

〈논 문〉

부가경로 전달함수의 온라인 예측에 의한 능동소음제어의 성능 향상

김홍섭* · 손동구* · 오재음**

(1996년 7월 23일 접수)

Performance Improvement of Active Noise Control Using On-line Estimation of Secondary Path Transfer Function

Heung Seob Kim, Dong Gu Sohn and Jae-Eung Oh

Key Words : S/N Ratio(신호 대 잡음비), Transfer Functions of Secondary Path(부가경로 전달함수), Adaptive Linear Enhancer(적응선형 증진기), Adaptive Noise Canceller(적응잡음 제거기), Inverse Modeling Method(인버스 모델링), Pseudo Random Signal(의사 랜덤신호)

Abstract

In the conventional inverse modeling method for on-line modeling of the secondary path transfer function, the signal to noise ratio between the arbitrary random signal and the plant noise have to keep at $-10 \sim -20$ dB. For these reasons, the modeling can't be exactly implemented by the conventional method alone and the convergence time for modeling becomes too long. In this study, by combining the conventional inverse modeling method with an adaptive line enhancer, or with an adaptive noise canceller, a rigorous transfer functions of secondary path modeling and the control of a primary noise have been implemented simultaneously.

1. 서 론

최근 환경 오염원으로서의 소음에 대한 규제가 사회적 관심이 되고 있으며 또한 생활 수준의 향상으로 정숙한 환경에 대한 요구가 증가되고 있다. 소음을 제거하기 위한 종래의 방법으로는 소음이 방출되는 것을 감소시키기 위해 흡음재, 차음재 또는 소음기 등을 사용하는 수동적인 방법들이 있으나, 500 Hz 이하의 저주파 소음에 대해서 감쇠가 어렵다는 단점이 있다. 이것은 저주파의 소음은 파장이 길기 때문에 이것을 제거하기 위해서는 그만큼

큼 더 두꺼운 흡음재나 차음재를 사용하여야 한다. 그러나, 설치 장소의 공간적 제약 등으로 흡음재나 차음재를 두껍게 하는 것은 한계가 있다. 최근 신호처리방법의 개발과 전자 기술의 발달로 인하여 능동소음제어(Active Noise Control: ANC) 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

기존의 능동소음제어에서 이용되어지는 Filtered-x LMS 알고리즘은 사전에 모델링된 제어기와 오차 센서사이의 부가경로 전달함수를 제거에 적용하여 수행되어졌다. 그러므로 모델링된 전달함수에서 모델링 오차가 존재하거나 부가경로의 환경변화가 발생하는 경우에는 제어가 되지 않고 오히려 오동작이 발생하기도 한다.⁽¹⁾ 부가경로 전달함수(transfer functions of secondary path)가 시 변

*회원, 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

**회원, 한양대학교 자동차공학과

화할 가능성이 있는 플랜트의 능동소음제어에서는 이러한 모델링 오차를 온라인으로 극복하기 위한 연구가 진행되고 있는데, 대표적인 방법으로 제어 신호와 상관없는 임의의 랜덤신호를 제어신호에 더해 플랜트에 가해주는 인버스 모델링기법이 있다.^(2,3) 그러나 기존의 인버스 모델링(inverse modeling) 방법에서 플랜트를 온라인으로 모델링하기 위한 임의의 랜덤신호와 잡음비(Signal to Noise ratio : S/N ratio)가 $-10 \sim -20$ dB로 유지되는 이유(최종적인 잔류소음을 최소화하기 위해)로 모델링을 제대로 수행하지 못하거나 모델링에 소요되는 시간이 길어져서 소음제어 성능에 상당한 영향을 주고 있다.⁽⁴⁻⁶⁾

본 연구에서는 온라인으로 부가경로 전달함수를 모델링하기 위해 임의의 랜덤신호와 주음원사이의 낮은 신호 대 잡음비 상태를 개선시키는 적응선형 증진기(Adaptive Line Enhancer : ALE)와 적응잡음 제거기(Adaptive Noise Canceller : ADNC)를 부착하여 빠른 시스템 규명과 주음원에 대한 제어를 가능하게 하는 연구를 수행하였다.

2. 부가경로 전달함수의 예측

2.1 인버스 모델링에 의한 부가경로 전달함수의 온라인 예측

기존의 Filtered-x LMS 알고리즘은 내부에 부가경로 전달함수를 필요로 하는데, 이 전달함수는 시불변적이고 오프라인에 기초하여 구성되진다. 그러나 많은 경우에 있어 이 전달함수는 시변적이어서 수신포의 위상변화를 가져올 수 있으므로 온라인으로 구성되어야만 한다. 따라서 인버스 모델링에서는 주음원과 무관한 임의의 랜덤소음을 시스템

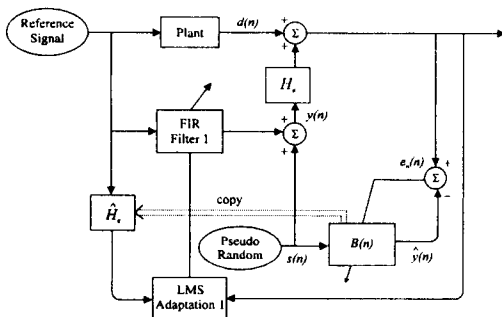


Fig. 1 Block diagram of the on-line identification in the filtered-x LMS adaptation

규명의 목적으로 세어턱에 더해준다.⁽²⁾

Fig. 1에서 $B(n)$ 은 예측부분의 FIR 필터의 계수이고, $s(n)$ 는 임의의 랜덤신호 $y(n)$ 는 예측하고자 하는 전달함수의 출력 $\hat{y}(n)$ 는 예측 FIR 필터의 출력이다. Fig. 1에서 주음원과 제어신호의 간섭으로 발생한 플랜트 잡음의 존재하에서 부가경로 전달함수의 규명을 위한 적응 필터의 수행은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} B(n+1) &= B(n) + 2\mu_n e_n(n) s(n) \\ &= B(n) + 2\mu_n [m(n) - \hat{y}(n) + d(n)] s(n) \\ &= B(n) + 2\mu_n [y(n) * h_e - \hat{y}(n)] s(n) \\ &\quad + 2\mu_n d(n) s(n) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, μ_n 은 인버스 모델링의 수렴계수로 예측을 위한 적응필터 $B(n)$ 의 수렴을 위해 랜덤잡음 $s(n)$ 과 $d(n)$ 의 기대치를 이용하여 크기를 결정한다.⁽⁴⁾ $d(n)$ 는 주음원과 제어력의 간섭으로 발생한 $e_n(n)$ 속에 존재하는 플랜트 소음으로 $2\mu_n d(n) s(n)$ 항은 $B(n)$ 의 성능을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 $B(n)$ 이 최적치로의 수렴을 위해서는 식 (1)에서 이항을 제거해야 하는데 적응선형 증진기나 적응잡음 제거기가 큰 플랜트 잡음속에서 부가경로 전달함수를 모델링하는 랜덤신호를 분리하는 기법으로 유용하다.

2.2 적응선형 증진기

적응선형 증진기는 입력신호가 정현과 신호와 랜덤신호와 합으로 구성되어져 있는 경우에 비상관 지연(uncorrelation delay)을 이용하여 두 성분을 분리하는데 유용하다.⁽⁷⁾

Fig. 2에서 오차 마이크로폰에서 오차신호 $m(n)$ 은

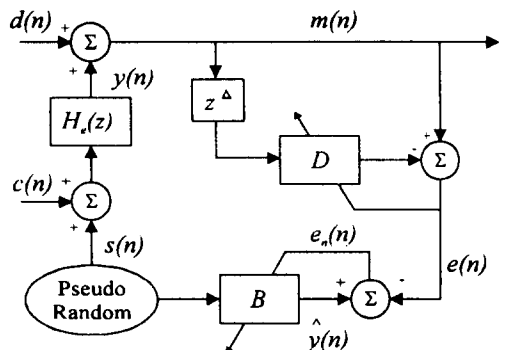


Fig. 2 Adaptive line enhancer in on-line modeling

$$\begin{aligned} m(n) &= d(n) + [c(n) + s(n)] * h_e(n) \\ &= f(n) + s(n) * h_e(n) \\ &= f(n) + \sum_{j=0}^{N-1} h_{ej}(n) s(n-j) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $h_{ej}(n)$ 은 부가경로의 j 차 임펄스함수를 나타내고, N 은 $h_{ej}(n)$ 의 필터차수이다. 백색잡음 $s(n)$ 과 플랜트 잡음신호 $f(n)$ 은 전혀 상관관계가 없으므로 $E[f(n)s(n)] = 0$ 이다.

$$\begin{aligned} E[m(n)m(n-\Delta)] &= E[f(n)f(n-\Delta)] \\ &\quad + \sum_{j=0}^{N-1} h_{ej}(n) \sum_{i=0}^{N-1} h_{ei}(n) \\ &\quad \cdot E[s(n-j)s(n-i-\Delta)] \end{aligned} \quad (3)$$

사용된 백색잡음의 평균이 0이면

$$\begin{aligned} E[s(n-j)s(n-i-\Delta)] &= 0, \\ 0 \leq i, j \leq N \text{ if } \Delta \geq N \end{aligned} \quad (4)$$

시간지연 Δ 이 부가경로 임펄스함수의 차수 N 보다 크다면, $m(n)$ 에서 백색잡음으로 인한 항이 사라지게 된다. 따라서 플랜트신호 $f(n)$ 만이 적응선형 증진기의 필터 D 의 출력에 의해 제거되고 적응선형 증진기의 최종 잔여오차는 다음과 같다.

$$e(n) \approx s(n) * h_e(n) \quad (5)$$

따라서 적응선형 증진기를 이용하면 플랜트 잡음신호 $f(n)$ 의 영향을 배제하여 온라인 모델링에서의 신호 대 잡음비를 개선할 수 있다.

2.3 적응잡음 제거기

적응잡음 제거기는 상관성이 존재하지 않는 두개의 신호가 섞여서 입력되는 경우에 두 신호를 분리하는데 사용된다.⁽²⁾

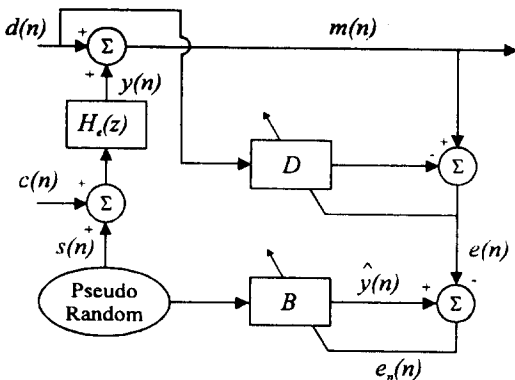


Fig. 3 Adaptive noise canceller in on-line modeling

Fig. 3에서

$$\begin{aligned} m(n) &= d(n) + [c(n) + s(n)] * h_e(n) \\ &= f(n) + s(n) * h_e(n) \\ &= f(n) + u'(n) \end{aligned} \quad (6)$$

$$f'(n) = d(n) * D(n) \quad (7)$$

여기서, $u'(n)$, $f'(n)$ 은 각각 임의의 랜덤신호 $s(n)$ 과 부가경로 임펄스함수 $h_e(n)$, 플랜트 잡음 $d(n)$ 과 적응잡음 제거기의 필터 $D(n)$ 와의 선형 중첩의 출력이다.

$$e(n) = f(n) - f'(n) + u'(n) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} e^2(n) &= (f(n) - f'(n))^2 + u'^2(n) + 2u'(n) \\ &\quad \cdot (f(n) - f'(n)) \end{aligned} \quad (9)$$

백색잡음신호 $u'(n)$ 와 $f(n)$, $f'(n)$ 은 서로 상관하지 않으므로

$$E[e^2(n)] = E[u'^2(n)] + E[(f(n) - f'(n))^2] \quad (10)$$

으로 되고, $E[e^2(n)]$ 을 최소화하기 위해 $E[(f(n) - f'(n))^2]$ 을 최소화하여야 한다.

$$E_{\min}[e^2(n)] = E[u'^2(n)] + E_{\min}[(f(n) - f'(n))^2] \quad (11)$$

식 (11)에서 완전히 $E_{\min}[(f(n) - f'(n))^2] = 0$ 으로 되는 경우에는 $f'(n) \approx d(n)$ 그리고 $e(n) \approx u'(n)$ 이 된다.

3. 시뮬레이션 및 결과 고찰

3.1 의사 랜덤신호

부가경로 전달함수의 온라인 규명을 위해서는 제어 신호와 상관성이 없는 임의의 랜덤신호를 제어신호에 더하여 액추에이터로 보내져야 한다. TMS320c30에서 피드백을 가진 5비트 시프트 레지스터를 이용하여 만들어낸 이진수열을 이용하여 Fig. 4와 같은

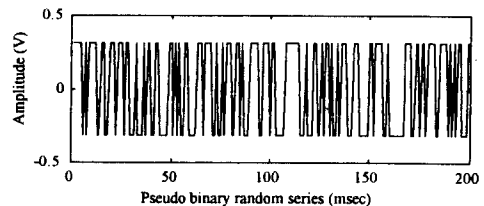


Fig. 4 Pseudo random signal for identifying transfer function of secondary path

의사 랜덤신호를 구성하였고, 500 Hz 이하의 랜덤 신호와의 기여도를 Fig. 5에 나타내었다. ⁽⁶⁾

3.2 전달함수 예측오차에 따른 제어계 변화

실제의 부가경로 전달함수의 예측을 위해 임의의 랜덤 신호를 사용하는 경우 부가경로 전달함수의 예측 오차는 nz^{-d} 로 나타나는데, 본 연구에서는 $\Delta = 1, 2, 3$ 인 경우에 예측오차 전달함수로 인한 크기와 위상변화를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 (a)는 $\Delta=1$ 로 모델링된 경우로 전 관 심주파수 영역내에서는 전달함수의 예측오차로 인한 크기 변화가 1보다 작고, 위상변화는 90° 을 벗어나지 않는다. (b)는 $\Delta=2$ 인 경우로 250 Hz 이상에서는 크기가 음수가 되고, 위상은 90° 을 벗어나 수렴계수를 작게 하여도 제어계가 발산하게 된다. (c)는 $\Delta=3$ 인 경우로 150 Hz 이상에서는 (b)와 동일한 결과를 나타낸다.

Fig. 7에서는 전달함수의 예측오차가 존재하지 않는 경우와 $\Delta=1, 2, 3$ 으로 예측오차가 존재하는 경우의 소음제어 결과를 비교하였다. Fig. 6에서의 결과와 동일하게 $\Delta=2$ 인 경우에는 전체 제어계의

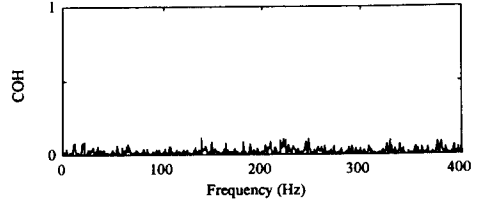


Fig. 5 Coherence function between pseudo random signal and low-pass filtered random signal

소음제어 결과로 250 Hz 이상에서는 악효과를 유발시키고, $\Delta=3$ 인 경우에는 전 주파수 영역에서 발산됨을 알 수 있다.

따라서 이러한 부가경로 전달함수의 모델링과정에서 또는 모델링 이후에 예측오차가 발생할 경우에는 크기와 위상변화로 인하여 제어계가 발산할 가능성이 존재하므로 부가경로 전달함수를 계속적으로 온라인 모델링할 필요가 있다.

3.3 ALE, ADNC를 이용한 부가경로 전달함수 예측의 결과

부가경로 전달함수의 온라인화를 위해 사용되는

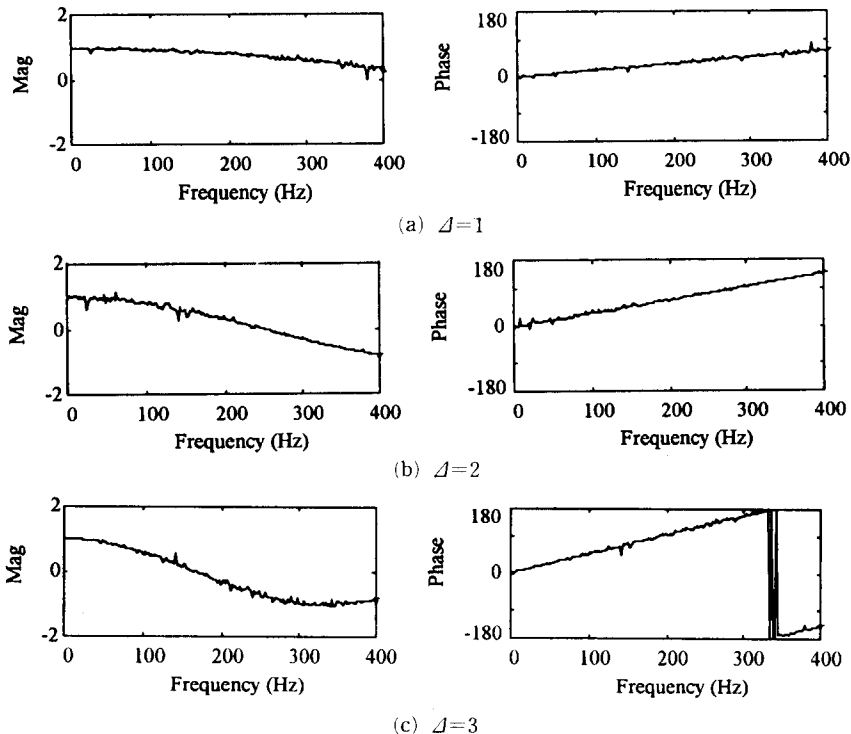


Fig. 6 Magnitude and phase change due to modeling errors of transfer function

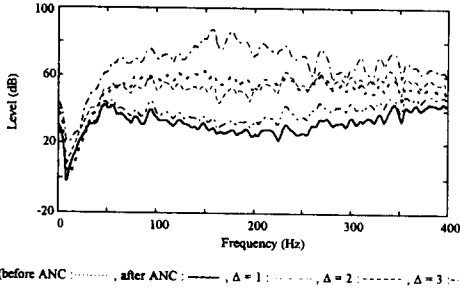


Fig. 7 Controlled random noise when estimation errors occurs in modeling of transfer functions of secondary path

의사 랜덤신호는 최종 잔류소음을 작게 하기 위해 플랜트 잡음신호에 비해 작게 유지되어야 하는데 이러한 이유로 의사 랜덤신호와 플랜트 잡음신호사이의 S/N 비는 -10~-20 dB이다. 기존의 인버스 모델링 방법만으로는 낮은 S/N 비로 인하여 부가경로 전달함수를 모델링하지 못하거나, 모델링에 따른 오차가 많이 발생하고 모델링에 소요되는 시간이 긴 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 적응선형 증진기와 적응잡음 제거기를 이용하여 플랜트 잡음신호를 제거함으로써 S/N 비를 높임으로써 부가경로 전달함수의 빠른 규명을 가능하게 하였다. 또한 모델링 이후에 발생하는 모델링 오차를 평가하기 위하여 식 (12)과 같은 기준을 이용하였다.

$$\sigma_e^2(\omega) = \sum_{i=0}^{N-1} [h_{ei}(\omega) - \hat{h}_{ei}(\omega)]^2 \quad (12)$$

식 (12)에서 $h_{ei}(\omega)$ 은 변화한 실제의 전달함수를 나타내고, $\hat{h}_{ei}(\omega)$ 은 이것을 예측한 전달함수를 나타낸다. Fig. 8은 S/N 비가 -15 dB인 경우에 식 (4)에서 제안된 적응선형 증진기의 최적한 시간 지연, Δ 를 결정하기 위하여 시간지연에 따라 부가경로 전달함수의 모델링 오차를 나타내고, Fig. 9은 적응잡음 제거기의 필터차수에 따른 부가경로 전달함수의 오차를 나타낸다.

Fig. 8에서는 선형 증진기의 시간지연을 부가경로 전달함수의 필터차수보다 크게 하는 경우에는 모델링의 오차가 크게 줄어드는 것을 알 수 있으며 Fig. 9에서는 적응잡음 제거기의 필터차수를 크게 하는 것이 오히려 오차를 많이 발생시키는 원인이 될 수 있음을 알 수 있다. Fig. 10은 기존의 인버스 모델링만을 사용한 경우와 $\Delta=140$ 의 시간 지연을

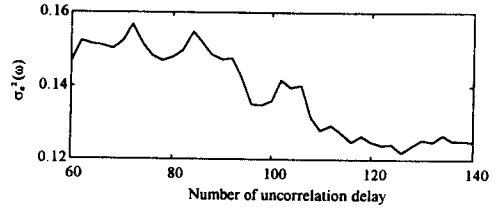


Fig. 8 Error due to the number of uncorrelation delays in the adaptive line enhancer

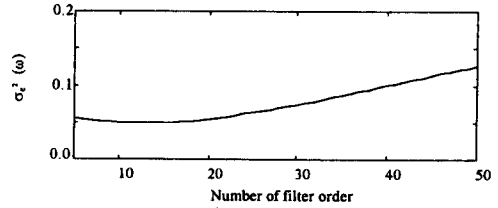


Fig. 9 Error due to the number of filter orders in the adaptive noise canceller

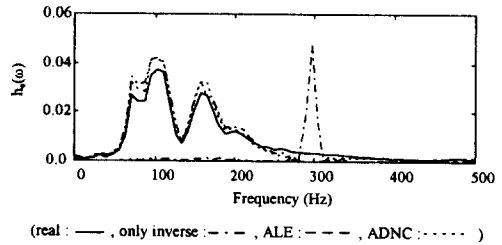


Fig. 10 Transfer functions of secondary path estimated with on-line modeling method

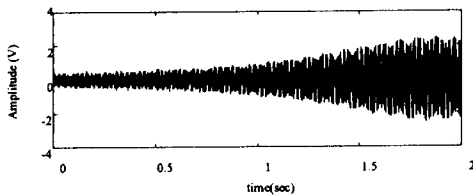
이용한 적응선형 증진기를 부착한 경우, 그리고 15차의 적응필터를 가진 적응잡음 제거기를 부착한 경우에 예측한 부가경로 전달함수를 실제의 전달함수와 비교하였다. 인버스 모델링만으로 모델링을 수행하는 경우 낮은 신호 대 잡음비로 인하여 실제의 전달함수의 예측을 수행하지 못하나 적응 선형 증진기나 적응잡음 제거기를 부착한 경우 실제의 전달함수를 거의 예측함을 Fig. 10를 통해 알 수 있다.

3.4 온라인 부가경로 전달함수의 모델링에 따른 전체 제어계의 거동

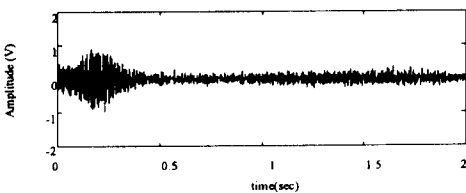
S/N 비가 낮은 상태에서도 부가경로 전달함수를 모델링할 수 있도록 적응선형 증진기와 적응잡음 제거기를 능동소음 제어에 부착하였다. 주소음원은 300 Hz의 정현파를 사용하였고 예측된 부가경

로 전달함수와 실제의 전달함수의 모델링 오차는 시간지연, $\Delta=3$ 의 차이가 있다고 가정하였다. 실제의 부가경로 전달함수가 변화되었기 때문에 온라인으로 부가경로 전달함수를 모델링하지 않으면 제어계는 발산하게 되는 것은 Fig. 7에서 보여주고 있다. Fig. 11에서는 부가경로 전달함수를 인버스 모델링만을 가지고 모델링하면서 동시에 정현파의 제어를 수행한 결과를 Fig. 11(a)에, 적응선형 증진기와 적응잡음 제거기를 인버스 모델링에 부착하여 모델링하면서 제어한 결과를 각각 Fig. 11(b), Fig. 11(c)에 나타내었다.

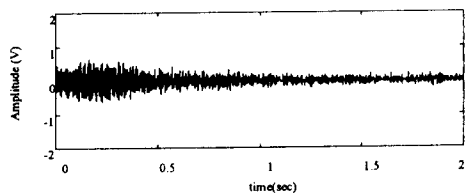
Fig. 11(a)에서 기존의 인버스 모델링만으로는 제대로 새로운 부가경로 전달함수를 모델링할 수 없기때문에 발산되는 것을 볼 수 있고, Fig. 11(b), Fig. 11(c)에서는 소음제어가 제대로 수행되어 지는 것을 알 수 있는데, 기존의 Filtered-x LMS 알고리즘보다는 잔여오차가 많지만 인버스



(a) The case of using only inverse modeling method



(b) The case of using inverse modeling method with ALE



(c) The case of using inverse modeling method with ADNC

Fig. 11 Controlled primary noise using proposed active control algorithm

모델링기법만을 사용한 결과와는 반대로 새로운 부가경로 전달함수를 0.5초 이내에 제대로 모델링함을 알 수 있었다.

4. 결 론

기존의 인버스 모델링만을 이용한 온라인 제어에서는 플랜트 잡음의 영향으로 부가경로 전달함수를 제대로 예측하지 못하여 제어계가 발산하는 결과를 가져왔다. 따라서 본 연구에서는 이러한 플랜트 잡음을 제거하기 위하여 인버스 모델링에 적응선형 증진기와 적응잡음 제거기를 부착하여 부가경로 전달함수의 온라인 모델링과 주소음원에 대한 제어 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 신호 대 잡음비가 낮은 음향환경에서 부가경로 전달함수를 모델링하기 위해서는 적응선형 증진기, 적응잡음 제거기를 이용하여 플랜트 잡음을 제거함으로써 신호 대 잡음비를 개선시켜야 한다.

둘째, 실제의 부가경로 전달함수가 변한 상태에서 제안된 알고리즘을 이용하여 제어 시뮬레이션을 수행한 결과 주소음원에 대한 제어와 새로운 부가경로 전달함수의 예측을 동시에 수행할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Snyder, S.D. and Hansen, C. H., 1990, "The Influence of Transducer Transfer Functions and Acoustic Time Delays on the Implementation of the LMS Algorithm in Active Noise Control System," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 141 (3), pp. 409~424.
- (2) Widrow, et. al., 1995, *Adaptive Signal Processing*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- (3) Eriksson, L. J. and Allie, M.C., 1989, "Use of Random Noise for On-line Transducer Modeling in an Adaptive Active Attenuation System," *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 85, No. 2, pp. 797~802.
- (4) Bao, C., Sas, P. and Van Brussel, H., 1993, "Adaptive Active Control of Sound of Noise in 3-D Reverberent Enclosure," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 161 (3), pp. 501~514.
- (5) Morgan, D. R., 1980, "An Analysis of Multiple Correlation Cancellation Loops with a Filter in

- the Auxiliary Path," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. ASSP-28, No. 4, pp. 454~467.
- (6) 김홍섭, 손동구, 오재응, 1995, "부가경로 전달함수의 온라인화를 이용한 능동소음제어의 성능향상," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 178~183.
- (7) Eriksson, L. J. and John, L., 1985, "Active Sound Attenuation Using Adaptive Digital Signal Processing Techniques," University Microfilms International.
- (8) Brown, R. G., 1992, *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*, John Wiley & Sons, Inc.