

능동소음제어의 기본 이해

박 영 진

(한국과학기술원 기계공학과)

1. 머리말

기계적 소음에 대한 방지 대책으로는 소음 발생원 또는 발생 메카니즘을 연구하여 그 원인을 제거하는 방법이 가장 바람직하나 비용, 시간 또는 기술상의 어려움으로 인하여 실제 적용이 어려운 경우가 많다. 이러한 경우, 차선택으로 소음의 전달 경로를 차단하는 방법이 많이 사용되고 있다. 종래의 흡음, 차음 또는 방사등의 원리를 이용하는 방법은 일반적으로, 저주파 대역에서 그 특성이 떨어져 전체 시스템의 성능 저하 또는 원가 상승을 가져오는 수가 많다. 이러한 수동적인 수단에 의한 소음제어의 한계를 극복하고자 20세기 초반부터 능동적인 방법에 의한 음향 및 소음제어 기법이 많이 연구, 개발되어 왔다. 이러한 능동소음제어에 관한 관심은 최근에 electronic technology의 급속한 발전에 의하여 실현성이 증가하면서 더욱 가속화되었다. 본 해설기사에서는 과거의 능동소음제어 예들을 통하여 능동제어의 특성과 한계를 설명하고 응용사례를 알아보기로 한다.

2. 기본원리

능동소음제어의 기본원리는 공기

중에서 음속이 공기중의 전파속도 (speed of electronic wave) 또는 전선 안에서의 전기 신호의 속도보다 상대적으로 느림을 이용하여, 소음원에 가까운 곳에서 음파를 측정 한 후 소음을 감소시키려는 장소에 음파가 도달함과 동시에 그 음파와 위상이 180° 다른 제어음을 발생시켜 소음을 상쇄시킬 수 있는데 있다. 다음의 Kirchhoff-Helmholtz Integral 식에서 보듯이 음장 V 는 표면 S 에서의 압력과 압력의 gradient만의 정보로부터 얻어질 수 있다. 그러므로 표면 S 상에 위상이 180° 다른 압력과 압력의 gradient를 dipole과 monopole을 사용하여 각각 생성하여, V 의 부에는 전혀 영향없이 내부의 음장을 상쇄시킬 수 있다.

$$\int_S [g(x|y) \nabla_y p(y) - p(y) \nabla_y g(x|y)] \cdot n \, dS = \begin{cases} p(x), & x \text{ within } V \\ 0, & x \text{ outside } V \end{cases}$$

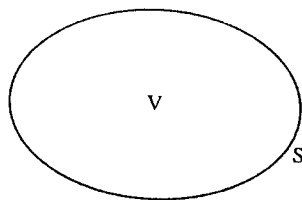


그림 1, 2와 3은 각각 control volume의 내부, 외부 그리고 전체의 음장을 control volume의 표면

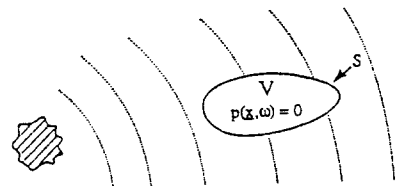


그림 1 입사음의 능동 흡수

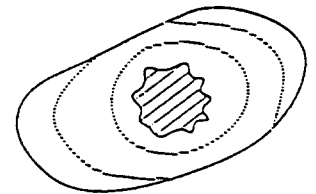


그림 2 방사음의 능동 흡수

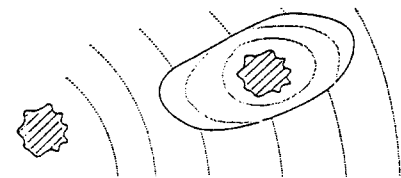


그림 3 입사음과 방사음의 동시 능동 흡수

에 무한개의 monopole과 dipole을 사용하여 이론적으로는 제어 가능함을 보여 주고 있다.

3. 능동소음제어의 발달과정

진공관 앰프의 개발과 더불어 1925년에 electronic technology시대가 열렸다고 볼 수 있다. 이후 녹음기, 음성 영화, 라디오, TV,

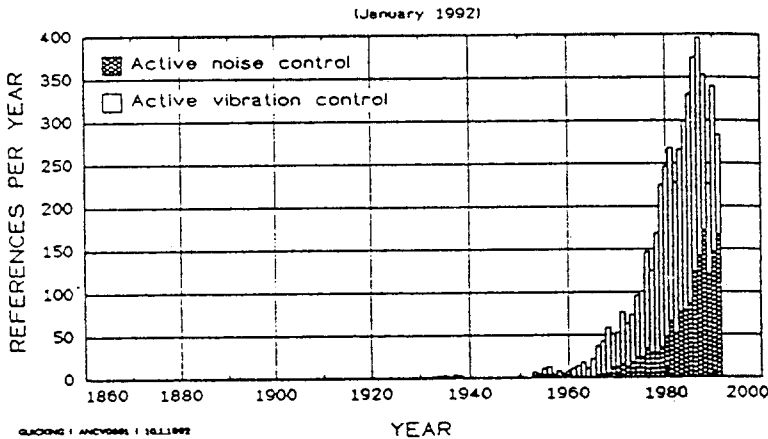


그림 4 년도별 능동소음/진동제어 관련 논문 추이

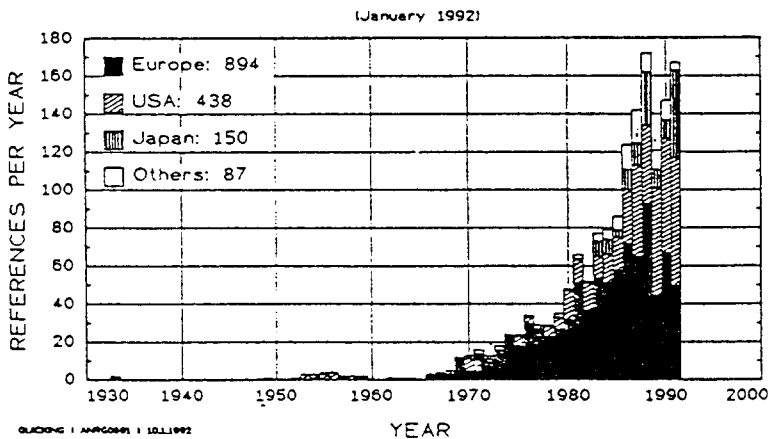


그림 5 년도별 능동소음제어 관련 논문 추이(국가별)

기타 등등의 전자 제품들이 개발되었으며 능동소음제어기도 최초의 전자제품들 중의 하나이다. 우선 그림 4는 능동소음 및 진동제어 관련 논문의 발표 추세를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 최초의 발표는 1930년대에 있었으나 실제적인 연구는 1960년대 후반에서나 가능하게 되었으며 1980년대에 들어서 비약적으로 증가하는 현상을 보여준다. 이는 마이크로프로세서의 상용화 시기와 일치한다. 특기할 만한 사항은 능동진동제어보다 소음제어 분야의 발달이 뒤쳐져 있어 능동소음제어가 상대적으로 구현하기 어려움을 알 수 있다. 그림 5는 각 지역 및 국가별 능동소음제어 관련 논문수를 년도별로 나타내고

있으며, 7~80년대에는 유럽에서 활발히 연구가 진행되었으나 최근 들어서는 일본 및 미국에서의 연구가 많은 것을 알 수 있다. 80년대 중반에 들어 능동소음 제어 연구가 활성화되는 것은 DSP(digital signal processing) 칩의 상용화 시기와 일치한다. 위의 예에서 알 수 있듯이 능동소음제어기의 발달은 전자기술의 발달과 밀접한 관계를 갖고 있으며 여기서는 능동제어 기술의 특성과 한계를 기술의 발달 역사와 당시의 전자 및 관계 기술의 관계로부터 알아보기로 한다.

3.1 Paul Lueg의 특허

1934년 Paul Lueg에 의하여 출원된 미국 특허 2043416호 “Proc-

ess of Silencing Sound Oscillations”이 능동소음제어(ANC)의 시초라 할 수 있다. 그림 6은 Lueg가 특허에 포함시킨 도식으로 Fig. 1은 공조덕트에서의 능동소음 원리를 설명하고 있다. 여기서 M은 마이크로폰을 나타내며 L은 라우드 스피커를, A는 소음원을, V는 전기회로를 각각 표시한다. 소음원에서 발생된 소음은 덕트를 따라 전파되어 마이크로폰에서 감지된 후에도 계속 전파되어 스피커 부근까지 전파된다. 이때 마이크로폰에 의하여 측정된 신호는 전기적 신호로 바뀌어 빠르게 전기회로까지 도달되어 적절한 신호처리를 거친 후에 스피커까지 보내져 다시 스피커를 통하여 제어소음으로 발생된다. 이론적으로는 제어소음은 마이크로폰의 위치를 지나 덕트를 따라 전파된 소음과 Fig. 3에서와 같이 위상만 180° 바뀌어 있어, 음파 간의 간섭 현상에 의하여 서로 완전히 상쇄되고 덕트 아래쪽으로는 더 이상 소음의 전파가 일어나지 않는다. 따라서 스피커 이후의 모든 구간에서의 음압은 0이다. Fig. 2와 Fig. 4는 3차원 공간에서의 능동소음제어 기법을 설명하고 있으며 Fig. 1의 경우와 마찬가지로 제어소음을 발생시킨다. 다만 3차원 공간에서는 스피커 근방의 국소 부위(Fig. 4의 빗금친 구역)에서만 소음 저감이 일어난다.

그림 7 (a)와 (b)는 평면파 순음소음(planar tonal noise)이 왼쪽에서부터 전파되어 오는 경우 동일한 주파수의 소음을, 원점에서부터 왼쪽으로 음의 한 파장 길이 되는 곳에 위치한 스피커로 원점의 음압이 0이 되도록 제어하였을 때, 원점 주변의 음압을 보여주고 있다. 보다시피 마이크로폰을 중심으로 파장의 4분의 1 정도를 반경으로

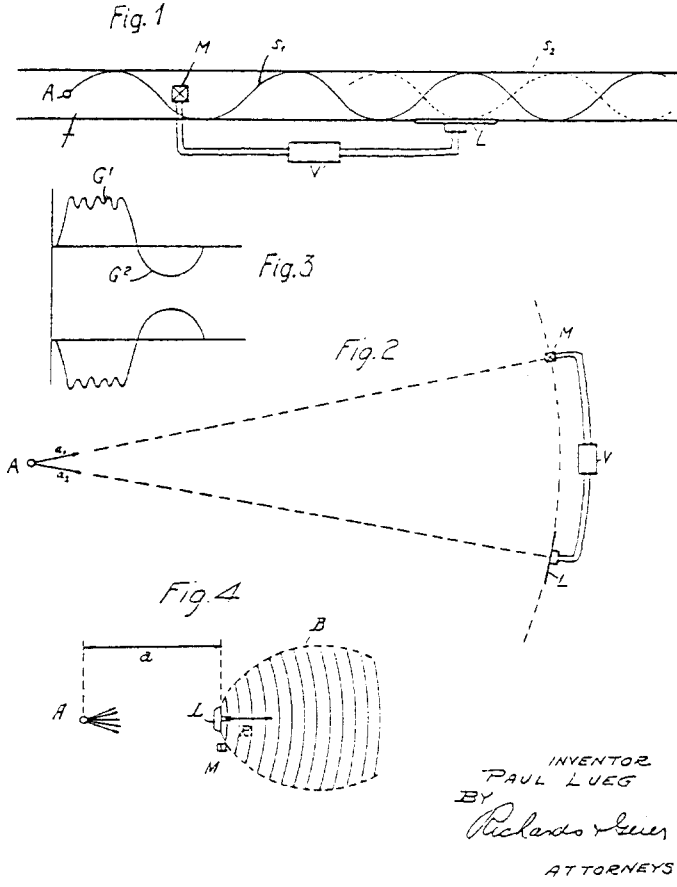


그림 6 Lueg의 1936년 특허문서의 그림

로 하는 구역만이 어느정도 음장제어가 되고 있고, 마이크로폰으로부터 떨어진 구간에서는 음압이 증가하기도 한다. 유한개의 마이크로폰과 스피커로는 항상 일부 3차원 구간의 소음 저감만이 가능하다. 이는 1차원 시스템인 덕트에서의 소음제어와 다른 점이다.

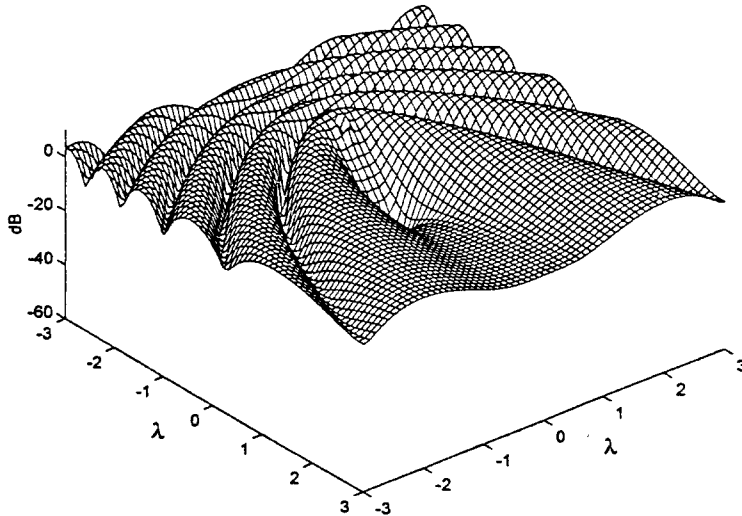
Lueg의 발명은 실제로는 1930년대의 전자기술과 신호처리 기술이 능동소음제어에 필요한 만큼 발전하지 못하였기 때문에 실현에 실패했다. 일례로 주파수에 관계없이 일정한 시간 간격 만큼 지연을 시킨 신호를 그림 8에 있는 것과 같은 원 신호(original signal)에 더하면 그림 9와 같은 결과를 얻게 된다. 일정한 주파수 성분 (b)는 서로 간섭을 일으켜 줄어들지만 다

른 주파수 성분 (a, c)은 최대 2배까지 증가된다. 따라서 광대역 신호를 상쇄시키려면 각 주파수 별로 정확한 지연 양을 결정하여 이를 전기 또는 전자회로로 구현해야 한다. 그림 10은 원 소음과 동일 주파수 성분의 신호를 발생시켜 소음 저감을 꾀할때, 진폭과 위상값의 부정확성에 의한 성능 저하를 보여주고 있다. 진폭과 위상이 정확할 경우에는 물론 무한 dB의 소음 저감이 가능하나 진폭 특히 위상오차가 증가함에 따라 성능이 급격히 떨어짐을 알 수 있다. 20dB 이상의 소음 저감 효과를 보려면 10% 진폭오차 또는 6° 위상오차 이내의 오차로 제어 소음을 발생시켜야 함을 알 수 있다. 이러한 정확도를 광대역 주파수에서 얻는 것은 1930

년대의 전기신호처리 기술로는 어려웠으며, 특히 시스템이 온도의 변화 등으로 인하여 변할 경우 이를 보정하여 주는 것은 현대역 또는 정현파 소음 (tonal noise) 일 경우에도 불가능하였다.

3.2 Harry Olson의 Electronic Sound Absorber

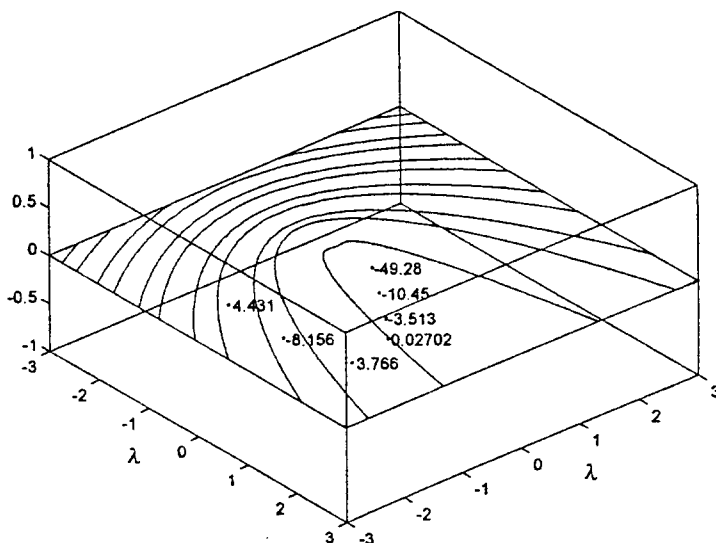
1953년에 Olson은 feedback 기법을 처음으로 사용하여 소음저감을 시도하였다. Lueg의 feedforward 기법과는 달리 마이크로폰 위치에서의 소음저감을 목표로 하고 있으며 고이득 폐환제어 (high gain feedback control)을 적용함으로써 음향학적 가상 접지 (acoustical virtual earth) 또는 tight coupled mono pole을 이루어 마이크로폰에서의 음압을 저감시킨다. 여기서 마이크로폰과 스피커 사이 그리고 음파 전달 경로의 위상지연이 크면 성능이 현저히 저하하므로 위상지연이 큰 트랜스포머 등의 사용은 주의를 요한다. 이러한 위상문제를 그림 11에 보이는 바와 같이 마이크를 스피커에 근접시킴으로서 음파전달 경로를 짧게 하고 고임피던스 음성코일 (high gain voice coil)을 사용한 스피커와 저대역통과 (low pass filter) 아나로그 회로를 사용하여 해결하였다. 그림 12는 스피커의 근접장 영향과 시스템의 오차로 인하여 약 2.5 옥타브 주파수 영역에서만 소음저감 효과가 있고 마이크로폰에서 조금 떨어져도 성능이 급격히 감소함을 보여주고 있다. 이는 그림 10에서 예측한 소음 저감 구역보다 더 적은 국부 영역제어만이 가능함을 말한다. 또한 feedback 제어 기법을 사용하므로 Ffowcs-Williams (1984)가 주장한 대로 안정성 문제를 해결하는 일이 쉽지 않아 널리 쓰이는데 실패하였다.



SPL in controlled space after ANC

error mic. : (0,0)
control speaker : (-1,0)

(a)



contour of SPL in controlled space after ANC
(solid line : 0 dB)

(b)

그림 7 평면파 순음소음을 점음원으로 능동제어시의 음압분포

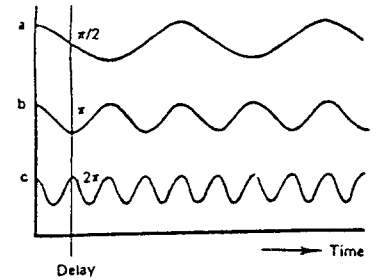


그림 8 고정된 시간 지연이 각기 다른 주파수 신호의 위상에 미치는 효과

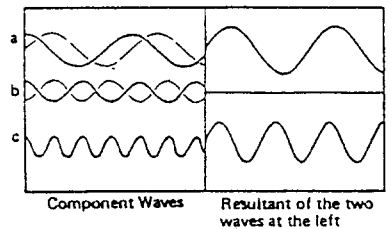


그림 9 고정된 시간 지연 신호와 원 신호의 중첩 효과

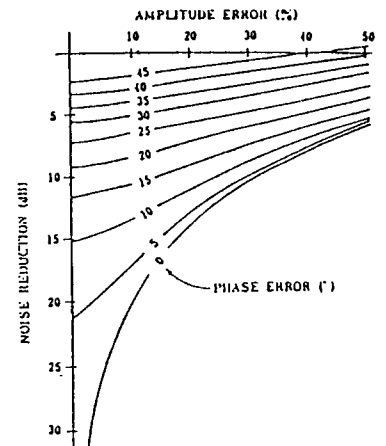


그림 10 진폭, 위상 오차에 따른 소음감소 효과의 변화 (동일 주파수 정현파 소음의 경우)

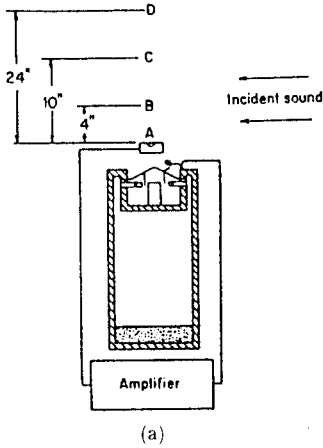
3.3 GE사의 Conover의 변압기 소음의 능동제어

변압기의 소음은 주기적이고 주파수(120Hz and harmonics) 또한 정확하게 알려져 있으므로 50년대의 전기회로기술 및 신호처리 기법으로도 비교적 쉽게 능동적으로 저

감될 수 있는 응용 예제이다.

반경이 수미터에 이르는 15MW의 대용량 변압기의 표면에 스피커를 그림 13처럼 부착하여 근접장의 소음제어를 시도하였다. 그림 14는 소음제어 전과 후의 각 방향 음압 정도를 보여주고 있다. 능동소음

제어는 스피커가 부착된 방향으로 약 15dB의 소음 저감 효과를 가져왔으나 나머지 방향으로 소음레벨을 증가시키거나 그대로 유지하였다. 이는 그림 15에서처럼 소음원의 크기가 소음의 파장보다 크면 1개의 점음원 즉 스피커로는



(a)

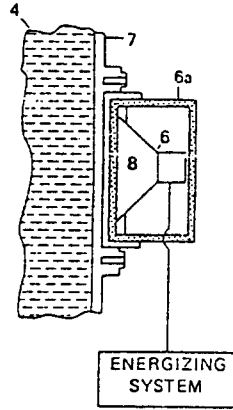
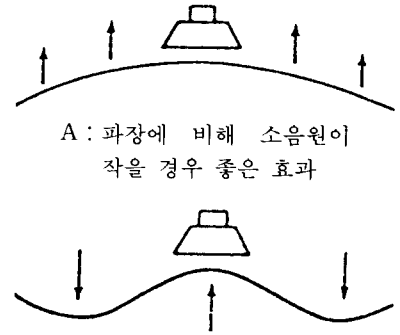
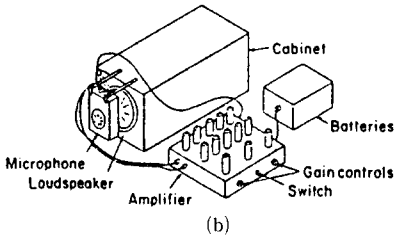


그림 13 변압기 능동소음제어 배치도 (U.S. Patent 2,766,020)



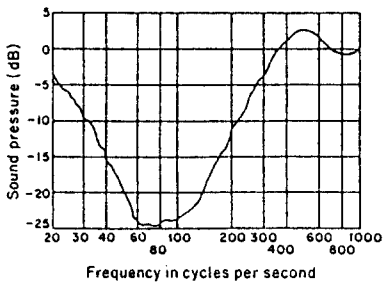
B : 파장에 비해 소음원이 큰 경우 제어 불가능

그림 15 근접장 소음제어

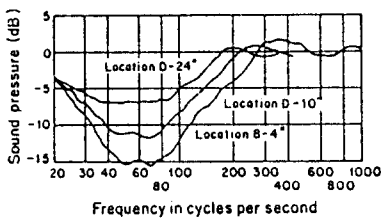


(b)

그림 11 Olson과 May의 "electronic sound absorber" 개략도 (Olson and May, 1953)



(a) 그림 11의 마이크로폰 위치



(b) 그림 11의 B, C, D 위치

그림 12 "electronic sound absorber"의 음압저감 성능표

근접장 소음 제거가 불가능함을 보여주고 있다.

정현파 소음원과 제어음원의 위

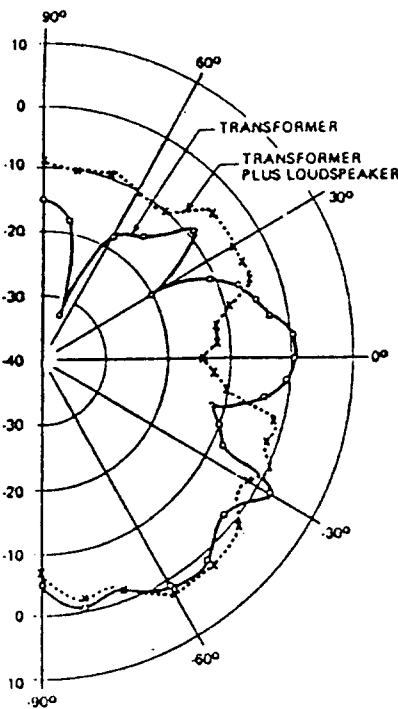


그림 14 Conover의 변압기 소음 저감량

치, 특히 거리에 따른 소음제어 성능 비교가 그림 16, 17, 18에 도시되었다. 그림 16은 소음원 P와 제어음원 S의 위치와 그들간의 거리 d의 관계를 보여주고 있고, 그림 17은 방사 음향파위를 최소화하는 최적 소음원 대 제어음원 크기의 비를 보여준다. 그림 18은 최대 방사 음향파위 저감량을 보여 준다.

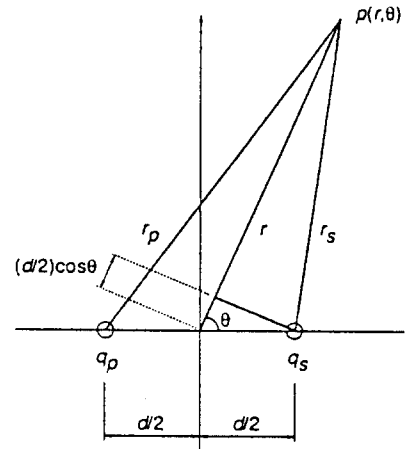


그림 16 소음원과 제어음원의 위치

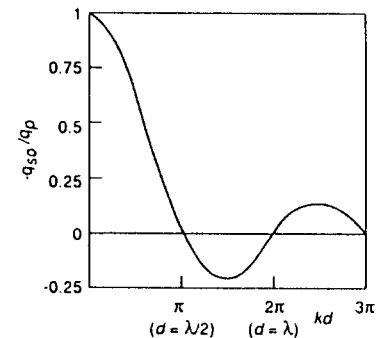


그림 17 최적 소음원 대 제어음원 source strength

그림에서 알 수 있듯이 음파의 파장 λ 에 비하여 음원의 크기가 매우 작고 제어음원과 소음원 사이의 거리가 $\lambda/4$ 보다 작은 경우에 한하여 모든 원거리장에서 어느정도 소

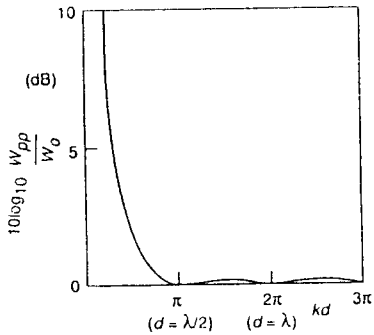


그림 18 최대 방사 음향과 위 저감량

음제어가 이루어질 수 있다.

그림 19는 두 음원사이의 거리 변화에 따른 원거리장에서의 음압 자승값을 polar plot으로 나타낸 것이다. 거리가 소음원 파장의 16분의 3 이상 떨어지면 제어를 하지 않을 경우보다 음압이 커지는 방향이 존재한다. 따라서 전영역 소음 제어를 위하여는 소음원과 제어 음원을 되도록 가까이 놓는 것이 유리하다. 고주파 소음을 제어하려면 더욱 가까이 배치하여야 하고 이러

한 이유로 고주파 신호일수록 능동 소음제어는 어려워진다.

3.4 최근의 능동소음제어

앞절에 열거된 과거의 능동소음제어 사례에서 볼 수 있듯이 능동소음제어는 여러 물리적인 제약 조건 아래에서만 가능하고, 광범위한 구역의 광대역 소음을 변화하는 환경 조건 아래에서 능동적으로 제어하는 것은 이론적으로도 쉽지 않다. 광범위한 구역을 제어하기 위하여는 많은 마이크로폰과 스피커가 필요하고, 광대역 소음을 처리하기 위하여는 복잡한 주파수 응답 함수를 표현할 수 있는 다중 계수 필터(multi-weight filter)의 사용이 불가피하며, 변화하는 환경에 능동적으로 대처하기 위하여는 적응제어 기법이 필수적이다.

최근 획기적인 DSP칩의 발전으로 인하여 복잡하고 다양한 적용 신호처리 기법이 사용 가능하므로

환경 및 시스템의 변화에 신속하게 실시간으로 대응 가능하게 되었다. 따라서 전자기술의 제한이나 신호처리 기법의 미비보다는 음향학적인 제한이 능동소음제어의 한계를 결정하는 주요 원인이 되었다. 일례로 고주파로 올라갈수록 파장이 짧아져 제어 가능 공간이 줄어들어(그림 7 참조) 실제로 3차원에서 구현 가능한 최대 주파수는 약 500 Hz 근방이며 충분한 파워를 갖는 저주파 신호를 발생시킬 수 있는 스피커의 특성 한계 때문에 최소 주파수는 50Hz 정도이다. 이러한 제약이나 causality 등에 의하여 발생하는 문제점들은 DSP칩이나 제어 알고리즘의 발달로는 해결이 불가능하며 능동소음제어의 물리적인 한계로 이해하여야 한다.

최근에는 여러개의 스피커와 마이크로폰 그리고 기준신호를 사용하는 다중 입·출력 능동소음제어 기법을 사용하여 제어 가능 공간을 넓히는 방법들이 개발되었으며 특히 덕트 소음제어에서는 plane wave 가정을 버리고 고차 음장모드까지도 제어하는 기법 또한 등장하였다.

3.5 능동소음제어 방식의 장·단점

능동소음제어 방식을 기존의 수동적인 방법에 비교하여 보면 저주파 영역에서 효율적이나 고주파 영역에서는 적용이 어렵고 반대로 수동적인 방법은 고주파 영역에서는 효율적이나 저주파 부분에서는 효율이 급격히 떨어진다. 능동적인 방법은 이외에도 흡음재 비산 현상이 없어 청정환경 보존 등에 우수하나 내구성에 문제가 있고, 엔진 배기관 등에 기존의 소음기 대신 사용하면 back pressure를 감소시켜 엔진의 효율을 높일 수 있으나 방법 자체가 동력을 필요로 하고 안정성 문제를 야기시킬 수 있으

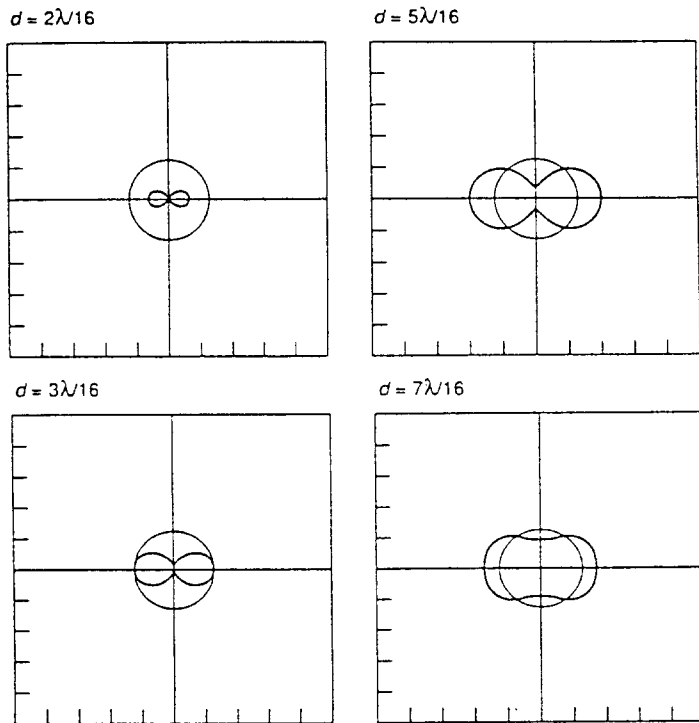


그림 19 두 음원 사이의 거리에 따른 원거리 음장의 변화

며, 수동적인 방법에 비하여 경량이고 작은공간에 설치 가능하지만 일반적으로 가격이 비싸다. 따라서 수동적인 방법과 능동적인 방법은 서로를 대치할 수 있는 경쟁적인 관계에 있는 기술이 아니고 동시에 사용하여 서로의 장단점을 보완할 수 있는 상호 보완적인 기술이다.

4. 응용사례

현재 능동소음제어가 적용되고 있는 분야는 다음과 같다.

4.1 덕트소음제어

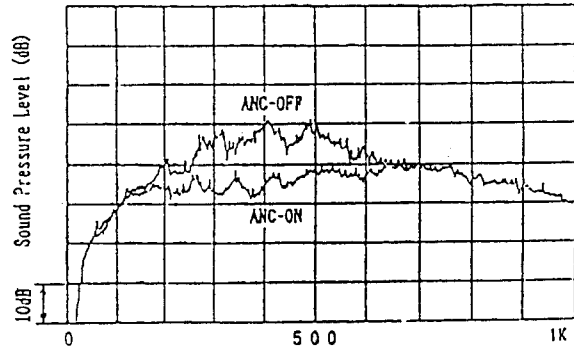
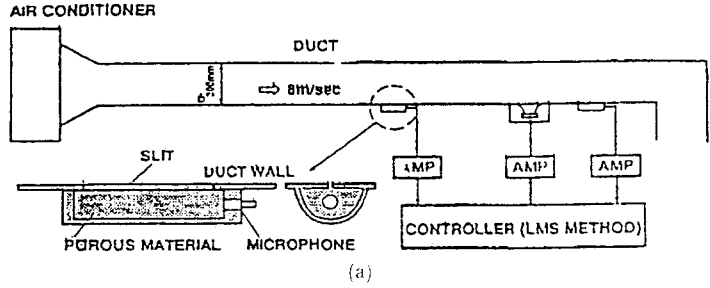
DIGISONICS 나 Hitachi, Mitsubishi 등 많은 회사들이 공조덕트 내에서의 전파 소음을 제어하는 설비를 개발 실용화했으며 국내에서는 ANC Technologies에서 국내 여러 건물에 설치 사용 중에 있다. 일반적인 제어 시스템 구조와 성능이 그림 20 (a)와 (b)에 나타나 있다.

4.2 능동전자 소음기

ANVT & Arvin Industries & ELESA(FIAT 계열사), Toyota Motors, Mitsubishi Heavy Industries(diesel generator for buildings) 등이 차량용 소음기와 디젤 발전기용 능동 소음기를 개발하였고 국내에서는 G7 과제의 일환으로 차량용 소음기 개발이 진행중이다. 소음원의 파워가 몇개의 주기 성분으로 주로 몰려 있는 점이 덕트 소음 제어의 경우와 다르나 동일한 능동 소음제어 기법이 적용될 수 있어, 제어 기법 개발보다는 배기 가스나 고온 환경에 내구성이 있는 스피커와 마이크론의 개발이 중요하다.

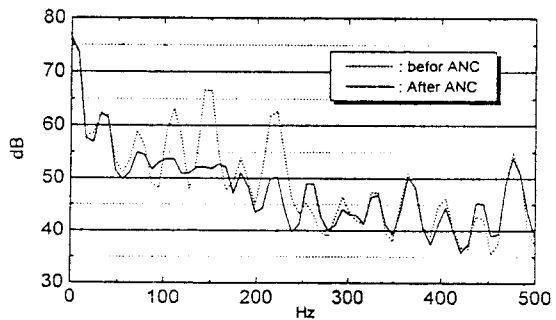
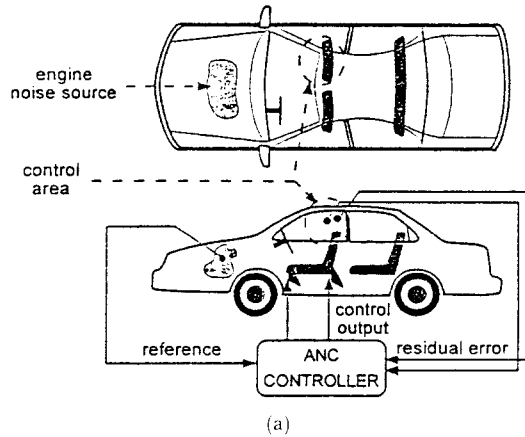
4.3 차량 및 기체내부 음장제어

Mitsubishi Motors, Nissan



Effect of active noise control for 10m/s flow

(b) 그림 20 공조 덕트용 능동 소음 제어 시스템 및 성능



(a) 그림 21 차 실내 엔진 부밍 소음 저감 시스템의 개략도 및 성능

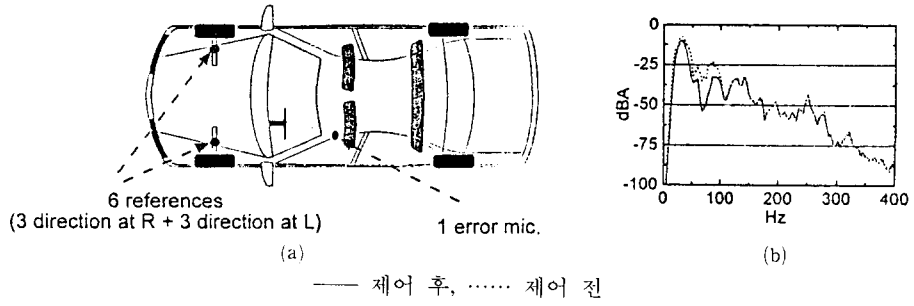
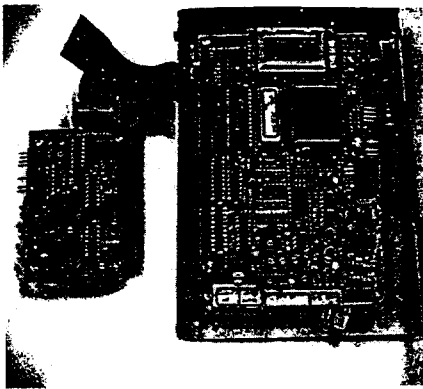
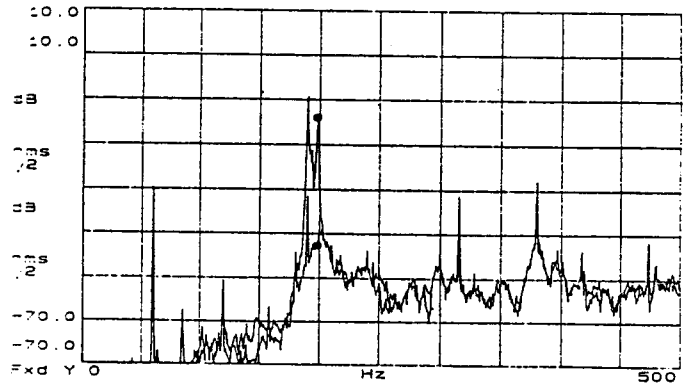


그림 22 차 실내 도로 소음 저감 시스템의 개략도 및 성능



제어기의 실물사진
(a)



200 Hz 소음의 제어실험 결과
(b)

그림 23 마이크로프로세서를 사용한 소음 제어 시스템과 성능

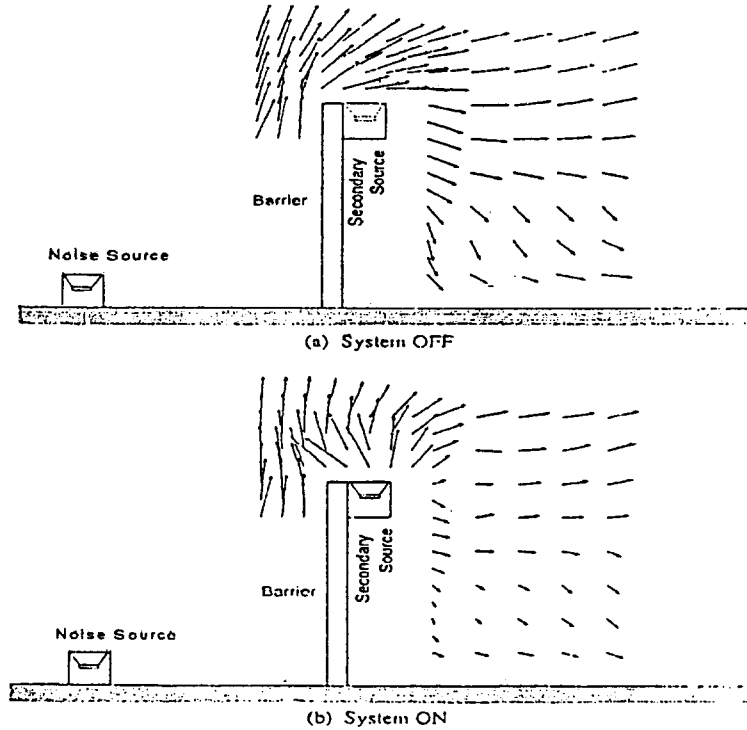


그림 24 능동소음 차단벽

Motors, Lotus Engineering & ISVR(engine boom and road noise), British Aerospace 등의 회사에서 승용차 실내 음장과 비행기체 내부 음장제어를 실행하여 일부 상용화 되었으며, 국내에서는 기아, 대우, 현대가 상용화를 목표로 개발 중이며 현대중공업에서는 쾌속 여객선 실내 소음제어를 연구하고 있다. 그림 21의 (a)와 (b)는 차 실내 엔진 부밍 소음 저감 시스템의 개략도와 성능을 각각 보여주고 있으며, 그림 22 (a)와 (b)는 차 실내 도로 소음 저감 시스템의 개략도와 성능을 보여주고 있다.

4.4 헤드셋과 Eardefenders

ANVT사에서 아로그 회로를 사용하여 헤드폰을 실용화하여 최대 20dB 저감이 가능하다고 주장하고 있다.

4.5 가전기기

Toshiba, Hitachi 등에서 냉장고 콤프레서 소음을 능동 제어하는 제품을 개발 상용화 하였으며, 국내 가전업체도 진공청소기 등의 가전 제품에 적용 가능성을 연구 검토하고 있는 것으로 알고 있다.

4.6 소형 팬과 공조 시스템의 주기 소음제어

주기적인 소음 특히 그 주파수가 정확히 알려진 경우에는 상대적으로 능동소음제어하기가 용이하므로 DSP칩 대신에 가격이 저렴한 마이크로프로세서를 사용하여 제어가

가능하다. 그림 23 (a)와 (b)는 개발된 제어기와 성능을 보여주고 있다.

4.7 기타

굴삭기등 중장비 실내 소음 제어, 발전소용 거대 환풍기 소음, 및 연도 소음 제어, 능동 소음 차단벽(그림 24 참조), 헬리콥터 실내 소음 저감, 능동 진동 감소를 통한 구조물 발생 소음 제어 등 여러 방면에서 능동소음제어 기법이 응용되고 있으며 계속 증가하고 있는 추세이다.

5. 맺음말

소음제어에 있어서 수동적인 방법과 능동적인 방법은 서로를 대치할 수 있는 경쟁적인 관계에 있는 기술이 아니고 동시에 사용하여 서로의 장단점을 보완할 수 있는 상호 보완적인 기술이다.

전자 기술의 발달로 능동소음제어에 필수적인 DSP칩의 가격이 더욱 떨어질 전망이므로 능동소음제어 기법이 보다 싼 가격에 많은 응용 분야에 적용 가능하게 될 것이니, 이 방법이 갖고 있는 물리적 성능 한계들을 염두에 두고 적용대상과 방법을 결정하여야 좋은 성능을 기대할 수 있다.

참고 문헌

(1) P.A. Nelson and S.J. Elliott, 1992, "Active Control of Sound," Academic Press.

(2) 이 종식, 1992, "공조덕트용 전자식 능동소음제어장치 강연노트,"
 (3) 이 종식, 1992, "능동소음 및 진동제어사례 강연노트."
 (4) 오 재응, 1991, "능동소음제어 기술" 한국소음진동공학회 '91 소음제측 및 제어강습회 교재.
 (5) 박 영진, 1995, "능동소음제어의 기본원리," 한국소음진동공학회 '95 능동소음제어의 원리와 응용강습회 교재.
 (6) P.A. Nelson, S.J. Elliott, 이 정권, 박 영진, 1992, "Active Noise Control 강의 교재."
 (7) P. Leug, 1936, "Processing of Silencing Sound Oscillations," U.S. Patent 2,043,416.
 (8) J.E. Ffowcs-Williams, 1984, "Review Lecture: Anti-sound. Proceedings of the Royal Society London A395, pp. 63~88.
 (9) H.F. Olson and E.G. May, 1953, Electronic Sound Absorber, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 25, pp. 1130~1136.
 (10) W.B. Conover and R.J. Ring-lee, 1955, Recent Contributions to Transformer Audible Noise Control. Transactions of the AIEE Part III Power Apparatus and Systems, Vol. 74, pp. 77~90.
 (11) G.E. Warnaka, 1982, "Active Attenuation of Noise - The State of the Art," Noise Control Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 100~110.