

자동차 소음제어를 위한 능동머플러

남현도\*, 방경욱\*, 서성대\*  
단국대학교 대학원 전기공학과

An Active Muffler for Car Engine Noise Reduction

Hyun-Do Nam\*, Kyung-Uk Bang\*, Sung-Dae Seo\*  
\* Department Of Electrical Engineering, Dankook University

**Abstract** - Noise can make surrounding environments inferior and deteriorates operation efficiency, and it can bring aural damage as well as give a person psychological stress. Therefore, necessity of study about noise control is increased for better labor conditions and agreeable habitat.

In this paper, implementation of active mufflers using active noise control techniques is presented. The LMS algorithm is used for adaptive filter algorithms.

Computer simulations and experiments using TMS320C32 digital signal processor have performed to show the effectiveness of a proposed algorithm.

1. 서 론

소음을 제거하기 위한 종래의 방법으로는 소음이 방출되는 것을 감소시키기 위해서 흡음재, 차음재 혹은 소음기 등을 사용하는 수동적인 방법들이 이용되어 왔는데, 고주파 소음에 대해서는 비교적 좋은 효과를 보이나 저주파 소음에 대해서는 감쇄가 어렵다는 단점이 있다. 저주파 소음은 파장이 길기 때문에 소음을 제거하기 위해 두꺼운 흡음재나 차음재를 사용해야 하므로 설치 장소의 공간적인 제약 및 비용 상승 등의 문제가 있어 흡음재나 차음재를 사용하여 소음을 제거하는 것에는 한계가 있다[1,2].

능동소음제어 방법은 소음원에 의해 발생된 주음원의 음장과 파괴간섭을 일으키는 부가적인 음원을 활용하는 방법으로 비교적 낮은 주파수의 소음 제어에 효과적인 방법이므로, 능동적인 방법과 수동적인 방법은 상호 보완적인 면이 있다.

능동소음제어에 관한 실용화 연구[3]는 미국과 영국 등에서는 1970년대 후반부터 우리나라에서는 1980년대 후반부터 활발히 진행되고 있다. 특히 적응제어 및 디지털 필터의 응용과 제어 시스템의 구현을 가능케 해주는 초고속 이산신호처리기(Digital Signal Processor, DSP) 기술의 발달로 자동차와 비행기의 내부에서와 같이 3차원 음향공간에서의 능동소음제어 문제와 소음 신호파의 특성 및 온도, 습도 등 주변환경이 변할 때도 잘 적용하는 1차원 및 3차원 음향 공간에서의 적응 능동소음제어 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[4~6].

본 논문에서는 자동차의 배기관 소음을 능동제어 기법을 이용하여 제어하였다.

2. 적응필터 알고리즘

LMS (Least Mean Squares) 알고리즘은 최대경사법의 일종으로 매 스텝마다 기울기 벡터를 순시자승오차를 이용하여 추정하며 이를 정리하면 다음 식과 같이 된다.

$$W(n+1) = W(n) - \mu R^{-1} \hat{v}(n) \tag{1}$$

여기에서 R은 입력상관(correlation) 벡터이며, W(n)으로부터 W(n+1)로의 이동 기울기 벡터의 추정치의 마

이니스 방향으로 이루어지므로 적응필터의 계수 벡터는 performance surface의 최대경사 경로를 따라 갱신된다. 입력의 power를  $\sigma^2$ 라 두면 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W(n+1) = W(n) - \frac{\mu}{(P+1)\sigma^2} \hat{v}(n) \tag{2}$$

여기서  $0 < \mu < 1$  이며 P는 필터의 차수이다.

$E[e^2(n)]$  대신에 순시자승오차  $e^2(n)$ 를 이용하면  $\hat{v}(n)$ 를 간편하게 추정할 수 있다.

$$\hat{v}(n) = \frac{\partial e^2(n)}{\partial W(n)} = -2e(n)X(n) \tag{3}$$

식 (3)에 평균을 취하면  $E[\hat{v}(n)] = v$ 이 되어 unbiased gradient임을 보일 수 있다. 식(3)을 식(2)에 대입하면

$$W(n+1) = W(n) + \frac{2\mu}{(P+1)\sigma^2} e(n)X(n), 0 < \mu < 1 \tag{4}$$

이 되며 이를 NLMS (Normalized LMS) 알고리즘이라 하며 다음 식과 같이 쓸 수도 있다.

$$W(n+1) = W(n) + \frac{\mu}{1X(n)} e(n)X(n) \tag{5}$$

3. 자동차 엔진 소음 분석

능동 머플러의 성능을 테스트하기 위하여 실험용 자동차와 엔진의 소음을 측정하기 위한 측정장비를 준비하였다. 실험차종과 제원은 표 1과 같다.

표 1. 실험용 자동차의 제원

항 목	제 원
차 명	라노스1.5 SOHC
배기량	1498cc
기통수	4기통
연료의 종류	가솔린

정확한 엔진 소음을 잡기 위하여 한정한 장소를 선정하였으며, 소음 신호는 모노마이크를 이용하여 엔진 표면에 장착하고 소음원의 정확한 측정을 하기 위하여 2회 반복 측정을 하였다.

그림 1과 2는 엔진의 회전속도가 3000, 4500rpm일때의 소음을 마이크로폰을 이용하여 측정해 FFT 취한 결과이다.

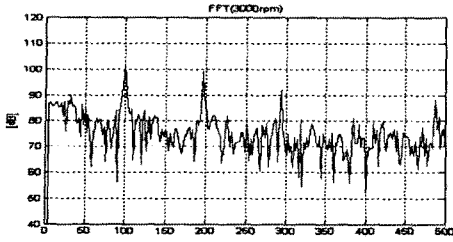


그림 1. 3000rpm일 때의 엔진 소음의 스펙트럼

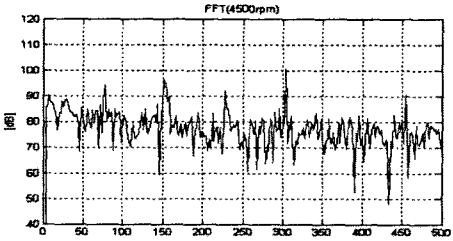


그림 2. 4500rpm일 때의 엔진 소음의 스펙트럼

#### 4. 자동차 배기관관의 수학적 모델링

본 논문에서는 소리의 속도는 시변변이라 가정하고 머플러의 능동소음제어를 위해 모델링을 하였다.

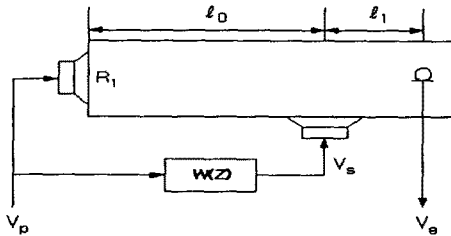


그림 3. 머플러의 능동소음제어 시스템의 구조

일반적인 머플러의 능동소음제어 시스템은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.  $R_1$ 은 머플러의 상단 반사 계수(reflection coefficient)이며,  $V_p$ 와  $V_s$ 는 소음원 및 제어 스피커를 구동하기 위한 전기적인 입력 신호이고,  $V_e$ 는 검출 및 오차 센서에서 측정되는 전기적인 출력 신호이다.

이를 블록 선도로 나타내면 그림 4와 같다.

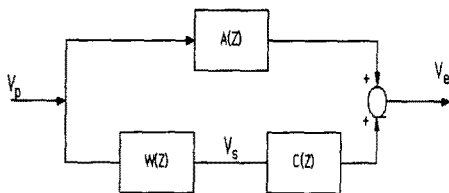


그림 4. 중첩 모델에 의한 머플러 시스템의 블록선도

1차 경로 전달 함수  $A(z)$ 는 소음원만을 동작시킨 경우

오차 및 검출 센서에 측정되는 신호의 비로 정의되며 오차 경로(2차 경로) 전달 함수  $C(z)$ 는 제어 음원만을 동작시켰을 때 오차 센서의 출력 신호이다.

전기적 전달 함수는 다른 입력 전압이 0으로 설정되었다는 조건하에서 입력과 출력사이에서 정의된다.

$$A = \left[ \frac{V_e}{V_p} \right]_{V_s=0} \quad (6)$$

$$C = \left[ \frac{V_e}{V_s} \right]_{V_p=0} \quad (7)$$

제어기 전달 함수의 유도는 중첩의 원리와 시스템의 모든 요소가 선형적이라는 가정에 달려있다. 이것이 사실이라면 일반적인 한 개의 출력 전압은 다음과 같이 될 것이다.

$$V_e = AV_p + CV_s \quad (8)$$

머플러에 대한 전기 음향 시스템에서 음원 및 센서를 무지향 트랜스듀서라고 가정하면 각각의 머플러 경로에 대한 전달 함수  $A$ ,  $C$ 의 계산이 가능하며, 이것을 이용하여 이상적인 제어기의 모델을 얻을 수 있다. 여기서  $k$ 는 복소 전파계수이며, 트랜스듀서의 전달 함수  $H$  및 지향 지수  $D$ 는 복소 주파수 함수로 표현된다.

지향 지수는 소음의 진행 방향에 대한 반대 방향의 감도비를 표시하며 무지향성(omnidirectional)인 경우는 1이 되고, 지향성(unidirectional)인 경우에는 0이 됨을 뜻하며 아래 첨자  $e$ 는 각각 검출 및 오차 센서의 전달함수 및 지향 지수를 나타내고, 아래 첨자  $p$ 와  $s$ 는 소음원과 제어 스피커의 전달함수 및 지향 지수를 의미한다. 전기 중첩 모델과 정상 상태 진행과 이론을 그림 3에 적용하면 다음과 같이 각 배기관 경로에 대한 전기 음향 전달 함수를 유도할 수 있다.

$$A = H_e H_p e^{-k(l_0 + l_1)} \quad (9)$$

$$C = H_e H_s e^{-k l_1} \times (1 + D_s R_1 e^{-2k l_0}) \quad (10)$$

여기서  $H_p$ ,  $H_s$ ,  $H_e$ 는 소음원, 제어음원, 오차 마이크폰 각각의 트랜스듀서 전달함수이며,  $D_s$ 는 제어음원의 지향지수이다.

#### 5. 실험 및 검토

하드웨어는 크게 DSP, 마이크폰 증폭기, LPF(Low Pass Filter), 신호 증폭기, 스피커 증폭기 등으로 구성된다. 능동 소음제어는 실시간 처리를 요하므로 고속의 연산이 가능한 DSP를 사용하였다.

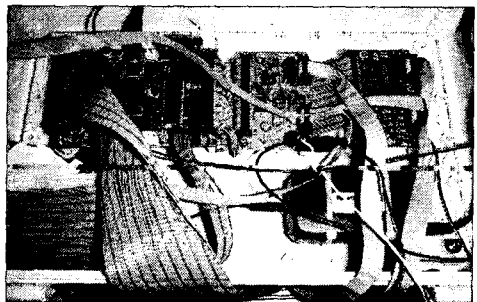


그림 5. DSP보드(TMS320VC33)

그림 5는 실험에 사용된 TMS320VC33 DSP 보드이다. TMS320VC33은 TMS320C31과 비슷한 구조를 가지며, 내부 SRAM 용량이 확대되었고, 더욱 고속 처리가 가능하다. 120MHz 또는 150MHz 클럭으로 동작하여 내부에서 2분주 클럭(H1, H3)으로 1명령 처리가 가능하므로 60MIPS(17nsec) 또는 75MIPS(13nsec)의 처리 능력을 가지므로 능동 소음제어가 가능하다[7].

그림 6은 실험에 사용된 모형 머플러이다. 총 길이는 약 240cm이고, 폭은 약21cm, 높이가 약17cm이다. 소음원에서 제어 스피커까지의 거리는 약190cm이고, 제어 스피커에서 오차 마이크로폰까지는 약20cm이다.

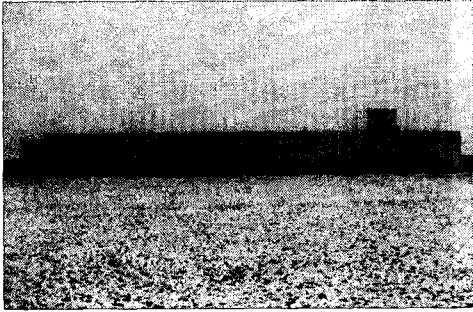


그림 6. 모형 머플러

실험에 사용된 소음은 실제 자동차의 3000rpm과 4500rpm일 때의 머플러의 소음을 측정하여 사용하였다.

3000rpm일 때 그림 7의 소음 제어 전과 그림 8의 제어 후 결과를 보면, 최고 30dB와 평균 15dB 정도의 소음 감쇄 효과를 얻었다. 역시 4500rpm일 때의 그림 9와 그림 10을 살펴보면 최고 20dB와 평균 7dB 정도의 소음 감쇄 효과를 얻었다.

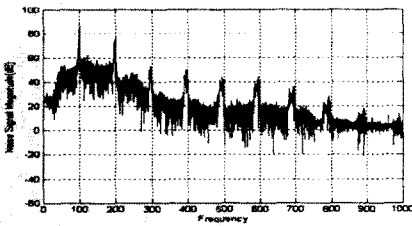


그림 7. 소음 제어전의 파워 스펙트럼(3000rpm)

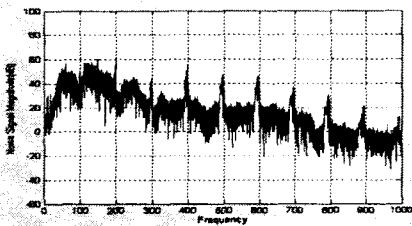


그림 8. 소음 제어후의 파워 스펙트럼(3000rpm)

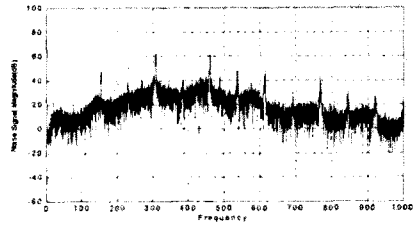


그림 9. 소음 제어전의 파워 스펙트럼(4500rpm)

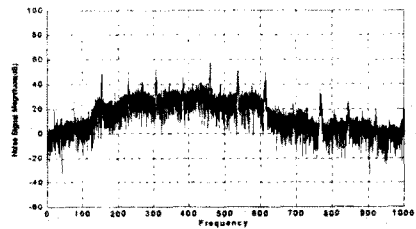


그림 10. 소음 제어후의 파워 스펙트럼(4500rpm)

## 6. 결 론

능동소음제어 기법은 음파의 중첩의 원리를 이용하여 소음 신호에 의해 발생된 주음원과 위상이 반대이고 진폭이 같은 음향 신호를 제어 음원으로부터 발생시킴으로써 소음을 감쇄시키는 방법으로 비교적 저주파 소음제어 경우에 효과적인 방법이다.

본 논문에서는 능동소음제어 기법을 이용하여 자동차 배기관의 능동 머플러를 구현하였다. 모형 머플러를 이용하여 3000rpm 과 4500rpm에서의 실험을 통해서 각각 30dB와 20dB 정도의 최고 감쇄값을 얻을 수 있었으며, 또한 각각의 평균 감쇄 값으로 15dB와 7dB 정도의 감쇄 효과를 얻을 수 있었다.

적용 알고리즘을 개선하고 마이크로폰과 스피커의 배치를 개선하면 보다 나은 소음 감쇄 효과를 보일 것으로 기대된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] S.J. Elliott and P.A. Nelson, "Active Noise Control," IEEE Signal Processing Magazine, pp. 12-35, 1993.
- [2] R.R. Leitch and M.O. Tokhi, "Active Noise Control System," IEE Proc., Vol.134, Pt.A, No.6, pp.525-546, 1987.
- [3] S.J. Elliott, P.A. Nelson, I.M. Stothers and C.C. Boucher, "Preliminary Results of In-Flight Experiments on The Active Control of Propeller-Induced Cabin Noise," J. of Sound and Vibration, Vol. 128, pp.355-357, 1989.
- [4] S.M. Kuo and D.R. Morgan, Active Noise Control Systems, New York : John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [5] J.N. Denenberg, "Anti-Noise ; Quietening The Environment With Active Noise Cancellation Technology," IEEE Potentials, Vol. 11, No. 2, pp. 36-40, 1992.
- [6] B. Widrow and S.D. Stearns, Adaptive Signal Processing, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.
- [7] Texas Instruments, TMS320VC33 Programmer's Guide, 2000.