

능동방음벽을 위한 다중채널 능동소음제어 시스템의 구현

최정일*, 조현기*, 남현도*, 안동준**
 단국대학교*, 아주자동차대학**

Implementation of multi-channel active noise control systems for active barriers

Jung Il Choi*, Hyun Gi Cho*, Hyun Do Nam*, Dong Jun Ahn**
 Department of Electronic and Electrical Engineering, Dankook University*, Ajou Motor College**

Abstract - In this paper, we implemented active noise control systems for active barriers with attenuation of road noise. And then we constructed by multi-channel audio systems and DAQ part, high performance DSP H/W. Active noise control firmware program was implemented for multi-channel off-line/on-line estimation methods for secondary path transfer functions and FIR/IIR filter structure main noise control algorithms. To evaluate performance of implemented systems, active barriers test bed was implemented and several experiments was performed by various noise cases.

1. 서 론

도로소음의 주체인 자동차의 주행에 따르는 소음에는 엔진소리, 배기 소리, 타이어와 도로면과의 마찰음이 있다. 일반적으로 저속으로 주행할 때에는 엔진음이 주체이고 고속인 경우는 타이어 음이 주체가 된다. 자동차 소음의 특성은 대책에 의한 소음 저하가 어렵고 생활에 밀착된 소음이다. 현재 도로소음에 대한 해결책은 소음을 감소시킬 수 있는 시설물(방음벽, 방음벽)을 설치하는 것 외에 없다. 따라서 이러한 소음을 줄이기 위한 대책으로 여러 가지 연구가 진행되어 왔는데, 그 대표적인 방법들이 수동적인 소음제어 방법과 능동적인 소음제어 방법이다. 수동적인 소음제어 방법은 흡음재나 방음재를 사용하여 소음을 차단하는 방법으로, 특히 500Hz 미만의 소음특성을 가지는 소음을 제거하기 위해서는 사용하기 어려운 문제점이 있다. 이를 해결하기 위한 방법이 소음을 소음으로써 해결하는 능동적인 방법인 '능동소음제어(Active Noise Control)' 기술이다[1].

능동소음제어 시스템은 제어용 필터와 적응제어 알고리즘 두 부분으로 이루어져 있다. 일반적으로 능동소음제어를 위한 제어 필터의 구조는 필터의 계수추정 알고리즘이 간단하고 안정한 FIR구조가 많이 사용되고 있으나 IIR 필터에 비해 비슷한 성능을 얻기 위해 필터의 차수가 커져 계산양이 많아지는 단점이 있다[2]. 필터계수 추정 적응 알고리즘으로는 FULMS[2] 알고리즘이 주로 적용되어 왔다.

본 논문에서는 3차원 폐 공간에서의 능동방음벽을 구현하였고, 2차 경로 오프라인 추정 시 FIR 필터 대신에 IIR 필터를 사용하여 계산량을 줄이는 새로운 방법을 제안하였다. 실제 녹음한 광대역 소음을 사용하여 실험을 했으며, 그 결과를 비교, 분석하였다. 계산량을 줄이기 위해 적응 필터로 IIR 필터를 적용하려면 안정성에 문제가 생기므로 이를 해결하기 위해서 안정성이 강화된 적응 IIR 필터 알고리즘을 사용하였다.

2. 본 론

2.1 알고리즘

2.1.1 적응필터 알고리즘

적응필터 알고리즘은 식(1)과 같이 오차의 제곱을 최소화 하는 알고리즘이다. 이를 수식적으로 전개하면 다음과 같다[1, 3].

$$\hat{\xi}(n) = e^2(n) \tag{1}$$

$$\nabla \hat{\xi}(n) = 2[\nabla e(n)]e(n) \tag{2}$$

$$e(n) = d(n) - W^T(n)X(n) \tag{3}$$

$$\nabla e(n) = -X(n) \tag{3}$$

따라서

$$\nabla \hat{\xi}(n) = -2X(n)e(n) \tag{4}$$

$$W(n+1) = W(n) - \frac{\mu}{2} \nabla \hat{\xi}(n) \tag{5}$$

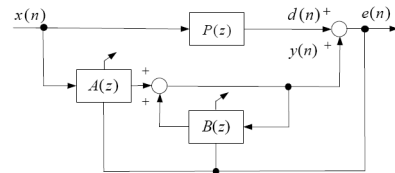
식(4)를 최대 경사법의 계수 적응식인 식(5)에 적용하면

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

여기서 μ 는 수렴계수로서, 알고리즘의 안정성과 수렴속도에 밀접한 영향을 주며, 이를 FIR 필터구조 LMS 알고리즘이라고 한다.

2.1.2 IIR 필터구조 적응 알고리즘

IIR 필터구조 적응알고리즘은 <그림 1>과 같으며[4, 여기서 $x(n)$ 과 $e(n)$ 은 기준입력 신호, 오차신호이고, $d(n)$ 과 $y(n)$ 은 1차경로 출력, 제어필터 출력이다.



<그림 1> IIR 필터구조 적응알고리즘

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

$$H(z) = \frac{A(z)}{1-B(z)} \tag{7}$$

이고, $A(z)$ 와 $B(z)$ 의 차수를 L, M 이라고 하면, IIR 필터의 계수 추정벡터 $A(n)$ 와 $B(n)$ 를

$$A(n) = [a_0(n) a_1(n) \dots a_{L-1}(n)]^T \tag{8}$$

$$B(n) = [b_1(n) b_2(n) \dots b_M(n)]^T \tag{9}$$

라고 한다면, 실제 시스템의 출력은 다음과 같다.

$$y(n) = W^T(n)U(n) \tag{10}$$

$$W(n) = \begin{bmatrix} A(n) \\ B(n) \end{bmatrix}, U(n) = \begin{bmatrix} X(n) \\ Y(n-1) \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$X(n) = [x(n) x(n-1) x(n-2) \dots x(n-l+1)] \tag{12}$$

$$Y(n-1) = [y(n-1) y(n-2) \dots y(n-M)]^T \tag{13}$$

따라서 시스템의 출력 값 $y(n)$ 은 $A(n)$ 과 $B(n)$ 의 함수라고 할 수 있다. 2.1절과 같이 최소 경사법을 이용하여 계수들의 갱신식을 구하면

$$W(n+1) = W(n) + \mu U(n)e(n) \tag{14}$$

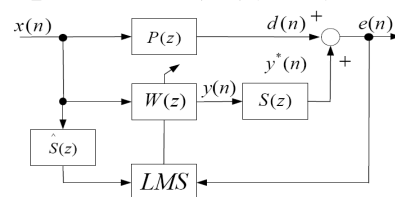
또한 이를 $A(n)$ 과 $B(n)$ 의 갱신식으로 나누어 표현하면

$$A(n+1) = A(n) + \mu_a X(n)e(n) \tag{15}$$

$$B(n+1) = B(n) + \mu_b Y(n-1)e(n) \tag{16}$$

2.1.3 2차경로 및 안정화 알고리즘 추정기법

능동소음제어를 위해서는 <그림 1>에서 추가로 2차 경로를 고려하여야 하는데, 이는 제어 출력에서부터 상쇄간섭이 이루어지는 실제 상황을 고려하여야 하기 때문이다. 따라서 2차 경로가 변하지 않거나 느리게 변화한다는 가정 하에 <그림 2>와 같이 변형된 구조를 FULMS(Filtered-U LMS)[2] 알고리즘이라고 한다.



<그림 2> Filtered-U LMS 알고리즘

<그림 2>에서 2차경로 S(z)의 추정 전달함수 구조는 FIR 구조방식이 일반적이거나 광대역 소음이나, S(z)의 구조가 극점을 가질 경우 필터의 차수가 커져 계산량이 많아지는 단점이 있다. IIR 필터 구조인 경우 잘 적용될 수 있으나, 식 (16)의 적응과정에서 불안정한 극점이 존재할 경우 쉽게 발산하는 문제점이 있으며 이를 방지하기 위하여 수렴 속도를 느리게 하면 수렴특성이 악화되는 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해소하기 위하여 식 (17)과 같은 안정화 알고리즘을 적용하였다.

$$H^k(z) = \frac{A(z)}{1 - f^k(z)} \quad (17)$$

$$f(z) = 1 + k(n)b_1(n)z^{-1} + k^2(n)b_2(n)z^{-2} + \dots + k^M(n)b_M(n)z^{-M}$$

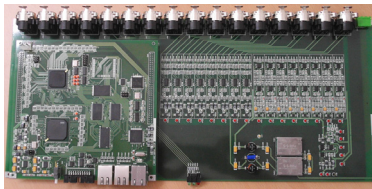
단, $0 \leq k \leq I, k(n+1) = \lambda k(n) + (1-\lambda)$ (λ : 망각인수)

즉, 식(7)과 같이 계수 추정과정에서 전처리 과정을 거치게 되면, 과도상태에서는 극점을 단위원 안쪽으로 강제로 이동시키고, 정상상태가 되면 원 위치시키는 방식이다. 이때 k는 1 보다 항상 작으므로 누승으로 전개되는 1차 이후차수의 계수의 크기는 기하급수적으로 감소하므로 M차의 전체 차수를 계산할 필요가 없다. 따라서 M차의 필터 차수를 매우 감소시켜도 필터 성능에 영향을 받지 않게 된다.

2.2 다중채널 능동소음 제어 시스템

2.2.1 DSP H/W 플랫폼

<그림 3>은 8Ch의 입출력을 지원하며, 고속의 TMS320C6713 DSP 칩이 내장된 DSP H/W 플랫폼의 외형이다. <표 1>은 이 플랫폼의 사양을 정리한 것이다.



<그림 3> DSP H/W 플랫폼

<표 1> DSP H/W 플랫폼 사양

기능	설명
CPU	TI's TMS320C6713B 300MHz DSP
FPGA	XILINX's XC3S700AN FPGA
Memory	1MBytes SRAM, 16MBytes SDRAM
Flash Memory	1MBytes FLASH
RS-232	UART 2 PORT(Console, Serial)
RS-485	UART#2 RS-232 선택사용
Ethernet	100Base-T
Shared Memory	ADC, DAC Control & Status Registers
ADC	8Ch, 16Bit, 100kHz per Channel
DAC	8Ch, 16Bit, 100kHz per Channel

2.2.2 Amp

<그림 4>의 Amp는 스피커와 마이크의 Amp, Power를 지원한다. 8Ch의 스피커 출력과 마이크 입력을 사용할 수 있다. <표 2>는 Amp의 사양을 정리한 것이다.



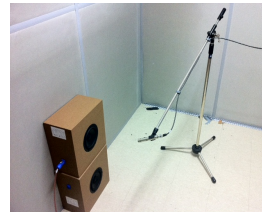
<그림 4> Amp

<표 2> Amp 사양

기능	설명
입피턴스	1V(0dBV)/20kΩ
출력입피턴스	Stereo(4Ω + 4Ω), Bridged(8Ω)
음성출력	4Ω Stereo (250W×2)
주파수 특성	20Hz~20kHz±0.5dB
의율	0.03% 이하(1kHz)
신호대 잡음비	100dB 이상
정격입력전압	AC220V,60Hz
소비전력	950W±15%

2.2.3 Condenser Mic

<그림 5>는 고성능의 Condenser Mic로 <표 3>의 사양을 가지고 있다.



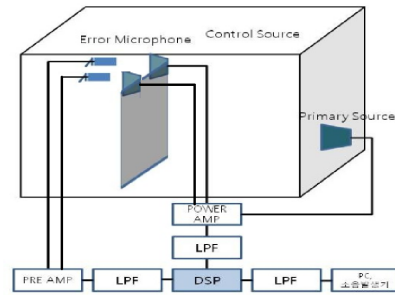
<그림 5> Condenser Mic

<표 3> Condenser Mic 사양

기능	설명
입피턴스	150Ω
출력입피턴스	Stereo(4Ω + 4Ω), Bridged(8Ω)
주파수 특성	30Hz~20kHz
민감도	15mV/Pa
신호대 잡음비	75dB

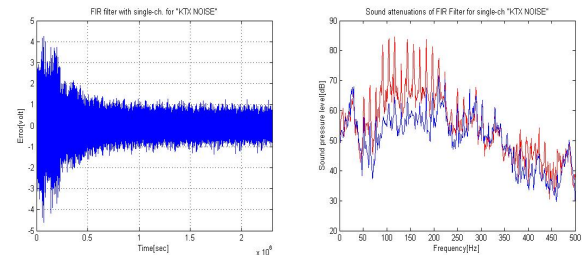
2.2.4 능동방음벽 구성도

<그림 6>는 <그림 3>과 <그림 4>, <그림 5>의 장비를 이용해 소음원 스피커 1개, 제어스피커 2개, 에러 마이크로폰 2개인 1x2x2의 환경으로 구성된 3차원 폐 공간에서의 능동방음벽 소음제어실험 구성도이다. 1차원 음장인 경우와 마찬가지로 2차 경로 전달함수가 시변하지 않는다고 가정하고 사전에 오프라인으로 추정하는 시스템을 구성하였다.



<그림 6> 능동방음벽 구성도

<그림 7>은 실제로 녹음한 광대역 소음으로 실험한 결과를 나타내고 있으며 약 12dB의 소음감쇄효과를 보였다.



<그림 7> 소음제어 전후의 신호와 FFT

3. 결 론

본 논문에서는 도로 방음벽의 소음 저감을 위한 능동소음 제어 시스템을 구현하였다. 도로 소음의 저감을 위하여 다중채널 음향시스템을 구축하였고, 다중채널 DAQ를 내장한 초고속 DSP 하드웨어 및 펌웨어를 제작하였다. 능동소음제어계의 핵심인 제어 프로그램은 다중채널 2차 경로 전달함수의 off-line, one-line 추정 알고리즘을 구현하였고 및 제어 알고리즘으로 다중채널 FIR, IIR 필터구조로 구현하였다. 구현한 시스템의 성능을 평가하기 위하여 모의 도로방음벽을 제작하고 여러 형태의 소음을 대상으로 실험을 행하여 소음 저감효과를 보였다.

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(과제번호 09기술혁신 E05)에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. M. Kuo and D. Morgan, Active Noise Control System, John Wiley and Sons, Inc. New York, 1996.
- [2] S. J. Elliott, P. Joseph, A. J. Bullmore, and P. A. Nelson, "Active cancellation at a point in a pure tone diffuse sound field", Journal of Sound and Vibration, Vol. 120, pp.183-189, 1988.