

자동차 실내에서의 엔진 소음 감쇠를 위한 실시간 능동 소음 제어 시스템의 구현

The Implementation of the Real-Time Active Noise Control System for Attenuating the Engine Noise in a Car

권 오 상*, 차 일 환*
(Oh-Sang Kwon*, Il-Whan Cha*)

요 약

지금까지 널리 사용된 수동 소음 제어 방법은 소리에 대한 재질 상의 특성을 이용하여 소음을 제거하는 방법으로서 무게와 부피를 증가시키고 소음의 고주파 성분에 대해서만 효율적인 성능을 발휘하는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 최근에 발전된 능동 소음 제어 방법은 무게와 부피를 감소시키고 저주파 소음에 대한 성능이 우수하다는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 능동 소음 제어의 원리를 디지털 신호 처리 기술을 이용하여 자동차 실내에서의 엔진 부밍 소음(Engine Booming Noise)을 감쇠시키는 실시간 능동 소음 제어 시스템을 구현하였다. 능동 제어를 위한 적응 알고리즘으로는 다채널 Filtered-x LMS 알고리즘을 사용하였으며 이를 위해 Motorola사의 디지털 신호처리 프로세서인 DSP56001을 제어기로 사용하여 적응 알고리즘을 실시간으로 구현하였다.

능동 소음 제어 시스템을 실제로 자동차에 장착하여 RPM에 따른 엔진 소음의 감쇠 성능을 평가한 결과 자동차 실내의 모든 위치에서 소음 감쇠 효과를 얻었으며 특정 주파수에서 20 dB 이상의 소음 감쇠 성능과 전체적으로 15 dB 이상의 소음 감쇠 성능을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

The passive noise control techniques used until now cancel the noise in terms of the characteristics of materials, which increase the mass and the dimension and have a limit that is effective only to attenuate the high frequency components of the noise. But the active noise control techniques developed in recent years have merits that they decrease the mass, and the dimension and are effective to attenuating the low frequency noises.

In this paper, the real-time active noise control system attenuating the engine booming noise in a car using the digital signal processing(DSP) techniques in terms of the principle of active noise control. The multiple-error filtered-x LMS(Least-Mean Square) algorithm is used as the adaptive algorithm for active noise control and is implemented using the DSP processor Motorola DSP56001 as a controller.

According to the result that the experiments are performed for the engine noise as the RPM changes in a car, the noise attenuating performances are achieved in an overall car interior and is verified to be 20 dB higher for pure-tone and globally, 15 dB.

I. 서 론

능동 소음 제어는 소음과 동일한 진폭과 역위상을 갖는 인공음을 발생하여 원래의 소음과 중첩시킴으로써 소음의 음압 레벨을 저하시키는 기술로서 1930년대에 처음으로 능동 소음 제어의 원리가 출현한 후 1960년대 초에 비로소 연구 개발이 활발히 진행되어 온 분야이다¹⁾.

일반적으로 소음을 제거하는 방법 중에서 흡음재나 방음재를 사용하여 소음을 제거하는 수동적인 소음 제어 방법이 지금까지 널리 사용되어 왔으나 이 방법은 사용되는 재료의 특질상 무게와 부피를 증가시키고 고주파수 영역에서만 효율적인 단점을 가지고 있다.

이에 반해 능동적인 소음 제어 방법은 흡음재나 방음재와 같은 것을 사용하지 않고 적은 무게와 작은 부피를 가지고 소음의 특성에 대하여 능동 소음 제어의 원리를 이용하여 소음을 저감시키므로 효율적이며 특히 수동적인 소음 제어 방법의 단점으로 지적되고 있는 저주파수

*연세대학교 전자공학과
접수일자: 1996년 10월 7일

점역에서의 성능이 우수하다.

또한, 능동 소음 제어는 다양한 영역의 소음 제어에 적용할 수 있는데 공조기¹⁾, 항공기²⁾, 자동차^{3,4)} 등의 소음 제어, 가전 제품(냉장고, 세탁기, 에어컨 등)의 정음화, 개공간(Open Space)과 폐공간(Closed Space)의 정음화⁵⁾ 및 구조물의 정음화에 이르기까지 능동 제어의 구조와 형태를 변화시키지 않고 다양하게 이용될 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 능동 소음 제어 기술을 자동차의 여러 가지 소음 중에서 엔진 소음에 관심을 두고 실시간 능동 소음 제어 시스템을 구현하였다. 자동차에 대한 능동 소음 제어는 과거와는 달리 자동차의 정음화와 경량화를 요구하는 경향이 커짐에 따라 커다란 관심을 모으고 있는 분야로서 자동차의 연비 문제가 비로소 자동차 문제로 대두되어 차량 중량의 경량화가 피할 수 없는 과제로 된 이후에 관심을 모으고 있는 분야이다.

현재와 앞으로의 자동차 개발의 주요 관심은 적은 실린더로 더 작고 더 높은 출력 엔진을 사용한 차체 중량의 감소와 엔진 효율의 향상에 있지만 이러한 경향의 결과로서 소음과 진동 문제의 대두를 들 수 있다. 우선적으로 자동차의 중량을 감소시키기 위해서는 흡음재나 방음재 등의 사용을 제한하는 것이 효율적인데 이는 소음과 진동의 증가를 유발하므로 능동적인 소음 제어 방법으로서 이러한 난점을 해결할 수 있다.

자동차에 대한 능동 소음 제어의 실용화 배경으로서는 3차원 공간의 적응 제어 이론의 확립과 디지털 신호 처리 기술에 있어서의 성능 향상과 저가격화를 들 수 있다. 자동차의 실내 소음 주파수 대역이 20-200 Hz이고 소음의 통계적인 특성이 시변인 경우에도 적응 디지털 필터를 이용하여 최적의 소음 제어 성능을 얻을 수 있다는 사실도 자동차 소음 제어의 연구 및 개발에 중요한 요인이 된다.

본 논문에서는 자동차 실내의 엔진 소음을 감소시키는 능동 소음 제어 시스템을 범용 신호처리 프로세서를 사용하여 구현하였으며 이에 대한 성능 평가를 수행하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다.

II 장에서는 적응 능동 소음 제어에 대한 전반적인 서술로서 그 원리와 특징 등을 설명하였으며 III 장에서는 능동 소음 제어 시스템의 실시간 구현을 위해 구성한 시스템의 하드웨어 구조와 특징 및 기능을 설명하였으며 시스템을 구동시키는 알고리즘 및 운영 흐름에 대해서도 서술하였다. IV 장에서는 자동차에 대한 능동 제어 시스템을 여러 가지의 실험 환경 하에서 실시간으로 구동하여 그 결과들에 대해서 분석 및 평가를 한 후에 V 장의 결론으로 끝을 맺었다.

II. 적응 능동 소음 제어

능동 소음 제어의 원리는 그림 1과 같이 소음과 동일한 진폭과 역위상을 갖는 인공음을 발생하여 원래의 소음과

중첩시킴으로써 소음의 음압 레벨을 저하시키는 기술로서 인공음을 발생시키는 제어기의 특성이 적응성을 가지고 있으므로 적응 능동 소음 제어라 할 수 있다⁶⁾.

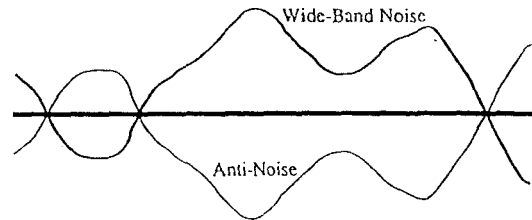


그림 1. 능동 소음 제어의 원리
Fig 1. The principle of active noise control

적응 능동 소음 제어 시스템의 구조는 그림 2와 같이 가속도계 또는 마이크로폰이 사용되는 참조 센서, 소음 제어 정도를 나타내게 하는 오차 마이크로폰이 있으며 참조 신호를 바탕으로 오차 마이크로폰에 의해 감지되는 소음에 대해 동일 크기와 180° 위상차를 가지는 신호를 생성하는 적응 디지털 필터와 이 필터의 출력을 증폭하여 음향 신호로 출력하는 스피커로 구성되어 있다⁶⁾.

그림 3은 그림 2의 능동 소음 제어 시스템의 구조를 블록도로서 나타낸 것이다. 그림에서 P는 기준 경로(Primary Path)를 모델링한 것으로서 소음원과 발생한 소음이 통과하게 되는 음장 및 오차 마이크로폰을 나타낸 것이며 W는 적응 필터를 모델링한 것이다. 또한, C는 2차 경로 즉, 증폭기와 스피커 및 오차 마이크로폰, 그리고 스피커에서 오차 마이크로폰 사이의 음장을 모델링한 것이다.

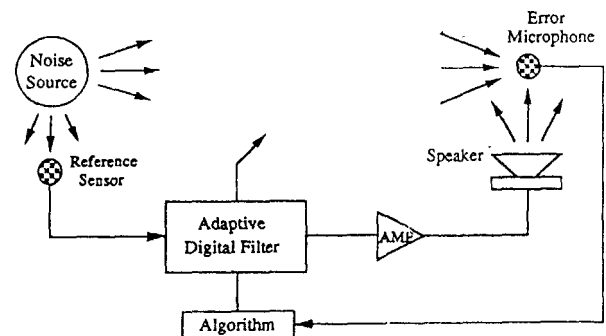


그림 2. 능동 소음 제어 시스템의 기본적인 구조
Fig 2. The basic structure of active noise control system

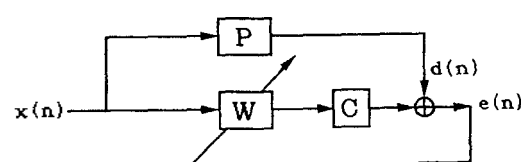


그림 3. 능동 소음 제어의 블록도
Fig 3. The basic diagram of active noise control

능동 소음 제어의 소음 감쇠 정도는 기준 경로 P 의 선형성에 의존한다. 선형성에 관계되는 요소인 유사도(Coherence)를 η 라고 할 때 최대 소음 감쇠 정도 ∇ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla = -10 \log_{10}(1 - \eta^2) \quad (dB) \quad (1)$$

아러한 선형성은 참조 신호의 특성 및 측정 위치 등에 관계되므로 참조 신호의 선정은 능동 소음 제어 시스템의 성능에 중요한 영향을 미치게 된다.

또한, 일반적으로 전기음향학적인 측면에서 소음에 대한 감쇠가 잘 이루어지려면 소음원과 2차 발생원이 원하는 주파수 대역에서 서로 반파장 이내에서 기하학적인 배치를 이루어야 한다는 사실도 센서와 2차 발생원의 위치를 결정하는 중요한 요소이다⁹⁾.

능동 제어 시스템의 구조에서 가장 핵심이 되는 신호 처리 부분은 적응 디지털 필터이다. 적응 디지털 필터의 최적해는 참조 신호를 처리하여 필터 출력 신호가 기준 신호를 가장 잘 추정하도록 하는 위너 필터(Wiener Filter)의 해로 주어진다¹⁷⁾. 위너 필터의 구현을 위해서는 참조 신호와 기준 신호의 통계적인 특성을 알아야 하는데 신호의 통계적인 특성이 변화하는 경우에는 새로운 필터 계수를 계산하여야 한다. 또한, 참조 신호를 입력으로 하는 적응 필터의 출력 신호와 오차 마이크로폰 출력 신호인 기준 신호는 스피커와 오차 마이크로폰의 비선형적인 특성과 스피커와 오차 마이크로폰 사이에 존재하는 음향학적인 공간에 의해 신호 왜곡이 발생하게 된다.

따라서, 이러한 신호 왜곡을 보상해 주면서 필터 계수를 적응시켜 주는 알고리즘이 필요하게 되는데 이러한 알고리즘으로서 LMS 알고리즘의 변형된 형태인 Filtered-x LMS 알고리즘이 있다.

다수의 오차 센서와 다수의 스피커를 사용하는 경우에는 다채널 Filtered-x LMS 알고리즘을 사용하며 그 구조는 그림 4와 같다⁹⁾. L 개의 오차 센서와 M 개의 스피커를 사용하는 경우 M 개의 적응 디지털 필터가 필요하며 $w_m(n)$ 과 c_{lm} 는 각각 적응 디지털 필터 및 스피커와 오차 센서 사이의 음향 시스템을 나타낸다. 이때에는 다수의 오차 센서를 통해 받아들여진 오차 신호 각각의 제곱 평균의 합을 최소화하도록 필터 계수를 적응시킨다.

m 번째 샘플에 대해 참조 신호를 $x(n)$, 소음원에 의해 발생하는 l 번째 기준 신호를 $d_l(n)$, 오차 센서의 l 번째 출력을 $e_l(n)$ 이라 하고 m 번째 스피커의 입력과 l 번째 오차 센서 출력 사이의 충격 응답 c_{lmk} 를 K 차수 FIR 필터로 모델링을 하면

$$c_{lmk}(z) = \sum_{k=0}^{K-1} c_{lmk} z^{-k} \quad (2)$$

m 번째 적응 디지털 필터의 출력, 즉 m 번째 스피커의 입력 $y_m(n)$ 은 다음과 같이 나타내어진다.

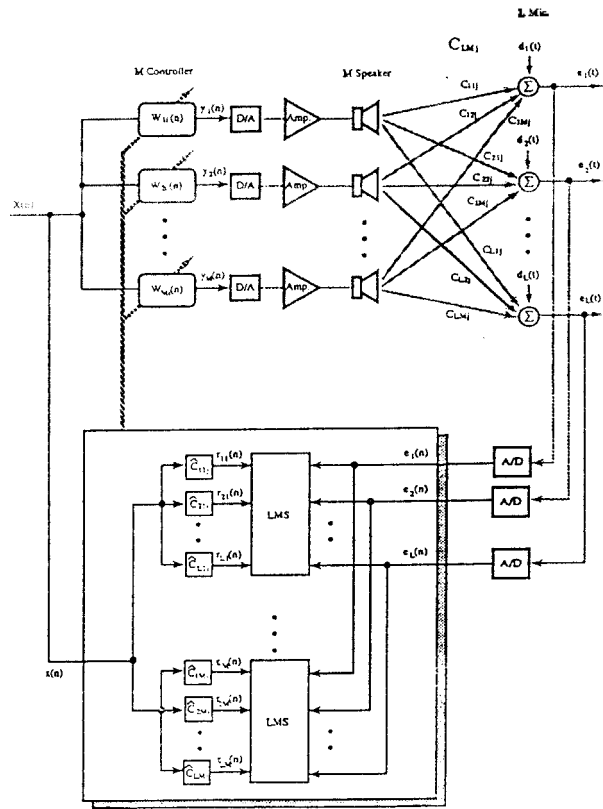


그림 4. 일반적인 다채널 Filtered-x LMS 알고리즘의 구조
Fig 4. The structure of general multiple-error Filtered-x LMS algorithm

$$y_m(n) = \sum_{i=0}^{L-1} w_m(n) x(n-i) \quad (3)$$

그리고 l 번째 오차 센서의 출력 신호는 다음과 같이 나타내어진다.

$$e_l(n) = d_l(n) + \sum_{m=1}^M \sum_{k=0}^{K-1} c_{lmk} \sum_{i=0}^{L-1} w_m(n-k) x(n-i-k) \quad (4)$$

소음 감쇠는 L 개 오차센서 신호의 전력을 최소화하도록 이루어지므로 전체 오차 J 는 다음과 같이 정의할 수 있으며 이를 최소화하도록 적응 디지털 필터 계수 $w_m(n)$ 을 조정한다.

$$J = E \left\{ \sum_{l=1}^L e_l^2(n) \right\} \quad (5)$$

여기서 $E\{\}$ 는 통계적 평균을 나타낸다. J 를 최소화하는 필터 계수를 구하기 위해 잘 알려진 Stochastic Gradient 알고리즘을 적용하면 적응 디지털 필터의 계수 조정은 다음과 같은 순환식으로 나타내어진다.

$$w_m(n+1) = w_m(n) + \alpha \nabla_{w_m}(n) \quad (6)$$

여기에서 $\nabla_{w_m}(n)$ 은 오차 센서 신호의 순시 전력에 대한 미분값이므로 다음과 같이 정의된다.

$$w_m(n) = \frac{\partial \sum_{l=1}^L e_l^2(n)}{\partial w_m(n)} \quad (7)$$

$$= 2 \sum_{l=1}^L e_l(n) \frac{\partial e_l(n)}{\partial w_m(n)} \quad (8)$$

가 $w_m(n)$ 이 시불변이라 가정하면 (8)식에서 오차 센서의 미분값은 다음과 같이 나타내어지며 이를 $r_{lm}(n-i)$ 로 정의한다.

$$\frac{\partial e_l(n)}{\partial w_m} = \sum_{k=0}^{K-1} c_{lm} x(n-i-k) = r_{lm}(n-i) \quad (9)$$

여기서 $r_{lm}(n-i)$ 는 i 샘플만큼 지연된 참조 신호 $x(n)$ 이 m 번째 스피커에 인가되었을 때 l 번째 오차 센서에서 얻어지는 신호를 나타내는데, 이것은 적응 디지털 필터의 주참조 신호(Main Reference Signal), 또는 필터링된 참조 신호(Filtered Reference Signal)라고 불린다⁹⁾.

(8)식을 (6)식에 대입하면 Filtered-x LMS 알고리즘의 확장된 형태인 Multiple Error Filtered-x LMS 알고리즘이 다음과 같이 생성된다.

$$w_m(n+1) = w_m(n) - \alpha \sum_{l=1}^L e_l(n) r_{lm}(n-i) \quad (10)$$

여기서 α 는 수렴 계수로서 필터의 수렴 속도와 안정도를 나타내며 입력되는 주참조 신호 $r_{lm}(n-i)$ 에 의해 수렴 속도가 결정된다.

본 논문에서는 위의 식(4)와 식(10)에서 오차 센서와 스피커의 갯수를 각각 4개씩 사용한 $L=M=4$ 인 경우이며 이때의 필터 계수를 적용시키는 알고리즘은 각각 다음과 같다.

$$e_l(n) = d_l(n) + \sum_{m=1}^4 \sum_{k=0}^{K-1} c_{lmk} \sum_{i=0}^3 w_m(n-k)x(n-i-k), \quad l = 1, 2, 3, 4 \quad (11)$$

$$w_m(n+1) = w_m(n) - \alpha \sum_{l=1}^4 e_l(n) r_{lm}(n-i), \quad m = 1, 2, 3, 4 \quad (12)$$

III. 실시간 능동 제어 시스템의 하드웨어와 알고리즘

3.1 실시간 능동 제어 시스템의 하드웨어

다음의 그림 5는 능동 소음 제어 시스템 하드웨어의 전체 블록도이며 다음과 같이 크게 아날로그 시스템과 디지털 시스템으로 나눌 수 있다.

3.1.1 아날로그 시스템 (Analog System)

아날로그 시스템은 저역 통과 필터, 고역 통과 필터, 고조파 발생기(Harmonics Generator), 증폭기, 스피커, 그리고 마이크로폰 등으로 구성되어 있다.

증폭기와 스피커는 모두 4채널로 각각 사용되며 임피

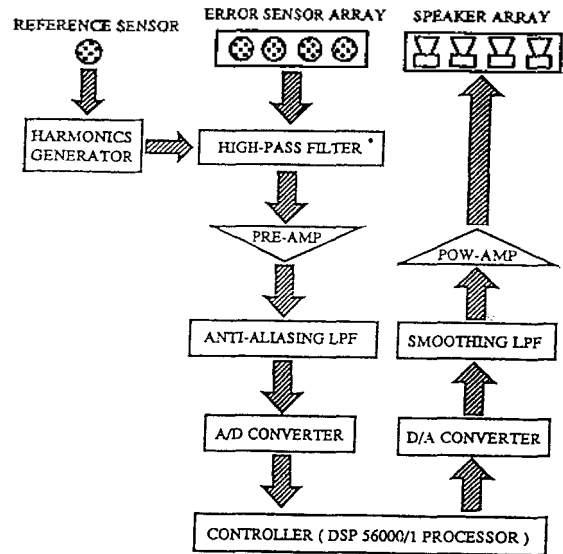


그림 5. 능동 소음 제어 시스템의 하드웨어 블록도
Fig 5. The hardware block diagram of active noise control system

던스가 서로 잘 부합되는 4 ohm인 자동차 전용 증폭기와 스피커를 사용하였다. 마이크로폰은 주파수 대역이 50 Hz-14 kHz에서 특성이 좋은 무지향성 마이크로폰을 사용하였다.

저역 통과 필터는 아날로그에서 디지털 부분으로 전환되는 부분과 디지털 부분에서 아날로그 부분으로 전환되는 부분으로 나누어 사용하게 되는데 차단 주파수(Cut-off Frequency)는 양쪽의 경우 모두 300 Hz이다. 전자의 저역 통과 필터는 신호의 알리아싱(Aliasing)을 제거하는 알리아싱 제거 필터로서 5채널을 사용하게 되며 4개의 폴(pole)을 가진 버터워스 저역 통과 필터로 구성되어 있다. 후자는 D/A된 신호의 형태를 완만하게(Smoothing) 만들어 주는 Shaping Filter로서 4채널을 사용하며 역시 4개의 폴을 가진 버터워스 저역 통과 필터로 구성되어 동작하게 된다. 고역 통과 필터는 자동차 소음 주파수 대역에서 60 Hz미만의 성분들을 제거함으로써 적응 필터의 성능을 향상시키기 위해 동작하게 된다.

고조파 발생기는 자동차 엔진부 참조 신호의 기본 주파수 성분들에 대하여 고조파 성분들을 아날로그로 처리하여 발생시킴으로써 자동차 실내에서 고조파 성분들을 가진 소음들에 대하여 소음 감쇠 성능을 향상시키기 위해 동작하게 된다.

3.1.2 디지털 시스템(Digital System)

디지털 시스템은 크게 아날로그에서 디지털로의 변환기(ADC)와 디지털에서 아날로그로의 변환기(DAC), 그리고 제어기인 DSP56001과 컴퓨터로 나눌 수 있다¹⁰⁾.

제어기의 구성은 데이터 연산부, 어드레스부, 그리고 프로그램 제어부 등으로 크게 나눌 수 있다. 데이터 연산부에서는 한 번의 사이클에 24 비트×24 비트 곱셈 연산

을 하며 56 비트의 어큐뮬레이터를 2개 가지고 있다. 어드레스부에서는 16 비트 어드레스, 오프셋(Offset), 모디파이어(Modifier) 레지스터를 각각 8개씩 전체 24개 레지스터로 구성되어 있다. 프로그램 제어부는 15 레벨 하드웨어 스택(Stack)을 가진다.

메모리는 24 비트 512 워드 프로그램 메모리, X 데이터 메모리, Y 데이터 메모리로 구성되어 64 K까지 확장이 가능하며 20.48 MHz 클럭으로 동작한다.

ADC와 DAC는 각각 8채널과 4채널용으로 PCM 방식을 이용하여 아날로그 신호를 디지털 신호로 전환하거나 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환할 때 사용한다.

호스트 PC는 제어 시스템 운영 알고리즘을 DSP56001의 프로그램 메모리에 다운로드(Down-loading)하여 제어기가 운영 알고리즘에 따라 정해진 과정을 수행하게 한다.

3.1.3 하드웨어 운영 과정

그림 6은 능동 제어 시스템을 자동차에 적용하였을 때의 블럭도를 나타낸 것이다. 자동차의 엔진 부분에서 연결된 참조 신호와 자동차의 실내에 위치한 4개의 마이크로폰이 감지한 신호는 증폭기를 통과하여 신호가 증폭된다. 이때, 참조 신호는 고조파 발생기를 거쳐 여러 가지 고조파 주파수 성분들을 갖는 신호로 변환하게 된다. 이 5개의 신호들은 60 Hz미만의 주파수 성분들을 제거하는 고역 통과 필터를 통과하게 되며 샘플링할 때 생기는 알리아싱을 피하기 위해 저역 통과 필터를 통과하여 A/D 변환기를 거쳐 디지털 신호로 바뀌게 된다.

범용 디지털 프로세서인 DSP56001로 구성된 제어기는 이 입력되는 신호들에 대해서 앞의 2-4절에서 설명한 Multiple-error Filtered-x LMS 알고리즘을 운영하여 제어기 내부의 적응 필터 계수를 보상하게 된다. 보상된 적응 필터는 소음에 대하여 동일 크기와 역위상을 갖는 인공음을 출력으로 발생시킨다. 제어기 내부에서 4개의 적응

필터에 출력된 각각의 신호는 D/A 변환기에 의해 아날로그 신호로 바뀌며 이 신호는 저역 통과 필터에 의해 그 형태가 스무딩(Smoothing)된다. 마지막으로 증폭기에 의해 신호를 증폭시켜 스피커를 통해 출력된다.

3.1.4 소요 클럭수

능동 제어 시스템의 클럭수는 20.48 MHz로서 실시간이 가능하게 하는데 최대 사용가능 클럭수는 약 19444클럭이다. 따라서 능동 제어 시스템을 실시간으로 정상적인 운영을 하는데 필요한 클럭수는 인터럽트가 걸려서 데이터의 입,출력 과정이 수행되는 도중에 다음의 인터럽트가 걸리지 않도록 클럭수가 이 최대 소요 클럭수에 들어가면 된다. 능동 제어 시스템의 소요 클럭수에 가장 지대한 영향을 미치는 요소는 FIR 필터링 과정과 적응 필터 계수를 보상하는 과정으로서 2차 경로의 추정 함수의 계수 갯수(PTAP)와 적응 디지털 필터의 계수 갯수(TAP)에 대해서 함수 관계가 있다. 이러한 관계를 자세히 나타내면

$$\text{입, 출력 수행 클럭} + \text{FIR 필터링 클럭} + \text{필터 계수 보상클럭} \leq \text{최대클럭} \quad (13)$$

이므로 실제의 값을 대입하면

$$736 + 4 * \{14 + 2 * (TAP - 2)\} + 16 * \{14 + 2 * (PTAP - 2)\} + 4 * 34 * (TAP - 1) \leq CLK_{MAX} \quad (14)$$

따라서 이를 정리하면

$$9 * TAP + 2 * PTAP \leq \frac{CLK_{MAX}}{16} \quad (15)$$

샘플링 주파수를 900 Hz로 하였을 때 식(15)은 다음과 같이 식(16)이 되며 실시간 가능 조건식인 식(16)을 만족시키는 경우에 대해서 실시간 시스템이 실현 가능하다고 할 수 있다.

$$9 * TAP + 2 * PTAP \leq \frac{1}{16} * 20M * \frac{1}{900} * \frac{7}{8} = 1215 \quad (16)$$

표 1은 적응 디지털 필터 계수와 2차 경로 전달 함수의 추정 계수의 갯수를 각각 1) 64개와 128개, 2) 32개와 128개, 그리고 3) 80개와 50개로 실험 환경을 설정하고 시스템을 실시간으로 구동하였을 때의 소요 클럭수를 나타낸다. 여기서, 1)의 경우에는 시스템의 실시간 가능 최대 허용 클럭수의 약 80%를 사용하며 2)의 경우에는 49%를, 그리고 3)의 경우에는 72%를 사용하므로 본 논문에서 구현한 시스템이 실시간으로 실현 가능하다는 사실을 확인할 수 있다.

3.2 실시간 시스템의 능동 제어 알고리즘

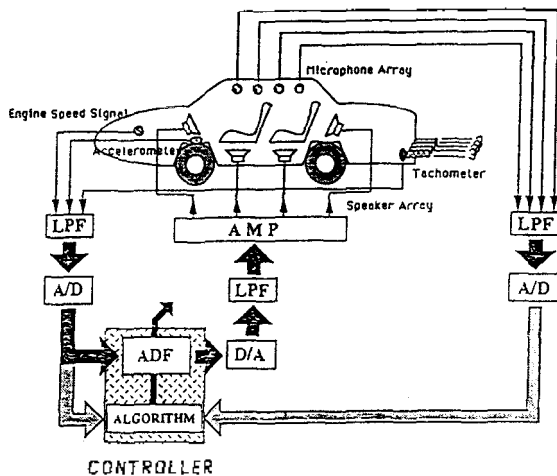


그림 6. 자동차에 대한 능동 소음 제어 시스템의 블록도
Fig 6. The block diagram of active noise control system for a car

능동 제어 시스템을 자동차에 대해서 적용하여 운영하는 과정은 다음의 그림 7과 같이 흐름도로서 나타낼 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 능동 제어 시스템을 운영하는 과정은 크게 두가지로 나눌 수 있는데 첫번째는 스피커에서 마이크로폰까지의 2차 경로 전달 함수를 추정하는 과정이고 두번째는 첫번째의 과정에서 추정된 전달 함수를 가지고 엔진 소음원으로부터 마이크로폰까지의 전달 함수를 추정하는 기준 경로의 시스템 동일화를 수행하는 과정이다.

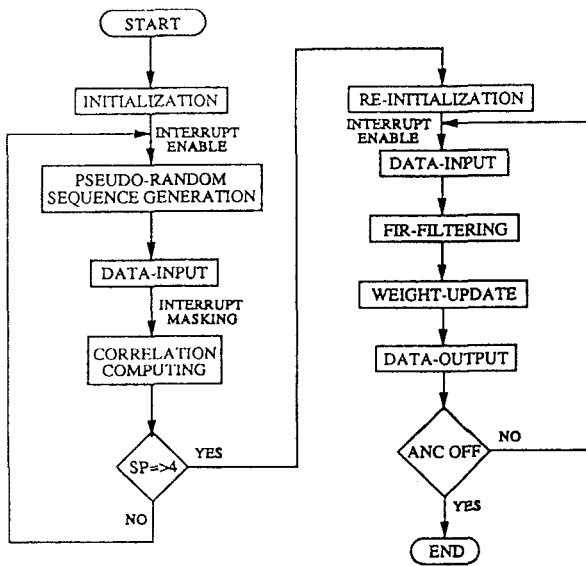


그림 7. 능동 소음 제어 시스템의 운영 흐름도
Fig 7. The flow-chart of active noise control system

3.2.1 최대 길이 열을 이용한 2차 경로 전달 함수 추정

앞에서 설명한 것과 같이 스피커와 마이크로폰 사이에 신호의 왜곡을 유발하는 전달 함수가 존재하게 되므로 이러한 왜곡을 보상하기 위해서 Filtered-x LMS 형태의 알고리즘을 사용한다. 따라서, 이러한 알고리즘을 운영할 때에는 먼저 스피커에서 마이크로폰까지의 전달 함수를 선행하여 추정하여야 한다.

이를 수행하는 방법 중에서 가장 널리 알려진 것은 스피커에 랜덤 신호(Random Signal)를 입력하여 그 출력을 마이크로폰이 받아들여 주어 스피커에 입력된 신호와 마이크로폰에서 출력되는 신호간의 상호 상관 관계를 계산하여 추정하는 방법이다¹¹⁾.

본 논문에서는 2차경로 전달함수의 추정을 위하여 스피커 입력 신호로서 유사 랜덤 신호(Pseudo-random Signal)인 최대 길이열(Maximum-length Sequence)을 가지고 스피커에서 마이크로폰 사이의 전달 함수를 추정하였다¹²⁻¹⁴⁾.

최대 길이열은 사분변 시스템의 충격 응답을 측정하는데 주로 사용되며 2가지의 값으로 구성되어 있다. 또한, 고속 하다마드 변환(Fast Hadamad Transform)을 이용하므로 빠른 계산이 가능하고 잡음이 존재할 경우에도 신

호 대 잡음비(SNR)를 향상시킬 수 있는 장점을 가지고 있다¹²⁻¹⁴⁾.

능동 제어 시스템이 시작되면 운영 알고리즘은 그림 7과 같은 2차 경로의 전달 함수를 추정하는 과정을 수행하게 되는데 그 전에 여러 가지의 파라미터와 제어기의 메모리 영역을 초기화 시킨다. 그 다음에 유사 랜덤 신호열인 최대 길이열을 인터럽트(Interrupt)를 통해 발생시켜 스피커로 출력시킨 후 음향학적인 공간, 또는 2차 경로를 통과한 신호를 마이크로폰으로 받아들여 발생 신호와 받아들인 신호 간의 상호 상관 관계를 이용하여 스피커에서 마이크로폰까지의 전달 함수를 추정한다. 이때 발생시킨 신호와 받아들인 신호들을 가지고 전달 함수를 계산하는 과정에서는 인터럽트가 동작하지 않는다(Interrupt Masking). 처음에는 하나의 스피커로 최대 길이열을 발생시켜 4개의 마이크로폰으로 받은 신호에 대해서 4개의 전달 함수를 계산한다. 그 다음에는 다른 스피커로 최대 길이열을 발생시켜 역시 4개의 전달 함수를 계산한다. 이와같이 4개의 스피커로 최대 길이열을 차례로 발생시켜 전체 16개의 2차 경로 전달 함수를 추정된 후에는 주 알고리즘인 다채널 Filtered-x LMS 알고리즘을 수행하는 기준 경로 시스템 동일화 과정으로 넘어간다.

3.2.2 기준 경로 시스템 동일화 과정

주알고리즘은 다시 인터럽트(Interrupt)를 인에이블(Enable)시켜 데이터를 받아들인 후 FIR 필터링 과정을 먼저 수행한다. 그 다음에는 4개의 마이크로폰으로부터 받은 신호와 필터의 참조 신호를 이용하여 다채널 Filtered-x LMS 알고리즘을 통한 적응 필터 계수를 보상한다. 결국 필터 입력은 이 보상된 계수와 계산되어 스피커를 통해 출력됨으로써 소음 신호를 상쇄시키는 기능을 하게 된다. 이때, 소음의 감쇠 정도는 적응 필터 계수의 갯수와 추정된 2차 경로 전달 함수의 계수 갯수에 의해 그 성능이 다르게 나타난다. 또한, 필터의 입력 신호에 대하여 알고리즘의 수렴 및 안정도 계수를 잘 조정하여야 시스템의 안정도를 보장받으면서 빠른 수렴 속도를 얻을 수 있다. 수렴 계수의 결정은 여러 가지가 있지만 참조 신호 발생기에서 여러 가지의 정현파를 발생시켜 주파수와 크기를 변화시키며 그에 따른 수렴 계수의 변화와 감쇠 시간을 고찰하여 결정할 수 있다.

IV. 실험 결과

본 논문에서는 실험 대상 자동차로서 4기통 엔진을 장착한 소형 승용차를 선택하였다. 마이크로폰과 스피커의 갯수는 각각 4개씩을 사용하였으며 마이크로폰 센서의 위치는 자동차 실내에서 머리위치 높이로서 앞쪽과 뒤쪽에 탑승자 위치를 중심으로 설치하고 스피커는 자동차 실내의 음향학적인 모드에 가장 잘 커플링되는 위치로서 구석을 결정하여 설치하였다¹⁵⁾.

자동차의 엔진 신호가 자동차 실내로 전달되어 소음을 느끼는 이상 자동차 실내에서 얻어지는 최대 소음 감쇠 정도는 자동차 엔진에서 얻어진 참조 신호와 자동차 실내에서 감지되는 신호들과의 유사도에 의해 어느 정도 예측할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 참조 신호와 마이크로폰으로 감지되는 신호들 간의 유사도를 측정하고 유사도에 따른 소음의 감쇠 성능을 고찰 하였다¹⁴⁾.

능동 제어 시스템을 자동차의 엔진 소음에 대하여 운영할 때 엔진회전수의 변화는 2500, 3000, 3500, 4000 그리고 4500 RPM의 5가지 경우에 대해서 일정 시간동안 지속적으로 구동하여 실험하였다. 위의 5가지 RPM은 각각 83.3 Hz, 100 Hz, 116.7 Hz, 133.3 Hz 그리고 150.0 Hz의 주파수에서 에너지가 가장 큰 C2성분들이 나타났다¹⁵⁾. 이 C2 성분들은 엔진 회전 기본 주파수에 대한 2번째 고조파 성분들을 나타낸다.

본 논문에서는 최대 길이열을 사용하여 추정한 2차 경로의 충격응답과 전달함수는 그림 9와 같이 그 형태가 지수적으로 감소하는 형태를 특징으로 한다. 그림 9는 그림 10과 같은 구조에서 첫번째 스피커(SP_LL)로부터 첫번째 마이크로폰(MIC_LL)까지의 충격응답과 전달함수를 나타낸다.

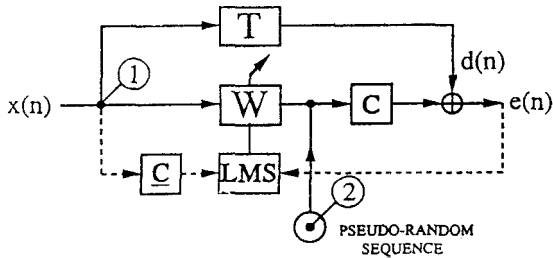


그림 8. 2차 경로 추정을 위한 시스템 구조
Fig 8. The system structure for estimating the secondary path

4.1 실시간 능동소음제어 실험 1

자동차에 대하여 실시간 능동 제어 시스템을 운영할 때의 실험 환경 1은 다음의 그림 10과 같이 마이크로폰과 스피커가 위치하는 경우로서 사용되는 적응 필터 계수의

갯수와 추정된 2차 경로의 전달 함수 계수의 갯수를 각각 64개와 128개 사용한 경우이다.

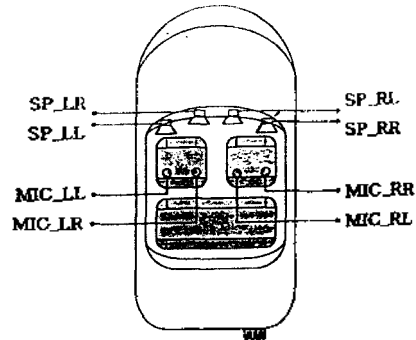


그림 10. 마이크로폰과 스피커의 위치
Fig 10. The position of microphones and speakers

다음의 그림 11은 엔진회전수가 4000 RPM인 대표적인 경우에 대하여 참조 신호와 4개의 마이크로폰으로 감지되는 기준 신호들 간의 유사도를 나타낸 것으로서 유사도는 300 Hz이하의 주파수 대역에서 대체적으로 큰 값을 나타내었으며 특히 C2성분에 해당하는 주파수에 대해서 가장 높게 나타났다. 또한, 그림 12는 엔진회전수가 4000 RPM인 대표적인 경우에 대하여 능동제어 시스템을 운영하기 전(ANC OFF)과 그 후의 상태(ANC ON)를 비교하여 4개의 오차 마이크로폰에서 얻어지는 소음의 감쇠 정도를 주파수 영역에서 나타낸 것으로서 자동차 실내의 앞쪽에 위치한 모든 위치에서 소음의 감쇠 효과가 나타났음을 알 수 있었으며 전반적으로 엔진회전수가 증가할수록 소음의 감쇠 성능이 더 향상되는 것을 보여주고 있다. 수렴 계수값은 엔진 회전수가 작을수록 점차 신호의 에너지가 상승하므로 엔진회전수가 작을수록 작은값을 사용하였다. 유사도와 시스템 성능 관계에 있어서는 유사도가 클수록 소음의 감쇠 성능이 보다 우수하게 나타났으며 유사도가 작은 영역에 대해서는 소음의 감쇠 성능이 저하되었다.

표 2는 실시간 능동 소음 제어 실험 1에 대한 소음의 감쇠 정도를 정리하여 나타낸 것이다. 소음 감쇠 정도는

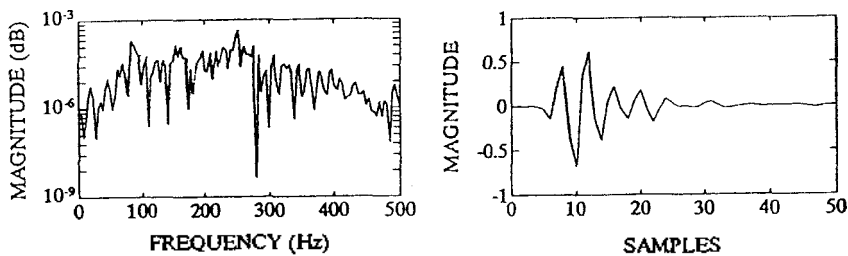


그림 9. 2차경로의 충격응답과 전달함수
Fig 9. The transfer function and impulse response of a secondary path

소음에서 가장 중요한 성분인 C2 성분에 대한 주파수에 있어서의 피크 감쇠 정도와 300 Hz이하의 전체 주파수 대역에서 얻은 평균적인 소음 감쇠 정도로 나누어서 나타내었다. 그림 13과 그림 14는 모든 엔진회전수에 대하여 C2 성분과 전체 주파수 대역에 대한 평균적인 소음 감쇠 성능을 나타낸 것으로서 각각 최대 24 dB와 16 dB의 감쇠 성능 효과를 볼 수 있었다.

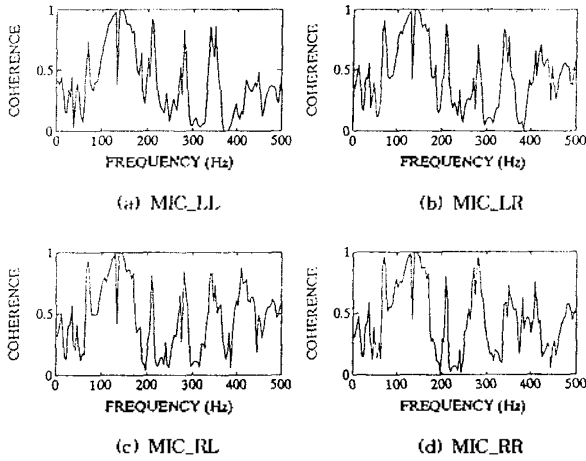


그림 11. 4000 RPM에 대한 참조 신호와 기준신호들간의 유사도
Fig 11. Coherences between a reference signal and primary signals for 4000 rpm

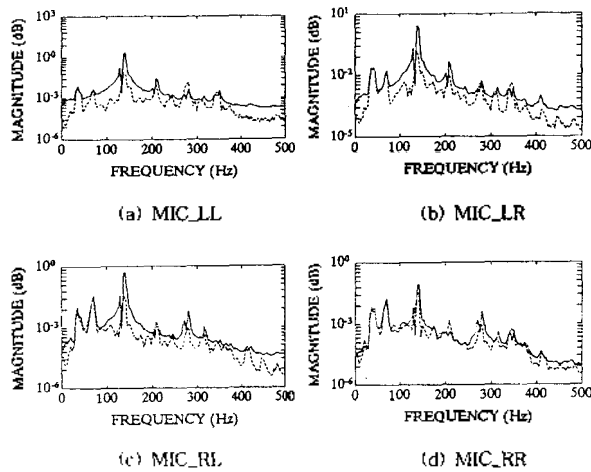
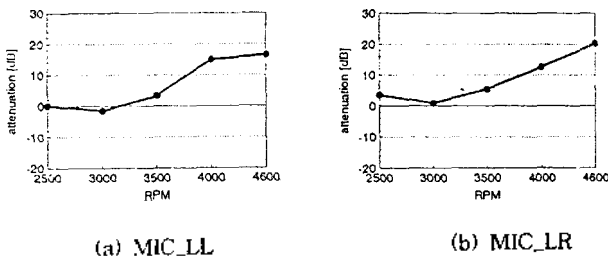


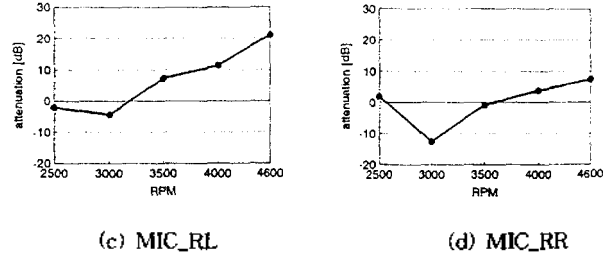
그림 12. 4000 RPM에 대한 소음 감쇠 성능(---: ANC OFF, - - -: ANC ON)

Fig 12. The noise attenuation performances for 4000 rpm



(a) MIC_LL

(b) MIC_LR

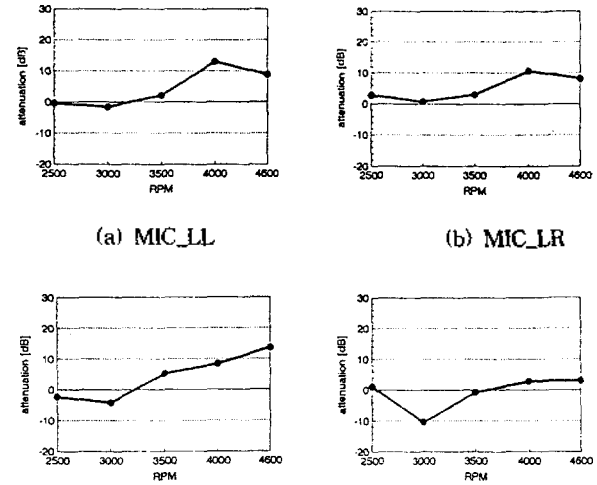


(c) MIC_RL

(d) MIC_RR

그림 13. C2에 대한 소음 감쇠 성능

Fig 13. The noise attenuation performances for C2



(a) MIC_LL

(b) MIC_LR

(c) MIC_RL

(d) MIC_RR

그림 14. 전체 주파수에 대한 소음 감쇠 성능

Fig 14. The noise attenuation performances for overall frequencies

4.2 실시간 능동소음제어 실험 2

자동차에 대하여 실시간 능동 제어 시스템을 운영할 때의 실험 환경 2는 마이크로폰과 스피커의 위치를 바꾸어 그림 15와 같이 한 경우로서 사용되는 적응 필터 계수의 갯수와 추정된 2차 경로의 전달 함수 계수의 갯수를 각각 64개와 128개를 사용하여 실험하였다. 또한, 그림 15와 같이 마이크로폰과 스피커를 위치시켰을 때 최대 길이열을 사용하여 추정된 2차 경로의 충격 응답은 그림 9와 유사한 지수적으로 감소하는 특징을 나타낸다.

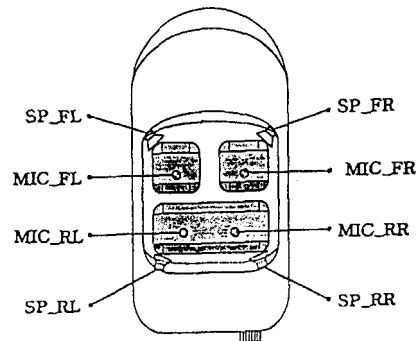


그림 15. 마이크로폰과 스피커의 위치

Fig 15. The position of microphones and speakers

그림 16과 그림 17은 엔진회전수가 4000 RPM인 대표적인 경우에 대하여 참조 신호와 4개의 오차 마이크로폰으로 감지되는 기준 신호들 간의 유사도와 소음 감쇠 정도를 주파수 영역에 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 자동차 실내의 모든 위치에서 소음의 감쇠 효과가 나타났으며 전반적으로 엔진 회전수가 증가할수록 소음의 감쇠 성능이 더 향상되는 것을 볼 수 있다. 유사도가 큰 C2 성분에 해당하는 영역에 대해서 소음의 감쇠 성능이 우수하게 나타났으며 유사도가 작은 영역에 대해서는 소음의 감소가 거의 이루어지지 않았다. 또한, 자동차 실내의 앞좌석보다 뒷좌석에서 약간 더 향상된 소음 감쇠 성능을 얻을 수 있었다.

표 3은 실시간 능동 소음 제어 실험 2에서 적응 필터의 계수 갯수를 64개로 하고 추정한 2차 경로 전달 함수의 계수 갯수를 128개로 하였을 때 소음 감쇠 정도를 정리하

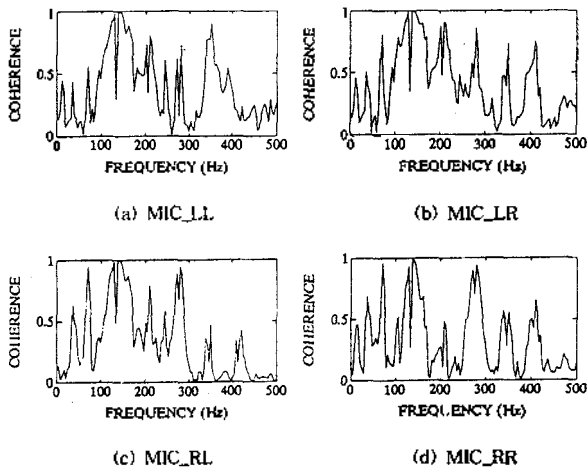


그림 16. 4000 RPM에 대한 참조 신호와 기준신호들간의 유사도
Fig 16. Coherences between a reference signal and primary signals for 4000 rpm

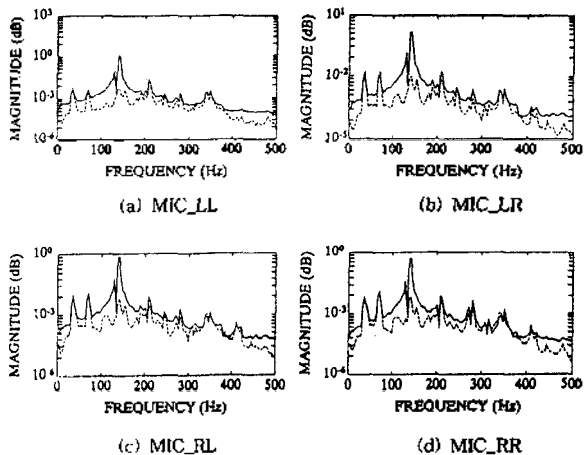


그림 17. 4000 RPM에 대한 소음 감쇠 성능(---: ANC OFF, -.-: ANC ON)
Fig 17. The noise attenuation performances for 4000 rpm

여 나타낸 것이다. 소음 감쇠 정도는 가장 중요한 성분인 C2 성분에 대한 주파수에 있어서의 피크 감쇠 정도와 300 Hz이하의 전체 주파수 대역에서 얻은 평균적인 소음 감쇠 정도로 나누어서 나타내었다. 표에서 (-) 값을 가지는 부분은 오히려 소음 레벨의 증가를 의미하는데 이러한 현상은 인공음을 출력하는 스피커가 저주파수 영역에서의 특성이 비선형적이고 스피커들간의 간섭효과에 의해 발생한 것이다. 또한, 그림 18과 그림 19는 모든 엔진 회전수에 대하여 4개의 오차 마이크로폰에 있어서의 C2 성분과 전체 주파수 대역에 대한 평균적인 소음 감쇠 성능을 그린 것으로서 각각 최대 21 dB와 15 dB의 감쇠 성능 효과를 볼 수 있었다. 전반적으로 엔진회전수가 증가할수록 소음의 감쇠성능이 더 향상되는 것은 실험 1의 결

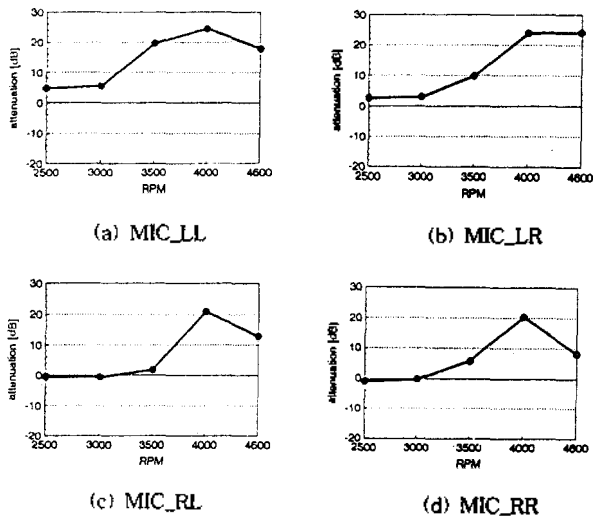


그림 18. C2에 대한 소음 감쇠 성능
Fig 18. The noise attenuation performances for C2

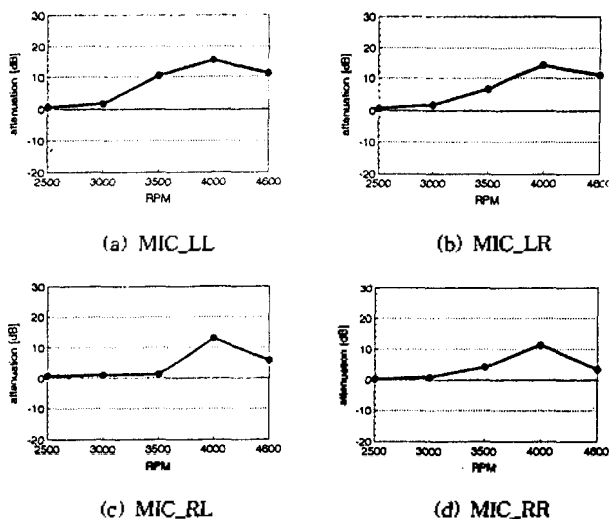


그림 19. 전체 주파수에 대한 소음 감쇠 성능
Fig 19. The noise attenuation performances for overall frequencies

과와 유사하며 자동차 실내의 뒷좌석보다는 앞좌석에서 더 향상된 소음감쇠 성능을 얻을 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 자동차의 여러 소음 중에서 엔진 소음이 자동차 실내로 전달되어 부밍 현상(Booming Effect)에 의해 발생하는 엔진 소음에 관심을 가지고 능동 소음 제어의 원리를 이용하여 차실내 소음 음압 레벨을 감쇠시키는 실시간 능동 소음 제어 시스템을 구현하였다. 능동 소음 제어 시스템은 모토롤라의 범용 디지털 신호 처리 칩인 DSP56001을 제어기로 사용하였으며 그밖에 아날로그 신호와 디지털 신호 사이의 변환기, 증폭기, 각종 필터 등이 사용되었다. 또한, 능동 소음 제어 시스템의 운영 알고리즘은 능동 소음 제어를 운영하는 데 편리한 다 채널 Filtered-x LMS 알고리즘을 사용하였다.

본 논문에서는 실시간 능동 소음 제어 시스템을 4기통 엔진이 장착되어 있는 소형 승용차의 엔진 소음에 대하여 실시간으로 실험을 하였다. 실험 결과 자동차 실내의 모든 위치에 대해 300 Hz이하 전체 주파수 대역에서 엔진회전수가 증가함에 따라 최대 15 dB이상의 소음 음압 레벨의 감소를 확인하였다. 소음 음압 레벨의 감소는 엔진 점화 신호로부터의 참조 신호와 자동차 실내에 위치한 마이크로폰과의 유사도에 따라 그 성능이 변화되었는데 자동차 실내의 모든 위치에서 전반적으로 좋은 감쇠 성능을 얻을 수 있었다. 엔진 소음에서 에너지가 가장 큰 성분은 C2 성분이며 유사도가 가장 높게 나타나 실시간으로 시스템을 동작시킨 결과 C2 성분에 해당되는 특정 주파수에서 최대 20 dB 이상의 감쇠 효과를 얻었다. 또한, 엔진회전수가 증가할 수록 소음 감쇠 성능이 더 증가하게 되며 엔진회전수가 낮을수록 소음 감쇠 성능이 감소하게 됨을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. L.J.Eriksson, M.C.Allie, "A Practical System for Active Attenuation in Ducts," *Sound Vib.* vol.22, no.2, pp.30-34, Feb. 1988.
2. S.J.Elliott, P.A.Nelson, I.M.Stothers, C.C.Boucher, "In-flight Experiments on The Active Control of Propeller-induced Cabin Noise," *J.Sound and Vib.* 140, pp.219-238, 1990.
3. W.B.Ferren, R.J.Bernhard, "Active Control of Simulated Road Noise," *Proc. of Noise and Vibr. Conference SAE*, 1991.
4. M.C.J.Trinder, G.B.B.Chaplin, P.M.Nelson, "Active Control of Commercial Vehicle Exhaust Noise," *Proc. Inter-Noise'86*, pp.611-616, 1986.
5. Y.Kurata, N.Koike, "Adaptive Active Attenuation of Interior Car Noise," *Proc. ASJ Symposium'91*, pp.297-302, April 1991.
6. P.M.Joplin, P.A.Nelson, "Active Control of Low-frequency Random Sound in Enclosures," *J.Acoust.Soc.Am.*, vol.87, no.6, pp.2396-2404, June 1990.
7. Bernard Widrow and Samuel D.Stearns, "Adaptive Signal Processing," Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985.
8. Lynn A.Poole, Glenn E.Warnaka, Richard C.Cutter, "The Implementation of Digital Filters using a Modified Widrow-Hopf Algorithm for the Adaptive Cancellation of Acoustic Noise," *Proc. ICASSP'84*, pp.21.7.1-21.7.4, 1984.
9. S.J.Elliott, I.M.Stothers, and P.A.Nelson, "A Multiple Error LMS Algorithm and Its Application to the Active Control of Sound and Vibration," *IEEE Trans. on Acoust., Speech, and Signal Processing*, vol.ASSP-35, No.10, pp.1423-1434, Oct. 1987.
10. Motorola, "DSP56000/DSP56001 Digital Signal Processor User's Manual", 1990.
11. L.J.Eriksson, M.C.Allie, "Use of Random Noise for On-line Transducer Modeling in An Adaptive Active Attenuation System," *J.Acoust.Soc.Am.*, vol.85, no.2, pp.797-802, Feb. 1989.
12. J.Borish, J.B.Angell, "An Efficient Algorithm for Measuring the Impulse Response Using Pseudorandom Noise," *J. Audio Eng.Soc.*, vol.31, no.7, pp.478-488, 1983.
13. D.D.Rife, "Modulation Transfer Function Measurement with Maximum-Length Sequences," *J.Audio Eng.Soc.*, vol. 40, no.10, pp.779-789, Oct. 1992.
14. H.Alrutz, M.R.Schroeder, "A Fast Hadamard Transform Method for the Evaluation of Measurements Using Pseudorandom Test Signals", *11th ICA*, pp.235-238, Paris, 1982.
15. 권오상, "자동차 실내에서의 엔진소음감쇠를 위한 실시간 능동소음제어 시스템의 구현", 석사학위논문, 전자공학과, 연세대학교, 1994.

▲ 권 오 상(Oh-Sang Kwon)



1992년 2월: 연세대학교 공과대학 전
자공학과 졸업(공학사)
1994년 2월: 연세대학교 본대학원 전
자공학과 졸업(공학석사)
1994년 3월~현재: 연세대학교 본대학
원 전자공학과 박사과정
※주관심분야: 디지털신호처리, 적응
필터, 능동소음제어 등

▲ 차 일 환(Il-Whan Cha)

음향학회지, Vol. 14, No. 4, Aug. 1995호 참조