

技術解説

능동 소음제어 기법을 이용한 자동차 내부 소음 제어 Active Noise Cancellation Techniques for Road Vehicles

남 현 도

(Hyun Do Nam)

단국대학교 전기공학과 부교수

I. 서 론

소음에 대한 연구는 소음을 소음원으로부터 어떻게 하면 적게 방출할 수 있는가 하는 방법에 대한 연구와 흡음재 및 소음방지에 대한 연구 등 기계, 건축, 재료 공학적인 연구와 능동 소음 제어(Active Noise Control : ANC) 등 전기, 전자 공학적인 연구로 분류할 수 있다.

수동적인 방법은 흡음재를 사용하는 방법으로 500 Hz가 넘는 고주파 소음에 대해서는 좋은 효과를 보이나 저주파 소음에 대해서는 흡음재의 크기가 커져야 하므로 비용을 증가시키고, 비행기나 자동차 등 중량을 줄여야 하는 곳에서는 사용이 어려운 문제점이 있다. 이에 2차 source를 이용한 능동 소음 제어에 관한 연구는 70년대 이후 미국, 일본, 유럽 등지에서 활발히 이루어지고 있는데 회전기, 변압기, 자동차 엔진 등에서 발생하는 소음과 같은 저주파의 소음을 감소시키는데 있어서 종래의 수동적 방법보다 탁월한 효과를 보여주고 있다[1, 2].

80년대에 들어와 duct 내에서의 소음 제어, 공장, 사무실 등 3차원 공간에서의 능동 소음 제어, 능동 소음 제어 기법을 이용한 noise barrier의 설계, 자동차 및 항공기 내에서의 능동 소음 제어 등에 관한 연구가 일본의 Tohoku University, 미국의 Bell Lab. 및 Nelson Industry, 영국의 Southampton 대학의 Institute of Sound and Vibration Research(ISVR) 등에서 활발히 연구되고 있으며 이를 이용한 제품들

로 1990년 9월에는 Toshiba에서 냉장고가 시판되었고 1991년 11월에는 Nissan에서 자동차가 시판되기에 이르렀다.

본고에서는 능동소음제어 기법을 이용한 자동차 내부 소음 제어기법들을 소개하고 현재의 연구 동향과 앞으로의 전망을 논하고자 한다.

II. 자동차 내부의 소음제어

1990년에 들어 환경문제가 심각해 짐에 따라 배기가스의 양을 줄이기 위해 연료를 작게 소모하는 차에 대한 요구가 증가하고 있다. 이에 대한 해결책으로 차의무게를 줄이고 엔진의 효율을 증가시키는 연구가 진행되고 있는데 이와 같은 접근은 필연적으로 차량의 소음및 진동에 나쁜 영향을 주고 있다. 한편 자동차 소비자들을 좀더 편안하고 조용한 차를 요구하고 있어 이와 같은 두가지 문제를 동시에 해결해 줄 수 있는 방법으로 능동제어 기법이 각광을 받고있다 [3, 4].

현재 가장 많이 사용되고 있는 4기통 엔진은 1회전당 두번의 폭발 행정이 있으므로 초당 엔진 회전수의 2배의 주파수에 해당하는 소음 즉 2차 하모닉 성분의 소음이 주로 발생하게된다. 보통 차량엔진의 사용범위를 900-6000rpm 정도라고 할 때 진동소음의 주성분은 30Hz-200Hz가 되어 차량내부의 음향모드의 주파수대역인 80-250Hz와 겹치게된다. 승용차의 경우 음향모드는 위 주파수대역에서 두개혹은 세개가 존

재하며 이에 따라 차량의 운행중 엔진이 음향모드를 가진하게 되어 이것이 차량소음의 가장 큰 성분인 booming 소음이다.

Booming소음은 대부분의 4기통 중 소형차에서 발생하고 있는데 앞 좌석에서는 4000rpm 부근에서 뒷 좌석에서는 2000-3000rpm 부근에서 특히 문제가 된다. 또 booming소음은 같은 종류의 차에서도 차마다 크기가 매우 다양해서 12dB 정도까지 차이가 나며 동일 차량에서도 날마다 변하는 것으로 알려져 있다. 그러므로 기계적인 방법으로는 모든 차에 동시에 적용되는 해결책을 찾기가 매우 힘들며, 어떤 차에 소음을 줄이는 방법이 다른 차에서는 오히려 소음을 증가시키기도 한다. 그림1을 보면 자동차 내부의 승객의 귀의 위치에서 감지되는 소음은 여러 boundary source에서 발생하는 소음의 벡터 합으로 나타난다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 벡터 합은 주변 소음원들의 크기와 위상에 좌우되며 이것은 차량 구조물들의 구조적인 결합에 관계한다[3].

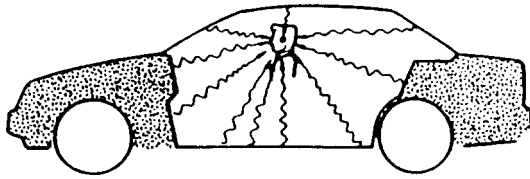


그림 1. 승객의 귀에 전달되는 소음경로

종래의 방법으로 이와 같은 소음을 줄이기 위해서는 소음원의 수를 줄이는 방법을 생각할 수 있으나 이것은 frame의 변경을 어렵게 하고 비용을 증가시킨다. 마이크로폰과 스피커를 사용하는 능동제어 기법은 엔진 속도의 변화나 차량의 음향특성의 변화에 빨리 적용할 수 있어 booming 소음 제어에 좋은 결과를 보여주고 있다. 차량소음은 이와같은 엔진에서 발생하는 booming 소음 뿐 만이 아니라 타이어와 도로 표면의 마찰로 발생하는 도로소음도 큰 문제가 되고 있다. 도로소음은 엔진소음과 달리 도로 표면 조건의 변화가 완만하여 소음 특성의 변화가 느리니 기준신호를 얻기가 힘들어 기준신호와 도로소음에 의한 차량내부 소음의 coherence의 크기가 소음제어기의 성능을 좌우하게 된다.

최근 Digital Signal Processor(DSP) 소자의 발달과 가격의 하락은 boomig 소음과 도로소음의 제어를

가능하게 만들었다.

Ⅲ. 엔진 소음 제어기

엔진에 의한 booming 소음을 제거하기 위해서는 엔진 진화 주기에 맞는 기준신호를 얻어 이에 맞는 제어신호를 스피커로 보내 소음을 상쇄시키어 한다. 기준신호는 tachometer로부터 얻을 수 있다. 엔진 소음의 변화가 없는 정상상태라면 look up table을 이용해서 제어가 가능하겠지만 엔진 속도의 변화가 빈번한 일반적인 경우를 생각하면 적응필터의 도입이 필수적이다. 적응필터 알고리즘으로는 multi channel LMS 알고리즘[5]이 많이 사용된다.

3.1 다중 채널 LMS 알고리즘

그림 2는 3차원 공간에 존재하는 소음을 다중 채널을 이용한 능동 소음 제어기법으로 제거하기 위한 블록 다이어그램이다. 그림에서 소음원은(P)이고, 기준 신호(x)는 음향제한이 없다는 가정하에서 추정된다고 가정한다. 음향제한이 없다는 가정은 자동차 소음 제어에서는 기준 신호를 엔진 속도를 측정하는 타코미터에서 직접 얻어므로 실제로 타당성이 있다. 그러므로 제어기법을 전향제어기법(feedforward control method)으로 간략화시킬 수 있으며 오차 마이크로폰들의 출력신호 제공의 함을 최소화하도록 적응필터를 설계하여 2차 음원의 제어신호를 발생시킨다.

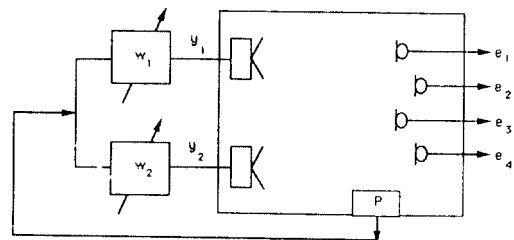


그림 2. 전향제어기법을 이용한 능동소음제어계의 블록 다이어그램

만일 소음원의 주파수중에 1개 고조파만을 제거하고자 한다면 디지털 필터 설계법은 주파수 영역해석에 의해 다음과 같이 간략화 시킬 수 있다.

n번째 고조파에서 1번째 오차신호의 2차 음원 신호의 복소성성분을 $E_1(\omega_n)$ 이라고 하고, 이 고조파에서 m번째 2차 음원의 복소성성분을 $W_m(\omega_n)$ 이라고 할때

제어대상 시스템이 선형이라고 가정하면 중첩 현상을 이용하여 (1)식과 같이 오차신호의 일반식으로 표현할 수 있다.

$$E_1(\omega_n) = D_1(\omega_n) + \sum_{m=1}^M C_{1m}(\omega_n) W_m(\omega_n) \quad (1)$$

여기서 $D_1(\omega_n)$ 은 소음원에서 발생한 1번째 복소 오차 신호이고, $C_{1m}(\omega_n)$ 은 n 번째 고조파에 대한, m 번째 2차 음원에서 1번째 오차 마이크로폰까지의 복소응답이다. 따라서 벡터 형태로 나타내면 (2)식과 같이 이를 그룹으로 나타내면 그림 3과 같다.

$$E(\omega_n) = D(\omega_n) + C(\omega_n) W(\omega_n) \quad (2)$$

여기서

$$E(\omega_n) = [E_1(\omega_n), E_2(\omega_n), \dots, E_L(\omega_n)]^T$$

$$D(\omega_n) = [D_1(\omega_n), D_2(\omega_n), \dots, D_L(\omega_n)]^T$$

$$W(\omega_n) = [W_1(\omega_n), W_2(\omega_n), \dots, W_L(\omega_n)]^T$$

$$C(\omega_n) = \begin{bmatrix} C_{11}(\omega_n) & C_{12}(\omega_n) & \dots & C_{1M}(\omega_n) \\ C_{21}(\omega_n) & C_{22}(\omega_n) & \dots & C_{2M}(\omega_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{L1}(\omega_n) & C_{L2}(\omega_n) & \dots & C_{LM}(\omega_n) \end{bmatrix}$$

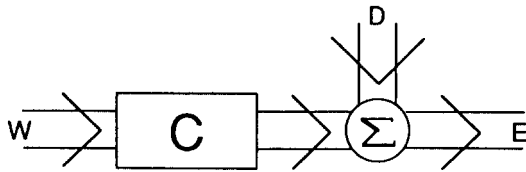


그림 3 그림 2의 블록 선도

(1)식은 제어대상 시스템이 시불변이라고 가정하였지만 실제로는 이를 만족하기 어려우므로 (1)식을 기초로 하여 제어대상 시스템이 시변인 경우로 확장하고자 한다.

일반화된 비용함수(cost function)를 이용한 다중 채널 능동소음 제어시스템의 제어기 설계 알고리즘을 유도하기 위해 오차 신호와 2차 음원 구동신호를 포함하는 비용함수를 최소화시키는 최대경사법을 이용

한 적응 알고리즘을 도출한다. 일반적으로 단일 소음원에 대한 비용함수는 (3)식과 같이 표현할 수 있다.

$$J = E^H A E + W^H B W \quad (3)$$

여기서 H 는 벡터(또는 행렬)의 conjugate transpose이며 E 와 W 는 $L \times 1$, $M \times 1$ 차수의 복소 오차 신호와 복소 2차 음원 신호이다. 그리고 A 와 B 는 $L \times L$, $M \times M$ 차수의 비중행렬(weighting matrix: positive definite)이며 대각행렬일 필요는 없다. 먼저 간단한 예로, 해를 구하기 위해 (4)식과 같이 오차신호를 비중행렬없이 취급을 하고 2차 음원 신호의 취급에 비중변수 β 를 고려한 비용함수는

$$J = E^H E + \beta W^H W \quad (4)$$

와 같다. (2)식을 (4)식에 대입하면 W 에 대한 quadratic form을 얻는다.

$$J = D^H D + W^H C^H D + D^H C W + W^H [C^H C + \beta I] W \quad (5)$$

(5)식의 행렬 $[C^H C + \beta I]$ 는 실수행렬에서 quadratic form의 Hessian행렬과 같은 역할을 하므로 이 행렬은 W 의 실수부보다는 허수부에 대한 J 의 2계 미분 결과이다. 오차 마이크로폰의 수가 2차 음원의 수보다 크거나 같다면 ($L \geq M$), 이 행렬은 positive definite이고, 따라서 오차 표면(error surface)은 유일한 global minimum을 가진다. 이같은 비용함수에서 W 의 실수부나 허수부(W_R, W_I)에 대한 1계 미분은 모두 실수가 되고 복소 gradient 벡터 g 를 정의할 수 있다.

$$g = \frac{\partial J}{\partial W_R} + \frac{\partial J}{\partial W_I} = 2[C^H C + \beta I] \beta W \quad (6)$$

g 의 실수부와 허수부는 서로 독립이므로 W_R 과 W_I 에 대한 J 의 상미분 결과를 0으로 놓으면($g=0$), 최적 신호를 얻는다.

$$W_{opt} = -[C^H C + \beta I]^{-1} C^H D \quad (7)$$

이 경우의 최대경사법은 복소 gradient 벡터를 얻을 수 있다.

$$g = 2[C^H C + \beta I] W \quad (8)$$

따라서 k번째 갱신식에서 gradient에 반비례하도록 복소 2차 음원 신호의 실수부분과 허수 부분을 조정하여 최대경사 알고리즘을 얻는다.

$$W(k+1) = (1 - \alpha \beta)W(k) - \alpha C^H E(k) \quad (9)$$

여기서 α 는 수렴계수이다. (9)식은 잘 알려진 "Leaky" LMS 알고리즘과 유사하며 잘 수렴하는 것으로 알려져 있다.

3.2 엔진 소음 제어기의 적용예

능동소음 제어 기법의 자동차에의 적용은 영국의 Lotus 사와 Southampton 대학의 ISVR에서 최초로 실용화하였고 그후 많은 발전을 이룩하였다. 본 절에서는 ISVR에서 개발해서 실제 자동차에 적용한 엔진 소음 제어 시스템을 살펴보기로 한다[3].

전절에서 소개한 multi-channel LMS 알고리즘을 사용했으며 적응 필터 실현을 위해 Texas Instrument 사의 TMS 320C25 Digital Signal Processor (DSP)를 사용했다. 500Hz까지의 주파수를 제어 대상으로 했으며 AD 및 DA 변환기는 12bit짜리를 사용했다.

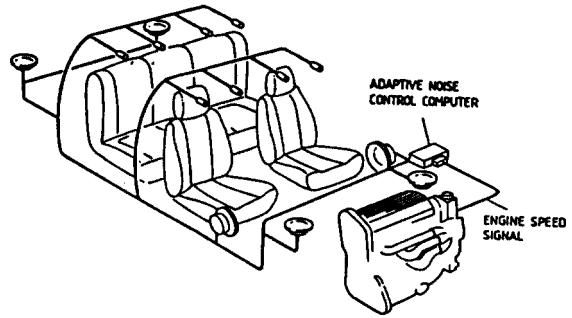


그림 4. 승용차에 적용된 6×8 ANC 제어기

그림4에 중형 세단형 승용차에 탑재된 ANC 제어기를 보여주고 있다. 좌우 dash board에 2개, 앞문에 1개씩 2개, 뒷 좌석 뒷부분(rear parcel shelf)에 2개 모두 6개의 스피커를 사용했으며 지붕의 lining에 8개의 마이크로폰을 설치했다. 즉 6×8 시스템을 사용했다. Tachometer에서 얻은 엔진 속도 신호를 기준 신호로해서 ANC 컴퓨터에서 다중 채널 LMS 알고리즘을 이용해 적절한 신호를 각각의 스피커로 보내 소음을 제어했다.

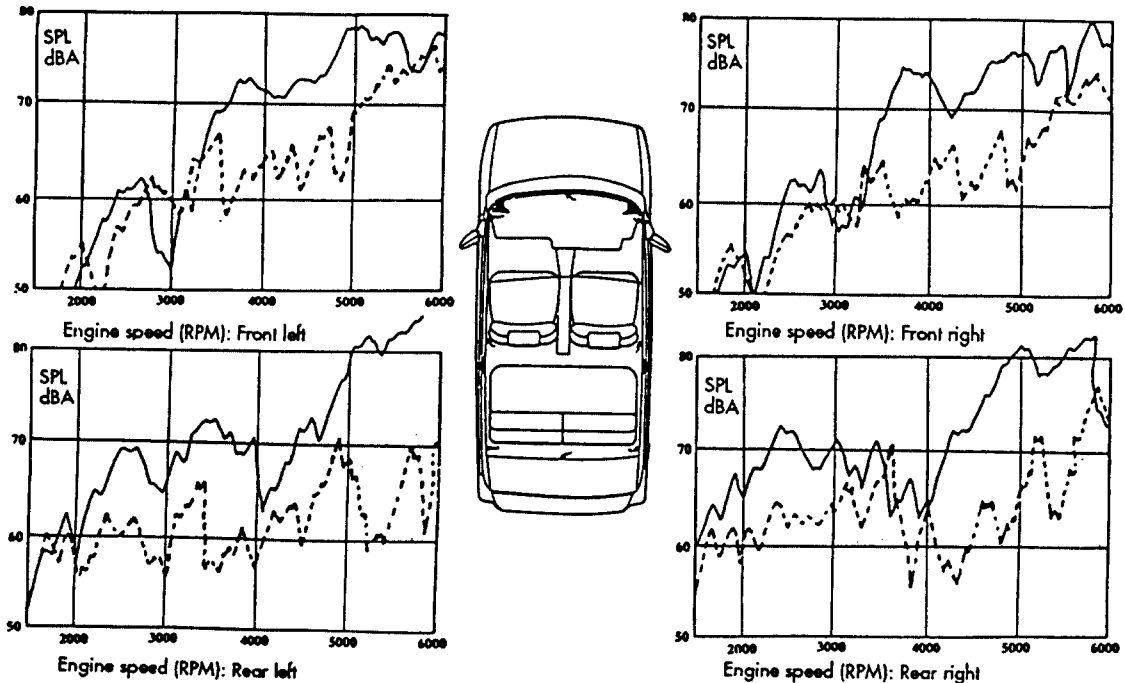


그림 5. ANC 제어기를 적용했을 때의 소음 감쇄효과

상기 시스템을 1100cc, 4기동 엔진 승용차에 적용한 결과를 그림5에 보였다. 앞, 뒤 좌석 모두 3000 rpm 이상에서는 10-15dB의 소음감쇄를 보였고 뒷좌석에서는 2000-3000rpm에서도 10dB이상의 소음이 줄어들었다. 6x8 시스템을 사용해서 30Hz-200Hz의 소음을 줄일 수 있었으며 스피커는 4.5inch를 사용해서 30Hz 정도의 소음을 제어하는 것이 가능했다. 또 이 시스템은 car audio 등의 In Car Entertainment (ICE) system에 결합하여 사용할 수 있으며 이때 ICE system의 성능에 영향을 주지 않는다. 전체적으로 1 watt 미만의 전력 밖에 소비하지 않아 매우 경제적이고 AD, DA 변환기 등을 쓴 것을 사용하면 추가적인 비용도 크게 문제가 되지 않는다. 2인승 스포츠카나 밴 같은 경우에는 2x4 system이면 가능한 것으로 생각되며 중형차인 경우도 4x8 system을 사용하더라도 어느 정도 만족한 결과를 얻을 수 있으리라 생각된다.

3.3 능동 엔진 mounts

엔진에 의한 booming 소음의 추가적인 감쇄를 위해서는 engine mounts의 진동을 제어해서 소음을 원천적으로 감소시키는 것이 매우 효과적이다. Lotus에서 Volkswagen Golf GTI 16 valve 승용차에 설치한 active mount control system을 그림 6에 보였다 [6].

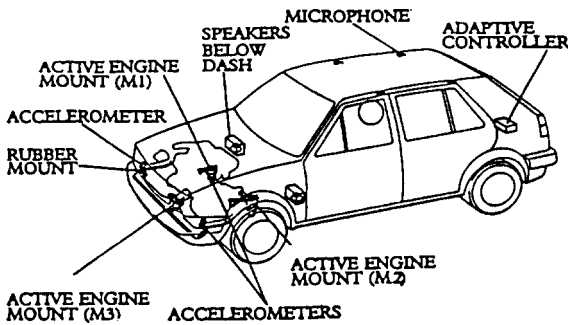


그림 6. 능동 엔진 mount의 설치도

25Hz 이하의 저주파에서는 종래의 hydramount로 동작하고 25Hz 이상의 주파수에서만 actuator에서 2차 force를 내보내 active mounts로 동작하도록 했다. 전집에서 소개한 multi-channel LMS 알고리즘을 사용해서 진동과 소음을 제어해서 그림 7에 보인 바와 같은 결과를 얻었다.

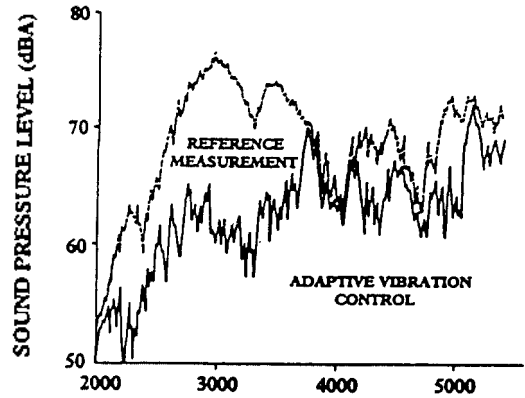


그림 7. Active engine mount를 사용한 경우의 소음감쇄

3000rpm 근처에서 매우 좋은 결과를 보였으며 3.2 선의 system과 같이 사용할 경우 더욱 좋은 결과가 기대된다.

IV. 도로 소음 제어

도로 소음은 엔진 소음과 달리 거의 random noise에 가깝고 소음원이 하나가 아니기 때문에 여러개의 기준신호를 필요로 해서 제어기의 구성이 매우 어렵다. 기준 신호는 wheel hub나 body의 진동을 측정해서 얻을 수 있는데 transducer의 최적위치 선정이 매우 어렵고 차종에 따라 최적 위치가 일정하지 않다. 도로소음 제어를 위한 세이 필터의 구성은 3장에서 언급한 다중채널 LMS 알고리즘을 사용한 선형 제어 기법[7]과 neural network 제어기를 사용한 비선형 제어 기법[7,8]이 소개되고 있는데 선형 제어 기법은 기준 신호의 coherence 분해와 time delay에 따른 성능 한계가 있어 본 고에서는 비 선형 제어 기법에 대해 주로 논하고자 한다.

4.1 비 선형 제어 기법

차체의 진동 sensor로부터 측정된 기준 신호와 실제 차량 내부의 소음 신호사이의 coherence가 선형 제어기의 성능을 좌우하나 소음원으로 부터의 전달 경로가 비선형이기 때문에 많은 경우 coherence가 30% 이하로 떨어져 제어기의 성능을 저하시킨다. 그림 8에 전륜 구동 차량의 앞쪽 supersion에 부착된 accelerometer 신호와 내부 소음 신호의 coherence를 보였다. 진동의 크기가 커질수록 coherence가 작아지는 것을 알 수 있으며 아울러 진동에 의한 소음

의 전달경로가 비선형임을 알 수 있다.

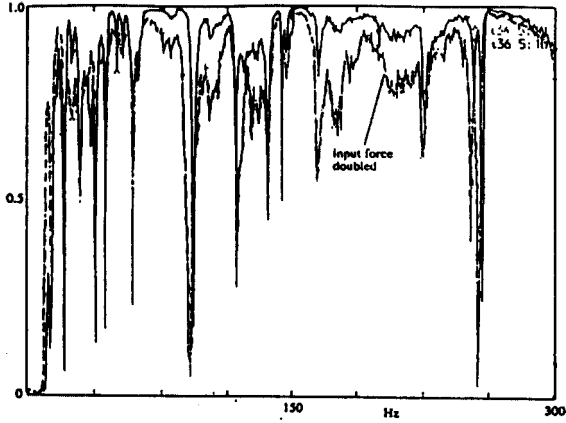


그림 8. supersion에 부착된 accelerometer 신호와 내부 소음 신호의 coherence

4.2 Neural network 제어기

Neural network을 사용하여 이와 같은 비 선형 성분을 modeling하면 coherence를 증가시킬 수 있다. 그림 9에서 비선형 제어기의 블록 선도를 보여주고 있다.

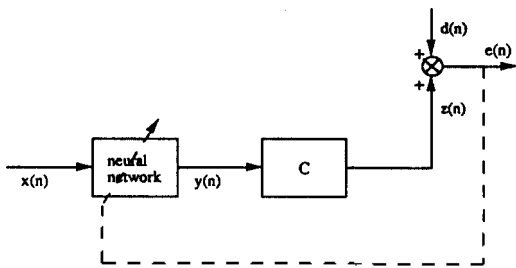


그림 9. 비선형 제어기의 블록 선도

선형 제어기의 적응 필터 대신에 그림 10과 같은 2-layer neural network을 사용할 수 있다. 여기서 $x(n)$ 은 accelerometer로부터 측정된 기준 신호이다. Back propagation 알고리즘을 이용한 neural network 제어기의 유도가 참고문헌[8]에 나와 있으며 이를 이용한 실험 결과를 그림 11에 보였다. 100Hz 부근에서 6dB 정도의 소음이 감소했으며 32 point FIR 필터를 사용했을 때 보다 70Hz 부근에서 다소 나은 결과를 보였다. 아직은 이부분의 연구가 시작 단계로 그렇게 좋은 결과를 보여주지 못했으나 비선형 제어기를 사용해서 coherence를 증가시키는

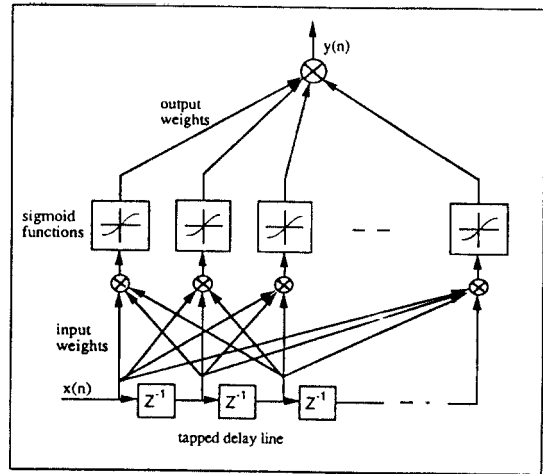


그림 10. 2 layer neural network

가능성을 보였으므로 앞으로 이에 대한 연구가 더 이루어져야 하리라 본다.

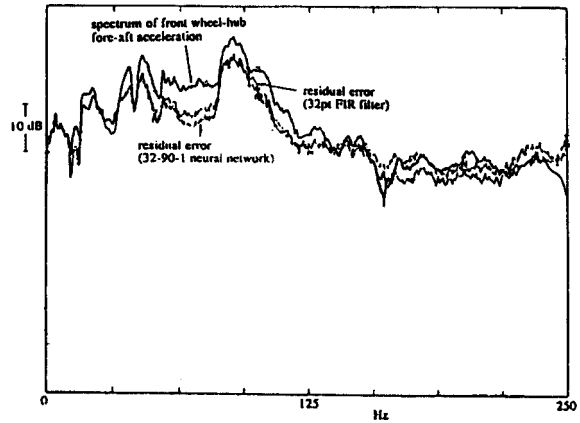


그림 11. 선형 필터 및 neural network 제어기를 적용한 경우의 소음감쇄

V. 결론 및 전망

능동 소음 제어 기법을 이용한 자동차 내부 소음 제어기의 현황과 연구 동향을 소개했다. 현재 이 분야에 대한 연구는 영국의 Lotus, 독일의 Volkswagen, 스웨덴의 Saab, 일본의 Nissan 및 Toyota[9] 등 많은 자동차 회사에서 활발하게 연구되고 있으며 1991년 세계 최초로 Nissan Bluebird에 장착되기에

이르렀다. 엔진 소음에 대해서는 대개 10-15 dB 정도의 감쇄 효과를 얻었고 active mounts를 증가하면 더 좋은 결과가 기대되고 있으며, 도로 소음에 대해서는 이제 막 연구가 시작되는 단계라 아직은 그렇게 좋은 결과들이 발표되지 않고 있으나 이 분야에 대한 연구도 영국의 ISVR을 중심으로 활발히 전개되고 있다.

앞으로는 환경 오염을 줄이기 위해 배기 가스 규제가 점점 심해지는 추세에 있어 자동차의 경량화가 필수적이므로 흡음체에 의한 소음 제어 보다는 능동 제어 기법이 각광을 받을 것으로 보인다. ASIC 소자들을 사용하면 제어기의 가격을 더욱 낮출 수 있으며 궁극적으로는 엔진 소음 제어기, active mounts 및 도로 소음 제어기를 하나로 묶어 전체적인 가격을 떨어뜨릴 수 있으리라 생각된다. 또 car audio 등 In-Car Entertainment (ICE) 시스템이 점점 고압화되고 CD, DAT 등 디지털화하는 추세에 있어 여기와 사용되는 DSP 소자에 약간의 software만 추가하면 적용이 가능할 날도 오리라 생각된다. 세계적으로 이 분야에 대한 연구는 시작된지가 그렇게 오래되지 않아 국내에서도 2, 3년 내에 현재의 수준을 따라잡을 수 있으리라 생각되며 도로 소음 제어에 대한 연구를 추가하면 쉽게 상품화 할 수 있으리라 생각된다.

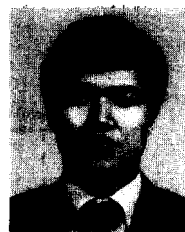
자동차 내부 소음 제어에 대한 연구는 공장, 발전소, recording studio 등 소음이 많은 곳의 소음 제어에도 그대로 적용될 수 있으며, 이 시스템은 dynamic equalisation이나 speech enhancement 등에도 사용될 수 있으리라 생각된다.

참 고 문 헌

1. 정찬수, "능동 소음 제어 기술," 한국음향학회지, Vol. 11, No.6, pp.70-75, 1992.
2. 남현도, S.J. Elliott, "Adaptive active noise control using multiple model approaches," ISVR Technical Report No.210, University of Southampton, U.K., 1992.
3. D.C. Perry, I.M. Stothers, S.J. Elliott and P.A. Nelson, "The use of DSP for adaptive noise cancellation for road vehicles," Acoustics Bulletin, pp. 9-11, October, 1991.
4. Y. Kurata and N. Koike, "Adaptive active attenuation of interior car noise," Proc. of Int.Symp. on Active Control of Sound and Vibration, pp.297-302, Tokyo, 1991.

5. S.J. Elliott, C.C. Boucher and P.A. Nelson, "The behavior of a multiple channel active control system," IEEE Tr. Signal Processing, Vol.40, No.5, pp. 1041-1052, 1992.
6. A.M. McDonald, S.J. Elliott and M.A. Stokes, "Active noise and vibration control within the automobile," Proc. of Int. Symp. on Active Control of Sound and Vibration, pp.147-156, Tokyo, 1991.
7. J.J. Sutton, S.J. Elliott and I. Moore, "Use of nonlinear controllers in the active attenuation of road noise inside cars," Proc. of the Conference on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration, pp.682-690, Virginia, U.S.A., 1991.
8. S.J. Elliott, "The application of back-propagation in feedforward active control systems," ISVR Contract Report No. 91/36, University of Southampton, U.K., 1991.
9. A. Nojima, Y. Matsuzaki and S. Kato, "Digital signal processing sound field control for automobile 'Toyota Sera'," Proc. of Int. Symp. on Active Control of Sound and Vibration, pp.513-516, 1991.

▲ 남 현 도 (南 炫 道)



1979년 2월 : 서울대학교 공과대학
전기공학과 졸업(공학사)

1981년 2월 : 서울대학교 대학원 전
기공학과 졸업(공학석사)

1986년 8월 : 서울대학교 대학원 전
기공학과 졸업(공학박사)

1982년 3월~현재 : 단국대학교 전기공학과 전임강사, 조교수, 부교수

1991년 1월~1992년 1월 : Visiting Fellow, Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, U.K.

현재 : 단국대학교 전기공학과 부교수

관심분야 : Adaptive signal processing and control, Active sound control, Biomedical signal processing.