

## 능동소음제어 기법 및 응용

■ 남 현 도 / 단국대학교 전자전기공학부 교수

### 1. 서 론

능동 소음 제어를 위해서는 소음원으로부터 소음을 감지해 소음을 상쇄시키는 신호를 만들어주는 적응필터와 적응필터로부터 신호를 받아 상쇄파를 발생시키는 제어 음원이 반드시 필요하다. 이때 중요한 문제는 제어 음원에서 나오는 신호에 영향을 받지 않고 소음을 정확히 감지하는 것과 감지된 신호를 처리하여 스피커로 내보냈을 때 원래 소음과 작용해서 상쇄시킬 수 있도록 신호를 처리하는 방법이다. 따라서 제어 음원에서 발생한 제어음이 다시 마이크로폰을 통해 궤환됨으로서 생기는 안정도의 파괴 문제와 신호 처리를 위한 적응필터의 구성문제 등에 대한 연구가 미국, 일본, 유럽 등지에서 활발히 이루어지고 있다[1,2].

능동 소음 제어는 HVAC 시스템에서 사용되는 환풍팬과 자동차 엔진 등과 같은 회전기에 의한 소음과 같이 500Hz 이하의 저주파의 소음을 감쇄시키는데 있어서 종래의 수동적 방법보다 탁월한 효과를 보여주고 있는데, 효과적인 소음의 상쇄를 위해서는 소음원으로부터 발생한 소음과 제어 음원에서 발생한 제어음이 반주기의 차이를 가져야 한다. 그러므로 신호의 주파수와 크기 뿐 아니라 위상도 다루어야 하므로 여러가지 어려운 문제가 생기게 된다.

능동 소음 제어의 개념은 1950년대 Lueg에 의해 처음 발표되었는데 전자 소자의 미발달로 인해 별로 주

목을 받지 못하다가 최근에 반도체 소자의 발달과 디지털 신호처리 기술의 발달로 능동 소음 제어 기술이 비약적인 발전을 이룩하게 되었다.

능동소음제어는 소음파를 평면파로 취급할 수 있는 1차원 음향 공간에서의 문제와 평면파로 취급할 수 없는 3차원 음향 공간에서의 문제로 나눌 수 있는데, 지금까지는 실시간 제어의 어려움 때문에 덕트, 엔진의 배기관 등 1차원 음향 공간에서의 소음제어가 주로 연구되어 왔으나 최근에는 DSP 기술의 발달로 자동차와 비행기의 내부에서와 같이 3차원 음향공간에서의 능동소음제어 문제와 소음 신호파의 특성 및 온도, 습도 등 주변환경이 변할 때도 잘 적응하는 1차원 및 3차원 음향 공간에서의 적응 능동소음제어 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[3-6].

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. 그러나 이와 같은 시스템은 스피커의 위치에 제한을 받기 때문에 최근에는 발달된 제어기술과 반도체 기술을 바탕으로 넓은 주파수 대역에서도 사용이 가능한 monopole 시스템을 많이 연구하고 있다[1].

DSP 프로세서 등 고속연산이 가능한 프로세서의 발달로 적응제어기법을 이용한 덕트의 능동소음제어기

와 능동 muffler가 미국의 Noise Cancellation Technologies (NCT)사 등에 의해 실용화되고 있으며 [7,8] 3차원 문제에서도 능동소음제어 기법에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 자동차의 엔진, motor 등의 회전기에 의한 3차원 공간에서의 소음제어에 관한 연구가 활발히 이루어져 비행기 내부, 자동차 내부 등의 잡음제어에 괄목할 만한 성과를 이루었고 이를 이용한 승용차가 영국, 일본 등에서 생산되고 있으며 1991년에는 ANC 기법을 이용한 소리없는 냉장고가 일본 Toshiba에 의해 시판되었다[9].

현재의 연구동향을 보면 미국의 NCT 사 및 Nelson Industry 사를 중심으로 engine exhaust, HVAC duct 및 공장의 굴뚝 등 1차원 공간에서 음속이나 시스템의 특성 등이 변하는 경우에도 잘 적응하는 적응 능동 제어에 관한 연구가 이루어지고 있으며 영국의 ISVR을 중심으로 3차원 공간에 대한 소음제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있고 일본의 Toyota, Nissan, Toshiba 등을 중심으로 이의 실용화가 이루어지고 있는 추세에 있다[9]. 능동방음벽을 이용하여 실내 소음을 원천적으로 제어하는 연구[10]와 주변 소음을 제거하는 헤드폰 [11-13] 등에 관한 연구도 활발히 이루어지고 있다.

국내에서도 최근에 많은 연구가 이루어져서 여러 편의 논문이 발표되었으나 ANC technology 사에서 덕트 소음 제어를 발표했고 자동차 회사 등에서 가능성을 탐색하고 있을 뿐 실용화 연구는 아직 많지 않은 상태이다.

본 고에서는 능동 소음 제어의 기본 개념 및 적응 필터 알고리즘들을 소개하고 능동소음제어의 응용 분야 및 앞으로의 전망을 다루고자 한다.

## 2. 능동소음제어 시스템

### 2.1 능동소음제어의 기본원리

능동소음제어는 음파의 간섭

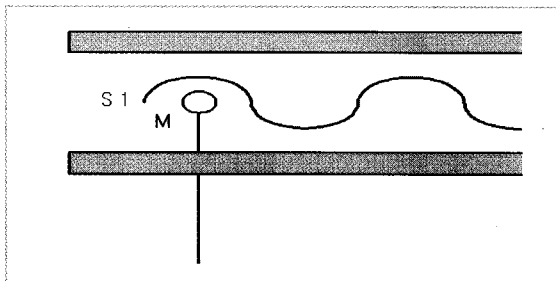


그림 2.1 능동 소음제어의 기본 원리

의 원리를 이용한 것으로 소음제어의 기본 원리는 그림 2.1에서 간단히 설명되어질 수 있다. 제어용 음원을 사용하여 제어 신호를 발생시킴으로써 소음원에서 발생된 소음 신호를 상쇄시키는 것이 기본적인 원리이다 [1].

소음원에서 발생된 음향 소음은 덕트를 따라서 전파되어 마이크론 M에 감지된다. 이 감지된 음향 소음이 전기 신호로 변환된 후 제어시스템을 통하여 위상이 변화되고 증폭된 후 출력스피커를 통하여 제어음이 방출된다.

### 2.2 적응필터

디지털 적응필터는 크게 디지털 필터부와 적응 알고리즘부 두 부분으로 나타낼 수 있다. 이를 블록선도로 나타내면 아래의 그림 2.2의 점선 부분에 해당한다.

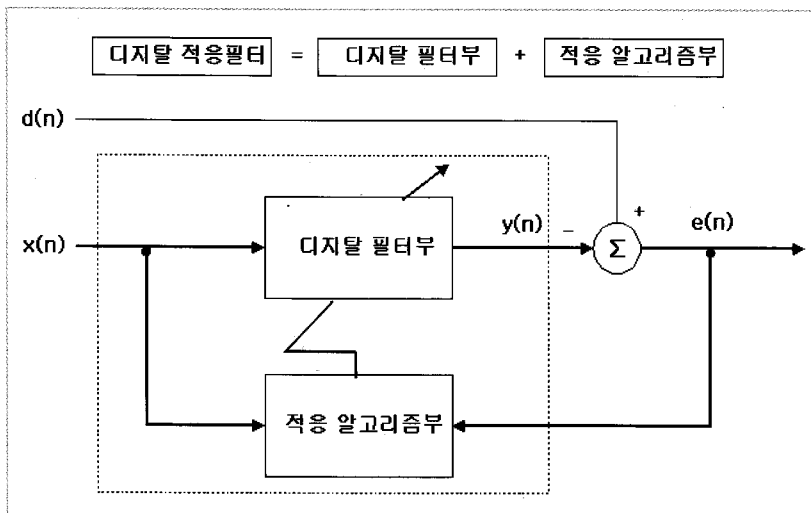


그림 2.2 디지털 적응필터의 기본 구조

그림 2.2에서,

$x(n)$  : 기준 입력 신호 (reference input signal)

$d(n)$  : 원하는 응답 신호 (desired response)

$y(n)$  : 디지털 필터의 출력 (output of a digital filter)

$e(n)$  : 디지털 필터의 오차 (residual error)

을 각각 의미한다.

디지털 필터부는 입력신호에서 입력신호에 포함되어 있는 원하는 정보만을 추출하여 출력신호로 내보내는 과정을 말한다. 이 필터처리는 시스템의 계산량과 성능에 따라서 여러 가지 다양한 구조로 수행될 수 있다. 일반적으로 크게 FIR 필터 구조와 IIR 필터 구조로 분류할 수 있다. FIR 필터는 IIR 필터에 비해 비슷한 성능을 얻기 위해 필터의 차수가 커져야 하므로 계산량이 많아지는 단점이 있으며, IIR 필터의 경우 성능에 비해 적은 계산량을 갖지만 극점이 존재하므로 안정성에 문제가 많다.

### 2.3 Filtered-x LMS 알고리즘

능동소음제어의 기본적인 원리는 소음신호와 반대 위상을 가지고 진폭이 같은 상쇄음향을 소음신호와 중첩시켜 소음을 제거하는 것이며, 제어기가 전향경로에 존재할 때의 블록선도는 그림 2.3과 같다.

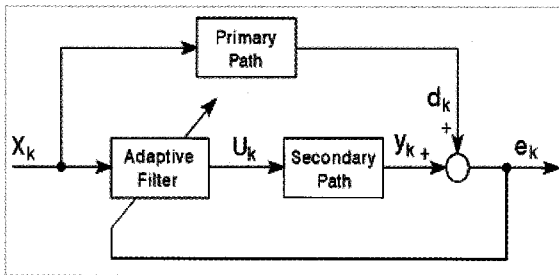


그림 2.3 전향 능동소음제어 시스템의 블록선도

소음원에서 검출되는 신호를  $x_k$ , 오차 마이크로폰에서 검출되는 신호를  $e_k$ , 그리고 제어필터의 출력을  $u_k$ 라 하고,  $x_k$ 와  $u_k$ 가 1차 및 2차경로를 통과한 신호를 각각  $d_k$ 와  $y_k$ 라 한다면, 제어필터의 출력과 오차 마이크로폰 사이에 2차경로 전달함수가 존재하므로 기존의 LMS 알고리즘을 사용할 경우에는 시스템의 안정도가 파괴될

수 있다[10]. 그러므로, 제어기의 안정도를 높이기 위한 방법으로 Filtered-X LMS 알고리즘을 사용하여야 한다.

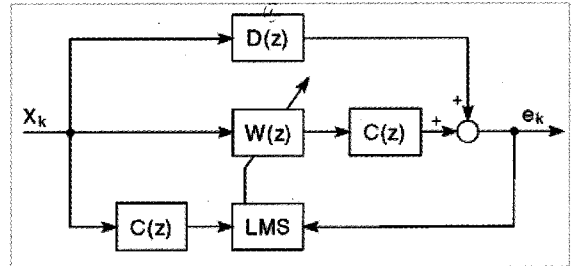


그림 2.4 Filtered-X LMS 알고리즘

그림 2.4와 같이 Filtered-X LMS 알고리즘에서는 가중치 계수의 갱신 시에 입력  $x_k$ 대신, 2차경로를 고려한  $Cx_k$ (Filtered  $x_k$ )를 사용하게 되는데, 이에 따라 2차음원과 마이크로폰 사이에서 음파의 전파 특성을 나타내는 2차경로 전달함수  $C(z)$ 에 대한 정보가 필요하게 된다. 2차경로 전달함수  $C(z)$ 는 덕트와 같이 1차원 문제에서는 해석적으로 구할 수 있지만, 3차원 폐공간에서는 2차경로 전달함수를 해석적으로 구한다는 것은 매우 어려우며, 이론적인 모델과 실험적인 모델의 불일치 등으로 인한 모델링 오차가 존재하기 마련이다. 그러므로, 능동소음제어 시스템에서는 일반적으로 이론적인 모델 대신 파라미터 추정기법을 통해 구한 실험적인 모델인  $C(z)$ 을 사용하게 된다.

## 3. 능동소음 제어 기법의 응용

능동 소음 제어 기법의 응용은 소음 신호를 평면파로 볼 수 있는 일차원 음장에서의 응용과 평면파로 볼 수 없는 삼차원 음장에서의 응용으로 나눌 수 있다. 일차원 음장에서의 응용은 공조용 덕트, 소음이 심한 공장이나 자동차 엔진의 배기관, 잡음 제거 헤드폰 등을 들 수 있고, 삼차원 음장에서의 응용은 사무실, 자동차 및 항공기 실내 소음제어 시스템, 소음의 확산을 막아주는 능동 소음 울타리 등을 들 수 있다.

### 3.1 잡음제거 헤드폰(Noise cancellation headphones)

능동 소음 제어 기법을 이용하여 주변 잡음을 제거

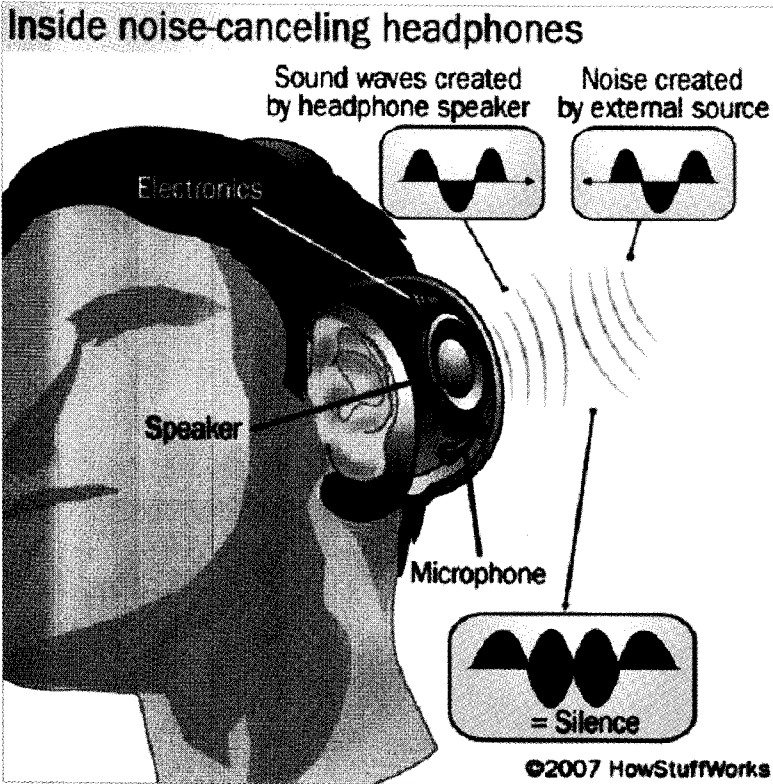


그림 3.1 잡음제거 헤드폰의 구조

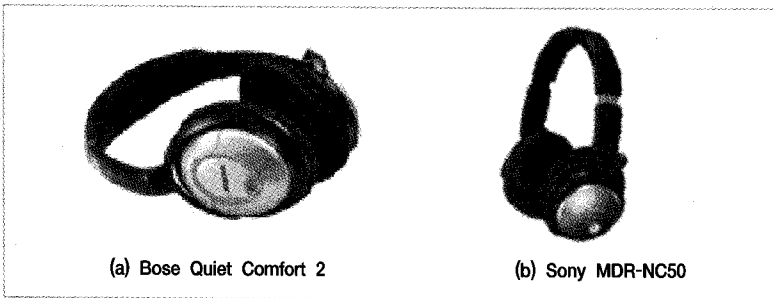


그림 3.2 잡음제거 헤드폰(Bose, Sony)

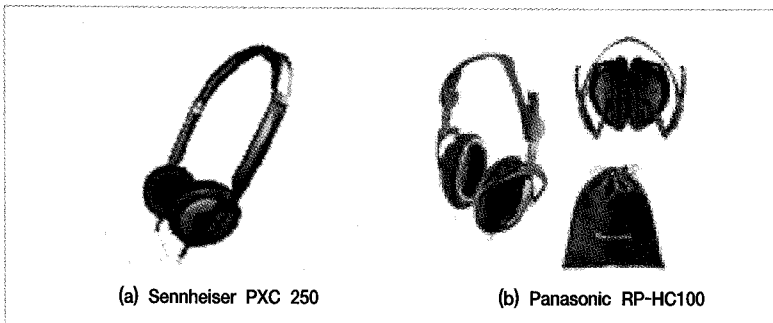


그림 3.3 잡음제거 헤드폰(Sennheiser, Panasonic)

해 주는 헤드폰이 최근에 많이 시판되고 있다. 잡음제거 헤드폰은 그림 3.1과 같이 귀 주위에 마이크로폰을 이용하여 주변의 잡음(기준 신호)을 감지하여 전자회로를 이용하여 크기는 같고 위상이 반대인 신호를 만들어 주변 잡음을 제거하는 방법으로 MP3 등 음향기기의 신호에 영향을 주지 않으면서 주변 잡음만 효과적으로 제거할 수 있다.

주변의 잡음을 효과적으로 제어함으로써 음향기기의 볼륨을 높이지 않아도 음악을 즐길 수 있게 해주므로 비행기 등에서 주위 승객의 불편을 줄여줄 수 있으므로 비행기의 1등석 등에 많이 사용되고 있다. 능동소음제거 기법을 적용한 잡음제거 헤드폰은 저주파 잡음을 효과적으로 제거할 수 있어 종래의 고주파 잡음이 주로 제거되는 잡음 저감 헤드폰에 이용되던 기법을 같이 적용하면 더욱 좋은 효과가 기대된다.

능동소음제거 기법이 헤드폰에 처음 적용된 것은 1978년 유명한 음향 회사인 Bose Corporation의 창립자인 Bose[11]에 의하여 비행기 헤드폰에 적용되면서 부터이다. 처음 개발된 잡음제거 헤드폰은 기술적으로 문제로 비행기의 엔진 소음을 효과적으로 제거하지 못해 좋은 평가를 받지 못했으나 Panasonic, Sony, Sennheiser 등에서 꾸준히 연구하여 성능을 향상시켜 왔다[12].

1986년 Bose에 의해 논스톱 세계 일주에 참여한 비행사들에게 제공된 이래 Bose Corporation, Panasonic, Sony, Sennheiser 등에서 아나로그 회로를 이용한 잡음제거 헤드폰이

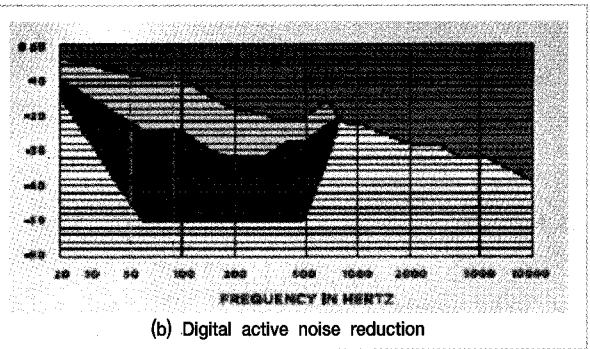
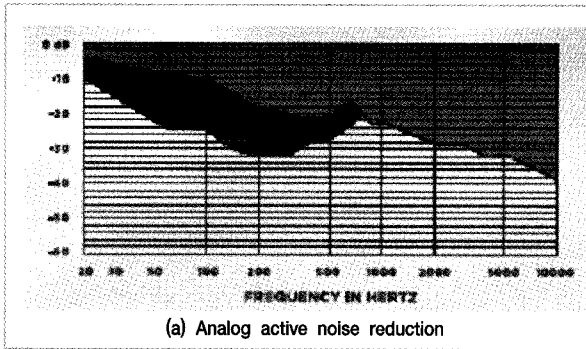


그림 3.4 Analog 및 digital active noise reduction 효과 비교

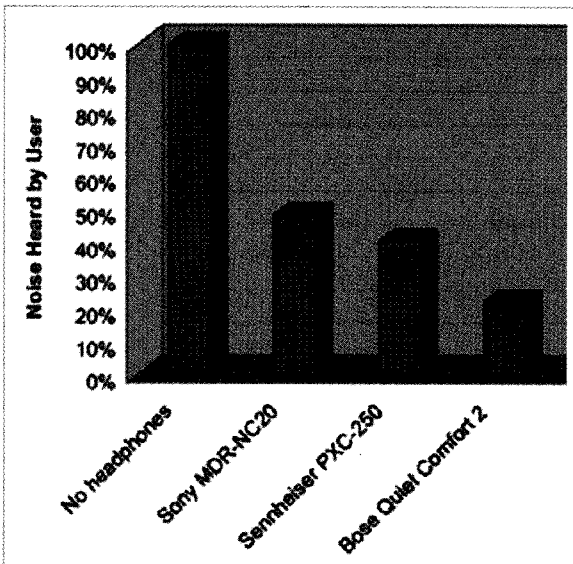


그림 3.5 잡음제거 헤드폰의 잡음제거 효과 비교

꾸준히 개발되었으며, Telex Communications은 디지털 회로를 이용하여 그림 3.4와 같이 50 [dB] 이상의 비행기 소음을 제거할 수 있는 Stratus 50 D headset을 발표하였다[13].

그림 3.5에 여러 회사에서 발표한 잡음제거 헤드폰의 성능을 보였다. Bose 사의 Quiet Comfort 2가 가장 좋은 효과를 보였으나 최근에 다른 회사에서도 새로운 모델을 발표하였으므로 새로운 비교가 필요하다.

### 3.2 비행기 내부 소음제어

최근에 소형 항공기 산업이 발달함에 따라 자동차 내부 및 프로펠러 항공기 내부의 소음 제어를 위한 응용 제품이 국내외에서 많이 발표되고 있다.

프로펠러를 사용하는 소형 항공기 실내에서의 소음 제어도 자동차 내부의 소음 감쇄와 매우 유사하다. 프로펠러의 회전 속도에 비례하는 소음 신호가 발생하며 프로펠러의 속도는 프로펠러 타코미터를 이용하여 측정할 수 있다. 최근 소형 항공기에 대한 수요가 증가하는 추세에 있으며, 소형 항공기에는 안전상의 문제로 프로펠러 항공기가 많이 사용되고 있어 능동소음 제어 시스템이 각광을 받고 있다. 항공기에 능동소음 제어 시스템을 설치하면 수동 소음제어 시스템을 설치할 때에 비해 무게 감소로 연료를 절감할 수 있으며 기존의 시스템에 비해 10-20 dB 정도의 소음 감쇄가 가능하여 Elliott Aviation, Lord Corp. 등의 회사에서 King Air, DC-9, MD-80 등의 항공기에 ANC 시스템을 장착하였다. 그림 3.6은 항공기 소음제어 시스템의 구조를 보인 것이며, 그림 3.7은 ANC 시스템 장착 후의 소음 음장 변화를 보인 것이며, 그림 3.8은 Lord Corp. 사의 제품을 MD-80 항공기에 적용시킨 결과이다.

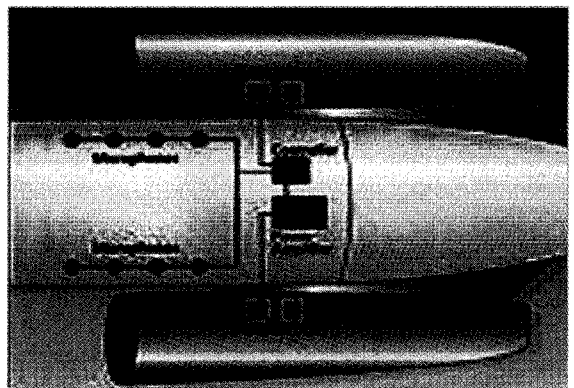


그림 3.6 비행기내부의 ANC 시스템의 개관

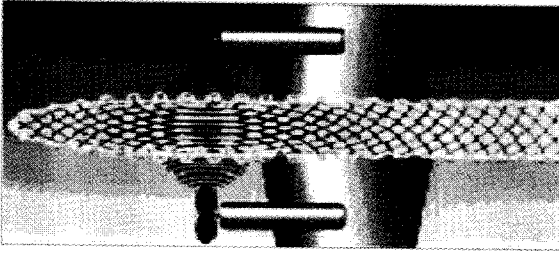


그림 3.7 ANC 시스템 장착 전후의 음장변화

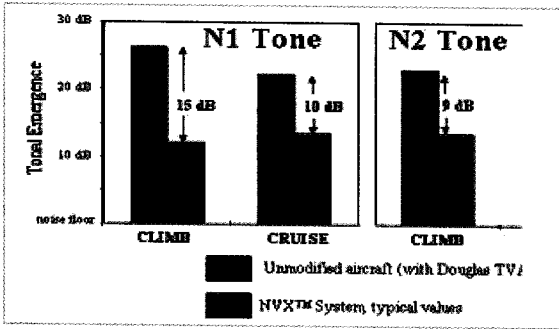


그림 3.8 ANC 시스템의 소음제어효과

#### 4. 결 론

능동 소음 제어의 기본 원리와 적용 필터 및 응용 분야를 알아보았다. 능동소음제어 기술은 최근 10년간 이론적으로 괄목할 만한 성과를 이루었으나 실제 현장에서의 적용은 그렇게 활발하지 않다. 그러나 최근에는 능동소음제어 기술의 한계와 가능성이 그전보다 잘 이해되고 있어 한계를 극복하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

능동소음제어 기법을 이용한 공조 시스템, 통신용 헤드셋, 자동차나 항공기 실내 소음제어, 엔진의 배기관, 변압기, 발전소 등은 물론 최근에는 공업용 풍동, 가스 터빈 등 산업 시스템에 활용이 늘어나고 있으며, 능동소음제어를 위한 하드웨어 개발도 활발히 이루어지고 있다.

앞으로 제어기의 단순화, 제어시스템의 코스트 저감, 제어기 및 트랜스듀서의 robustness 해결 등의 문제만 해결된다면 많은 응용이 기대된다.

#### 참고문헌

[1] R.R. Leitch and M.O. Tokhi, "Active noise control systems," IEE Proc., Vol.134, Pt.A, No.6, pp.525-

546, 1987.

[2] S.M. Kuo and D.R. Morgan, Active Noise Control Systems, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.

[3] C.H. Hansen, "Current and future industrial applications of active noise control," Proc. of Active 04, Williamsburg, Virginia, 2004.

[4] J. Scheuren, "Engineering applications of active sound and vibration control," Proc. of Active 04, Williamsburg, Virginia, 2004.

[5] T. Kletschkowski, D. Sachau, S. Böhme and H. Breitbach, "The acoustic window - a new local method for global active noise control," Proc. of ICSV 13, Vienna, 2006.

[6] H.D. Nam, S.D. Suh, K.J. Yoon, D.J. Ahn, "Stabilized multi-channel IIR filters for active control of noise in a duct," Proc. of ICSV 13, Vienna, 2006.

[7] J.N. Denenberg; "Anti-noise; Quietening the environment with active noise cancellation technology," IEEE Potentials, Vol.11, No.2, pp.36-40, 1992.

[8] L.J. Eriksson, M.C. Allie and P.A. Greiner, "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, 1987.

[9] M. Kato and S. Nakayama, "DSP: the key to the next generation of consumer electronics," Nikkei Electronics, Vol.1, No.4, pp.38-43, 1992.

[10] A. Omoto, K. Takashima, and K. Tujiwara, "Active suppression of sound diffracted by a barrier," J. Acoust. Soc. Am. pp.1671-1679, 1997.

[11] Bose web site, www.bose.com

[12] C/net review, Cnet web site, reviews.cnet.com

[13] Telex web site, www.telex.com