

〈논 문〉

## 덕트에서 온라인 적응 알고리즘을 이용한 능동소음제어

김흥섭\* · 홍진석\* · 오재응\*\*

(1997년 1월 23일 접수)

### Active Noise Control with On-line Adaptive Algorithm in a Duct System

Heung Seob Kim, Jin Seok Hong and Jae-Eung Oh

**Key Words :** Adaptive Random Noise Technique(적응 랜덤잡음법), Overall Modeling Method(오버올 모델링기법), S/N Ratio(Signal to Noise Ratio : 신호대 잡음비), Narrowband Control(협대역 제어), Adaptive Line Enhancer(적응 선형증진기)

#### Abstract

In the case of the transfer function for the secondary path is dependent on time, the on-line method which can model it is continuously must be applied to the active noise control technique. And the adaptive random noise technique among the on-line methods is effective in the narrow-band control. In this method, the signal to noise ratio between random noise for modeling and primary noise is low. Therefore, the estimations of transfer function will be prone to inaccuracies and the convergence time will be too long. Such imperfections will have an influence upon the performance of an active noise controller. In this study, to enhance the signal to noise ratio, the on-line method that is combined the conventional adaptive random noise technique and the adaptive line enhancer, is proposed. By using proposed on-line method, a rigorous system identification and control of primary noise have been implemented.

#### 1. 서 론

부가경로 전달함수에 모델링오차가 발생하는 경우에 온라인 알고리즘으로 이용되는 제어기법으로 적응 랜덤잡음법(adaptive random noise technique)과 오버올 모델링기법(overall modeling method)이 연구되고 있다. 적응 랜덤잡음법에서는 모델링오차가 발생한 부가경로 전달함수를 계속적으로 모델링하기 위하여 주음원과 상관관계가 존재하지 않은 의사 랜덤신호를 제어력에 가해주는 방법이며,<sup>(1~3)</sup> 오버올 모델링기법은 다른 신호를

이용하지 않고 제어력을 이용하여 부가경로 전달함수를 모델링한다.<sup>(4,5)</sup>

적응 랜덤잡음법에서는 의사 랜덤신호를 제어력에 더하여 주기 때문에 최종적인 잔류오차가 증가되는 단점을 가지는데, 일반적으로 의사 랜덤신호와 주음원과의 신호대 잡음비(signal to noise ratio: S/N ratio)는  $-10 \sim -20$  dB이며, 이때의 잔류오차는 2~3 dB정도가 증가된다. 오버올 모델링기법에서 부가경로 전달함수의 모델링을 위하여 사용되어지는 제어력은 주음원에 종속적이어서 협대역제어(narrowband control)의 경우, 부가경로 전달함수도 협대역에 대한 모델링만을 수행하게 된다. 따라서 주음원이 자동차 엔진, 배기소음같이 관심 주파수 영역이 좁고 또한 시간에 따라 주파수가 달라지는 경우에는 자동차 rpm이 달라짐에 따

\*한양대학교 기계기술연구소

\*\*한양대학교 정밀기계공학과

\*\*\*회원, 한양대학교 자동차공학과



$d_k$ 는  $e_{n,k}$  속에 존재하는 주음원 소음으로 식 (1)의  $2\mu_n d_k s_k$ 항은 예측을 위한 적응필터  $B_k$ 의 성능을 저하시키는 요인이 된다. 따라서  $B_k$ 가 최적치의 수렴을 위해서는 식 (1)에서 이 항을 제거해야 하는데 적응 선형증진기나 적응 잡음제거기 큰 플랜트잡음속에서 부가경로 전달함수를 모델링하는 랜덤신호를 분리하는 기법으로 유용하다.

2.2 적응 선형증진기에 의한 플랜트 잡음제거

적응 선형증진기는 입력신호가 정현파신호와 랜덤신호의 합으로 구성되어 있는 경우에 비상관 지연(uncorrelation delay)을 이용하여 두 성분을 분리하는데 유용하다.

Fig. 2에서 오차 마이크로폰에서의 오차신호  $m_k$ 는

$$\begin{aligned}
 m_k &= d_k + [c_k + s_k] * h_{e,k} \\
 &= f_k + s_k * h_{e,k} \\
 &= f_k + \sum_{j=0}^{N-1} h_{ej,k} s_{k-j}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서,  $h_{ej,k}$ 는  $j$ 차 임펄스 부가경로 전달함수를 나타내고,  $N$ 은  $h_{ej,k}$ 의 차수이다. 백색잡음  $s_k$ 와 플랜트잡음신호  $f_k$ 는 전혀 상관관계가 없으므로  $E[f_k s_k]$ 이다.

$$\begin{aligned}
 E[m_k m_{k-d}] &= E[f_k f_{k-d}] \\
 &+ \sum_{j=1}^{N-1} h_{ej,k} \sum_{i=0}^{N-1} h_{ei,k} E[s_{k-j} s_{k-i-d}]
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

사용된 백색잡음의 평균이 0이면

$$E[s_{k-j} s_{k-i-d}] = 0, \quad 0 \leq i, j \leq N, \quad \text{if } \Delta \geq N \tag{4}$$

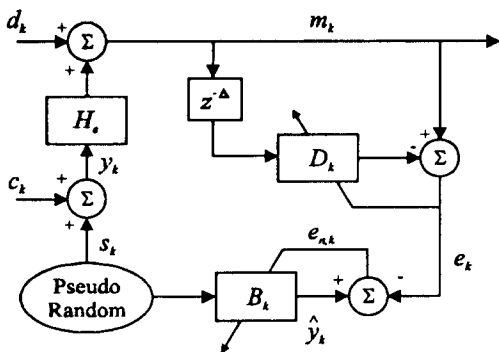


Fig. 2 Adaptive line enhancer for removing the plant noise in the inverse modeling

시간지연  $\Delta$ 이 부가경로 임펄스함수의 차수  $N$ 보다 크다면,  $m_k$ 에서 백색잡음으로 인한 항이 사라지게 된다. 따라서 플랜트신호  $f_k$ 만이 필터  $D$ 의 출력에 의해 제거되고, 적응 선형증진기의 최종 잔여오차는 다음과 같이 된다.

$$e_k \approx s_k * h_{e,h} \tag{5}$$

따라서 적응 선형증진기를 이용하면 플랜트 잡음신호  $f_k$ 의 영향을 배제하여 온라인 모델링에서의 신호대 잡음비를 개선할 수 있다.

3. 실험장치와 방법

제안된 온라인 filtered-x LMS 알고리즘의 검증을 위하여 다음의 덕트 시스템에서 능동소음제어 실험을 수행하였다. Fig.3는 덕트에 대한 능동소음제어 시스템의 구성 및 신호처리 흐름도를 나타내고 있다. 본 연구에서 이용된 덕트 시스템은 총 길이가 4.5 m이고, 입력 마이크의 초기 위치를 제어 스피커에서 0.2 m 떨어진 위치에 설치하였다. 또한 무한 덕트로 가정하기 위하여 끝부분에 유리솜(glass wool)을 부착하였으며, 오차 마이크로폰은 제어성능을 관찰하기 위하여 오실로스코프와 주파수 분석기에 연결하였다.

제어기로 이용된 DSP 보드는 실시간제어 프로세서 TMS320c30가 내장되어 있으며, 4채널 입력과 2채널 출력이 가능한 A/D, D/A보드로 구성되어 있다. 실시간제어 프로세서에서 실행되는 제어 알고리즘은 TMS 전용 어셈블리로 되어 있으며, 실행제어 알고리즘을 제어 프로세서로 다운로드하

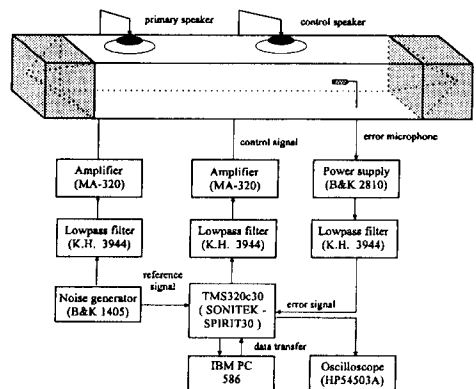


Fig. 3 Block diagram of the active noise control in a duct system

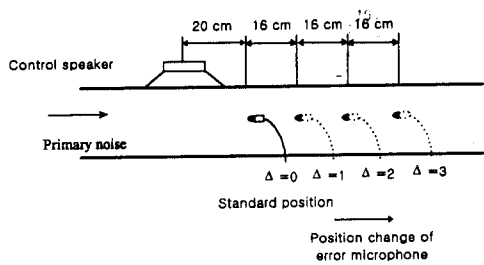


Fig. 4 Position change of error microphone for generating the modeling error in a duct system

나 제어파라미터의 실시간 모니터링을 위하여 Borland C로 PC 상에서 실행하였다. 부가경로 전달함수의 온라인 예측에 의한 능동소음제어 실험을 수행하기 위하여 제어 스피커와 오차 마이크로폰 사이의 거리를 변화시키면서 오프라인 filtered-x LMS 알고리즘을 이용한 경우, 적응 랜덤잡음법을 적용한 filtered-x LMS 알고리즘을 이용한 경우 그리고 적응 선형증진기를 부착한 적응 랜덤잡음법을 적용한 filtered-x LMS 을 이용한 경우의 결과를 각각 비교하였다.

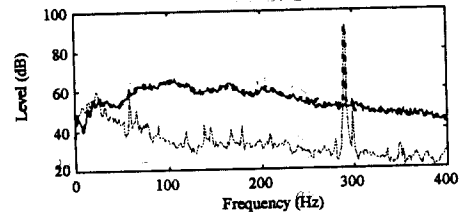
Fig. 4에서 제어 스피커와 오차 마이크로폰 사이의 거리를 샘플링시간(sampling time)이 1/2000초로 한 경우에 시계열에서 시간지연이 각각  $\Delta=0, 1, 2, 3$ 인 경우에 해당하게 변화시켰다.  $\Delta=1$ 은 오차 마이크로폰을 최초 위치에서 16 cm 이동한 경우이고,  $\Delta=2$ 은 32 cm 이동한 경우,  $\Delta=3$ 은 48 cm 을 이동한 경우이다. 주음원은 300 Hz의 순음을 이용하였으며, 주음원과 랜덤신호 사이의 신호대 잡음비는 -15 dB로 하였다.

#### 4. 부가경로 전달함수의 온라인 예측에 따른 덕트에서의 능동소음제어 실험

##### 4.1 부가경로 전달함수의 온라인 예측실험

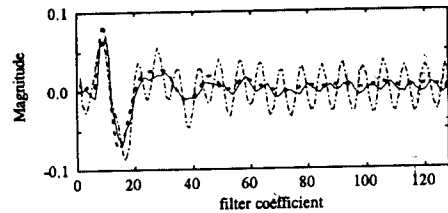
부가경로 전달함수를 모델링하기 위한 랜덤신호와 300 Hz의 주음원과의 신호대 잡음비를 -15 dB로 유지하면서 오프라인과 제안된 온라인 알고리즘을 이용하여 각각 모델링을 수행하였다. 부가경로 전달함수는 128차의 FIR 필터로 모델링하였고, 모델링을 시작한 후 10초 후의 결과를 비교하였다.

Fig. 5에서 오차 마이크로폰에서 계측된 신호로 300 Hz의 주음원과 랜덤신호는 오버울 레벨에서 15 dB의 차이를 보이고 있으며 주음원과 랜덤신호와의 합은 원래의 주음원과 1 dB정도의 차를 나타

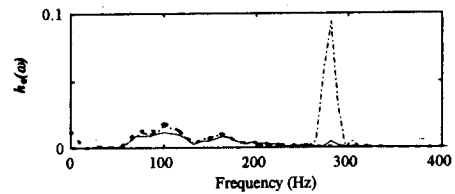


(..... : 300Hz pure tone, — : pseudo random, - · - : pure tone + pseudo random)

Fig. 5 Primary noise and pseudo random signal measured at error microphone



(a) Estimated FIR filter response



(..... : real TF, - · - : only inverse, — : inverse + ALE)

(b) Frequency response of FIR filter

Fig. 6 Estimated transfer functions of secondary path

내고 있다.

실제의 부가경로 전달함수를 적응 랜덤잡음법만으로 예측한 경우, 그리고 적응 랜덤잡음법에 적응 선형증진기를 부착하여 예측한 경우를 각각 Fig. 6에서 비교하였다. 실제의 부가경로 전달함수와 제안한 온라인 알고리즘을 이용하여 예측한 부가경로 전달함수는 비슷한 양상을 보이고 있으나 적응 랜덤잡음법만을 사용한 경우는 300 Hz 주음원의 영향으로 예측한 전달함수에 주음원의 영향이 지배적으로 나타나고 있다. 따라서 적응 선형증진기가 오차신호에서 주음원의 영향을 효과적으로 제거시킬 수 있다.

4.2 온라인 예측에 의한 덕트에서의 능동소음제어 기존의 적응 랜덤잡음법에서는 주음원의 영향으로 모델링오차가 많이 발생하지만 적응 랜덤잡음법

에 적응 선형증진기를 부착한 경우는 부가경로 전달함수를 제대로 모델링하는 것을 알 수 있다.

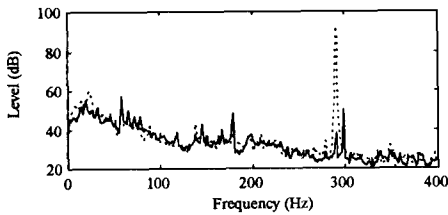
Fig. 7은 모델링오차를 발생시키지 않은 상태( $\Delta=0$ )에서 filtered-x LMS 알고리즘만을 이용하여 (랜덤신호를 발생시키지 않은 상태) 제어한 결과, 주음원의 주파수에서 60 dB 정도의 저감을 가져온다.

Fig. 8은 적응 랜덤잡음법을 적용한 경우로 적응 선형증진기를 부착한 전후의 제어결과가 동일하게 나타남을 볼 수 있다. 주음원은 부가경로 전달함수를 모델링하기 위해 발생시킨 랜덤소음의 레벨까지 20 dB 정도의 저감이 이루어짐을 알 수 있다. 따라서 부가경로 전달함수에 모델링오차가 발생하지 않은 상태에서는 기존의 filtered-x LMS 알고리즘을 이용한 경우와 온라인 적응 랜덤잡음법을 적용한 경우의 소음저감은 40 dB 정도의 차이가 발생한다.

각각의 제어 알고리즘에서 제어 파라미터(수렴계수 $=3.0e-4$ , 주제어 필터차수 $=128$ 차)를 동일하게 한 상태에서 모델링 에러가 발생하지 않은 경우( $\Delta=0$ )에 시간영역의 제어 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 온라인 알고리즘과 오프라인 filtered-x LMS 알고리즘의 수렴속도가 큰 차이를 보이지 않으며, 잔여오차는 적응 랜덤잡음법만을 사용한 경우와 적응 선형증진기를 사용한 경우가 비슷하게

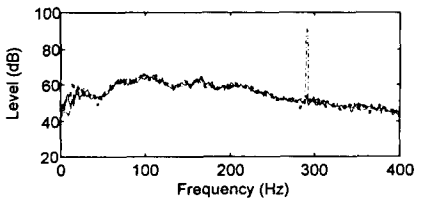
나타나고 있다.

부가경로 전달함수에 모델링오차를 발생시키기 위하여 오차 마이크로폰의 위치를 32 cm 를 이동시켰을 경우( $\Delta=2$ )에 주음원에 대한 제어결과를 살펴보았다. 기존의 오프라인 filtered-x LMS 알고리즘을 이용한 경우에는 부가경로 전달함수가 달라졌으므로 주음원과 제어력의 위상이 일치하지 않아 오차소유이 증가되어 2.5 sec 이후에는 발산되어진다. 적응 랜덤잡음법만을 적용한 경우에는 낮은 신호대 잡음비로 인하여 모델링오차가 많이 발생하여 전체 제어계가 발산된다. 적응 랜덤잡음법에 적응 선형증진기를 부착한 경우에는 낮은 신호대 잡음비가 개선되어 Fig. 6와 같이 부가경로 전달함수를 정확하게 예측하기 때문에 Fig. 10(d)와



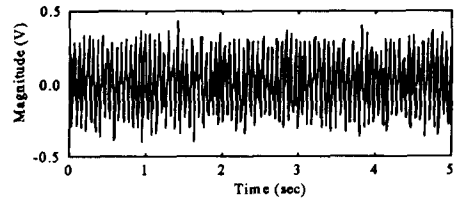
( ..... : without ANC, — : with filtered-x LMS only )

Fig. 7 Controlled primary noise with filtered-x LMS only

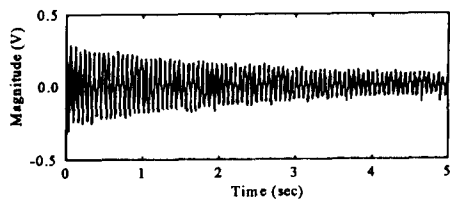


( ..... : without ANC, - · - · : only inverse, — : inverse + ALE )

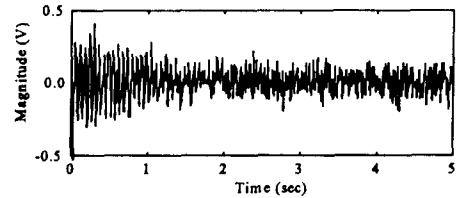
Fig. 8 Controlled primary noise with inverse modeling only and inverse+ALE



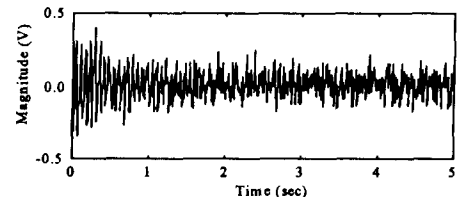
(a) With out ANC



(b) With filtered x LMS only



(c) With inverse modeling only



(d) With inverse modeling+ALE

Fig. 9 Controlled primary noise at the modeling error,  $\Delta=0$

같이 잘 제어됨을 알 수 있다.

따라서 신호대 잡음비가  $-15$  dB 정도에서 주음원에 대한 제어를 수행하기 위해서는 적응 랜덤잡음법에 적응 선형증진기를 부착하여 부가경로 전달

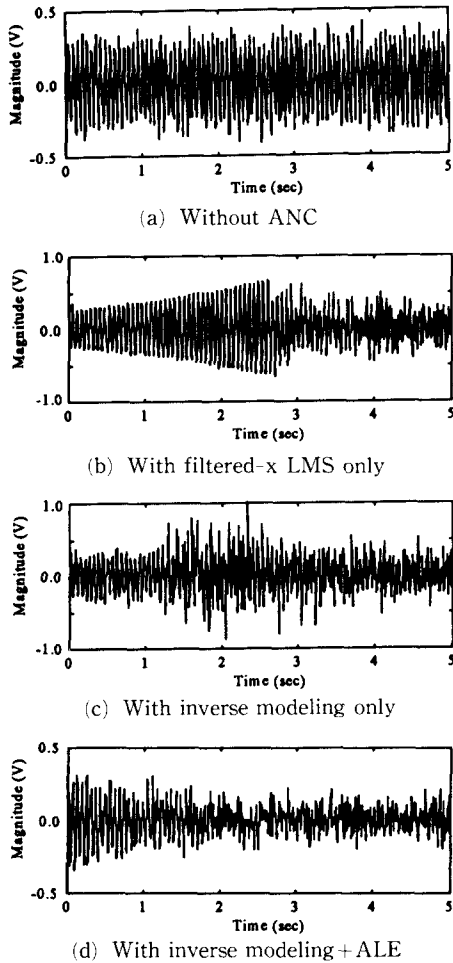


Fig. 10 Controlled primary noise at the modeling error,  $\Delta=2$

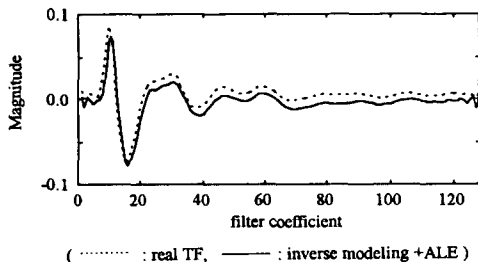


Fig. 11 Estimated secondary path transfer functions after ANC

함수를 정확하게 모델링할 수 있어야 한다.

Fig. 11은 적응 선형증진기를 적응 랜덤잡음법에 부착한 온라인 알고리즘을 이용한 결과로 Fig. 10(d)와 같이 주음원에 대한 제어를 수행하면서 변화한 실제의 전달함수를 정확하게 예측하는 것을 알 수 있다.

### 5. 결 론

제안된 온라인 알고리즘을 이용하여 덕트에서 부가경로 전달함수의 예측실험과 주음원에 대한 제어 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 부가경로 전달함수의 온라인 모델링에서 기존의 적응 랜덤잡음법은 낮은 신호대 잡음비로 인하여 주음원의 영향이 예측한 전달함수에 나타난다. 그러나 제안된 온라인 알고리즘은 주음원의 영향을 적응 선형증진기가 배제하기 때문에 정확하게 부가경로 전달함수를 예측할 수 있다.

(2) 기존의 적응 랜덤잡음법을 이용하여 부가경로 전달함수를 예측하는 과정에서 모델링오차가 많이 발생되면 전체 제어계가 발산되게 한다. 그러나 적응 랜덤잡음법에 적응 선형증진기를 부착한 경우는 부가경로 전달함수를 제대로 예측하기 때문에 빠른 수렴속도로 제어를 수행할 수 있다.

### 참고문헌

- (1) Widrow, et al., 1985, *Adaptive Signal Processing*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- (2) Dipa Vijayan and Kuo, S. M., 1995, "Secondary Path Modeling Using an Adaptive Predictor on the TMS320c30," *Proceedings of Internoise 1995*, pp. 11~15.
- (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. Am.*, Vol. 85, No. 2, pp. 797~802.
- (4) Tapia, J. and Kuo, S.M., 1990, "New Adaptive On-line Modeling Technique for the Active Noise Control Systems," *Proceedings of IEEE Int. Conf. Systems Engineering*, pp. 280~283.
- (5) Eriksson, L. J., 1991, "Active Acoustic Attenuation System with Overall Modeling," *U.*

- S Patent 4,987,598.*
- (6) Kuo, S. M. and Morgan, D. R., 1996, *Active Noise Control Systems*, John Wiley & Sons, Inc.
- (7) Bao, C. Sas P. and Brussel, H. Van, 1993, "Adaptive Active Control of Sound of Noise in 3-D Reverberent Enclosure," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 161, No, 3 pp. 501~514.
- (8) 김홍섭, 손동구, 오재응, 1997, "부가경로 전달함수의 온라인화를 이용한 능동소음제어의 성능향상," 대한기계학회논문집, 제21권, 제2호, pp. 281~287.
- (9) 김홍섭, 1997, "온라인 적응 알고리즘을 이용한 자동차 배기계의 능동소음제어," 박사학위논문 한양대학교, 서울.