인한 P_k , 이차 음원으로 인한 S_k , 두 부분으로 구성된다.

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

k 번째에 오차 센서에서 계측된 제어 신호는 액츄에이터의 특성 전달함수 A 에 의해 수정되어지고 액츄에이터와 오차 센서사이의 한정된 거리로 인해 n 샘플이 지연되어 진다. 또한, 전체 오차 신호는 오차 마이크로폰 전달함수 M 에 의해 수정되어 진다.

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

만약 신호가 정현파이다면 오차 마이크로폰과 제어 액츄에이터의 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.

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

순간 오차 신호에 근거한 경사 예측치는 다음과 같다.

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

그러므로 최종적으로 적응필터계수 갱신은 다음과 같이 된다.

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

알고리즘 수행이 가능한 블록 선도는 Fig.1에서 보여준다.

참조 신호 X 는 적응 알고리즘에서 사용되기 이전에 액츄에이터와 오차 센서 특성 함수의 예측치에서 포함된 n 샘플의 예측치에 의해 지연된다.

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

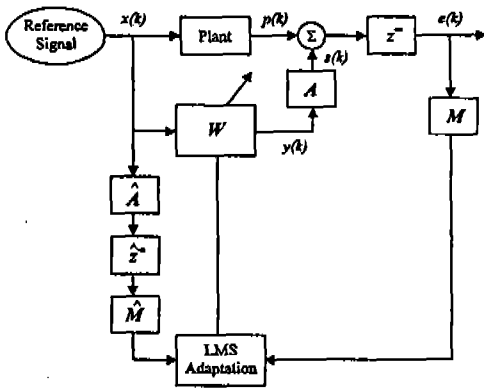


Fig.1 Block diagram of the practical implementation of a single actuator, single error sensor active control system

그러므로 알고리즘의 실제적인 수행은 다음과 같다.

$$W_{k+1} = W_k - 2\mu(\hat{F}_k G_k + \hat{F}_k F_k^T W_{k-n}) \quad (7)$$

3. 능동배기소음 제어 실험⁽⁷⁾

본 연구에서는 능동배기소음 제어 시뮬레이터의 형태를 결정하기 위하여 photo 1의 1 phase, photo 2의 2 phase 그리고 photo 3의 개선된 1 phase 시뮬레이터 제작하였다.

제작된 시뮬레이터는 크게 세개의 부분으로 구성되어 있는데, 첫째는 소음을 발생시키기 위한 혼드라이버(삼미 SU-75E) 유닛이다. 실제 배기 소음 레벨의 소음을 발생시키기 위하여 두개의 혼드라이버를 십자형으로 결합하여 80Hz 이상의 저주파 소음을 발생시켰다. 또한 실제 배기계와 유사한 유속을 주기 위해 십자형 끝에 유속 입력 장치(컴프레서)를 설치하였으며 테일 파이프의 끝에서 핫아이어를 설치하여 유속을 측정하였다. 시뮬레이터 배기계의 테일 파이프에서 실측한 유속은 입력 신호에 따라 달라지나 평균적으로 34m/s 이다. 둘째는 실제 차량의 배기계에서는 엔진의 폭발 주파수와 조화 성분의 소음이 배기관을 통과하면서 상당히 변조되는데 본 시

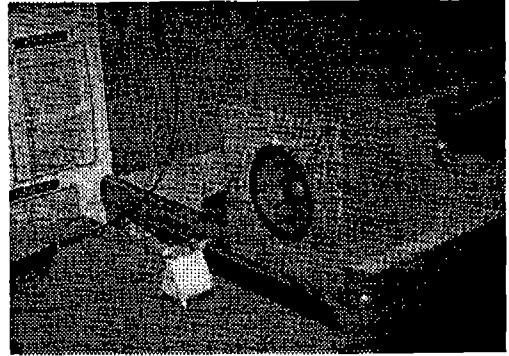


Photo 1 1 phase simulator for active exhaust noise control

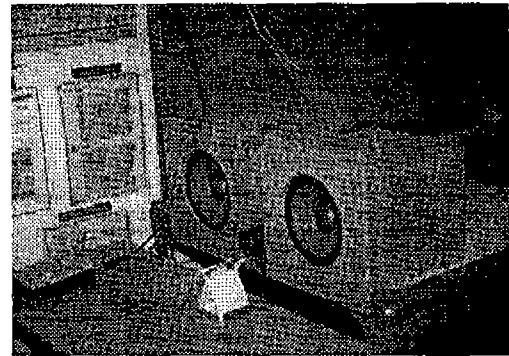


Photo 2 2 Phase simulator for active exhaust noise control

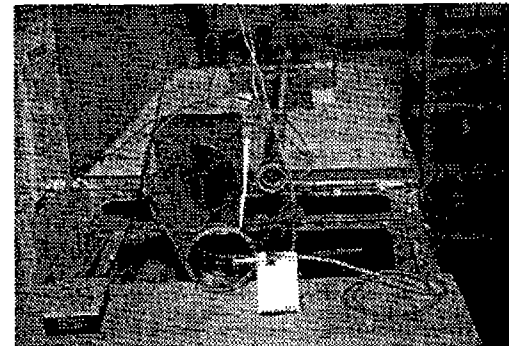


Photo 3 Improved 1 phase simulator for active exhaust noise control

시뮬레이터에서는 실제 배기관과 유사하게 ϕ 4.8cm의 배기관을 사용하였다. 마지막으로 배기관을 통과하여 테일 파이프에서 배기관을 통과하여 밖으로 방사되는 소음을 제어하기 위한 제어 스피커와 마이크로폰 유닛이다. 사용된 제어 스피커는 공진 주파수가 48Hz인 수제 우퍼형 스피커를 이용하였는데 1phase, 개선된 1phase 경우에는 우측에 다이폴(dipole) 형태로 하나를 배치하였고 2 phase 경우에는 좌·우측에 두개를 배치하였다. 개선된 1 phase의 경우에는 외부로 방사되는 소음을 차단하기 위하여 배기계 테일 파이프와 제어 스피커 유닛을 원추형의 밀폐계를 이용하여 밀폐하였다. 2 phase 시뮬레이터의 경우에는 Multi filtered-x LMS 알고리즘⁹⁾을 이용하여 제어 실험을 수행하였는데, 사용된 제어 스피커의 갯수가 2개인 반면에 오차 마이크로폰의 갯수는 1개이다. 개선된 1 phase 시뮬레이터의 경우에는 오차 마이크로폰의 위치는 밀폐계의 내부가 아니라 원추형 밀폐계의 출구단에 위치시켰으며 밀폐계 내부의 벽면에서 반사되는 성질을 줄이기 위하여 흡음재를 부착하였다.

4. 능동배기소음 제어 결과 및 고찰

실제의 배기 소음은 주기 소음과 조화 성분으로 구성되어지고 주행 RPM이 정속인 상태로 계속되는 것이 아니라 가속, 감속인 상태가 반복적으로 발생하기 때문에 정현파 변조에 대한 제어 실험을 수행하였다. 입력 주파수가 10초 동안에 50Hz에서 250Hz로 급격하게 상승하는 상태를 가속, 250Hz에서 100Hz로 입력 주파수가 하강하는 상태를 감속이라고 하였다.

4.1 1 phase 제어 결과 및 고찰

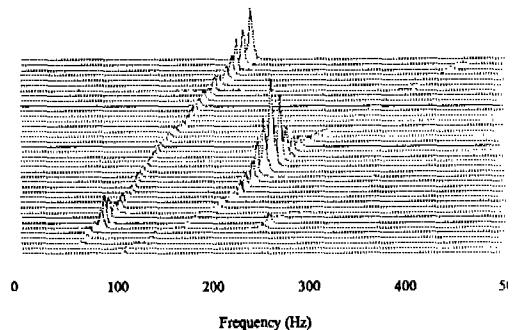
정현파의 주파수 변조 실험에서 사용된 제어 알고리즘은 기본 주파수뿐만 아니라 조화주파수까지도 제어 가능하게 하였다. 모든 이벤트에서 오차 마이크로폰의 음압은 기본 주파수 125Hz와 1차 조화 주파수 250Hz의 음압 레벨이 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있었다. Fig.3, Fig. 5의 시계열에서 제어 알고리즘은 주파수 변조시

에도 빠르게 오차 소음을 저감시킬 수 있음을 알 수 있으며 모든 이벤트에서 제어후 기본 주파수와 1차 조화 주파수가 모두 저감됨을 알 수 있다.

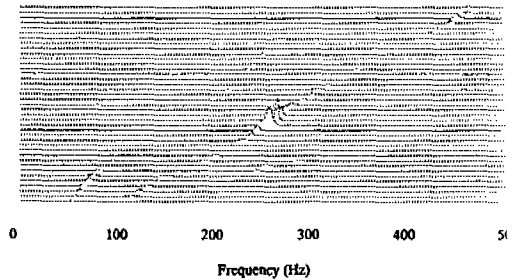
따라서 본 연구에서 개발한 제어 알고리즘은 배기계같이 엔진 RPM 변경에 따라 지배적 소음의 주파수 변동이 심하고 또한 기본 주파수뿐만 아니라 조화 주파수까지 발생하는 시스템에서도 소음 제어 효과가 뛰어남을 알 수 있었다.

4.2 2phase 제어 결과 및 고찰

2 phase 시뮬레이터에서 정현파 소음 변조에 대한 제어 실험의 결과는 1 phase 시뮬레이터와 비슷한 결과를 얻었다. 따라서, 스피커의 파워가 오차 소음을 충분히 제어시킬 수 있다면 사용되는 공간과 제어알고리즘의 단순성 면에서 1 phase 시뮬레이터를 사용하는 유리하다는 것을 알 수 있었다.

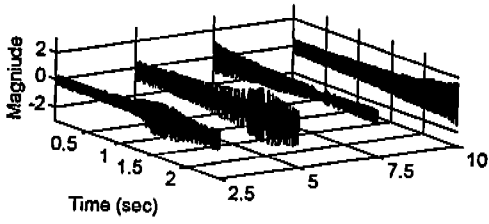


(a) Before control

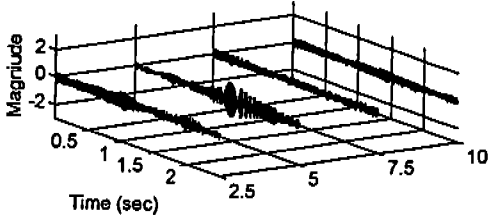


(b) After control

Fig.2 Waterfall plots of active exhaust noise control for acceleration(case of 1 phase)

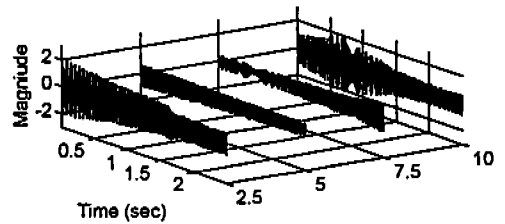


(a) Before control

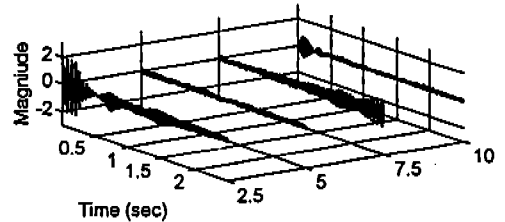


(b) After control

Fig.3 Results of active exhaust noise control for acceleration(case of 1 phase)

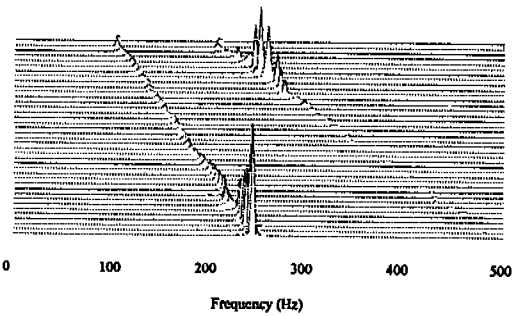


(a) Before control

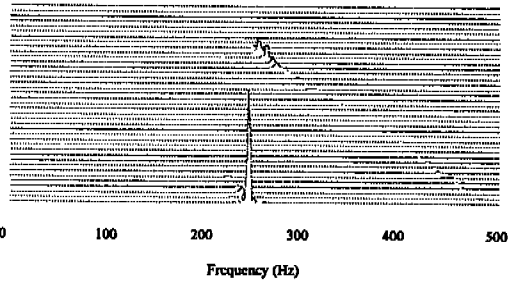


(b) After control

Fig.5 Results of active exhaust noise control for deceleration(case of 1 phase)

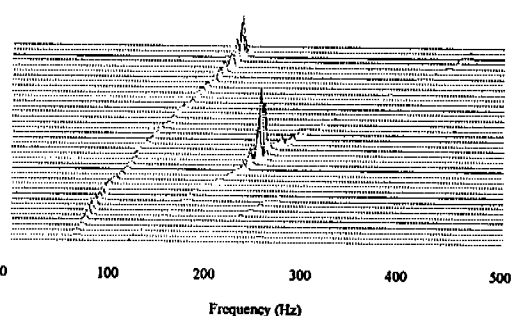


(a) Before control

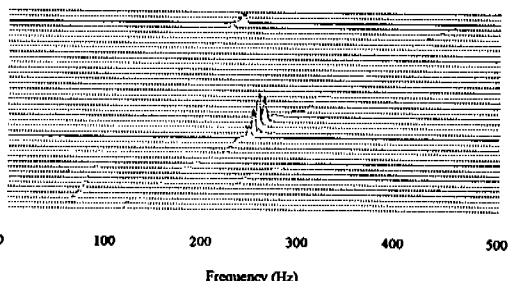


(b) After control

Fig.4 Waterfall plots of active exhaust noise control for deceleration(case of 1 phase)



(a) Before control



(b) After control

Fig.6 Waterfall plots of active exhaust noise control for acceleration(case of 1 phase)

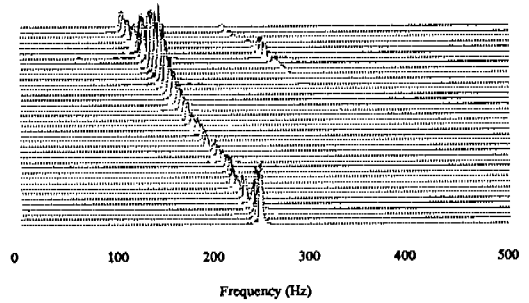
4.3 개선된 1 phase 제어 결과 및 고찰

1, 2 phase 시뮬레이터의 경우 오차 마이크로폰의 위치에서 다이폴 특성을 나타내지 못한 결과로 오차 마이크로폰의 위치를 제외하고는 오히려 음압이 증가하는 결과를 나타내었다. 따라서, 이러한 점을 개선하기 위하여 배기계 테일 파이프와 제어 스피커 유닛을 둘러싸는 밀폐계를 부착한 형태의 개선된 1 phase 시뮬레이터를 동일한 이벤트들에 대해서 제어 실험을 수행하였다.

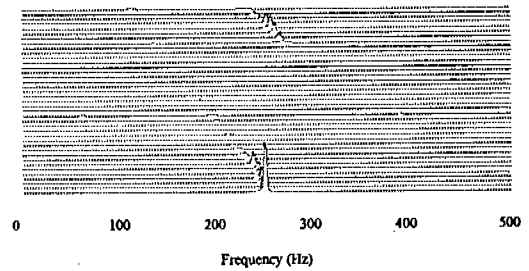
능동배기소음 제어용으로 제작된 1 phase, 2 phase 그리고 개선된 1 phase 시뮬레이터를 이용하여 다양한 소음 환경에서 제어 실험을 수행한 결과 다음과 같은 시뮬레이터의 형상에 대한 제안 사항을 제시할 수 있게 되었다.

첫째는, 제어 스피커의 파워가 방사되는 배기소음을 충분히 제어할 수 있는 파워를 가진다면 제어 알고리즘의 단순성, 안정성과 설치 공간 확보라는 면에서 2 phase 시뮬레이터보다 1 phase 시뮬레이터가 유리하다는 점이다.

둘째는, 1 phase 시뮬레이터에서 테일 파이프에서 방사되는 소음과 제어 스피커가 다이폴 형

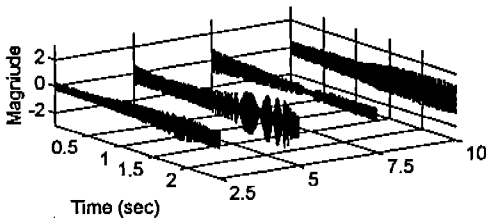


(a) Before control

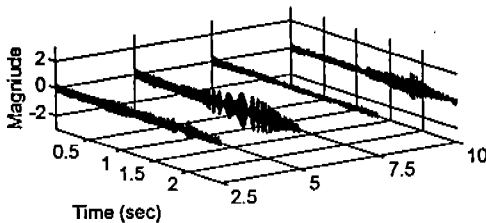


(b) After control

Fig.8 Waterfall plots of active exhaust noise control for deceleration(case of 2 phase)

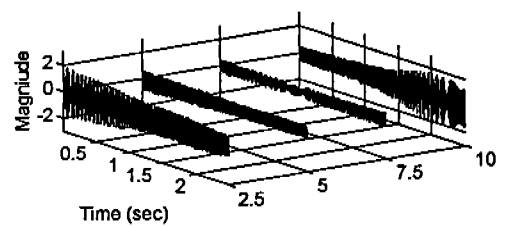


(a) Before control

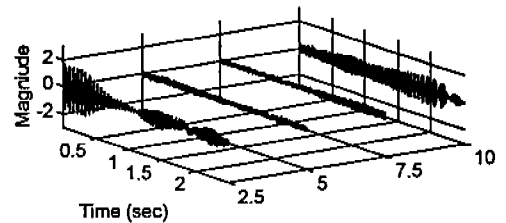


(b) After control

Fig.7 Results of active exhaust noise control for acceleration(case of 2 phase)

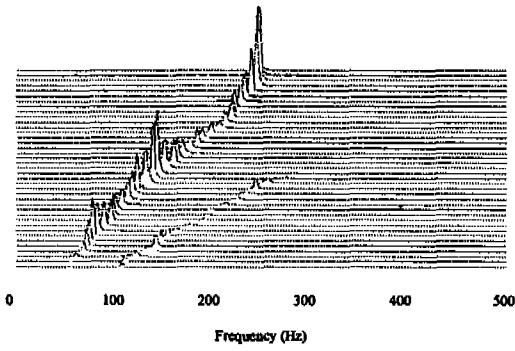


(a) Before control

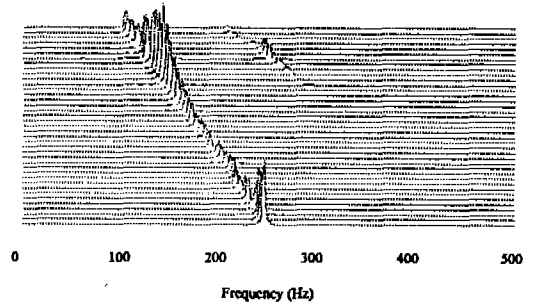


(b) After control

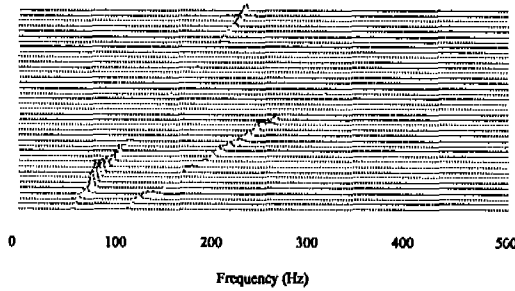
Fig.9 Results of active exhaust noise control for deceleration(case of 2 phase)



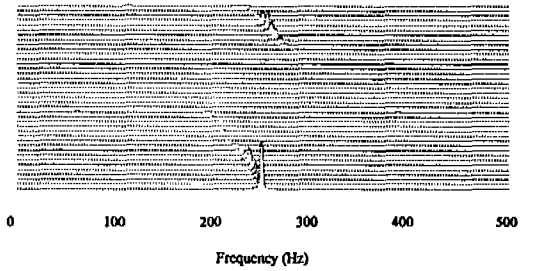
(a) Before control



(a) Before control



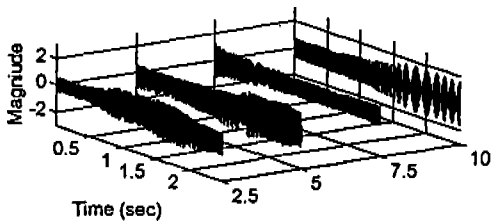
(b) After control



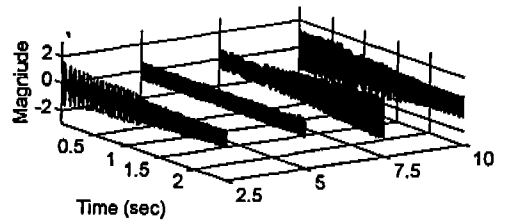
(b) After control

Fig.10 Waterfall plots of active exhaust noise control for acceleration(case of improved 1 phase)

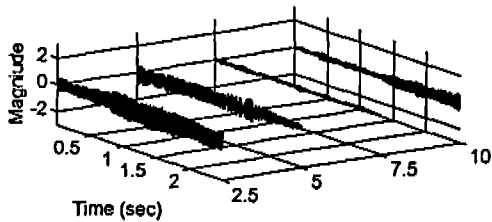
Fig.12 Waterfall plots of active exhaust noise control for deceleration(case of improved 1 phase)



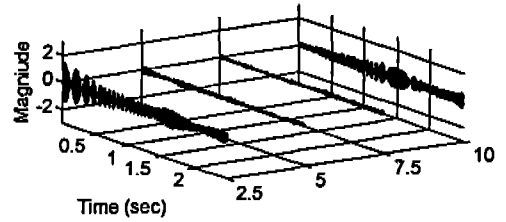
(a) Before control



(a) Before control



(b) After control



(b) After control

Fig.11 Results of active exhaust noise control for acceleration(case of improved 1 phase)

Fig.13 Results of active exhaust noise control for deceleration(case of improved 1 phase)

태의 음원 형태를 제대로 형성하지 못하여 제어 후 오차마이크로폰의 위치를 제외하고는 제어 전 보다 소음 레벨이 증가하는 결과를 나타내었다. 따라서 외부로 방사되는 소음을 줄이기 위해 테일 파이프와 제어 스피커를 둘러싸는 밀폐계를 설치할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서 능동배기소음 제어 알고리즘과 능동형 배기계 시뮬레이터 구성, 실험에 대한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서 개발된 제어 알고리즘이 다양한 소음 환경에서도 빠르고, 견실하게 적용되어 배기 소음을 제어할 수 있음을 알 수 있었다.
- 2) 제어 스피커의 파워가 배기 소음을 충분히 제어할 수 있다면 1 phase 시뮬레이터 형태가 설치 공간 확보, 알고리즘의 단순성, 안정성 면에서 유리하다는 것을 알 수 있었다.
- 3) 외부로 방사되는 배기 소음을 줄이기 위해서는 배기계 테일 파이프와 제어 스피커를 둘러싸는 밀폐계 설치를 필요로 한다. 앞으로의 능동형 배기계의 설계 방향이 개선된 1 phase 시뮬레이터 형태로 설계되어야 하는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 환경부 주관의 선도기술개발과제 (G7 프로젝트) 연구 활동의 일환으로 기아자동차 부설 기아기술센터의 주관아래 이루어진 연구입니다.

참 고 문 헌

1. "Commercial considerations for the implementation of active noise and vibration control", T. H. Hesse, International symposium on active control of sound and vibration, 1991.
2. "Design of active muffler for international combustion engines", Kh. Eghtesadi, J. W. Gardner, Proceedings of Internoise 1989, pp. 471~474, 1989.
3. "Active control of commercial vehicle exhaust noise", M. C. J. Trinder, G. B. B. Chaplin, Proceedings of Internoise 1986, pp. 611~616, 1986.
4. "Development of a prototype active muffler for the detroit diesel 6V-92 TA industrial engine", W. J. J. Hoge, Everett Arnold, SAE 911045
5. "Active control of exhaust noise of diesel engine by wave synthesis method", T. Ohnuma, J. Sugimura, International symposium on active control of sound and vibration, 1991.
6. "Loudspeaker for high temperature environment", Seiji Himori, Haruhisa saito, International symposium on active control of sound and vibration, 1991.
7. 능동배기소음제어용 제어기 개발, 환경부 선도기술개발과제 한양대학교 1차년도 보고서, 1995.
8. Adaptive signal processing, Widrow et al., Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1985.
9. "A multiple error LMS algorithm and its application to the active control of sound and vibration", S. J. Elliott, I. M. Stothers, P. A. Nelson, IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing, Vol. ASSP-35, NO. 10, pp. 1423~1434, 1987