

순환 LMS 알고리즘을 이용한 자동차 능동소음기 구현

방경욱*, 서성대*, 남현도*
단국대학교 대학원 전기공학과

Implementation of active mufflers for automobiles using recursive LMS algorithms

Kyung-Uk Bang*, Sung-Dae Seo*, Hyun-Do Nam*

* Department Of Electrical Engineering, Dankook University

Abstract - According as quality of life improves, pursuit of agreeable life became realistic problem. Specially, noise had been appraised to element that influence in human life directly and indirectly Therefore, necessity of study about noise control is increased for better labor conditions and agreeable habitat.

In this paper, implementation of active mufflers using recursive LMS algorithms is presented. Analyze exhaust pipe noise of a gasoline and Diesel car and use adaptation IIR filter algorithm that stability is solidified and controled exhaust pipe noise of a car.

computer simulation is performed to show the effectiveness of a proposed algorithm.

달시 발생하는 각각의 경로를 감안하여 그 경로를 1차 경로 $P(z)$, 2차 경로 $S(z)$ 라 한다.

$x(n)$ 과 $y(n)$ 을 입력과 출력으로 하는 전달함수 $H(z)$ 은

$$H(z) = \frac{A(z)}{1 - B(z)} \tag{1}$$

이 되며, 실제 시스템의 출력값은 아래와 같이 나타낼수 있다.

$$y'(n) = s(n) * y(n) = s(n) * [W^T(n)U(n)] \tag{2}$$

여기서 *는 컨볼루션 연산자이다.

$$W(n) \equiv \begin{bmatrix} A(n) \\ B(n) \end{bmatrix}, U(n) = \begin{bmatrix} X(n) \\ Y(n-1) \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$X(n) = [x(n) \ x(n-1) \ x(n-2) \ \dots \ x(n-L+1)] \tag{4}$$

$$Y(n-1) \equiv [y(n-1) \ y(n-2) \ \dots \ y(n-M)]^T \tag{5}$$

를 의미한다. 따라서 시스템의 출력값 $y'(n)$ 은 $A(n)$ $B(n)$ 의 함수라고 할 수 있다.

또, 최소경사법을 이용하여 계수들의 업데이트 식을 구하면

$$W(n+1) = W(n) + \mu U(n)e(n) \tag{6}$$

라고 쓸 수 있다.

또한 위식은 다시 $A(n)$ 과 $B(n)$ 각각의 업데이트 식으로 나누어 쓸 수 있다.

$$A(n+1) = A(n) + \mu_a X(n)e(n) \tag{7}$$

$$B(n+1) = B(n) + \mu_b Y(n-1)e(n) \tag{8}$$

위의 식(7)과 식(8)를 이용하면 μ_a 와 μ_b 의 값을 각기 달리 줌으로써 각 항을 각각 따로 제어할 수 있다.

3. 안정한 IIR LMS 알고리즘을 위한 전처리

IIR LMS는 앞에서 전개한 것과같이 항상 극점이 존재하므로 안정성에 제한이 있다. 일반적으로 적응신호처리 시스템에서 필터계수가 완전히 수렴하기 전에 큰 오차가 발생한다. 이 경우 수렴계수의 크기에 따라서 극점이 크게 변동한다. 따라서 소음제어 초기에 극점이 z평

1. 서 론

능동소음제어의 개념은 1936년 미국의 Paul Lueq가 능동소음제어 기술에 대한 특허를 출원한 것이 시초이며 1950년대 초 Olson 이 효과적인 음향감쇄 기법인 Helmholtz 공명기에 의한 능동적인 음향제어방법을 소개하였으나 크게 주목을 받지 못했다.[1] 그 이후 능동소음제어는 반도체 기술의 비약적 발전과 환경에 대한 관심의 고조로 연구가 활발하게 이루어지고 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 신호와 특성 및 온도, 습도 등 주변환경이 변할 때도 잘 적용하는 1차원 및 3차원 음향 공간에서의 적응 능동소음제어 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[2-4].

본 논문에서는 가솔린과 디젤 자동차의 배기관 소음을 분석하고 시스템의 작동 초기에 IIR 필터의 극점을 원점 방향으로 끌어당긴 안정도가 강화된 적응 IIR 필터 알고리즘을 사용하여 자동차의 배기관 소음을 제어하였다.

2. 안정한 적응 IIR 필터를 이용한 제어 알고리즘

능동소음제어를 위한 IIR LMS 알고리즘은 1985년 Eriksson에 의해 제안 되었다. IIR LMS 알고리즘을 위한 간단한 블록 다이어그램은 그림1과 같이 나타낼수 있다[2].

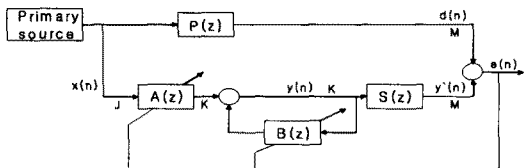


그림 1. IIR LMS 알고리즘 블록 다이어그램

여기서 K는 제어 스피커 수이다. $x(n)$ 과 $y(n)$ 은 각각 기준 입력값과 제어필터의 출력값이고, $d(n)$ 과 $e(n)$ 은 각각 제어할 하지않을때의 소음신호와 제어시의 오차값을 의미한다. 입력과 출력이 여러 마이크로폰에 도

면의 단위 원 밖으로 빠져 나가서 발산하는 경우가 많으므로 초기에 필터 계수의 분모항의 업데이트 식에서 극점의 위치를 단위 원쪽으로 조금 옮겨 주는 전처리 과정을 거침으로써 좀 더 안정된 IIR LMS를 적용할 수 있다.[5] 이를 위해 IIR 적응필터의 전달함수중 분모 즉 $1 - B(z)$ 대신에 다음식을 도입한다.

$$F(z) = 1 + kb_1(n)z^{-1} + k^2b_2(n)z^{-2} + \dots + k^M b_M(n)z^{-M} \quad (9)$$

$, 0 \leq k \leq 1$

IIR LMS의 분모항 $1 - B(z)$ 의 근을 z_1 이라 한다면

$$1 - B(z_1) = 1 + b_1(n)z_1^{-1} + b_2(n)z_1^{-2} + \dots + b_M(n)z_1^{-M} = 0 \quad (10)$$

을 만족시키는 $F(z)$ 의 근은 kz_1 이 된다. 즉,

$$F(kz_1) = 1 + kb_1(n)(kz_1)^{-1} + k^2b_2(n)(kz_1)^{-2} + \dots + k^M b_M(n)(kz_1)^{-M} = 0 \quad (11)$$

이 된다.

따라서 $1 - B(z)$ 을 전처리함으로써 극점을 k 배 만큼 원점 방향으로 조정이 가능하다. 능동 소음제어 시에는 초기에 오차가 커서 극점이 크게 변동될 때에는 k 를 0에 가까운 값으로 정해 원점으로 당겨주며, 정상상태 시에는 k 를 1로 하여 원래의 극점값을 주어야 한다. 즉,

$$k(n+1) = \lambda k(n) + (1 - \lambda), k(0) = 0, 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (12)$$

따라서, k 값을 위와 같이 가변 시켜 가면서 IIR 필터의 분모항 $1 - B(z)$ 의 업데이트 식을 전처리하여 안정된 소음제어가 가능하다.

4. 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	아반떼 XD 1.5	카니발Ⅱ 2.9
배기량	1,493cc	2,902cc
기통수	4기통	4기통
연료의 종류	가솔린	디젤

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

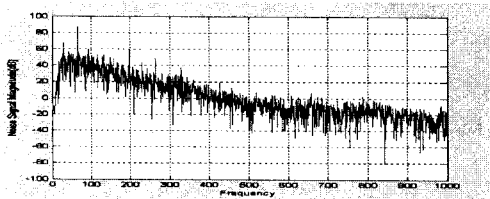


그림 2. 2000rpm일 때의 가솔린 엔진 소음의 스펙트럼

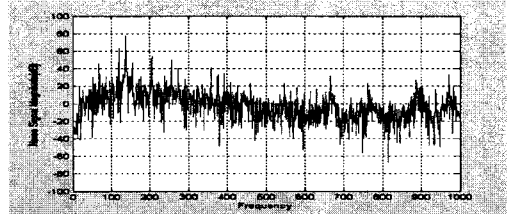


그림 3. 2000rpm일 때의 디젤 엔진 소음의 스펙트럼

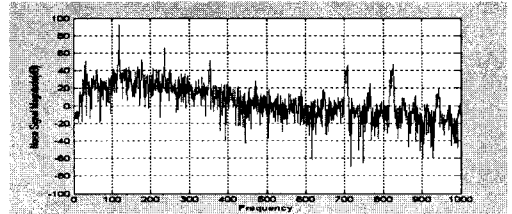


그림 4. 3500rpm일 때의 가솔린 엔진 소음의 스펙트럼

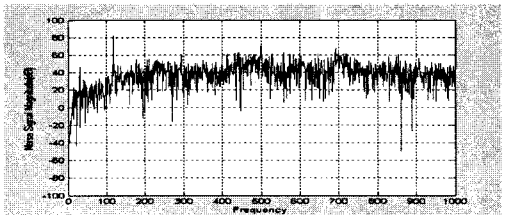


그림 5. 3500rpm일 때의 디젤 엔진 소음의 스펙트럼

그림 2와 3은 엔진의 회전속도가 2000rpm, 그림 4와 5는 3500rpm일때의 소음을 마이크로폰을 이용하여 측정하여 6000Hz로 샘플링 한 자동차 배기관 소음의 파워스펙트럼이다. 2000rpm 가솔린 엔진의 소음은 68 Hz 및 그의 정수 배 주파수인 136Hz, 204Hz등의 성분의 소음이 주를 이루고, 3500rpm 가솔린 엔진의 소음과 2000rpm, 3500rpm 디젤 엔진의 소음은 116 Hz 및 그의 정수 배 성분인 232Hz, 348Hz성분의 소음이 주를 이루는 것은 알 수 있었다.

5. 자동차 배기관의 수학적 모델링

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

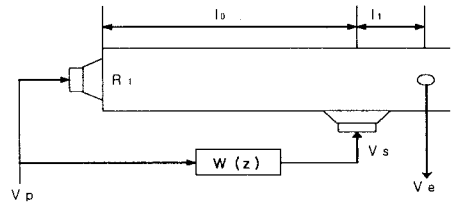


그림 6. 머플러의 능동소음제어 시스템의 구조

일반적인 머플러의 능동소음제어 시스템은 그림 6과 같이 나타날 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 7과 같다.

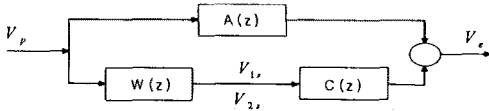


그림 7. 중첩 모델에 의한 머플러 시스템의 블록선도

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.

$$A = \left[\frac{V_e}{V_p} \right]_{V_{1s}=0, V_{2s}=0} \quad (13)$$

$$C = \left[\frac{V_e}{V_{1s}} \right]_{V_p=0} = \left[\frac{V_e}{V_{2s}} \right]_{V_p=0} \quad (14)$$

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

$$V_e = AV_p + C[V_{1s} + V_{2s}] \quad (15)$$

또한, 전기 중첩 모델과 정상 상태 진행과 이론을 그림 6에 적용하면 다음과 같이 각 배기관 경로에 대한 전기 음향 전달 함수를 유도할 수 있다.

$$A = H_o H_p e^{-k(l_o + l_p)} \quad (16)$$

$$C = H_e H_s e^{-k l_s} \times (1 + D_s R_1 e^{-2k l_s}) \quad (17)$$

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

6. 컴퓨터 시뮬레이션

안정된 IIR LMS 알고리즘을 실제 자동차 배기관의 소음을 이용하여 컴퓨터상에서 시뮬레이션을 수행하였다.

IIR 필터 모델은 $A(z)$ 의 차수를 4차, $B(z)$ 의 차수를 4차로 하였다. 또한 μ_a 와 μ_b 값을 고정값으로 주면 오차의 수렴 특성이 기준 입력 신호 $x(n)$ 의 파워에 따라 크게 변하므로 μ_a 와 μ_b 를 각각 $x(n)$ 과 $y(n)$ 의 파워, x_p 와 y_p 로 normalization하여 LMS 알고리즘에 적용시켰다. 즉,

$$\mu_a = \frac{\mu}{1 + x_p} \quad (18)$$

$$\mu_b = \frac{\mu}{1 + y_p} \quad (19)$$

$$\text{여기서 } x_p = (1 - \gamma)x_p + \gamma x(n)^2, \quad 0 < \gamma < 1 \quad (20)$$

$$y_p = (1 - \gamma)y_p + \gamma y(n)^2, \quad 0 < \gamma < 1 \quad (21)$$

을 이용하여 각각의 파워값을 추정하였다.

시뮬레이션은 가솔린 자동차와 디젤 자동차의 3500 rpm 일 때의 머플러의 소음을 측정하여 사용하였다. 그림 8과 그림 9에서 가솔린 자동차의 경우 최고 35 [dB]와 평균 15 [dB]의 소음 감쇄 효과를 얻었다. 또, 디젤 자동차일 때의 그림 10과 그림 11을 살펴보면 최고 35 [dB]와 평균 25 [dB]정도의 소음 감쇄 효과를 얻었다.

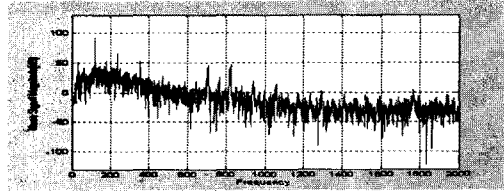


그림 8. 소음 제어전의 소음 스펙트럼(가솔린, 3500rpm)

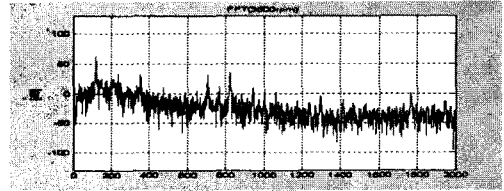


그림 9. 소음 제어후의 소음 스펙트럼(가솔린, 3500rpm)

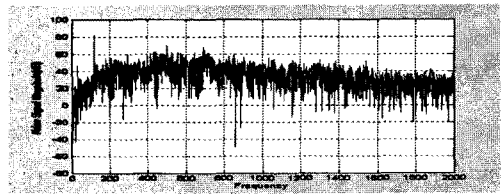


그림 10. 소음 제어전의 소음 스펙트럼(디젤, 3500rpm)

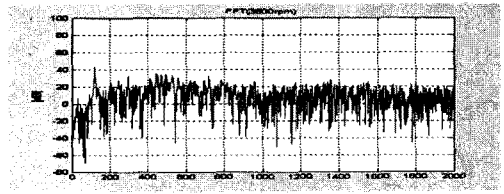


그림 11. 소음 제어후의 소음 스펙트럼(디젤, 3500rpm)

7. 결 론

본 논문에서는 순환 LMS 알고리즘을 이용하여 자동차 배기관의 능동 소음기를 구현하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 가솔린과 디젤 엔진의 3500 rpm에서 35 [dB]정도의 최고 감쇄 값을 얻을 수 있었으며 평균 감쇄 값으로 각각 15 [dB], 25 [dB] 정도의 감쇄 효과를 얻을 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Olson H.F. and May E. G., "electronic sound absorber", J. acoust. soc. am., Vol. 25, pp. 1130-1136, 1953.
- [2] S.M. Kuo and D. Morgan, "Active Noise Control System," John Wiley and Sons, Inc, New York, 1996.
- [3] J.N. Denenberg, "Anti-Noise: Quietening The Environment With Active Noise Cancellation Technology," IEEE Potentials, Vol. 11, No. 2, pp. 36-40, 1992.
- [4] B. Widrow and S.D. Stearns, Adaptive Signal Processing, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.
- [5] B. Friedlander, "A modified prefilter for some recursive parameter estimation algorithms," IEEE Transactions on Automatic Control, vol.27, pp.232-235, 1982.