

〈論 文〉

역전파 알고리즘에 의한 덕트내 소음의 능동제어

신 준* · 김홍섭* · 오재응**

(1993년 12월 9일 접수)

Active Control of Sound in a Duct System by Back Propagation Algorithm

Joon Shin, Heung-Seob Kim, and Jae-Eung Oh

Key Words: Active Noise Control(능동 소음제어), Duct System(덕트계), Back Propagation Algorithm(역전파 알고리즘), Learning(학습)

Abstract

With the improvement of standard of living, requirement for comfortable and quiet environment has been increased and, therefore, there has been a many researches for active noise reduction to overcome the limit of passive control method. In this study, active noise control is performed in a duct system using intelligent control technique which needs not decide the coefficients of high order filter and the mathematical modeling of a system. Back propagation algorithm is applied as an intelligent control technique and control system is organized to exclude the error microphone and high speed operational device which are indispensable for conventional active noise control techniques. Furthermore, learning is performed by organizing acoustic feedback model, and the effect of the proposed control technique is verified via computer simulation and experiment of active noise control in a duct system.

1. 서 론

산업의 발달과 함께 설비의 고속화, 자동화에 따라 생활환경 전반에서 발생하는 소음문제는 점차 심각한 형태로 부각되고 있으며, 특히 생활수준의 향상으로 환경문제에 큰 관심을 갖게 됨에 따라 소음대책에 대한 사회적 요구가 고조되고 있다. 한편 기존의 소음저감 대책은 차음재나 흡음재의 사용에 의한 수동적인 방식이 주종을 이루었으나 설치 공간상의 제약이나 청정환경의 유지에 대한 어려움 그리고 저주파에 대한 제어효과가 미흡하다는 측면 등이 극복되어야 할 문제점으로 부각되었다.

이에 따라 음향에너지가 큰 저주파 영역에 대한 효과적인 소음저감을 위하여 기존의 수동적인 방식의 한계를 극복하고 그 효율을 향상시키기 위한 능동 소음제어기법들이 연구되고 있는데 음향학적 기구와 평면파 모델에 대한 해석적 접근⁽¹⁾이나 역위상에 의한 주 소음원의 제거(cancellation) 방식^(2,3) 등이 주종을 이루고 있다. 역위상에 의한 소음제어 방식으로서 가장 대표적인 Filtered-X LMS 알고리즘을 이용한 능동 소음제어방식이 실험에 의한 검증을 통하여 국내에서도 발표되고 있으며⁽⁴⁾ 상품화에 직접 적용하여 실용화 단계에 있는 내용도 발표되고 있다.⁽⁵⁾ 또한 덕트내의 평면파 뿐만 아니라 고차 모드를 제어하기 위한 다입력 다출력방식⁽⁶⁾도 제안되고 있다. 그러나 현재 연구되고 있는 능동 소음제어기법들은 대부분이 고차의 디지털필터(digital filter) 모델링방식에 의존하고 있으며 따

*정회원, 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

**정회원, 한양대학교 자동차공학과

라서 많은 계산량을 요구하므로 실시간 처리를 위해서는 고속 연산장비가 필수적이다. 그리고 시스템의 특성에 따라 필터 차수나 계수를 적절히 선정하여야 하며 제어성능과 수렴성에 영향을 미치는 수렴계수의 온라인화에 대한 연구도 초보적인 단계에 머물고 있는 실정이다.⁽⁷⁾ 또한 제어계의 구성에 있어서도 알고리즘의 차이를 제외하고는 거의 유사한 형태를 갖추고 있다.

따라서 본 연구에서는 시스템의 특성을 파악하기 위한 모델링 및 고속 연산을 위한 추가적인 장비가 필요하지 않고 제어계의 구성을 단순화시킬 수 있는 능동소음제어방식에 의한 능동 소음제어기법을 연구하였다. 능동소음제어기법은 최근 이론적인 측면에서 몇가지가 제안되고 있으나 아직까지 범용적인 방식이 제시되지 않고 있으며 그 응용범위에 있어서도 극히 국한되어 발표되고 있다.^(8,9) 이에 따라 본 연구에서는 역전파 알고리즘에 의하여 미지의 시스템 특성을 학습하고 임의의 입력원에 대하여 제어력을 결정할 수 있는 능동 소음제어방식을 제안하여 모의 덕트에서의 평면파에 대한 제어를 수행하였다.^(10,11) 일반적으로 덕트에서와 같은 평면파의 제어는 산업계에 광범위하게 응용될 수 있다는 점과 실험장치를 쉽게 구성할 수 있다는 측면에서 능동 소음제어의 대상으로 많이 활용되어지고 있다. 본 연구에서 제안한 능동 소음제어 시스템에서는 인공신경망(neural network)이 갖는 고유의 학습기능 및 보간(interpolation)기능을 활용하여 랜덤한 입력원에 대하여 본 연구에서 설정한 덕트(duct)모델 및 음향채환(acoustic feedback)모델을 학습하게 된다. 학습이 수행된 후 제어시에는 에러마이크(error microphone)의 사용없이 임의의 입력원의 정보만으로 출력을 결정하게 된다. 본 연구에서는 마이크의 설치환경이나 부가적인 연산장비의 활용에 제약이 있는 경우 에러 마이크를 사용하지 않고 알고리즘만으로 소음원을 제어할 수 있는 단순하고 효과적인 제어계를 설계하였다. 그리고 정현파, 주파수 변조(modulation)파, 랜덤파 입력원에 대하여 능동 소음제어 컴퓨터시뮬레이션을 수행하여 설계한 제어계의 타당성을 고찰하였다. 또한 모의 덕트에서 시변환경을 가정한 주파수 변조파에 대한 실험과 랜덤한 신호에 대한 제어실험을 통하여 기존의 Filtered-X LMS 알고리즘에 의한 결과와 비교함으로써 제안한 능동 소음제어방식의 효과와 제어계의 유효성을 검증하였다.

2. 소음제어를 위한 역전파 알고리즘

역전파 알고리즘은 지도학습(supervised learning)을 행하는 인공신경망의 일종으로서 오프라인(off-line)으로 학습하며 이산(discrete)시간에서 동작한다. 또한 다른 신경망에 비하여 프로그램이 간단하고 학습이 잘되는 장점을 갖고 있다.

역전파 알고리즘에서 학습된 신호에 대한 출력은 입력벡터 X 와 가중값(weight) 벡터 W 의 곱들의 합이 일정한 임계값에 의해 반응을 보이게 되는데 이것은 식(1)과 같이 표현할 수 있으며, 여기서 θ 는 바이어스(bias) 벡터를 나타내고 있다.^(12,13)

$$OUT = f(XW^T - \theta) \quad (1)$$

여기서, f 는 활성화함수(activation function)라고도 불리우며 이 함수에 의해 출력값이 결정되는데 본 연구에서 사용된 활성화함수는 미분특성과 비선형특성으로 인하여 일반적으로 많이 사용되는 식(2)와 같은 시그모이드(sigmoid)함수를 이용하였다.

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2)$$

한편 Fig. 1은 본 연구에서 정의한 모델의 경로를 나타내고 있는데, 덕트모델은 입력마이크로부터 제어스피커까지의 경로이며 음향채환 모델은 역으로 제어스피커에서 입력마이크까지의 경로이다. 그림에서 입력스피커는 소음원을 발생시키기 위하여 사용되며, 에러마이크는 제어스피커 위치에서 학습을 위한 덕트모델의 출력과 음향채환모델의 입력을 검출하고 실제 제어시에는 사용되지 않는다.

또한 Fig. 2는 본 연구에서 적용한 역전파 모델을 나타내고 있는데, 덕트모델과 음향채환모델은 모두 입력층(input layer), 은닉층(hidden layer), 출력층(output layer)의 3개의 층으로 구성되어 있다. 이 모델에서 입력층은 3개의 노드(node)로 구성되며 은닉층은 10개의 노드 그리고 출력층은 1개

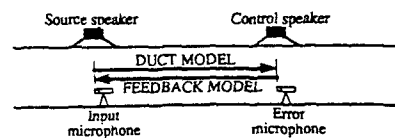


Fig. 1 The path of the defined two models in a duct system

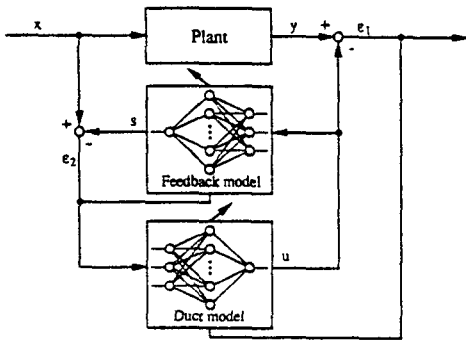


Fig. 2 Block diagram of the duct model and the feedback model for active noise control

의 노드로 구성된다. 따라서 학습을 위해서는 3개의 입력과 1개의 출력을 씌우므로 하는 데이터가 필요하게 된다. 학습시 덕트모델에서의 입력값은 입력 마이크에서의 이산신호 $x(t)$ 와 신호의 변화량 $x(t-1) - x(t) - x(t+1)$ 이며 출력값은 에러마이크에서 감지된 신호 $y(t)$ 이다. 그리고 음향회환모델에서는 역으로 입력값은 에러마이크에서의 이산신호와 신호의 변화량이고 출력값은 입력마이크에서 감지된 신호이다. 학습과정에서는 먼저 입력층 패턴과 요구하는 출력층 패턴값을 제시하고 입력층과 은닉층 사이의 가중값을 이용하여 은닉층의 j 번째 출력값 h_j 를 계산한다.⁽¹⁴⁾

$$h_j = f\left(\sum_{i=1}^3 x_i w_{ij} - \theta_j\right) \quad (3)$$

where, x_i : i -th input pattern
 w_{ij} : Weight between i -th input and j -th hidden layer
 θ_j : Threshold of j -th hidden layer

그리고 은닉층과 출력층 사이의 가중값을 이용하여 출력 z_1 을 결정한다.

$$z_1 = f\left(\sum_{j=1}^{10} h_j w_{j1} - \theta_1\right) \quad (4)$$

where, w_{j1} : Weight between j -th hidden and output layer
 θ_1 : Threshold of output layer

한편 은닉층과 출력층 사이의 가중값 w_{j1} 및 임계값 θ_1 은 출력층의 에러 δ_{j1} 과 요구되는 출력 d_1 을 이용하여 식(6), (7)과 같이 수정된다.

$$\delta_{j1} = z_1(1 - z_1)(d_1 - z_1) \quad (5)$$

$$w_{j1}(t+1) = \alpha w_{j1}(t) + \eta \delta_{j1} z_1 \quad (6)$$

$$\theta_1(t+1) = \theta_1(t) + \eta \delta_{j1} \quad (7)$$

where, α : Momentum

η : Learning coefficient

같은 방식으로 입력층과 은닉층 사이의 가중값 w_{ij} 및 임계값 θ_j 은 은닉층의 에러 δ_{ij} 를 이용하여 다음 식과 같이 수정된다.

$$\delta_{ij} = h_j(1 - h_j) \sum \delta_{j1} w_{j1} \quad (8)$$

$$w_{ij}(t+1) = \alpha w_{ij}(t) + \eta \delta_{ij} h_j \quad (9)$$

$$\theta_j(t+1) = \theta_j(t) + \eta \delta_{ij} \quad (10)$$

결국, 에러가 원하는 범위내에 수렴할 때까지 식(3)~(10)의 과정을 반복하게 되는데, 여기서 모멘텀(momentum) α 는 앞 단계의 계산에서 나타난 가중값의 변화를 다음 단계에 반영시켜서 학습과정시 수렴의 속도를 촉진시켜 주는 역할을 한다.

3. 능동 소음제어 시스템

시계열의 데이터로 부터 특정 시스템의 특성을 파악하거나 제어력을 결정하는데 있어 학습신호의 선정이 매우 중요하게 작용된다.⁽¹⁵⁾ 기존의 대부분의 연구에서는 한 스텝 앞선 신호를 예측하기 위하여 몇개의 지연된 신호를 사용하고 있다.⁽¹⁶⁾ 그러나 실제의 대부분의 시스템들은 다소간의 비선형성을 내포하고 있으므로 모의 덕트에서도 제어스피커 위치에서 일반적으로 신호가 비선형적으로 변화하게 되고 입력되는 신호의 개수가 많아지면 실시간 처리에 불리하게 되므로 단순하면서도 유연한 제어 시스템의 설계가 요구되어 진다.⁽¹⁷⁾ 따라서 본 연구에서는 덕트에서의 능동 소음제어를 위해 단순하고 효과적인 지능제어 방식을 도입하였다. Fig. 3은 모의 덕트에 대한 능동 소음제어 시스템의 구성을 나타내고 있다.

본 연구에서 제어하고자 하는 모의 덕트시스템은 총 길이가 4.5m이고 무한 덕트로 가정하기 위하여 끝부분에 유리섬(glass wool)을 부착하였다. 그리고 소음원은 합음발생기와 잡음발생기에 의해 입력스피커를 통해 출력된다. 한편 학습신호는 500 Hz에서 저역통과 필터를 거친 랜덤노이즈를 발생시켜 모의 덕트에서 수집하였으며 출력층에서의 에러가 0.002 보다 작아질 때 까지 학습을 수행하였다. 이때 학습을 위한 입출력 쌍(pair)은 100개의 샘플 데이터로 하였으며 학습계수는 0.2, 모멘텀은

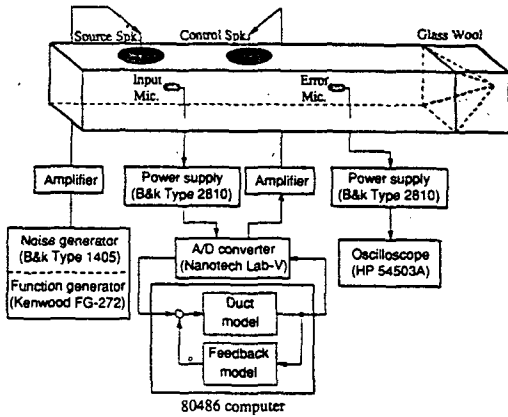


Fig. 3 Block diagram of the active noise control in a duct system

0.8로 하였다. 여기서 제어효과를 높이기 위해서는 적절한 학습신호와 샘플데이터의 개수 선정이 필요 한데 실제 적용시에는 학습시간과 소음저감 효과를 절충하여 입출력 쌍의 개수를 설정해야 한다.

Fig. 4는 본 연구에서 제안한 제어기법이 모의 덕트시스템을 효과적으로 모델링할 수 있는지를 검증하기 위하여 에러마이크에서 측정된 랜덤신호와 역전과 알고리즘에 의하여 예측된 추정신호를 동시에 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 매우 짧은 시간내에 기울기가 변화하는 경우를 제외하고는 전반적으로 양호한 추정성능을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 학습에 의한 추정신호를 역위상으로 제어스피커에 입력시킨다면 효과적인 제어결과를 얻을 수 있으리라 기대된다.

한편 직관적으로 생각할 수 있듯이 실제의 제어

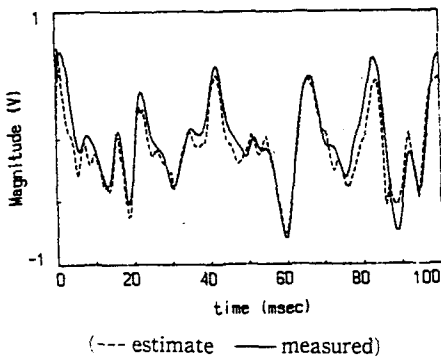


Fig. 4 Comparison of estimated and measured random signal at the control speaker position for system identification

시에는 에러마이크로부터의 정보없이 입력마이크의 정보를 학습되어진 가중값과 곱하여 출력을 바로 결정하게 되므로 학습시에 소요되는 시간보다 훨씬 빠르게 되며⁽¹⁸⁾ 이때 소요되는 시간은 80486 프로세서 (processor)와 A/D 변환기를 사용하였을 경우 0.5 msec이다. 따라서 본 연구에서 적용한 모의 덕트에 있어 입력마이크에서부터 제어스피커까지의 거리 1.0 m를 고려하였을 경우 부가적인 연산장비 없이 알고리즘만으로 실시간 처리가 가능할 것이다.

4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

능동 소음제어를 위한 컴퓨터시뮬레이션에서는 모의 덕트에서 수집된 데이터로 학습이 완료된 덕트모델과 음향제한모델을 사용하여 제어를 수행함으로써 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

4.1 정현파에 대한 제어시뮬레이션

일반적으로 능동 소음제어에서 주목하는 주파수 영역은 음향에너지가 큰 500 Hz 이하의 저주파이므로 정현파의 경우 250 Hz를 대상으로 제어시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 5는 정현파에 대한 제어 결과를 주파수영역에서 나타내고 있다.

그림에서 알 수 있듯이 250 Hz에서 약 25 dB의 제어 효과를 나타내고 있으며 전체적으로도 10 dB 정도의 저감효과를 나타내고 있다. 한편 본 연구에서는 학습신호로 랜덤파를 선정하였으나 정현파와 같은 특정 입력원을 학습신호로 사용한다면 제어 효과는 더욱 증대될 것으로 생각된다.

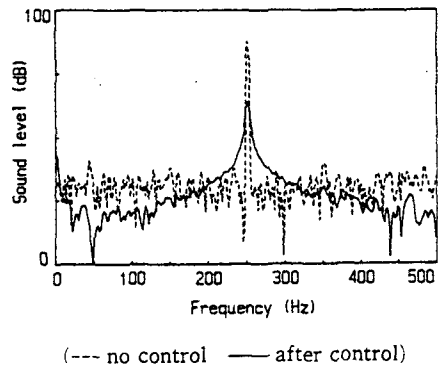


Fig. 5 Control result of computer simulation for single sinusoidal signal

4.2 주파수 변조파에 대한 제어시뮬레이션

본 시뮬레이션에서는 주파수 변조파에 대한 제어를 행하였는데 이러한 현상은 회전체에 피치(pitch) 오차가 존재할 경우 발생하게 되며 시간에 따라 주파수가 변동하게 된다. Fig. 6은 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다.

그림에서 알 수 있듯이 250 Hz를 중심으로 양측에 이론적으로는 무한개의 사이드 밴드가 나타나게 되며 이 경우에도 중심 주파수를 비롯한 모든 사이드 밴드에서 약 25 dB 이상으로 효과적으로 제어하고 있다. 이 결과로부터 회전체의 이상에 따른 시변의 비선형적인 소음원은 물론 주기적인 조화(harmonic) 성분을 포함하는 소음원에 대해서도 안정적이며 효과적으로 제어할 수 있으리라 기대된다.

4.3 랜덤파에 대한 제어시뮬레이션

본 시뮬레이션에서는 랜덤파의 경우에 대한 제어

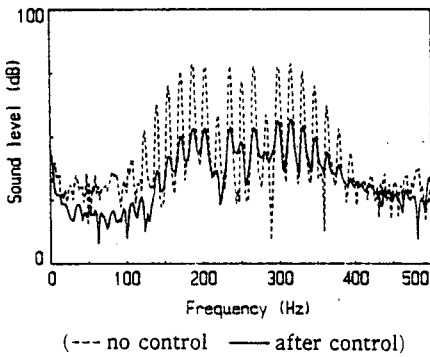


Fig. 6 Control result of computer simulation for frequency modulated signal

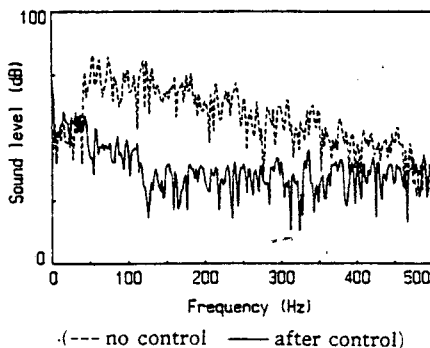


Fig. 7 Control result of computer simulation for random signal

를 수행하여 제안한 소음제어 시스템의 성능을 평가하였다. 랜덤파의 경우에는 저주파 성분만을 고려하기 위해 500 Hz에서 저역통과 필터(low pass filter)를 거쳐 제어를 수행하였으며 결과는 Fig. 7에 나타나 있다.

그림에서 랜덤파의 경우 전 주파수 대역에서 크게 제어효과를 나타내고 있으며 전체적으로 약 25 dB 이상의 저감량을 보이고 있다. 한편 실제 시스템에서는 일반적으로 60 Hz 이하에서 스피커의 성능이 보장되지 못하므로 이 부분에 대한 제어 결과는 다소 다르게 나타날 것으로 생각된다. 또한 랜덤파의 경우에 있어서 정현파의 제어효과와 거의 유사한 결과를 얻었는데, 이것은 학습시킨 신호가 실제 모의 덕트에서의 랜덤파였기 때문인 것으로 생각된다.

이상과 같은 시뮬레이션 결과를 통하여 본 연구에서 제안한 능동 소음제어 시스템의 안정성 및 알고리즘의 타당성을 검증할 수 있었다. 또한 제어하고자 하는 특정 소음원의 정보를 학습신호로 채택함으로써 보다 우수한 제어성능을 얻을 수 있으리라 기대되며 소음원이 변동하는 경우에도 변화된 시스템에 대한 재학습없이 제어를 수행할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 실험 및 결과 고찰

본 연구에서는 지능제어기법의 효율성을 검증하기 위하여 컴퓨터시뮬레이션과 동일한 소음원에 대하여 제어실험을 수행하였다. 실험장치 및 구성은 Fig. 3과 동일하며 제어기는 단순히 80486 컴퓨터와 A/D 변환기로 구성된다. 한편 실험결과는 감각적인 소음 저감량을 확인하기 위해서 dB(A)로 환산하여 1/3 옥타브 밴드로 나타내었다.

5.1 정현파에 대한 제어실험

Fig. 8은 정현파에 대한 제어결과를 1/3 옥타브 밴드별로 나타낸 것이다.

제어결과에서 알 수 있듯이 주목하는 250 Hz 밴드에서 약 20 dB의 제어효과를 나타내고 있다. 한편 250 Hz 이외의 주파수에 대해서는 시뮬레이션의 결과와는 달리 제어효과가 나타나지 않고 있지만 이것은 40 dB(A) 이하의 현실적으로 매우 낮은 소음레벨이므로 물리적으로 타당한 결과라고 생각된다. 또한 250 Hz에서 제어효과가 시뮬레이션 보

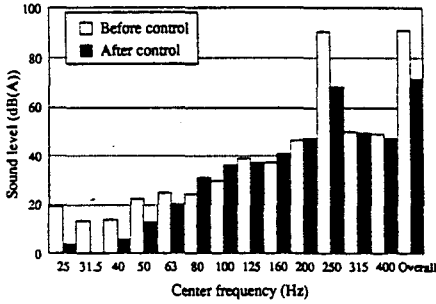


Fig. 8 Control result of experiment for single sinusoidal signal

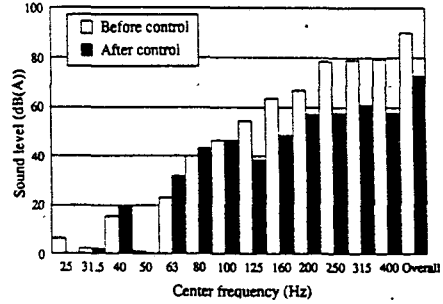


Fig. 9 Control result of experiment for frequency modulated signal

다 떨어지는 이유는 모의 덕트에서의 반사와 스피커 및 앰프의 성능 등에 기인한다고 생각되어진다.

5.2 주파수 변조파에 대한 제어실험

본 실험에서는 팬의 고장 등에 따른 시변 환경을 가정하기 위하여 주파수 변조파에 대한 제어를 수행하였는데 그 결과는 Fig. 9에 나타나 있다.

이 경우에도 시뮬레이션결과와 마찬가지로 각각의 사이드 밴드가 포함된 중심주파수에서 약 20 dB 이상으로 제어하고 있는 것을 알 수 있으며, 오버올(overall) 레벨의 경우에 있어서도 효과적인 저감량을 확인할 수 있다.

5.3 랜덤파에 대한 제어실험

본 실험에서는 기존의 Filtered-X LMS 알고리즘과 본 연구에서 제안한 기법으로 랜덤파의 경우에 대한 제어를 수행하였는데 Fig. 10에 각각의 제어 결과가 나타나 있다.

그림에서 Filtered-X LMS 알고리즘은 TMS320C30을 이용하여 구현한 것이며 역전파 알고리즘에 의한 결과는 별도의 연산장비 없이 컴퓨터상에서 'C' 언어로 직접 구현한 것이다. 랜덤파의 경우 중심주파수가 160, 250, 315, 400 Hz인 밴드에서는 역전파 알고리즘이 Filtered-X LMS 알고리즘 보다 우수한 성능을 나타내고 있으며 각 밴드에서 약 20 dB 정도의 소음저감 효과를 얻을 수 있었다. 그러나 125 Hz 미만의 저주파에서는 Filtered-X LMS 알고리즘이 역전파 알고리즘 보다 우수한 소음저감 성능을 나타내고 있다. 또한 200 Hz 밴드 부근에서는 두가지 기법에 의한 제어 효과가 다소 떨어졌는데 이것은 실험에 사용된 모

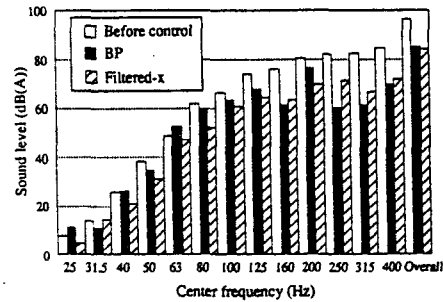


Fig. 10 Control result of experiment for random signal

의 덕트 자체의 고유한 특성 때문인 것으로 생각된다. 한편 시뮬레이션의 경우와 마찬가지로 학습신호로서 랜덤파를 사용했기 때문에 단일 정현파에 대한 제어결과와 비슷한 소음저감 효과를 나타내고 있으나 오버올레벨의 경우는 10 dB 정도의 저감량을 나타내고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 역전파 알고리즘에 의한 지능제어 기법을 이용하여 모의 덕트에서의 능동 소음제어 시뮬레이션과 실험을 수행하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 역전파 알고리즘에 의한 지능제어 기법을 이용하여 덕트모델과 음향체화모델을 고려한 덕트내에서의 능동 소음제어방식을 제안하였다.
- (2) 기존의 능동 소음제어에서 필수적으로 사용되었던 에러미크의 사용을 배제하고 고차의 필터 계수 연산을 위한 고속 연산장비의 사용 없이 단순하면서 효과적인 제어 시스템을 구성하였다.
- (3) 모의 덕트에 대한 능동 소음제어 시뮬레이션

과 실험을 통하여 제안한 능동 소음제어 시스템의 효율성과 제어효과를 검증하였다.

향후에는 풍속이 존재하는 실제 덕트에서의 검증과 구면파에 대한 제어의 확장이 요구되며 덕트 모델 및 음향개환모델 등을 통합하여 단순화시키는 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 마이크의 설치환경이 열악한 경우나 주기적인 소음원이 존재하는 경우에는 본 연구에서 이용한 지능제어 기법을 외부 정보에 의한 동기화기법(synchronous sampling method) 등과 결합시킴으로써 더욱 효과적인 제어 시스템을 구성할 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) Scott, D. Snyder and Colin, H. Hansen, 1989, "Active Noise Control in a Duct: Some Physical Insights," *JASA*, Vol. 86, No. 1, pp.184~194
- (2) Nelson, P. A. and Elliot, S. J., 1992, *Active Control of Sound*, Academic Press, London
- (3) Eriksson, L. J., 1991, "Development of the Filtered-U Algorithm for Active Noise Control," *JASA*, Vol.89, No.1, pp.257~265
- (4) 우재학, 김인수, 이정권, 김광준, 1992, "Filtered-X LMS 알고리즘을 응용한 덕트내 평면파 소음의 능동제어," 한국소음진동공학회, Vol. 2, No. 2, pp.107~116
- (5) 이증식, 1992, "공조덕트용 능동 소음제어장치 개발," ANC 학술대회, pp.1~16
- (6) 김광준, 김인수, 1992, "사각관내 고차 모드 소음의 모드별 분리에 의한 능동제어," ANC 학술대회, pp.51~62
- (7) 이태연, 김철호, 오재응, 1991, "적응 신호처리 기법을 이용한 능동 소음제어에 관한 연구," 대한기계학회논문집, Vol.15, No.3, pp.809~823
- (8) Dote, Y., 1990, "Fuzzy and Neural Network Controller," *Proc. of IECON '90*, Vol. 2, pp. 1315~1343
- (9) 田中信雄, Scott, D. Snyder, 菊島義弘, 黒田雅治, 1993, "ニューラルネットワークによる非線形振動制御に関する研究", 日本機械學會論文集 C編, Vol.59, No.559, pp.700~707
- (10) Koers, P. H. J., Vogel, J., Zeelen, A., Putten, R. F. G. and Berkout, A. J., 1990, "Active Noise Reduction using Neural Network Processing System," *Int. Neural Network Conference*, Vol. 1, pp.145~148
- (11) Shin, J., Jang, K. Y. and Oh, J. E., 1993, "Active Noise Control in a Duct System by Neuro-Fuzzy Technique," *Korea-U.S. Vibration Eng. Seminar*, pp.293~304
- (12) Patric K. Simpson, 1991, "Artificial Neural Systems," Pergamon Press, New York
- (13) Pao, Yoh-Han, 1989, *Adaptive Pattern Recognition and Neural Networks*, Addison-Wesley Pub. Corp., New York
- (14) Beale, R. and Jackson, T., 1990, *Neural Computing: An Introduction*, Adam Hilger, Bristol
- (15) Cheung, W. S., 1993, "Identification, Stabilization and Control of Nonlinear System Using Neural Network-Based Parametric Nonlinear Modeling," Ph. D. thesis, University of Southampton, England
- (16) Fuller, C. R., Cabell, R. H. Gibbs, G. P. and Brown, D. E. 1991, "A Neural Network Adaptive Controller for Nonlinear Systems," *Inter-Noise 91*, Vol. 1, pp.169~172
- (17) 신 준, 김홍섭, 장경영, 오재응, 1993, "지능제어기법에 의한 덕트에서의 능동 소음제어," 대한기계학회 '93년 추계학술대회논문집 [I], pp.233~236
- (18) Nelson M. M. and Illingworth, W. T., 1992, *A Practical Guide to Neural Nets*, Addison-Wesley Pub. Company, Inc., New York