

적응 선형 증진기를 이용한 인버스

모델링의 성능향상

Performance Improvement of the Inverse Modeling using Adaptive Line Enhancer

김흥섭*(한양대 대학원), 홍진석*(한양대 대학원), 손동구*(한양대 대학원),

신준***(국립 원주 전문대 자동차과), 오재응****(한양대 자동차공학과)

Heung Seob Kim(Graduate School, Hanyang Univ), Jin Seok Hong(Graduate School, Hanyang Univ),

Dong Goo Sohn(Graduate School, Hanyang Univ), Joon Shin(Won Joo National Junior College),

Jae-Eung Oh(Hanyang Univ)

ABSTRACT

In this study, performance improvement of the inverse modeling as the on-line control method for the estimation, control experiment is performed. As the modeling errors is occurred in duct system arbitrarily, a case using the filtered-x LMS algorithm only as the control method, a case using the inverse modeling method only and a case using the inverse modeling with the adaptive line enhancer are compared. The estimation errors between real secondary path transfer functions and the estimated and the control performances of primary noises with these estimated transfer functions are compared.

Key Words : Inverse modeling(인버스 모델링), Estimation(예측), Adaptive line enhancer (적응 선형 증진기), Secondary path transfer functions(부가경로 전달함수), Overall modeling method(오버올 모델링 기법)

1. 서론

부가경로 전달함수에 모델링 오차가 발생하는 경우에 온라인 알고리즘으로 이용되는 제어 기법으로 적응 랜덤 잡음법(adaptive random noise method, 또는 인버스 모델링)^(1,2,3)과 오버올 모델링 기법(overall modeling method)^(4,5)이 연구되고 있다. 인버스 모델링은 모델링 오차가 발생한 부가경로 전달함수를 계속적으로 모델링하기 위하여 주음원과 상관 관계가 존재하지 않은 의사 랜덤 신호를 제어력에 가해주는 방법이며, 오버올 모델링 기법은 다른 신호를 이용하지 않고 제어력을 이용하여 부가경로 전달함수를 모델링 한다.

인버스 모델링 기법은 의사 랜덤 신호를 제어력에 더하여 주기 때문에 최종적인 잔류 오차가 증가되는 단점을 가지는데 일반적으로 의사 랜덤 신호는 주음원과 신호대 잡음비가 -10 dB 이며 이때의 잔

류 오차는 2 ~ 3 dB 정도가 증가된다. 오버올 모델링 기법에서 부가경로 전달함수의 모델링을 위하여 사용되어지는 제어력은 주음원에 종속적이어서 협대역 제어(narrowband control)의 경우, 부가경로 전달함수도 협대역에 대한 모델링을 수행하게 된다. 따라서 주음원이 자동차 엔진, 배기 소음 같이 관심 주파수 영역이 좁고 또한 시간에 따라 주파수가 달라지는 경우에는 자동차 RPM 이 달라짐에 따라 계속적으로 모델링을 필요로 한다. 이와 달리 인버스 모델링의 경우에는 부가경로 전달함수를 의사 랜덤 신호를 이용하여 모델링하므로 주음원의 주파수 변경 시에도 재모델링을 필요치 않는다.

따라서 본 연구에서는 온라인 제어 기법으로 인버스 모델링 기법의 성능 향상과 검증에 대한 연구를 수행하였다. 덕트에서 임의적으로 모델링 오차를 발생시켜 filtered-x LMS 알고리즘만을 사용하였을 경우, 온라인 알고리즘으로 인버스 모델링을 적용하였

을 경우, 그리고 인버스 모델링에 적응 선형 증진기를 부착한 경우를 비교하였다. 모델링 오차가 발생하였을 경우에 실제의 전달함수와 예측한 전달함수간의 예측 오차를 분석하고, 예측된 전달함수를 이용한 주음원의 제어 결과를 분석하였다.

2. 부가경로 전달함수 온라인 예측

2.1 인버스 모델링에 의한 부가경로 전달함수의 예측

기존의 *Filtered-x LMS* 알고리즘은 내부에 부가경로 전달함수를 필요로 하는데 이 전달함수는 시변적이고 오프라인에 기초하여 구성되어진다. 그러나 많은 경우에 있어 이 전달함수는 시변적이어서 수십도의 위상 변화를 가져올 수 있어 온라인으로 구성되어야만 한다. 따라서 인버스 모델링에서는 주음원과 무관한 임의의 랜덤 소음이 시스템 규명을 목적으로 제어력에 더해준다.

Fig.1에서 $B(n)$ 는 예측 부분의 FIR 필터의 계수이고, $s(n)$ 는 임의의 랜덤 신호, $y(n)$ 는 예측하고자 하는 전달함수의 출력, $\hat{y}(n)$ 는 예측 FIR 필터의 출력이다.

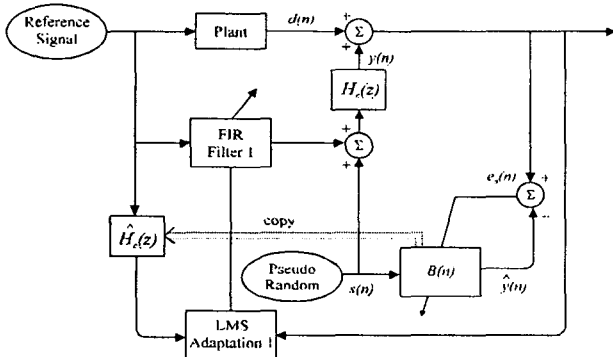


Fig.1 Block diagram of the on-line identification in the filtered-x LMS adaptation

Fig.1에서 주음원과 제어 신호의 간섭으로 발생한 플랜트 잡음의 존재하에서 부가경로 전달함수의 규명을 위한 적응 필터의 수행은 다음과 같이 된다.

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

$d(n)$ 는 주음원과 제어력의 간섭으로 발생한 $e_n(n)$ 속에 존재하는 플랜트 소음으로 $2u_n d(n) s(n)$

항은 예측을 위한 적응 필터, $B(n)$ 의 성능을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 $B(n)$ 이 최적치로의 수렴을 위해서는 식(1)에서 이 항을 제거해야 하는데 적응 선형 증진기나 적응 잡음 제거기가 큰 플랜트 잡음 속에서 부가경로 전달함수를 모델링하는 랜덤 신호를 분리하는 기법으로 유용하다.

2.2 적응 선형 증진기에 의한 플랜트 잡음 제거

적응 선형 증진기는 입력 신호가 정현파 신호와 랜덤 신호의 합으로 구성되어 있는 경우에 비상관 지연(uncorrelation delay)을 이용하여 두 성분을 분리하는데 유용하다.

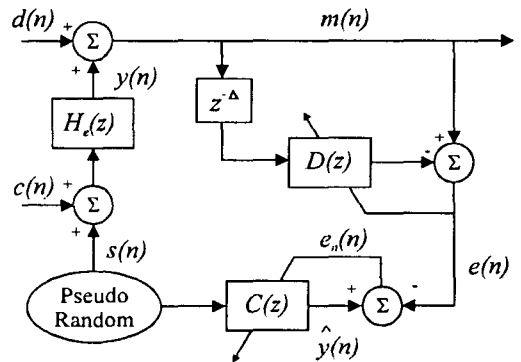


Fig.2 Adaptive line enhancer in on-line modeling

Fig.2에서 에러 마이크로폰에서의 오차 신호 $m(n)$ 은

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

여기서, $h_{vj}(n)$ 은 부가경로의 j 차 임펄스 함수를 나타내고, M 은 $h_{vj}(n)$ 의 차수이다. 백색 잡음 $s(n)$ 과 플랜트 잡음 신호 $f(n)$ 은 전혀 상관 관계가 없으므로 $E[f(n)s(n)] = 0$ 이다.

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

사용된 백색 잡음의 평균이 0 이면

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

시간 지연 Δ 이 부가경로 임펄스 함수의 차수 M

보다 크다면, $m(n)$ 에서 백색 잡음으로 인한 항이 사라지게 된다. 따라서 플랜트 신호 $f(n)$ 만이 필터 $D(z)$ 의 출력에 의해 제거되고 적응 선형 증진기의 최종 잔여 오차는 다음과 같이 된다.

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

따라서 적응 선형 증진기를 이용하면 플랜트 잡음 신호 $f(n)$ 의 영향을 배제하여 온라인 모델링에서의 신호대 잡음비를 개선할 수 있다.

3. 실험 장치와 방법

위에서 제안된 온라인 *filtered-x LMS* 알고리즘의 검증은 위하여 다음의 덕트 시스템에서 능동소음제어 실험을 수행하였다. 본 연구에서 이용된 덕트 시스템은 총 길이가 4.5 m 이고 입력 마이크의 초기 위치가 제어 스피커에서 1 m 떨어져 설치하였다. 또한 무한 덕트로 가정하기 위하여 끝부분에 유리솜 (glass wool)을 부착하였으며 오차 마이크는 제어 성능을 관찰하기 위하여 오실로스코프와 주파수 분석기에 연결하였다.

제어기로 이용된 DSP 보드는 실시간 제어 프로세서 TMS320c30가 내장되어 있으며 4 채널 입력과 2 채널 출력이 가능한 A/D, D/A 보드로 구성되어 있다. 부가경로 전달함수의 온라인 예측에 능동소음제어 실험을 수행하기 위하여 제어 스피커와 오차 마이크로폰 사이의 거리를 변화시키면서 오프 라인으로만 모델링을 수행한 *filtered-x LMS* 알고리즘과 인버스 모델링을 이용한 *filtered-x LMS* 알고리즘과 적응 선형 증진기를 적용한 인버스 모델링을 이용한 경우의 *filtered-x LMS* 경우의 결과를 비교하였다.

Fig.3 에서 제어 스피커와 오차 마이크로폰 사이의 거리는 시뮬레이션에서의 조건과 동일하게 샘플링 지연이 각각 $\Delta = 0, 1, 2, 3$ 인 경우에 제어 실험을 수행하였다. 샘플링 시간(sampling time)이 1/2000 초 인 경우에 $\Delta = 1$ 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 Hz 의 순음을 이용하였으며 신호대 잡음비는 -15 dB 로 하였다.

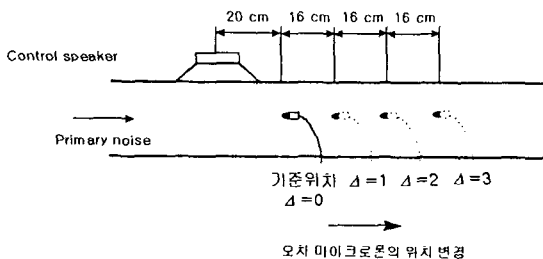


Fig.3 Error microphone position change for modeling error generation in duct system

3.1 부가경로 전달함수의 온라인 예측 실험

주음원으로 300 Hz 의 순음과 부가경로 전달함수를 모델링하기 위한 랜덤 신호와의 신호대 잡음비를 -15 dB 로 유지하면서 제시된 온라인 알고리즘을 이용하여 각각 모델링을 수행하였다. 부가경로 전달함수는 128 차의 FIR 필터로 모델링하였고 모델링을 시작한 후 10 초 후의 결과를 비교하였다.

Fig.4 에서 오차 마이크로폰에서 계측된 신호로 300 Hz 의 순음과 랜덤 신호는 오버를 레벨에서 15 dB 의 차이를 보이고 있으며 순음과 랜덤 신호와의 함은 주음원과는 1 dB 이내의 차를 나타내고 있다.

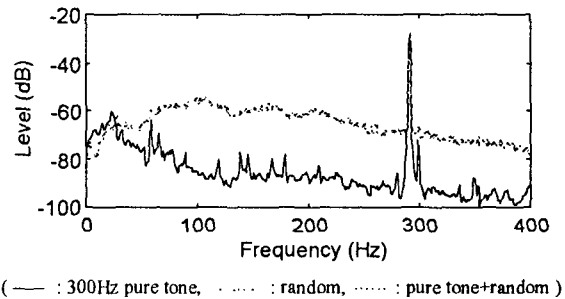
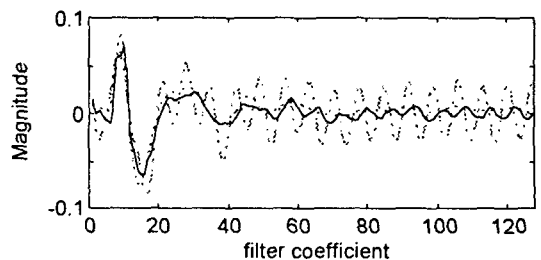
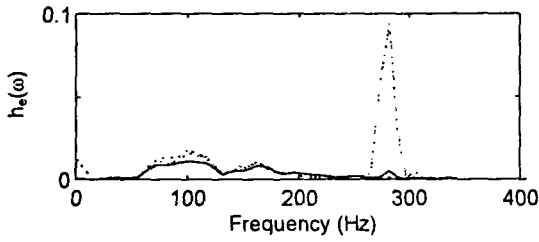


Fig.4 Primary noise and pseudo random signal measured at error microphone

실제의 부가경로 전달함수와 인버스 모델링만으로 예측한 경우, 그리고 인버스 모델링에 적응 선형 증진기를 부착하였을 예측한 경우를 각각 Fig.5 에 비교하였다. 실제의 부가경로 전달함수와 제안한 알고리즘을 이용하여 예측한 부가경로 전달함수는 비슷한 양상을 보이고 있으나 인버스 모델링만을 사용한 경우는 300 Hz 주음원의 영향으로 예측한 전달함수에도 주음원의 영향이 지배적으로 나타내고 있다. 따라서 적응 선형 증진기가 오차 신호에서 주음원의 영향을 효과적으로 제거시킴을 알 수 있다.



(a) Estimated FIR filter response



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

(b) Frequency response of FIR filter

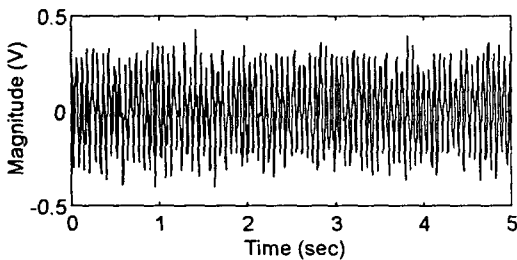
Fig.5 Estimated secondary path transfer function

3.2 온라인 예측에 의한 덕트에서의 능동소음제어

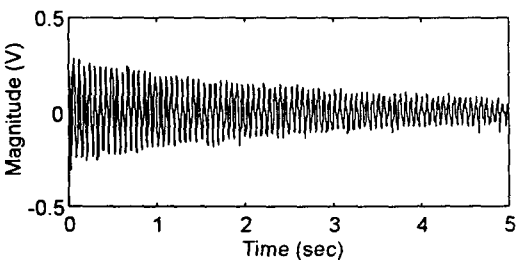
기존의 인버스 모델링에서는 주음원의 영향으로 모델링 오차가 많이 발생하지만 인버스 모델링에 적응 선형 증진기를 부착한 경우는 부가경로 전달함수를 제대로 모델링함을 알 수 있다.

각각의 제어 알고리즘에서 제어 파라미터(수렴 계수 = 3.0×10^{-4} , 주제어 필터 차수 = 128 차)를 동일하게 한 상태에서 온라인 알고리즘과 *filtered-x* LMS 알고리즘의 수렴 속도를 시간 영역의 제어 결과에서 비교하였다.

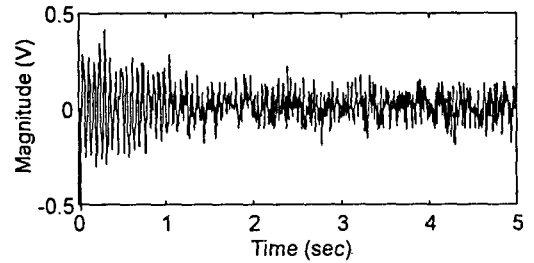
먼저 모델링 오차를 발생시키지 않은 상태($\Delta = 0$)에서는 온라인 알고리즘과 *filtered-x* LMS 알고리즘의 수렴 속도가 큰 차이를 보이지 않으며 잔여 오차는 인버스 모델링만을 사용한 경우와 적응 선형 증진기를 사용한 경우가 비슷하게 나타나고 있다.



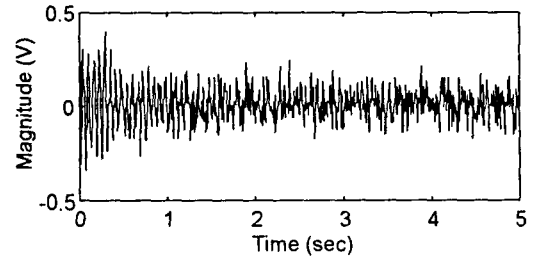
(a) Without ANC



(b) with *filtered-x* LMS only



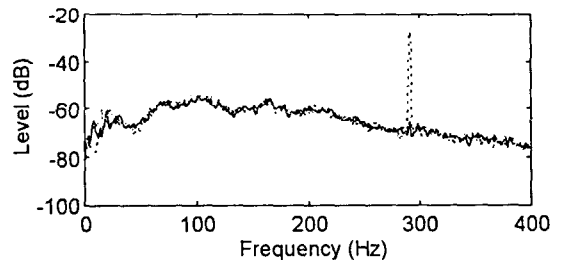
(c) with inverse modeling only



(d) with inverse modeling + ALE

Fig 6 Control results at the modeling error, $\Delta = 0$

Fig.7 에서 인버스 모델링에 적응 선형 증진기를 부착한 전후의 제어 결과가 동일하게 나타남을 볼 수 있는데, 300 Hz의 주음원이 부가경로 전달함수를 모델링하기 위해 발생시킨 랜덤 소음의 레벨로 20 dB 저감 되어 진다.



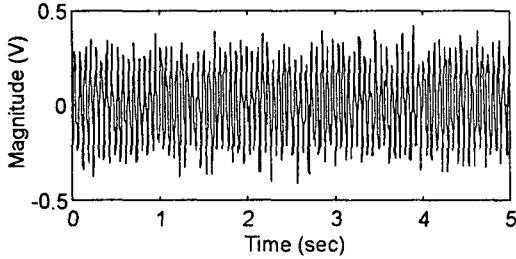
(.....:without ANC,..... :only inverse, —— :inverse + ALE)

Fig.7 Results of active noise control with only inverse modeling and inverse modeling + ALE

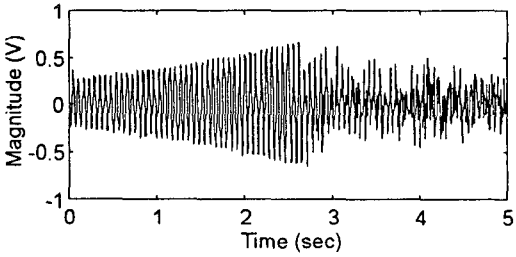
부가경로 전달함수에 모델링 오차를 발생시키기 위하여 오차 마이크로폰의 위치를 32 cm 를 이동시켰을 경우($\Delta = 2$)에 주음원에 대한 제어 결과를 살펴 보았다. 기존의 *filtered-x* LMS 알고리즘을 이용한 경우에는 시뮬레이션의 결과와 동일하게 부가경로 전달함수가 달라졌으므로 주음원과 제어력의 위상이 일치하지 않아 오차 소음이 증가되어 2.5 sec 이후에는 발산되어 진다. 인버스 모델링만을 적용한 경우에는 낮은 신호대 잡음비로 인하여 모델링 오차가 많이 발생하여 전체 제어계가 발산된다. 인버스 모델링에 적응 잡음 제거기를 부착한 경우에는 낮은 신호대 잡음비가 개선되어 부가경로 전달함수를 정

확하게 예측하기 때문에 Fig.10(c)와 같이 잘 제어됨을 알 수 있다.

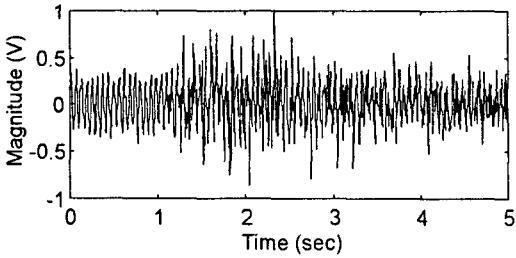
따라서 신호대 잡음비가 -15 dB 정도에서 주음원에 대한 제어를 수행하기 위해서는 인버스 모델링에 적응 잡음 제거기를 부착하여 부가경로 전달함수를 정확하게 모델링할 수 있어야 한다.



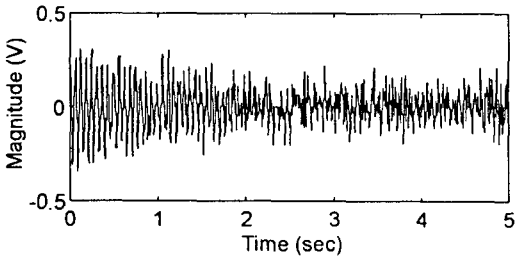
(a) without ANC



(b) with filtered-x LMS only



(c) with inverse modeling only



(d) with inverse modeling + ALE

Fig.8 Control results at the modeling error, $\Delta = 2$

Fig.9는 부가경로 전달함수를 적응 잡음 제거기를 부착한 온라인 알고리즘으로 제어를 수행한 이후에 변화한 실제의 전달함수와 예측한 전달함수로 정확하게 예측된 것을 알 수 있다.

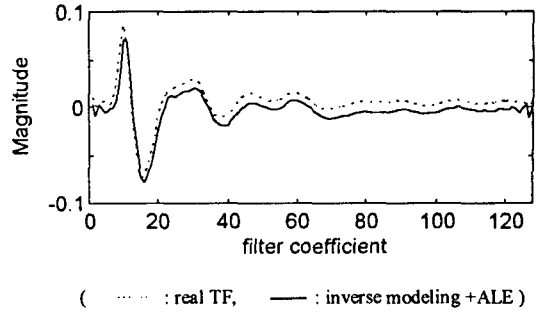


Fig.9 Estimated secondary path transfer function after on-line active noise control is performed

4. 결론

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

1. 부가경로 전달함수의 온라인 모델링에서 기존의 인버스 모델링은 낮은 신호대 잡음비로 인하여 주음원의 영향이 예측한 전달함수에 나타난다. 그러나 제안된 온라인 알고리즘은 주음원의 영향을 적응 선형 증진기가 배제하기 때문에 정확하게 부가경로 전달함수를 예측할 수 있다.
2. 부가경로 전달함수에 모델링 오차가 발생할 경우 인버스 모델링의 경우 변화된 부가경로 전달함수를 예측하는데 오차가 많이 발생하여 전체 제어가 발산되게 한다. 그러나 적응 선형 증진기를 부착한 경우는 부가경로 전달함수를 제대로 예측하기 때문에 빠른 수렴 속도로 제어를 수행할 수 있다.

< 참고문헌 >

- (1) Tapia, S.M. Kuo, "New adaptive on-line modeling technique for the active noise control systems", Proceedings of IEEE Int. conf. Systems Engineering, pp.280-283, 1990
- (2) Dipa Vijayan, S.M. Kuo, "Secondary path modeling using an adaptive predictor on the TMS320c30", Internoise, pp.11-15, 1995
- (3) L.J. Eriksson, "Active acoustic attenuation system with overall modeling", U.S Patent 4,987,598, 1991
- (4) L. J. Eriksson and M.C. Allie, "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, 1989
- (5) 김홍섭, 손동구, 오재웅, "부가경로 전달함수의 온라인화를 이용한 능동소음제어의 성능 향상", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp.178~183, 1995