

공조덕트용 능동소음제어 장치

이 종 식

한국해사기술연구소 연구원



●1956년생
●음향 신호처리를 전공하였으며, 능동소음제어 및 수중음향기기 개발에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

종래에는 공조덕트 내에 소음의 감소를 위하여 주로 흡음, 차음 등의 기법을 사용하여 왔다. 그러나 이러한 종래의 소음감소 대책은 500Hz 이상의 고주파 영역에서는 좋은 소음감소효과를 보여주나, 500Hz 이하의 저주파 영역에서의 소음감소 효율이 좋지 않음은 널리 알려진 사실이다. 특히 공조덕트 내의 소음은 흡음, 차음 등 종래의 소음 감소 대책으로는 감소시키기 어려운 500Hz 이하의 저주파 영역에 대부분의 소음 에너지가 집중되어 있는 특성을 갖고 있으므로, 이러한 저주파수 영역에서의 소음 감소를 위한 기술의 개발이 요구되어 왔다.

500Hz 이하의 저주파 소음은 각종 구조물의 진동을 야기시켜 정밀 작업이 요구되는 곳에서는 작업 환경을 파괴하고, 작업자의 심리를 불안하게 하여 작업능률을 떨어뜨릴 뿐만 아니라, 청정 환경이 요구되는 곳에서의 소음감소를 위하여 흡음재료를 사용할 경우 흡음재료로부터 떨어져 나오는 미세분에 의해 청정환경의 보존이 어려워 진다. 이러한 종래의 소음감소 대책의 저주파수 영역에서의 단점을 보완하기 위하여 소음을 그 소음과 동일한 음압을 갖으며 위상차가 180도인 인위적인 음파로 상쇄시키는 기술인 능동소음 제어기술(active noise

cancellation technique)이 개발되고 있다.

이 글에서는 공조덕트 또는 이와 유사한 음향환경에 적용할 수 있는 능동소음제어 기술, 실제구현방법, 성능 및 국내외 개발현황에 대해 논하였다.

2. 능동소음제어 장치 국내외 기술 현황

1936년 미국의 Paul L.이 능동소음제어 기술에 대한 특허(U.S.Pat. No.2,042,416)를 세계 최초로 출원한 후 현재까지 수 많은 연구가 진행되어 매년 수백 편의 논문이 발표되고 수십 건의 특허가 출원되고 있다. 특히 1980년대 이후 디지털 신호처리기술 및 전자산업의 급격한 발전에 힘입어 능동소음 제어 기술의 실용화, 상품화가 급속히 진행되어 왔다. 현재까지 상품화 발표된 공조덕트용 능동소음제어장치중 두 가지 중요한 예를 들면 ① 미국 Digisonix사의 디지털 소음제어시스템과 ② 일본 Hitachi 플랜트 건설사의 전자소음(電子消音) 시스템이 있다.

이 외에 상품화되어 있는 능동소음제어장치로는 미국의 Noise Cancellation Technologies사의 자동차 배기계용 능동소음제어시스템, 일본 Toshiba사의 냉장고용 능동소음제어시스템 등이 있다.

국내에서는 아직 상품화되어 있는 능동소음제어시스템은 없으나 1980년대 후반부터 능동소음제어에 대한 학계 및 산업계의 관심이 높

아져 현재 매우 활발한 연구가 진행되고 있다. 국내 연구개발 현황을 살펴보면 가전업계에서는 냉장고 및 에어컨 소음제어용, 자동차업체에서는 배기계 및 자동차실내소음제어용, 공조설비업체에서는 공조덕트용 능동소음제어기 개발을 자체적 또는 대학교 및 국책연구소와 공동으로 수행하고 있거나 계획중인 것으로 알려져 있다.

한국기계연구소 부설 해사기술연구소는 1989년부터 ANC Technologies사와 공조덕트용 능동소음제어기 공동개발에 착수하여 1990년 말에 시제품제작에 성공하고, 현재 상품화 개발을 수행하고 있다.

3. 공조덕트 능동소음제어 이론

3.1 기본원리

그림 1은 공조덕트용 능동소음제어장치의 기본원리를 보여주고 있다. 공조덕트로 전달되는 소음의 발생원인 송풍기 근처에 마이크로폰(탐지 마이크로폰)을 설치하여 송풍기로부터 발생하는 소음의 특성(x)을 측정하여 소음이 탐지 마이크로폰에서 제어스피커 설치위치까지 진행되는 동안에 능동소음제어기에서 덕트내 음향 특성(음속, 풍속, 반향 등)을 고려한 신호처리를 수행하여 제어스피커에 원래의 소음과 위상차가 180도인 신호(y)를 공급하여 제어스피커 앞부분에서 원래소음과 상쇄음파가 합성되어 제어스피커 이후 덕트내에서의 소음이 감소될 것이다. 그러나 실제의 경우 상쇄음파 발생기

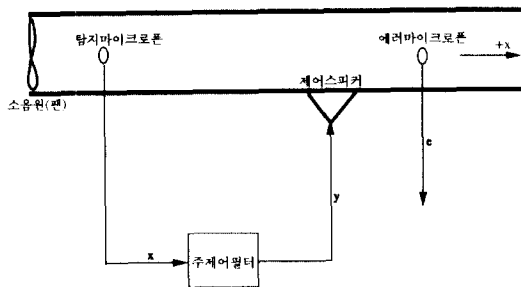


그림 1 공조덕트용 능동소음제어장치 기본원리

로부터 방사된 상쇄음파가 원래 소음의 진행방향(그림 1의 $+x$ 방향)뿐만 아니라 소음원인 송풍기쪽($-x$ 방향)으로도 진행되어, 결과적으로 탐지 마이크로폰에는 소음원인 송풍기에서 발생된 소음뿐만 아니라 제어스피커에서 방사된 음파도 측정될 것이다. 이러한 현상을 음향 피드백현상(acoustic feedback)이라 부르며, 이 현상이 발생할 경우 능동소음제어 시스템의 성능이 급격히 감소하고 제어 시스템이 불안정하게 된다. 이러한 음향 피드백현상을 감소시키기 위해 여러 가지 방법이 제안되어 왔으며, 그림 2, 3, 4는 대표적인 음향피드백 제거 방법을 보여 주고 있다.

그림 2⁽¹⁾는 두 개(또는 그 이상)의 스피커와 시간지연장치(T)를 이용하여 제어스피커로부터 방사된 상쇄음파가 제어대상 소음의 진행방향($+x$ 방향)으로만 전파되도록 설치하여 상쇄음파가 탐지 마이크로폰에 의해 다시 측정되지 않도록 하는 방법을 보여주고 있다.

이와 같이 지향성을 갖는 스피커 배열을 사용할 경우 상쇄음파가 탐지센서에 탐지되는 음향피드백(acoustic feedback)현상을 근본적으로 감소시켜 피드백 루프(feedback loop)에 의한 능동소음 제어기의 발산현상을 방지할 수 있으나 요구되는 정밀도의 지향성을 갖는 스피커 배열의 설치가 매우 까다롭고, 설치 및 제작 비용이 많이 들어, 최근에는 설치가 간편하고 제작 및 설치비용이 저렴한 무방향성 스피커 1개를 사용하고 음향피드백현상은 능동소음제어 프로그램에서 보상해주는 방법이 많이 사용되고 있다.

그림 3⁽²⁾은 무방향성 스피커 1개를 사용하고, 이 경우 발생하는 음향피드백현상을 능동소음제어 프로그램내에서 음향피드백 보상 필터(F)를 이용하여 제거시키는 능동소음제어기법을 보여주고 있다. Digisonix사의 디지털 소음제어 시스템과 한국해사기술연구소에서 개발한 공조덕트용 능동소음제어 시스템은 이방법에 기초를 두고 있다.

그림 4⁽³⁾는 제어스피커에서 동일한 거리만큼

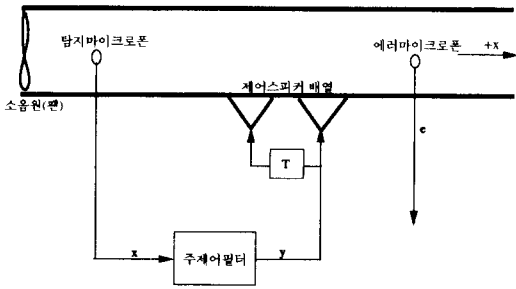


그림 2 지향성 스피커배열을 이용한 능동소음제어 기법

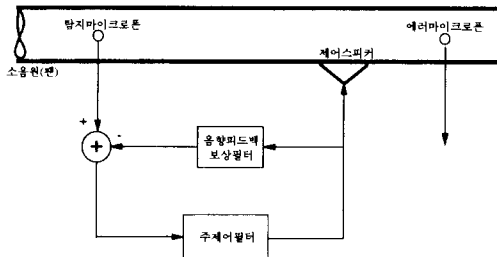


그림 3 음향피드백 보상 필터를 이용한 능동소음제어 기법

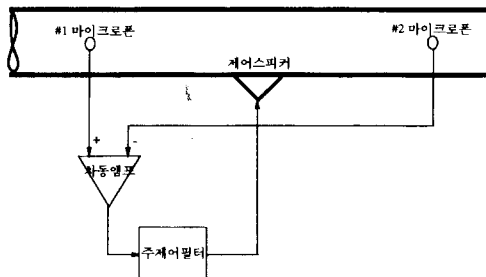


그림 4 2중 감지 마이크로폰법을 이용한 능동소음제어 기법

떨어진 위치에 두 개의 마이크로폰을 설치하여 두 개의 마이크로폰에서 측정된 소음의 차이를 이용하여 음향피드백현상을 제거하는 방법으로 일본의 Hitachi 프랜트사의 전자소음시스템이 채택하고 있는 방법이다.

4. 개발된 능동소음제어장치의 구성 및 성능

그림 5는 한국해사기술연구소와 NAC Tech-

nologies사가 공동 연구개발한 공조덕트용 능동소음제어 장치의 기본 작동블럭도를 도시한 것이다.

송풍기 등의 소음원에서 발생한 덕트내 소음은 탐지 마이크로폰에 의해 탐지되어 능동소음제어 프로그램에 입력되며, 이 능동소음제어 프로그램은 주어진 음향환경에 적합한 신호처리를 수행하여 소음상쇄를 위해 필요한 신호를 제어스피커에 공급한다.

능동소음제어 프로그램은 주어진 음향환경을 모델링하기 위한 각종 필터(C와 F)들을 포함하고 있으며, 이러한 필터들의 모델링 오차 및 음향환경 및 입력소음 특성의 시간에 따른 변화 등의 이유로 소음의 완전한 상쇄가 일어날 수 없으므로, 이 글에서 제시한 능동소음제어 방법은 이러한 변화에 대처할 수 있도록 입력소음 중 상쇄음파에 의해 상쇄되지 않은 부분을 다시 에러마이크로폰으로 탐지하여 이 에러신호를 능동소음제어 프로그램에 피드백(feedback)시키는 적응 필터기법(adaptive filtering)을 사용하였다.

음향피드백 보상필터(F)는 무방향성 제어스피커를 사용할 경우 발생하는 음향피드백(acoustic feedback)현상, 즉 제어스피커에서 생성된 상쇄용 음파가 탐지 마이크로폰에 다시 탐지되는 현상을 보상해 주기 위한 필터로서 피드백 루프(feedback loop)현상에 의한 능동소음제어 계통의 발산을 방지해 준다.

에러경로 보상필터(C)는 제어스피커로부터 에러마이크로폰 사이의 음향환경을 모델링하는 필터로서 안정성이 보장되는 FIR 형태를 갖는

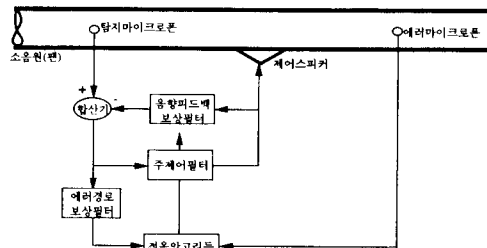


그림 5 개발된 능동소음제어장치의 작동블럭도

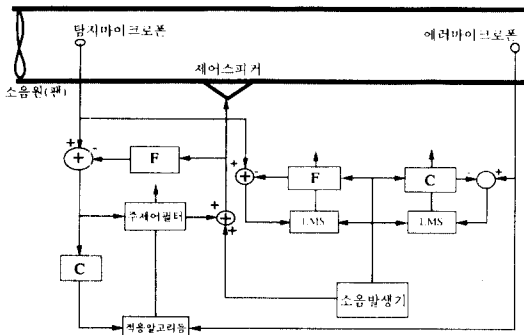


그림 6 온라인 LMS 적응시스템 인식을 이용한 능동소음제어계통

다. 음향피드백 보상과정을 거친 소음신호는 주제어필터(W)에 입력되며 이 주제어필터는 제어스피커에 상쇄 음파신호를 공급한다.

에러경로 보상필터 및 음향피드백 보상필터의 특성은 능동소음제어 계통 작동전에 여러 가지 오프라인 시스템(off-line system identification) 인식기법을 이용하여 구할 수도 있으나, 능동소음제어장치 작동 전후의 덕트내 음향환경의 변화 및 시간의 흐름에 따른 마이크로폰, 제어스피커 및 소음원 등의 특성변화에 대처할 수 있도록 하기 위하여 그림 6에 보여진 것과 같이 능동소음제어장치 작동중 덕트음향특성을 LMS 적응시스템 인식 기법을 이용하여 온라인(on line)으로 추정하는 방법을 개발하였다.

4.1 고차모드 소음제어를 위한

적응필터기법⁽⁴⁾

그림 2와 3에서 보여준 바와 같은 종래의 능동소음제어 방법의 경우 대부분 평면파로 진행되는 소음의 제어에 국한되어 있다. 고차모드로 진행되는 소음의 제어를 위해 그림 2의 능동소음 제어 계통을 병렬로 합성한 방법이 발표되었다.⁽⁵⁾ 이 방법의 경우 동수의 에러마이크로폰과 제어스피커를 짝을 지어 사용하며 각 제어스피커는 그와 짝이 되는 에러마이크로폰 및 탐지마이크로폰에 의해서만 제어된다. 이 경우 서로 짝지어지지 않은 에러마이크로폰과

제어스피커 사이에 존재하는 상호연관현상(cross coupling)을 해결하기 어려워 능동소음제어 성능이 저하된다. 이 글에서 제안한 능동소음제어기법의 경우 에러마이크로폰 및 제어스피커의 개수를 증가시켜 고차모드로 진행되는 소음도 제어할 수 있는 시스템으로 확장시킬 수 있으며, 모든 마이크로폰의 신호가 주제어필터에서 종합적으로 처리되어 위에서 언급한 바와 같은 상호연관 현상에 의한 성능저하가 일어나지 않는다. 이 절에서는 고차모드 제어를 위한 적응필터 제어기법에 대하여 간단히 기술하였다.

K개의 에러마이크로폰과 M개의 제어용 스피커가 있을 경우 k번째 에러마이크로폰으로부터의 출력신호를 $e_k(n)$ 이라 하면 이 에러신호는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$e_k(n) = d_k(n) + \sum_{m=1}^M \sum_{j=0}^{I-1} c_{kmj} \sum_{i=0}^{J-1} w_{mi} x(n-i-j) \quad (1)$$

여기서, $d_k(n)$ 는 소음원만 작동시의 k번째 에러 마이크로폰으로부터의 출력신호, M은 제어용 스피커의 개수, I는 주제어필터의 차수, J는 에러경로보상필터의 차수, c_{kmj} 는 에러경로보상필터 계수, w_{mi} 는 주제어 필터 계수, $x(n)$ 는 입력신호를 나타낸다.

적응 필터의 적응기술을 식 (2)같이 표시되는 에러 신호 자승의 합의 기대치 J를 최소화하는 것으로 정하면 다음과 같다.

$$J = E \left[\sum_{k=1}^K e_k^2(n) \right] \quad (2)$$

이 때 J는 주제어 필터 W의 계수에 대해 이차 함수의 형태를 갖으므로 J의 값을 최소화시키기 위한 최적 필터계수는 J값의 필터계수에 대한 경사(식 (3))를 이용하여 식 (4)와 같은 적응필터 알고리즘을 고안할 수 있다.

$$\frac{\partial J}{\partial W_{mi}} = 2E \left[\sum_{k=1}^K e_k(n) \frac{\partial e_k(n)}{\partial W_{mi}} \right]$$

$$= 2E \left[\sum_{k=1}^K e_k(n) \sum_{j=0}^{J-1} c_{kmj} x(n-i-j) \right] \quad (3)$$

$$w_{mi}(n+1) = w_{mi}(n) - \alpha \sum_{k=1}^K e_k(n) \sum_{j=0}^{J-1} c_{kmj} x(n-i-j) \quad (4)$$

여기서, α 는 적응률(adaption rate)이며, 이것은 일종의 확률구배 적응 알고리즘(stochastic gradient adaptive algorithm)이며 윌터드 XLMS 알고리즘이라 부르기도 한다.

4.2 실제구현 및 실험 결과

그림 7은 능동소음제어장치의 실제 구현을 위한 하드웨어 구성도를 보여주고 있다. 전치

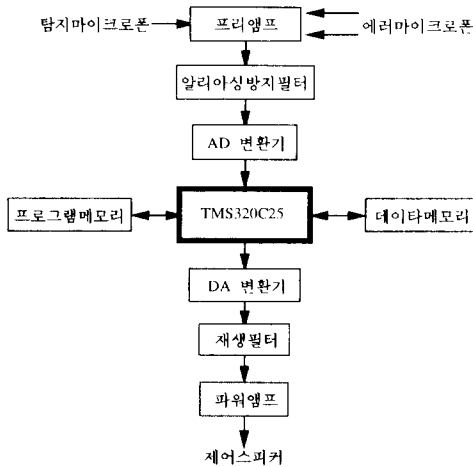


그림 7 능동소음제어장치의 하드웨어 구성도

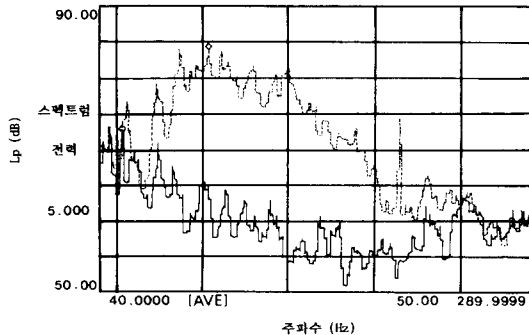


그림 8 개발된 능동소음제어장치의 성능(풍속 20m/s, 덕트단면 120cm×50cm)

앰프(pre-amp)을 통과한 아날로그 신호는 A/D변환기를 이용하여 디지털 신호로 변환되어 디지털 중앙처리장치에 입력된다. 전치 앰프에서 출력된 아날로그 신호는 A/D변환기에 입력되기 전에 알리아싱 방지필터(anti-aliasing filter)를 통과한다.

중앙처리장치에 입력된 디지털 신호는 중앙처리장치의 프로그램 메모리 및 데이터 메모리에 저장되어 있는 능동소음제어 프로그램에 의해 분석처리되며 중앙처리장치는 상쇄음과 발생을 위한 디지털 신호를 출력한다.

중앙처리장치에서 출력된 상쇄음과 디지털 신호는 D/A변환기에 의해 아날로그 신호로 변환되며, 디지털 신호의 아날로그 신호로의 변환시 발생하는 불필요한 고주파 성분을 제거하기 위한 재생필터(reconstruction filter)를 통과하게 되며, 이 재생필터의 출력은 다시 파워앰프에 의해 제어스피커를 작동할 수 있도록

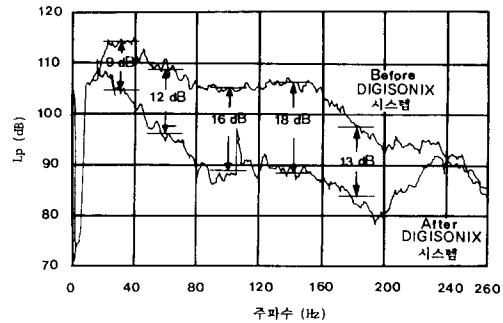


그림 9 Digisonix사 제품의 성능(실험조건 알 수 없음)

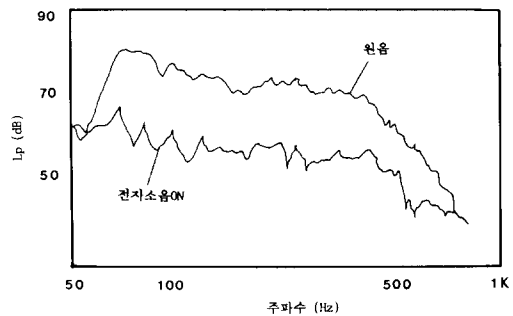


그림 10 Hitachi 플랜트사 제품의 성능(풍속 10m/s, 덕트단면 35cm×35cm)

증폭된다.

현재 개발되어 있는 시스템의 경우 중앙처리 장치로 TI사의 DSP용 전문 chip TMS320C25를 사용하였으며 128point FIR필터를 사용할 경우 약 3000Hz까지의 실시간 처리가 가능하다. 개발된 시스템은 단면이 120cm×75cm인 실제 건물용 덕트에서 실험되었으며, 그림 8은 풍속이 20m/s일 경우의 능동소음제어장치의 소음감소 효과를 보여주고 있으며, 그림 9와 그림 10은 각각 Digisonix사 제품과 Hitachi 프랜트 건설사 제품의 성능을 보여준다.

5. 맺음말

이 글은 평면파 소음의 감소 성능을 향상시키고 고차모드로 전달되는 소음의 감소도 가능한 공조덕트용 능동소음제어장치의 개발에 대하여 논하였으며, 실험결과 개발된 능동소음제어장치의 성능 및 안정성이 기 상품화되어 있는 외국의 제품에 비해 손색없이 뛰어난을 발견하였다.

능동소음제어장치는 앞으로 고도의 청정, 정숙환경이 요구되는 반도체공장, 방송국 등에 폭넓은 적용이 기대되며, 기존의 흡음처리 대책보다 설치, 보수 및 유지가 간편하다. 특히

덕트내 주요소음원인 블로워의 소음특성이 저주파 부근에 에너지가 집중되어 있음을 고려할 때 능동소음제어기술의 공조덕트내 소음제어에의 적용은 매우 효과적이며 경제적인 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Swinbanks, M.A., 1973, "The Active Control of Sound Propagation in Long Ducts," JSV. 27(3), pp. 411~436.
- (2) Erikson, L.J., 1987, "Acitive Sound Attenuation System with On-Line Adaptive Feedback Cancellation," U.S. Patent No. 4, p.677.
- (3) Kinichiro, A. and Minoru, T., 1989, "공조 덕트용 電子消音시스템," 건축설비와 배관공사(일본) pp. 94~99.
- (4) Elliot, S.J., et al, 1987, "A Multiple Error LMS Algorithm and Its Application to the Active Control of Sound and Vibration," Trans. IEEE ASSP-35(10).
- (5) Eriksson, L.J., et al, 1989, "Higher Order Mode Cancellation in Ducts Using Active Noise Control," Inter-Noise 89, pp. 495~500.

