

일차원 음장에서의 능동소음제어

남 현 도

(단국대학교 전기공학과)

1. 머리말

원하지 않는 소음을 줄이는 방법에 대한 연구는 크게 나누어 능동적인 방법 (active control)과 수동적인 방법 (passive control)으로 나눌 수 있는데 수동적인 방법은 흡음제를 사용하는 방법으로 고주파 소음에 대해서는 좋은 효과를 보이나 저주파 소음에 대해서는 흡음제의 크기가 커야 하므로 미관 및 설치장소에 제약을 받아 사용이 어려울 뿐만 아니라 비용이 많이 드는 단점이 있다^(1~3).

능동소음제어는 HVAC(central heating, ventilation and air conditioning) 시스템에서 사용되는 환풍팬(fan)과 자동차 엔진 등과 같은 회전기에 의한 소음과 같이 500 Hz 이하의 저주파의 소음을 감소시키는데 있어서 종래의 수동적 방법보다 탁월한 효과를 보여주고 있는데, 효과적인 소음의 상쇄를 위해서는 1차 소음원으로부터 발생한 소음과 2차 소음원에서 발생한 2차음이 반주기의 차이를 가져야 한다. 효과적인 소음 제어를 위해서는 신호의 주파수와 크기 뿐 아니라 위상도 다루어야 하므로 여러가지 어려운 문제가 생기게 된다. 능동소음제어의 개념은 1950년대 Lueg⁽⁴⁾에 의해 처음 발표되었는데

전자 소자의 미발달로 인해 별로 주목을 받지 못하다가 최근에 반도체 소자의 발달과 디지털 신호처리(digital signal processing: DSP) 기술의 발달로 ANC(active noise control) 기술이 비약적인 발전을 이룩하게 되었다.

능동소음제어는 소음파를 평면파(plane wave)로 취급할 수 있는 1차원 음장에서의 문제와 평면파로 취급할 수 없는 3차원 공간에서의 문제로 나눌 수 있는데, 지금까지는 실시간 제어의 어려움 때문에 덕트, 엔진의 배기관(exhaust) 등 1차원 음향 공간에서의 소음제어^(5,6)가 주로 연구되어 왔으나 최근에는 DSP 기술의 발달로 자동차와 비행기의 내부에서와 같이 3차원 음향공간에서의 능동소음제어 문제^(7,8)와 소음 신호파의 특성 및 온도, 습도 등 주변환경이 변할 때도 잘 적응하는 1차원 및 3차원 음향 공간에서의 적응 능동소음제어 기법에 대한 연구^(6,9,10)가 활발히 이루어지고 있다.

Lueg의 시스템은 한개의 loudspeaker를 사용하기 때문에 monopole 시스템이라고 불리며 이 시스템이 잡음의 주파수에 영향을 받는 약점을 해결하기 위하여 두개 혹은 세개의 스피커를 사용하는 dipole 혹은 tripole 시스템이 제안되었다⁽⁵⁾. 그러나 이와 같은 시스

템은 스피커의 위치에 제한을 받기 때문에 최근에는 발달된 제어기술과 반도체 기술을 바탕으로 넓은 주파수 대역에서도 사용이 가능한 monopole 시스템을 많이 연구하고 있다^(1~3).

DSP 프로세서 등 고속연산이 가능한 프로세서의 발달로 적응제어기법을 이용한 덕트의 능동소음제어기와 능동형 머플러(active muffler)가 미국의 NCT(Noise Cancellation Technologies)사 등에 의해 실용화되고 있으며^(6,11) 3차원 문제에서도 ANC기법에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다^(7,8). 영국 Southampton 대학의 Institute of Sound and Vibration Research (ISVR)을 중심으로 비행기의 프로펠러, 자동차의 엔진⁽⁸⁾, 모터 등의 회전기에 의한 3차원 공간에서의 소음제어에 관한 연구⁽¹⁰⁾가 최근 10년간 활발히 이루어져 비행기 내부, 자동차 내부 등의 잡음제어에 괄목할 만한 성과를 이루었고 이를 이용한 승용차가 영국, 일본 등에서 생산되고 있으며 1991년에는 ANC 기법을 이용한 소리 없는 냉장고가 일본 Toshiba에 의해 시판되었다⁽¹²⁾.

현재의 연구동향을 보면 미국의 NCT사 및 Nelson Industry사의 Eriksson을 중심으로 엔진 배기, HVAC 덕트 및 공장의 굴뚝 등 1

차원 공간에서 음속이나 시스템의 특성 등이 변하는 경우에도 잘 적용하는 적응능동제어에 관한 연구가 이루어지고 있으며^(5,6,11) 영국의 ISVR을 중심으로 3차원 공간에 대한 소음제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있고^(7,8,10) 일본의 Toyota, Nissan, Toshiba 등을 중심으로 이의 실용화가 이루어지고 있는 추세에 있다⁽¹²⁾.

본 글에서는 엔진 배기, HVAC 덕트 및 공장의 굴뚝 등 1차원 음장에서의 능동소음제어 문제를 주로 다루고자 한다. 능동소음제어를 위한 적응 필터 알고리즘에 대해 알아보고 최근의 국내외에서 연구된 1차원 음장에서의 응용 사례들을 소개한다.

2. 능동소음제어시스템

2.1 능동소음제어의 기본원리

능동소음제어(active noise control, ANC)는 음파의 간섭 및 흡수의 원리를 이용한 것으로 Paul Lueg에 의해 처음 발표된 이후 별로 주목을 받지 못하다가 최근에 제어기술과 반도체사 및 디지털 신호처리기술의 발달로 능동소음제어시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

능동소음제어의 기본원리는 제어용 음원(secondary source)을 사용하여 제어신호를 발생시킴으로써 소음원(primary source)에서 발생된 소음신호를 상쇄시키는 것이다. 이러한 원리를 이용하여 구성된 능동소음제어 시스템은 그림 1과 같다.

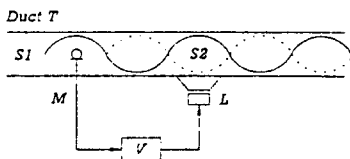


그림 1 능동소음제어의 기본원리

점 A에서 발생한 음향잡음은 덕트 T를 따라서 전파되어 마이크로폰 M에 감지된다. 이 감지된 음향잡음이 전기신호로 변환되어 제어기 V를 통하여 증폭된 후 상쇄소음원 L을 통하여 방출된다. 이때 상쇄소음이 원 소음에 비해 180° 위상 차이를 갖게 하기 위해서는 제어기 V에서 적절한 시간지연을 갖게 하여야 한다.

2.2 능동소음제어기법

능동소음제어기법은 전향기법과 캐환기법으로 분류할 수 있는데 캐환기법은 소음원에 대한 사전정보를 필요로 하지 않으나 소음 뿐만 아니라 모든 음향을 제거하므로 비행기나 소음이 심한 공장에 사용되는 헤드셋 등에 응용된다. 전향기법은 소음원에 대한 사전정보를 얻을 수 있을 때 사용할 수 있으며 다른 음향에 영향을 주지 않고 원하지 않는 소음만을 제거할 수 있어 자동차 내부의 소음제거나 덕트의 소음제거에 응용되고 있다.

그림 2는 전향능동소음제어 시스템의 블록선도를 나타낸 것이다.

전향능동소음제어 시스템은 적응 신호처리기법을 이용하여 실현할 수 있으며, 전향제어기로서 적응필터(adaptive filter)를 사용할 수 있다. 그림 2에서 $W(z)$ 는 제어필터이고 $C(z)$ 는 스피커의 입력과 센서출력 사이의 전달함수 즉 2차 경로 전달함수이며 $P(z)$ 는 소음원의 음향경로 전달함수 즉 1차 경로 전달함수이다. 그림 2에서 측정잡음이 없을 때 $e(k)$ 가 0이 되기 위

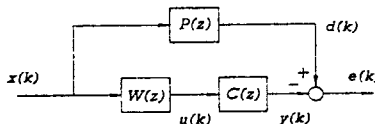


그림 2 전향능동소음제어 시스템의 블록선도

한 이상적인 필터는 다음과 같다.

$$W(z) = -\frac{P(z)}{C(z)} \quad (1)$$

여기서 제어필터 $W(z)$ 는 FIR (finite impulse response) 혹은 IIR(infinite impulse response) 구조 모두 사용될 수 있으나 음향캐환이 존재할 때에는 IIR구조가 더욱 효과적이며, 이상적인 필터의 극점이 z -평면상의 단위원 근처에 위치하는 경우 FIR필터의 차수가 매우 커져야 하므로 IIR필터가 훨씬 효과적이다^(6,9).

이 두 경우 모두 2차경로 전달함수 $C(z)$ 로 인하여 LMS 알고리즘과 같은 적응필터 알고리즘을 사용할 수 없다. 왜냐하면 LMS 알고리즘을 사용하기 위해서 필터출력 $u(k)$ 은 $d(k)$ 를 비교할 수 있는 신호가 요구되나 오차신호 $e(k)$ 은 $d(k)$ 과 $u(k)$ 의 차이가 아니라 $d(k)$ 과 $y(k)$ 의 사이의 차이므로 LMS 알고리즘에 $e(k)$ 를 적용해서 필터계수를 추정하면 알고리즘이 불안정해지거나 필터의 계수에 편이(based)가 생기게 되기 때문이다.

시스템이 선형이고 시스템과 제

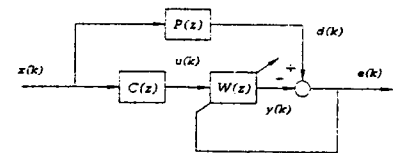


그림 3 변형된 능동소음제어 시스템의 블록선도

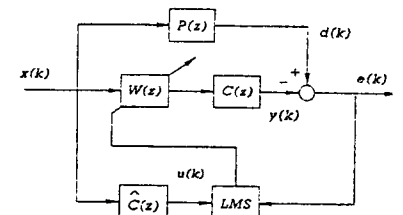


그림 4 Filtered-X LMS 알고리즘을 이용한 적응제어 시스템

어필터가 시불변이거나 시정수에 비해 천천히 변한다고 (slowly time-varying) 가정하면 그림 3과 같이 시스템의 구조를 변형할 수 있다.

만약 $C(z)$ 를 안다고 가정하면 Widrow에 의해 제안된 filtered-X LMS 알고리즘을 적용하여 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

여기서 $\hat{C}(z)$ 는 2차경로 전달함수를 추정된 전기적인 모델이다. 이때 필터의 파라미터벡터 $W(k)$ 는 다음과 같이 적응시킬 수 있다.

$$W(k+1) = W(k) - 2\mu e(k)x(k) \quad (2)$$

여기서 μ 는 수렴상수이고 $e(k)$ 는 오차신호, $x(k)$ 는 입력신호의 벡터이다. 만약 $C(z)$ 가 미지이거나 시변이라면 filtered-X LMS 알고리즘을 적용하기 전에 먼저 $C(z)$ 를 추정해야 한다.

3. 적응필터 알고리즘

3.1 연속추정기법 및 MMAC 알고리즘

전 장에서 언급한 바와 같이 적응필터 $W(z)$ 를 계산하려면 $C(z)$ 의 추정이 필요하므로 $C(z)$ 를 실시간 추정 기법(그림 5)이 Eriksen⁽⁴⁾에 의해 제안되어 대부분의 공조 시스템에서 사용되고 있으나 이 방법은 실시간 적응 필터의 구현에 많은 계산 양이 소요되므로 multi-pole 시스템에는 사용이 곤란하므로, 마이크로 프로세서의 계산 부담을 줄이고 시스템 전체의 강인성을 보장하는 방법으로 다중모델 적응 제어(MMAC; multiple model adaptive control) 기법⁽⁹⁾이 제안되었다.

그림 6은 MMAC를 이용한 능동소음제어 기법의 블록선도이다. 미

리 선정된 2차 경로 전달함수 모델 C_i 들 중에서 residual test를 이용하여 실제 2차 경로 전달 함수에 가장 가까운 것을 선정하게 함으로써 $C(z)$ 를 추정하는데 필요한 계산 양을 줄일 수 있고, 미리 안정된 모델을 선정함으로써 해서 전체 시스템의 강인성을 증가시킬 수 있으나, 2차 경로 전달 함수 모델을 잘 선정하기 위해서는 전체 시스템에 관한 정보를 사전에 알아야 하는 약점이 있다.

3.2 퍼지 LMS 알고리즘

LMS 알고리즘은 안정도와 수렴 특성이 수렴계수와 밀접한 관계가 있어 수렴계수의 적절한 선정이 매우 중요하다. 그러나 이의 적절한 선정은 매우 어려우며 안정성을 보장하기 위하여 수렴 계수를 고정하면 측정 잡음의 특성이 시간에 따라 변동할 경우 만족스런 성능을 얻기가 어렵다. 그리고 정규화된 LMS 알고리즘은 급격한 수렴 계수의 변동시에 알고리즘이 불안정

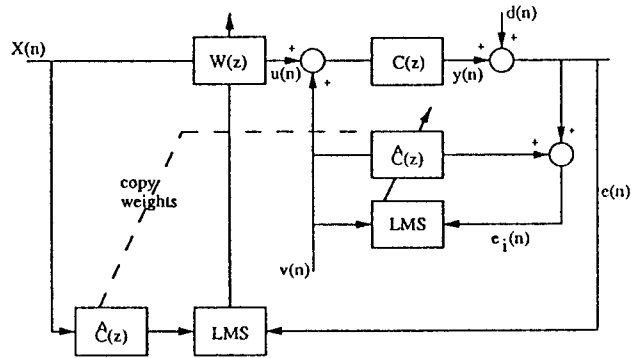


그림 5 연속 추정 기법

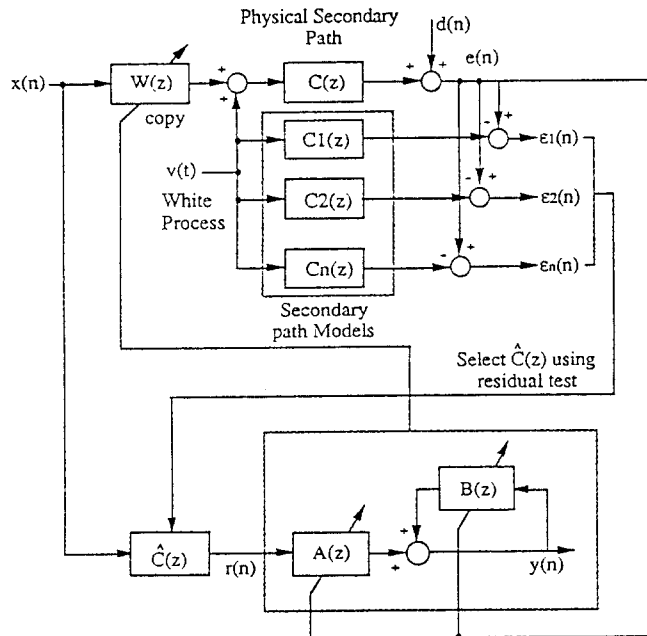


그림 6 다중모델 적응제어기법

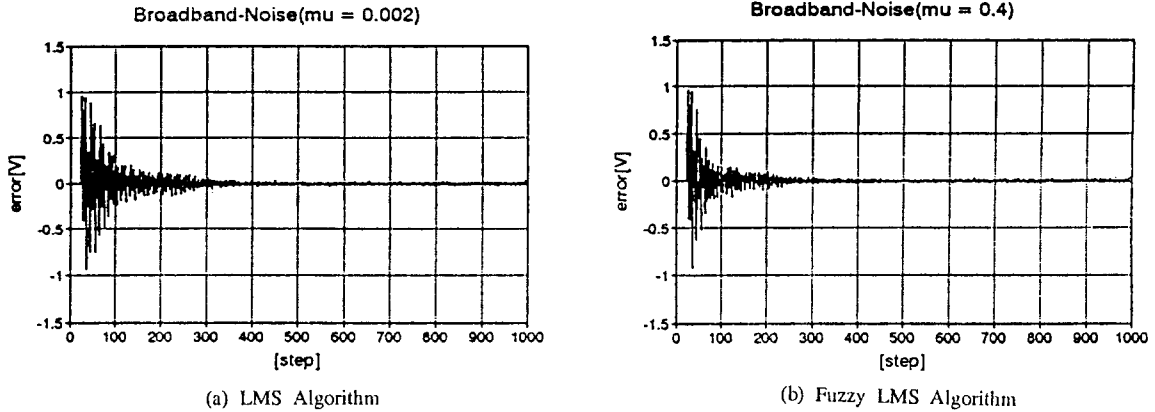


그림 7 퍼지 LMS 알고리즘을 이용한 능동소음제어 결과

해지는 문제점이 발생한다. 따라서 LMS 알고리즘의 안정도를 해치지 않고 수렴 속도를 향상시키는 연구들이 많이 발표되고 있으나 최적 수렴 계수의 선정은 필터의 차수, 계수의 초기치 및 입력의 조건등 복잡한 비선형 함수의 해로 주어지므로 사전 정보가 부족한 경우나 조건들이 시변일 경우에는 최적 선정이 어렵다.

최근에 퍼지 논리를 도입하여 적응 정도에 따라 안정도를 해치지 않고 수렴 속도가 향상되는 수렴 계수 갱신식이 제안되었다⁽¹³⁾. 즉, LMS 알고리즘의 안정도와 수렴특성을 향상시키기 위해 수렴 계수를 퍼지 논리를 이용하여 LMS 알고리즘의 오차응도에 따라 수렴 계수를 적절히 가변시키는 퍼지 LMS 알고리즘이 제안되었으며, 이를 적용 능동소음제어 시스템에 적용하였다.

퍼지 LMS 알고리즘은 Chelaru 등⁽¹⁴⁾이 LMS 알고리즘의 수렴 계수를 퍼지 알고리즘으로 갱신하는 정규화된 LMS 알고리즘 구조로 된 퍼지 LMS 알고리즘을 제안한 바 있으나, Chelaru의 알고리즘은 퍼지 추론 규칙에 추정 오차만 고려하고 추정 오차의 변동(오차응도)을 고려하지 않기 때문에, 급격

한 수렴 계수의 변동에 따라 LMS 알고리즘의 안정도가 보장되지 못하는 경우가 있을 수 있어 Chelaru 알고리즘의 약점을 보완하기 위하여 추정 오차의 변동도 고려하는 새로운 형태의 수렴계수 갱신식을 제안하였으며 이를 덕트에서의 능동소음제어 문제에 적용한 결과가 그림 7과 같다.

음향 케환이 존재하고 협대역 소음원인 경우에 고정적인 LMS 알고리즘 및 퍼지 LMS 알고리즘으로 능동 소음 제어를 행한 결과, 전체적으로 약 10~15[dB]의 감쇠 효과가 있었고, 제안한 퍼지 LMS 알고리즘의 소음감쇠 성능이 기존의 알고리즘과 비슷함을 알 수 있다. 기존의 LMS 알고리즘은 수렴 계수의 조정을 시행 착오 방법으로 할 수 밖에 없으나, 제안한 퍼지 LMS 알고리즘은 수렴계수의 조정이 필요없는 장점을 가지며 LMS 알고리즘 적용시 수렴계수들은 여러번의 실험을 통해 가장 수렴 특성이 빠른 계수로 선정하였으므로 실제 상황에서는 적용이 매우 어렵다. 광대역 소음원인 경우나 소음의 특성이 변하는 경우 등 실제 응용시에는 제안한 퍼지 LMS 알고리즘이 훨씬 좋은 특성을 보이리라 기대된다.

3.3 하이브리드형 능동소음제어의 설계

전향능동소음제어시스템은 기준 또는 검출센서와 오차센서를 사용하여 광대역 및 협대역의 주파수 특성을 갖는 소음을 감쇠하는 경우에 널리 사용되고 있다. 이때 기준 센서는 제거해야 할 주 소음신호를 측정하는 반면 오차 센서는 시스템의 성능을 모니터링 한다. 그러나 전향제어시스템은 제어용 음파가 기준센서로부터 소음원 방향으로 역전 됨으로써 음향 케환이 발생되며 기준신호와 상관 관계를 가지는 주 소음원 성분만을 제거할 수 있다.

케환능동소음제어시스템은 오차 센서만을 사용하기 때문에 기준센서를 제거함으로써 케환 문제를 해결할 수 있는 반면 예측 가능한 소음만을 제거할 수 있다.

본 절에서는 전향 제어 시스템과 케환제어시스템을 혼합하여 구성한 하이브리드형 능동소음제어 시스템(HANC: hybrid active noise control)을 소개한다. HANC 시스템에서 소음원 근처에 위치한 기준센서는 전향제어기의 기준신호를 제공하며 제어 스피커의 다운스트림에 위치한 오차센서에 의해서 검출된 잔차소음은 케환 제어기의 기준

신호로 사용 될 뿐만 아니라 전향과 궤환 제어기의 파라미터를 적용시키는 경우에도 사용된다.

그림 8은 궤환 및 전향적응제어를 이용하여 구성한 HANC 시스템을 나타내며, 이때 기준 입력 센서로서는 회전속도계나 가속도계 등과 같은 비 음향센서의 사용이 가능하다.

그림 9는 filtered-X LMS 알고리즘^(16,17) 및 1차소음 재발생(primary noise regeneration) 원리⁽¹⁸⁾에 기초하여 설계된 HANC 시스템을 나타낸 것이며, 스피커의 제어 입력신호는 전향필터 $W_a(z)$ 와 궤환 필터 $W_b(z)$ 의 출력의 합으로 주어진다. 제안된 HANC 시스템에서 제어필터 $W(z)$ 는 두개의 입력신호를 갖는다. 즉 기준신호 x

(k) 와 추정된 소음신호 $\hat{d}(k)$ 가 제어 필터로 입력된다.

$C(z)$ 는 제어음원에서 오차센서에 이르는 오차경로 전달함수를 나타낸다. 그러나 제어필터의 출력 부분에 $C(z)$ 가 존재하기 때문에 LMS 알고리즘을 직접 적용할 수 없으므로 filtered-X LMS 알고리즘을 이용하여 그림 9와 같이 시스템을 변형해야 한다.

$A(z)$ 는 1차 경로 전달함수를 나타내며, 오차경로 전달함수 $C(z)$ 는 오프-라인 혹은 온-라인 모델링 기법을 사용하여 추정할 수 있다. 그림 9에서 $\hat{C}(z)$ 는 오프-라인 기법으로 모델링된 오차경로에 대한 FIR 추정치를 나타낸다. Filterd-X LMS 알고리즘을 제안된 시스템에 적용 시킴으로써 필터링된 기

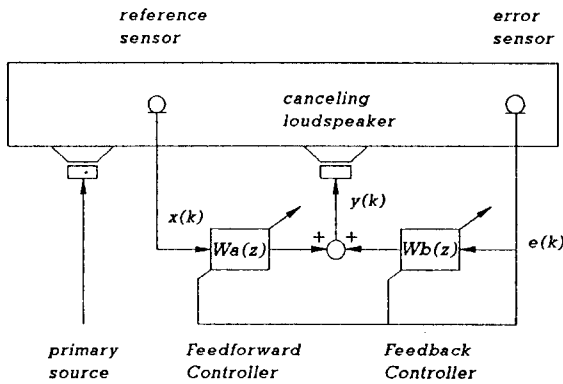


그림 8 하이브리드형 능동소음제어 시스템의 구조

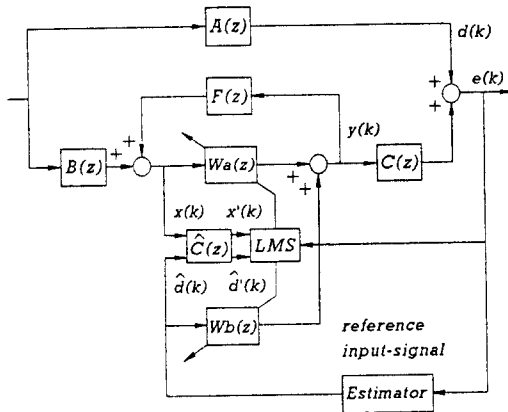


그림 9 Filtered-X LMS 알고리즘을 이용한 HANC 시스템의 표현

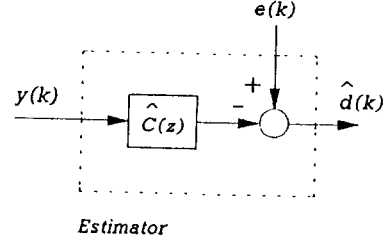


그림 10 기준 입력신호를 발생시키기 위한 추정기

준 입력신호는 적응필터 $W_a(z)$ 와 $W_b(z)$ 의 파라미터를 적응시키는데 사용된다.

그림 10은 궤환 필터의 입력이 되는 기준 입력신호를 발생시키기 위한 추정기를 나타낸다.

4. 적용 사례

4.1 Nelson/Digisonix dX-30 Digital Sound Controller

공조 시스템에 능동소음제어 기법을 적용한 예로서 Nelson Industries에서 개발한 Nelson/Digisonix dX-30 Digital Sound Controller를 소개한다⁽¹⁵⁾.

설치시 전체적인 외관은 그림 11과 같으며 적응필터 설계를 위한 적응 알고리즘으로는 연속 추정 알고리즘을 사용했다. 적응필터로는 음향궤환의 영향을 상쇄시키기 위하여 IIR 필터를 사용했으며, Texas Instruments 사의 digital signal processor TMS 32010을 이용하여 이를 실현했다.

적응필터를 사용하였으므로 적용하는 곳에 따른 data calibration이나 parameter tuning이 필요 없으며 소음신호의 특성이 변할 때도 잘 적응하는 특성을 가지고 있다. dX-30 시스템을 실제 적용하여 실험한 결과 flow가 없을 때, pure tone에 대해서는 50 dB, random noise의 경우는 30~35 dB의 소음 감쇠를 얻었다. 그림 11과 같이 실

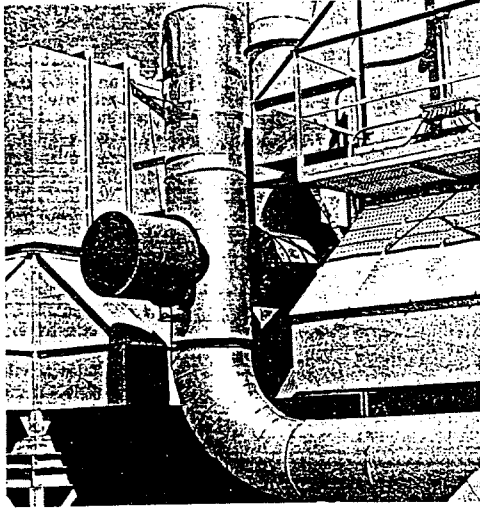


그림 11 Delson/Digisonix dX-30 시스템의 외관

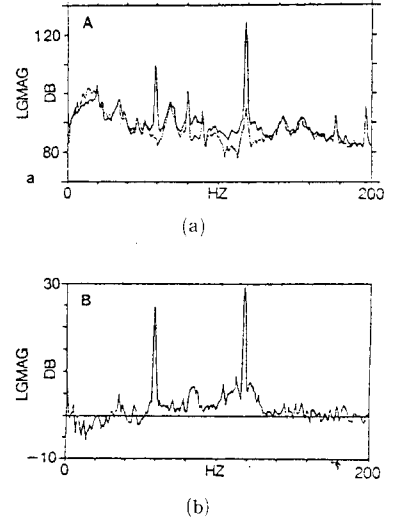
제 공장에 설치하여 운전을 한 경우에는 그림 12에서 보듯이 적용 공장에서 가장 문제가 되는 59 Hz 와 118 Hz의 소음에 대해 각각 25 dB 및 30 dB의 소음감쇠를 얻었다.

2.2 엔진 배기관에서의 능동소음제어

엔진 배기관 등의 소음은 대부분이 저주파이므로 능동소음기법을 쓰면 좋은 효과를 얻을 수 있다. 지금까지의 연구 결과에 따르면 자동차의 머플러를 능동형 머플러로 대체할 경우 15 dB 정도의 소음감쇠와 고속도로에서는 2~3%의 연료절약과 시내 주행에서는 5%의 연료가 절약되는 효과를 얻은 것으로 발표되었다⁽¹¹⁾.

표 1에 미국의 Noise Cancellation Technologies사에서 캐나다의 Manitoba Hydro 및 BC Hydro의 대형 디젤엔진의 배기관에 ANC 기법을 적용한 결과를 보였다. 표 1에서 보듯이 10 dB 내외의 overall noise reduction 및 17~20 dB의 tonal noise reduction을 얻을 수 있었으며 표 2에서 보듯이 2% 내외의 에너지 절약 효과를 얻

어 13개월 만에 설치비를 회수할 수 있었다. 뿐만 아니라 CO₂ 배출도 줄일 수 있어 환경 개선에도 크게 이바지할 수 있으리라 기대된다.



(A) Sound pressure spectra,
Solid line : ANC on,
Dotted line : ANC off
(B) Noise reduction with dX-30
그림 12 dX-30 시스템의 소음감쇠 효과

표 1 능동형 머플러와 수동형 머플러의 비교

Active industrial silencer reduction of prime power exhaust noise				
	Overall exhaust noise reduction (dB)	Tonal exhaust noise reduction (dB)	Fuel savings (gallons/year)	CO ₂ emissions reduction (tons/year)
Manitoba hydro 425 kW generator	12	17	5.256	61
BC hydro 900 kW generator	7.5	20	9.084	270

표 2 B.C. Hydro(900 kW prime power diesel generating unit)에 NCT의 능동형 머플러를 적용시킨 결과

Average amount of fuel used per year	369,726 gallons Imp.
Price of fuel(including shipping & storage)	\$ 1.33 CAD/gallon
Average year fuel costs	\$ 491,736 CAD
Price of muffler(not installed)	\$ 12,000 CAD
ANC average fuel savings	2.23 %
Average payback period for B.C. hydro	13 months
Five year B.C. hydro fuel savings	\$ 54,829 CAD

CAD: Canada Dollar

덕트 및 배기관 등의 소음은 대부분이 회전기에 의해 발생하는 200 Hz 미만의 저주파이므로 능동소음 기법을 쓰면 좋은 효과를 얻을 수 있다. 지금까지의 연구 결과에 따르면 HVAC시스템에서는 20 dB 내외의 소음감쇠 효과와 30% 내외의 에너지 절약되며, 자동차의 머플러를 능동형 머플러로 대체할 경우 15 dB 정도의 소음 감쇠와 고속도로에서는 2~3%의 연료절약과 시내 주행에서는 5%의 연료가 절약되는 효과를 얻은 것으로 발표되었다.

5. 맺 음 말

본 글에서는 일차원 음장에서의 능동소음제어를 위한 적응필터 알고리즘들과 이의 응용 예를 주로 다루었다. 앞으로의 세기는 환경관련 기술이 산업화의 앞날을 좌우할 수 있는 핵심기술이 될 것이므로 능동소음제어에 관한 연구가 더욱 활발해지리라 예상된다.

공조 시스템에서의 능동소음제어 기술은 미국, 유럽 등지에서 상품화 된 지 10여 년이 지났고 국내에서도 수 년전에 ANC Technology사에서 상품화를 하였으나, 아직은 가격이 비싸고 덕트의 크기나 소음원의 특성 등에 따라 성능이 제한을 받고 있어 방송국, 공연장 등 소음에 민감한 곳에서 부분적으로 사용되고 있을 뿐이나 앞으로 프로세서의 가격이 싸지고 좀 더 강인성이 보장된 알고리즘을 개발하여 성능을 향상시킬 경우 많은 응용이 기대된다. 엔진의 배기관에의 응용은 이제 시작 단계에 있으며 발전소 등과 같은 대용량 엔진에서는 어느 정도 실용성이 입증되고 있으나 자동차 엔진 등과 같은 소용량 엔진에서는 시스템의 가격이 지나치게 비싸 아직은 적용하지 못하고

있어 저 가격화에 대한 연구가 필요하다.

능동소음제어 분야는 미국, 영국, 일본 등 선진국에서도 시작한 지 10년 내외되는 신기술 분야로 실제 플랜트에 응용되고 상용 제품을 생산하기 시작한 것은 불과 수년 밖에 안되었으므로 앞으로 더욱 연구가 진행된다면 더욱 좋은 결과가 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) R. R. Leitch and M. O. Tokhi, 1987, "Active Noise Control Systems," IEE Proc., Vol. 134, Pt.A, No. 6, pp. 525~546.
- (2) 남현도, 1993, "능동소음제어 기법을 이용한 자동차 내부 소음 제어," 한국음향학회지, 제12권, 제3호, pp. 76~82.
- (3) 남현도, 정찬수, 1995, "능동소음제어기술의 현황 및 추이," 대한전기학회지, 제44권, 제10호, pp. 33~39.
- (4) P. Lueg, 1934, Process of Silencing Sound Oscillations, US Patent 2 043 416.
- (5) M. A. Swinbanks, 1973, "The Active Control of Sound Propagation in Long Duct," J. of Sound and Vibration, Vol. 27, pp. 411~436.
- (6) L. J. Eriksson, M.C. Allie and P.A. Greiner, 1987, "The Selection and Application of an IIR Adaptive Filter for use in Active Sound Attenuation," IEEE Tr. of ASSP, Vol. ASSP-35, No. 4, pp. 433~437.
- (7) S. J. Elliott, I. M. Stothers and P.A. Nelson, 1987, "A Multiple Error LMS Algorithms and Its Application to the Active Control of Sound and Vibration,"

IEEE, Tr. of ASSP, Vol. ASSP-35, pp. 1423~1434.

- (8) S. J. Elliott, I. M. Stothers, P. A. Nelson et al, 1988, "Active Control of Engine Induced Noise Inside Cars," Proc. Inter-Noise, Avignon, pp. 987~990.
- (9) H. D. Nam and S. J. Elliott, 1995, "Adaptive Active Attenuation of Noise Using Multiple Approaches," Mechanical Systems & Signal Processing, Vol. 9, No. 5, pp. 555~567.
- (10) 남현도, 안동준, 1994, "회전기에 의한 소음제거를 위한 능동소음제어-3차원 폐공간의 경우," 대한전기학회논문지, 제43권, 제9호, pp. 1553~1562.
- (11) J. N. Denenberg, 1992, "Anti-Noise; Quietening the Environment With Active Noise Cancellation Technology," IEEE Potentials, Vol. 11, No. 2, pp. 36~40.
- (12) M. Kato and S. Nakayama, 1992, "DSP: the Key to the Next Generation of Consumer Electronics," Nikkei Electronics, Vol. 1, No. 4, pp. 38~43.
- (13) 남현도, 안동준, 강택동, 김균태, 1995, "일차원 음장에서의 능동소음제어를 위한 Fuzzy LMS 알고리즘," 한국자동차제어학술회의 논문집, pp. 953~956.
- (14) M. Cheralu, H. N. Tecodorescu and C. Dumitrascu, 1990, "A Fuzz LMS Algorithm," Proc. Int. Conf. on Fuzzy Logic & Neural Networks, pp. 107~110, Japan.
- (15) L. J. Eriksson and M. C. Allie, 1988, "A Practical System for Active Attenuation in Ducts," Sound and Vibration, Vol. 22, No. 2, pp. 30~34.