

# 능동소음제어를 위한 Adjoint-LMS 알고리즘의 강인성 개선

## A Robustness Improvement of Adjoint-LMS Algorithms for Active Noise Control

문 학 룡\* · 손 진 근†

(Hak-ryong Moon · Jin-geun Shon)

**Abstract** - Noise problem that occurs in living environment is a big trouble in the economic, social and environmental aspects. In this paper, the filtered-X LMS algorithms, the adjoint LMS algorithms, and the robust adjoint LMS algorithms will be introduced for applications in active noise control(ANC). The filtered-X LMS algorithms is currently the most popular method for adapting a filter when the filter exits a transfer function in the error path. The adjoint LMS algorithms, that prefilter the error signals instead of divided reference signals in frequency band, is also used for adaptive filter algorithms to reduce the computational burden of multi-channel ANC systems such as the 3D space. To improve performance of the adjoint LMS ANC system, an off-line measured transfer function is connected parallel to the LMS filter. This parallel-fixed filter acts as a noise controller only when the LMS filter is abnormal condition. The superior performance of the proposed system was compared through simulation with the adjoint LMS ANC system when the adaptive filter is in normal and abnormal condition.

**Key Words** : Adjoint LMS algorithms, ANC(active noise control), Parallel-fixed filter, Filterd-X LMS algorithm, Robust adjoint LMS, Transfer function

### 1. 서 론

능동소음제어(Active Noise Control;ANC) 기법은 소음원의 근처에서 측정된 신호를 제어기를 이용하여 그 음과 크기가 같고 180° 위상차의 상쇄파를 발생하여 소음을 저감시키는 것이다[1]. 이는 부가 음원의 제어스피커와 에러 마이크를 이용하여 실시간으로 변화하는 소음을 제거하는 방법으로 이들 장비의 부피와 무게가 적기 때문에 방음벽과 같은 수동 방식보다 설치 용이의 장점이 있다. 이러한 ANC 기법은 주로 500[Hz]미만의 저주파수 대역에서 효과적이며, Filterd-X LMS 알고리즘이 가장 많이 이용되고 있다[2].

기존 Filterd-X LMS 알고리즘은 오차신호가 오차경로를 거친 다음 마이크로폰에 의해 탐지될 때 오차경로의 영향을 상쇄시키기 위해 입력신호를 오차경로의 전달함수에 해당하는 필터로 필터링한 후 LMS 알고리즘의 입력으로 사용하는 방식이다. 이의 방법은 광대역 및 협대역의 소음 저감에 효과적이지만 2차 음원에서 발생하는 제어음파에 의한 음향 회환에 의하여 제어기의 성능 저하를 초래한다.

특히 3차원 폐공간과 같은 복잡한 소음 환경에서는 다중 채널로 Filterd-X LMS를 적용하여야 한다. 그러나 이의 경우에는 다수의 오차 마이크로폰과 다수의 제어용 음원을 갖는 음향회환 보상필터를 적용 하기에는 막중한 필터의 계

산량 증가를 초래하여 프로세서의 계산 부담을 가중시키게 된다[3, 4].

이러한 복잡한 다중채널 구조의 ANC를 적용하고자 할 때의 문제점인 계산량의 감소를 위하여 Adjoint-LMS 알고리즘이 제시되었다[5]. 다중채널 구조의 ANC에서 일반적으로 많이 사용되는 Filterd-X LMS 알고리즘을 적용할 때에는 기준 입력 신호를 여러 개의 밴드로 나누어야 하므로 각각의 기준입력 신호를 prefiltering 할 때 많은 계산량이 요구된다. 그러나 Adjoint-LMS 알고리즘은 기준입력 대신에 오차신호를 prefiltering 하게 되므로 기준 입력신호의 갯수와 상관없이 적용필터의 계산 시에도 기준 입력신호가 변경되지 않았으므로 오차 센서의 수 M에 비례하는 수 만큼 연산량이 줄어들게 된다.

그러나 Adjoint-LMS 알고리즘의 적용은 적용필터가 정상적인 동작을 하지 않을 경우에는 소음이 그대로 전달되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 강인성이 고려된 Adjoint-LMS 알고리즘을 제안하였다. 이는 적용필터가 정상적인 동작을 하지 않을 경우에는 고정 필터를 미리 배치하여 최소한의 성능을 보장하도록 하는 것으로 시스템의 높은 안정성을 갖도록 하였다.

덕트 소음을 제어대상으로 하여 2차 소음경로에 대하여 오프라인 방식으로 전달함수 측정에 의한 고정필터를 적용 필터와 병렬로 접속하는 방식을 적용하여 강인성을 개선하였다. 컴퓨터 시뮬레이션으로 제안된 알고리즘을 수행한 결과 적용필터의 고장 시에도 소음제거의 효과에 대한 강인성이 개선됨을 확인할 수 있었다.

### 2. 다중채널 구조의 ANC

능동소음 제어기법은 제어기법에 따라 전향제어기법과

\* Korea Institute of Construction Technology, SoC Research Institute, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gachon University, Korea

E-mail : shon@gachon.ac.kr

접수일자 : 2016년 7월 27일

최종완료 : 2016년 8월 10일

쾌환제어기법으로 나눌 수 있다. 전향제어기법은 기준센서에서 감지된 소음신호와 오차신호의 상관관계를 이용해서 소음을 제거하는 방법이다. 이는 높은 안정성과 강인한 성능을 특징으로 하는 반면 느린 수렴속도와 상호 상관관계가 있는 기준 입력신호를 필요로 하며 음향쾌환 발생으로 인해 안정도가 파괴될 수 있다.

또한, 쾌환제어기법은 기준 입력신호를 필요로 하지 않고 오차센서 주위의 소음을 예측 제거 하는 방법으로 음향쾌환이 없으며 일반적으로 빠른 수렴 속도를 갖지만 이득-대역폭 제한과 안정성 문제가 단점으로 알려져 있다[1, 4].

3차원 폐공간 내의 소음신호는 많은 음향모드를 여기시키는데, 이론적으로 완전한 소음제거를 위해서는 여기되는 음향모드의 수만큼 2차 음원이 필요하게 된다. 실제로 하나의 음향모드를 다른 음향모드의 여기 없이 독립적으로 제어한다는 것은 매우 어려운 일이므로 여러 개의 2차 음원과 오차센서, 그리고 여러 개의 기준입력센서를 가진 능동소음제어 시스템을 구성해야 한다[6].

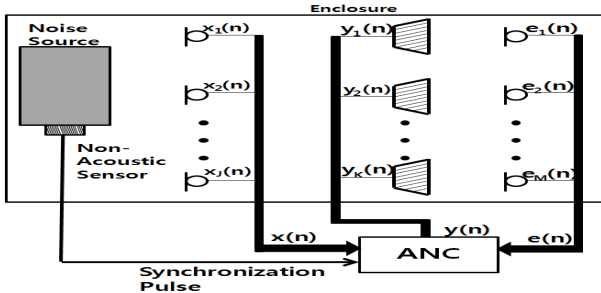


그림 1 다중채널 능동소음제어 시스템  
Fig. 1 Configuration of multiple-channel ANC system

그림 1은 다중채널 능동소음제어의 구조로, J개의 기준 입력 센서와 K개의 병렬 적응필터 및 이에 상응하는 2차 음원들, 그리고 M개의 오차센서로 구성되어 있다. J개의 기준 입력신호가 소음신호와 상관관계가 있다고 가정할 때, K개의 적응필터는 M개의 오차신호의 출력의 제곱의 합을 최소화 하기 위해 적응되며, K개의 2차음원에 의해 소음이 제거된다. 여기에는 J×K개의 1차경로와 K×M개의 2차 경로가 존재하고, 적응필터 갱신시 J×K×M에 비례해서 계산량이 증가하게 된다. 그러므로 1차원 문제와 비교하여 훨씬 많은 계산량을 갖게 된다[3].

### 3. ANC를 위한 적응필터 알고리즘

#### 3.1 Adjoint-LMS 알고리즘

Adjoint-LMS 알고리즘은 Filterd-X LMS 알고리즘의 변형으로 기준 입력신호를 2차 경로의 전달함수로 필터링하는 대신 오차신호를 2차 경로의 adjoint 모델로 필터링하는 방법이다[3, 5]. 능동소음제어에서 다중채널일 경우 일반적인 Filterd-X LMS 알고리즘을 적용하면 기준 입력신호의 필터링시 입력신호의 개수인 J에 비례하는 연산을 필요로 하게 된다. 그러나 Adjoint-LMS 알고리즘을 사용하면 오차신호를 필터링하므로 기준입력신호의 개수와 상관없이, 적용필터 계산 시에도 기준 입력신호가 변경되지 않았으므로 오차센서의 수 M에 비례하는 수만큼 연산량이 줄어들게 된다. 그러므로 다중채널일 경우 상당한 양의 계산량을 줄일 수 있다.

적용필터 계산 시에도 기준 입력신호가 변경되지 않았으므로 오차센서의 수 M에 비례하는 수만큼 연산량이 줄어들게 된다. 그러므로 다중채널일 경우 상당한 양의 계산량을 줄일 수 있다.

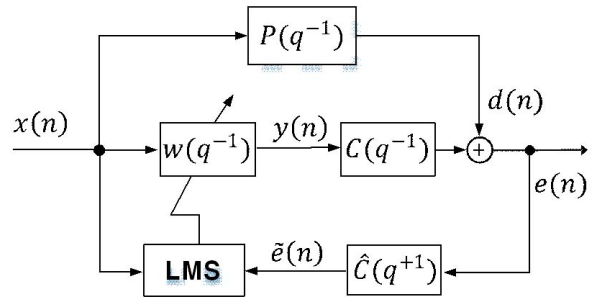


그림 2 Adjoint-LMS 알고리즘의 블록선도  
Fig. 2 Block diagram of adjoint LMS algorithm

그림 2는 Adjoint-LMS 알고리즘의 블록선도이다. 여기서  $x(n)$ 는 기준 입력벡터이고,  $e(n)$ 는 오차센서에서 검출된 신호,  $y(n)$ 는 제어필터의 출력이다.  $d(n)$ 는  $x(n)$ 가 1차 소음원의 전달경로 전달함수  $P(q^{-1})$ 를 통과한 신호이다.  $C(q^{-1})$ 와  $\hat{C}(q^{-1})$ 은 2차 경로와 추정된 2차 경로의 전달함수를 나타낸다.  $\hat{C}(q^{-1})$ 은 추정된 2차경로 모델의 adjoint 모델이다. 여기서  $q^{-1}$ 은 시간지연연산자(time delay operator)이다.

Adjoint-LMS 알고리즘의 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w(n+1) = w(n) - \mu \tilde{e}(n-N)x(n-N) \quad (1)$$

$$\tilde{e}(n) = \hat{C}(q^{-1}, n) * e(n) \quad (2)$$

여기서  $w(n)$ 은 적응필터 파라미터,  $\mu$ 는 step size,  $\tilde{e}(n)$ 는 오차 신호벡터,  $N$ 은 2차 경로 모델차수인데, Adjoint 모델은 지연요소는 앞선 요소가 되는 비인과적 계통이므로 실시간 적용식에 적용하기 위해 2차경로 모델차수  $N$ 만큼 지연을 시킨다. Adjoint-LMS 알고리즘은 단일 채널인 경우 각각의 계산량은 동일하지만 다중 채널일 경우 계산량을 줄일 수 있으며 기존 Filterd-X LMS 알고리즘과 동등한 수렴성 및 excess mse(mean square error)를 갖는다.

#### 3.2 제안된 강인성 Adjoint-LMS 알고리즘

광대역 및 협대역의 소음원을 제거하기 위한 ANC시스템의 도입은 주로 Filterd-X LMS 또는 Adjoint-LMS 알고리즘의 적용을 고려할 수 있다. 이러한 ANC 시스템의 적용장점은 설치할 때마다 프로그램을 바꾸거나 시스템 모델링을 할 필요가 없기 때문에 설치가 용이하고 시변시스템에도 잘 동작된다는 것이다.

그러나 적응필터의 강인성이 보장되지 않는 경우에는 수시로 필터를 복귀시켜야 하는데 이때 큰 펄스성 잡음이 생긴다. 또한 필터가 고장인 경우에는 수리가 완료될 때까지 ANC 시스템이 동작되지 않으므로 큰 소음이 그대로 전달되어 오히려 역효과가 나는 단점이 있다. 이러한 단점을 보

완하기 위하여 본 논문에서는 그림 3과 같은 강인성이 고려된 Adjoint-LMS 알고리즘을 새롭게 제안한다.

그림 2의 제어 구조와 흐름을 그림 3과 같은 다이어그램으로 표현할 수 있다. 즉 입력 마이크로폰으로부터 제어스피커까지의 덕트의 전달함수를  $P(q^{-1})$ 라고 표현하고, 2차 음원에서 발생한 제어음파가 기준센서로 검출되는 음향계환(acoustic feedback)을  $F(q^{-1})$ , 제어스피커에서 오차마이크로폰까지의 2차경로 전달함수를  $C(q^{-1})$ 를 각각 나타낸다.

그림 3에서의 제어구조는 그림 2의 Adjoint LMS와 비교하여 큰 차이점은 미리 각 전달함수를 측정하여 그 값을 병렬로 고정시킨다는 것이다. 즉  $P(q^{-1})$ 의 전달함수를 측정하여  $\hat{P}(q^{-1})$ 로 고정하고, 음향계환을 측정하여  $\hat{F}(q^{-1})$ 로 고정한다. 그리고 2차 경로내의 전달함수를 측정하여  $\hat{C}(q^{-1})$ 로 고정된 후, 그 변화분에 대해서는 적응필터를 병렬로 연결하여 보상하는 능동소음제어 시스템인 것이다. 이때의 각 전달함수의 측정은 오프라인으로 측정하고, 이들 전달함수에 의해 발생하는 오차는 적응필터  $W(q^{-1})$ 로 보상한다. 이렇게 하면 적응필터가 제 기능을 다하지 못하는 경우에도  $\hat{P}(q^{-1})$ 에 의해 소음제어가 가능해져 전체시스템의 강인성이 보장되어 최소한의 성능이 보장된다는 것이다.

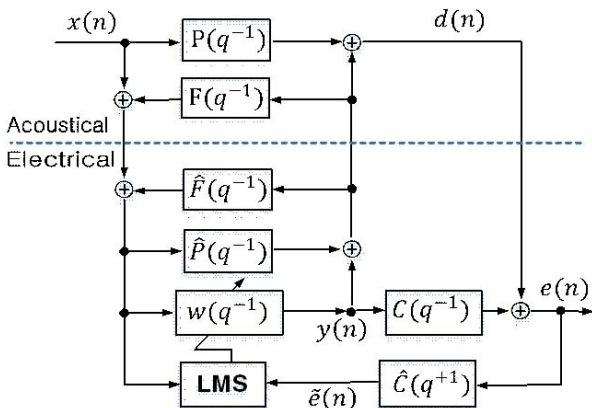


그림 3 강인성을 고려한 Adjoint-LMS의 블록다이어그램  
Fig. 3 Block diagram of adjoint LMS with robustness

#### 4. 제안된 ANC 알고리즘의 모의실험

##### 4.1 시스템 전달함수의 측정

본 논문에서 제안한 강인성이 고려된 Adjoint-LMS 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 그림 4와 같은 시스템을 구성하였다. 이의 구성 시스템은 제안된 ANC시스템에 사용하기 위한 전달함수 측정의 구성도이며, 이때의 제어대상은 전체의 길이가 3,000(mm)이고, 직경이 200(mm)인 아크릴원통을 사용한 구조의 덕트를 선택하였다.

이의 구성으로 입력스피커 SP1에서 신호음을 발생시켜 입력마이크로폰 M1과 제어스피커 SP2의 전달함수  $\hat{P}(q^{-1})$ 를 측정한다. 또한 제어스피커(SP2)의 입력과 오차마이크로폰(M2)의 출력으로 이어지는 전달함수  $\hat{C}(q^{-1})$ 를 측정하게 된다[7].

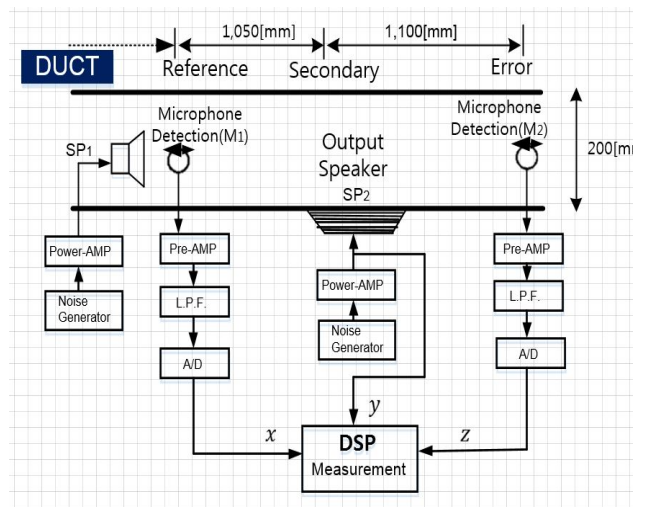


그림 4 ANC시스템에서의 전달함수 측정 다이어그램  
Fig. 4 Block diagram of measurement of transfer function for ANC system

그림 4의 구조에서 전달함수 측정을 위한 입력스피커의 신호음은 임펄스 발생기를 통하여 입력시키며, 입력마이크로폰 M1에서 얻은 입력신호와 제어스피커의 위치에 놓인 마이크로폰 M2에서 얻은 출력신호를 토대로 하여 전달함수  $\hat{P}(q^{-1})$ 를 구하게 된다. 이때의 음향계환 전달함수  $\hat{F}(q^{-1})$ 는  $\hat{P}(q^{-1})$ 과 입·출력의 위치를 바꾸게 되는 것이므로  $\hat{F}(q^{-1}) = -\hat{P}(q^{-1})$ 의 관계를 이용하여 구한다. 또한 제어스피커의 입력과 오차마이크로폰 M2의 출력을 이용하여  $\hat{C}(q^{-1})$ 를 구한다. 그리고  $\hat{C}(q^{-1})$ 는 Adjoint-LMS 알고리즘의 성능과 안정성을 향상시키기 위해 필요한 요소이나, 약간의 오차는 전체 시스템에 큰 영향이 없으므로 계산량을 줄이기 위해 고정시키기로 하였다.

그림 5(a)는 입력스피커에 인가한 입력신호와 그림 5(b)는 제어스피커의 위치에서 측정된 출력신호이다. 이때 입력과 출력신호는 50[μsec]로 샘플링 하였고, 계수추정을 위해 300개의 샘플링 데이터를 사용하였다. 측정된 신호를 근거로 ARX(Auto Regressive External)모형화[8, 9]에 의해 전달함수  $\hat{P}(q^{-1})$ 를 구하였다. ARX 모형화에 대한 입력 모델은 식 (3)을 사용하였으며, 입력된 신호  $u(t)$ , 출력되는 신호  $y(t)$  및 오차신호  $e(t)$ , 지연소자  $q^{-1}$  등으로 구성된다.

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - nk) + e(t) \quad (3)$$

여기서,  $A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-na}$ ,

$B(q) = 1 + b_1q^{-1} + \dots + b_nq^{-nb}$ .

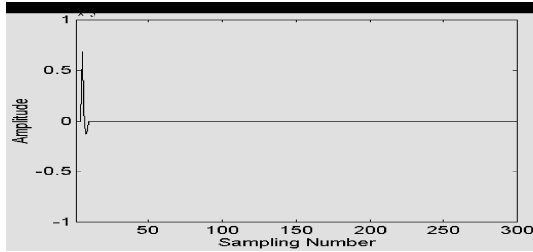
$na, nb$  : 각각의 다항식의 차수

$nk$  : 입력으로부터 출력까지의 지연이다.

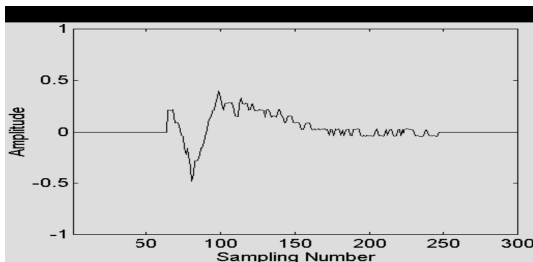
그림 5(a)의 입력스피커 입력신호는 입력 임펄스가 펄스 폭이 3[μsec], 펄스 주기는 15 [msec]인 임펄스 발생기를 사용하였다. 그림 5(b)의 측정 신호는 식 (3)을 근거에 의한 방법으로 전달함수  $\hat{P}(q)$ 를 구하였으며, ARX(8, 2)인 모형의 계수를 구한 결과는 식 (4)와 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{P}_A(q^{-1}) = & 1 - 0.7472q^{-1} + 0.0161q^{-2} + 0.0480q^{-3} \\ & + 0.0212q^{-4} - 0.1286q^{-5} - 0.0502q^{-6} \\ & - 0.0953q^{-7} + 0.0154q^{-8} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\hat{P}_B(q^{-1}) = 0.0180q^{-60} (1 + 1.2722q^{-1}) \quad (5)$$

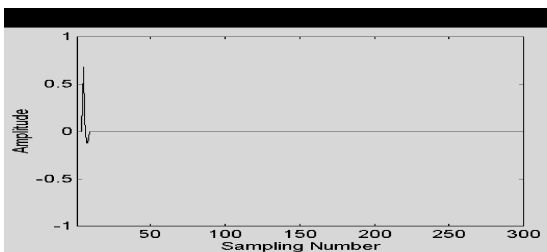


(a) Input signal of input speaker

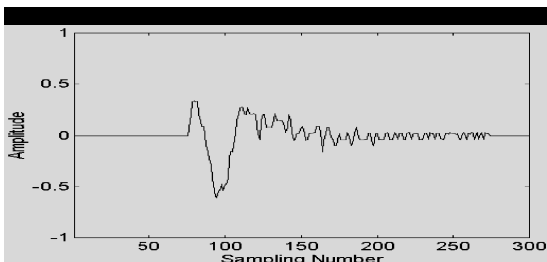


(b) Measured output signal of the control speaker

그림 5 전달함수  $\hat{P}(q^{-1})$  측정을 위한 입/출력신호  
Fig. 5 Input/output signal for measurement of transfer function  $\hat{P}(q^{-1})$ .



(a) Input signal of the control speaker



(b) Measured output signal of the error microphone

그림 6 전달함수  $\hat{C}(q^{-1})$  측정을 위한 입/출력신호  
Fig. 6 Input/output signal for measurement of the transfer function  $\hat{C}(q^{-1})$

그림 6은 전달함수  $\hat{P}(q^{-1})$ 를 측정하는 방법과 유사하게 제어스피커에 인가한 입력신호와 오차마이크로폰에서 측정

한 출력신호이며, 이 신호를 근거로 전달함수  $\hat{C}(q^{-1})$ 를 구하였다. 마찬가지로 방법으로 ARX(8, 2)인 모형의 계수를 구한 결과는 식 (6), 식(7)과 같다.

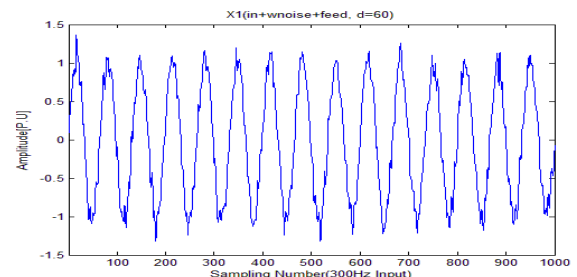
$$\begin{aligned} \hat{C}_A(q^{-1}) = & 1 - 0.5985q^{-1} + 0.2699q^{-2} + 0.1296q^{-3} \\ & - 0.0276q^{-4} - 0.0989q^{-5} - 0.0704q^{-6} \\ & + 0.0976q^{-7} - 0.2454q^{-8} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\hat{C}_B(q^{-1}) = 0.0602q^{-64} (1 + 2.9186q^{-1}) \quad (7)$$

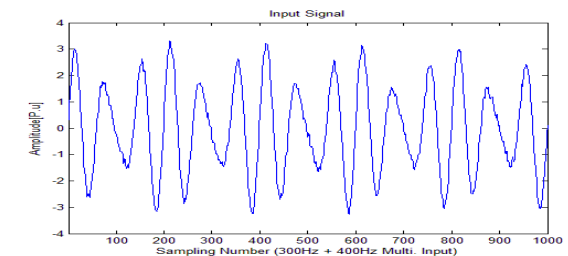
#### 4.2 모의실험 및 결과

4.1절에서 구한 전달함수를 이용하여 그림 3에서 제시한 시스템을 구성하여 Matlab tools을 이용하여 모의실험을 수행하였다. 단일 주파수 및 복합 주파수 신호 입력의 두 가지 경우에 대하여 기존의 Adjoint-LMS ANC와 새롭게 제안한 Robust Adjoint-LMS ANC에 대하여 성능을 분석하였다. 이는 적응필터가 정상적으로 동작할 경우와 정상적으로 동작하지 않을 경우에 대해서 성능을 비교하였다. 샘플링 주파수는 20[kHz], 데이터 샘플의 수는 1,000개로 하였으며, 500번째 샘플링의 이전에는 적응필터가 고장 없이 정상적으로 동작할 경우, 500번째 샘플링의 이후에는 적응필터가 고장이 나서 정상적으로 동작하지 않을 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 7은 두 가지 Adjoint-LMS 알고리즘의 입력신호를 각각 나타낸 것이다. 그림 7(a)는 단일 주파수의 입력 소음 신호를 나타낸 것이다. 이는 300[Hz]의 정현파에 백색잡음을 첨가하고 음향케환을 고려하여 입력신호로 사용하였다. 이때의 입력소음은 전파되는 과정에서 온도와 송풍유속이 일정하다고 가정하였다. 그림 7(b)는 300[Hz]와 400[Hz] 복합 주파수에 백색잡음을 첨가하고 음향케환을 고려하여 입력신



(a) Input signal of single frequency



(b) Input signal of multiple frequency

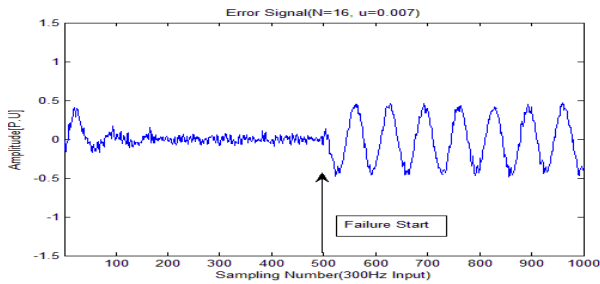
그림 7 ANC에 사용되는 두 가지 입력노이즈 신호

Fig. 7 Input noise signals of adjoint LMS

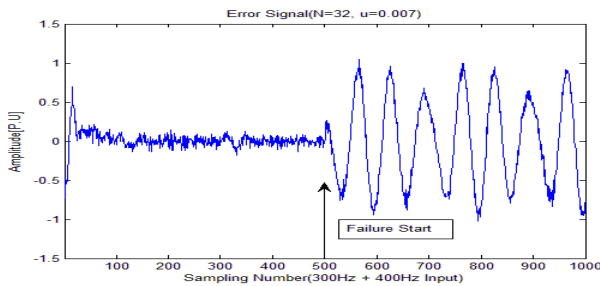
호로 사용한 것이다.

그림 8(a)는 그림 7과 같은 단일 주파수 입력신호에 대하여 기존의 Adjoint-LMS 알고리즘을 적용한 적응필터의 오차신호를 나타낸 것이다. 이때의 FIR 필터의 차수  $N$ 은 16이고, step-size  $\mu$ 는 0.007로 하였다. 그리고 그림 8(b)는 복합 주파수 입력신호에 대하여 기존의 Adjoint-LMS 알고리즘을 적용한 적응필터의 오차신호를 나타낸 것이다. 이때의 FIR 필터의 차수  $N$ 은 32이고, step-size  $\mu$ 는 0.007로 하였다.

두 결과 파형 모두 적응필터가 고장 없이 없는 500번째 샘플링 이전에는 정상적인 제어특성을 보이고 있으나, 500번째 샘플링 이후에는 적응필터가 고장이 나서 정상적으로 동작하지 않을 경우에는 제어의 기능 없이 입력소음이 그대로 전달되고 있다는 것을 볼 수 있다.



(a) Controlled error signal of single frequency

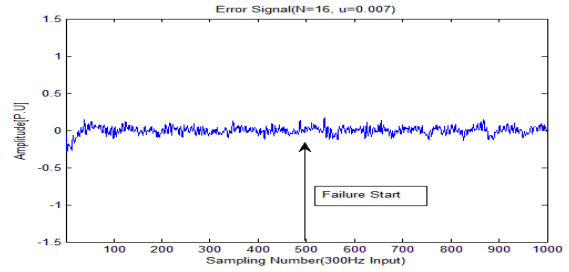


(b) Controlled error signal of multiple frequency

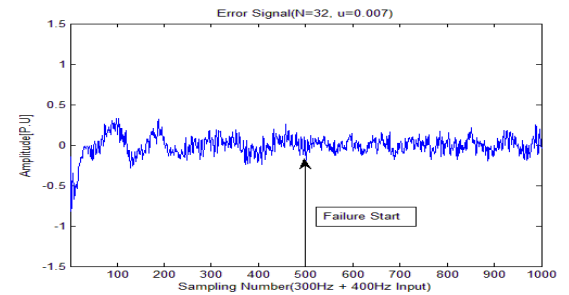
그림 8 기존의 Adjoint-LMS에 의하여 제어된 오차신호  
Fig. 8 Controlled error signal of conventional adjoint LMS

그림 9는 두 종류의 입력신호에 대하여 제안된 Robust Adjoint-LMS 알고리즘을 적용하여 제어된 오차신호를 나타낸 결과파형이다. 이의 ANC 시스템은 적응필터가 정상적으로 동작하지 않고 고장이 있는 경우에도 제 기능을 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 적응필터가 제 기능을 다하지 못하더라도  $\hat{P}(q^{-1})$ 에 의해 필터링 되기 때문이다.

그림 10 및 그림 11은 단일 및 복합주파수 입력에서 기존의 Adjoint-LMS와 제안된 Robust Adjoint-LMS 알고리즘을 사용한 제어된 오차신호의 스펙트럼 비교를 나타낸 결과이다. 300Hz 단일주파수 입력에 대하여 그림 10(a)와 같이 적응필터가 정상 동작시에는 두 가지 방법 모두 약 -70[dB]의 소음제거 효과를 나타낸다. 그러나 그림 10(b)와 같이 적응필터가 고장시에는 기존의 Adjoint-LMS인 경우에는 300Hz대역에서 입력신호가 제어되지 않고 그대로 ANC 시스템에 전달된다. 그러나 제안된 Adjoint-LMS인 경우에

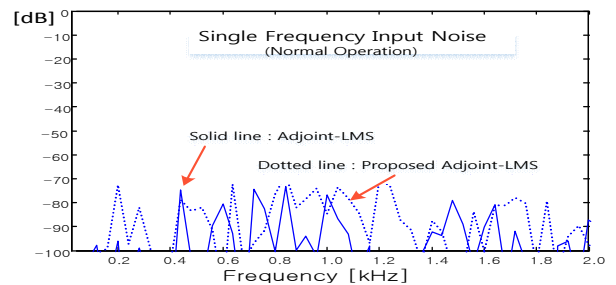


(a) Controlled error signal of single frequency

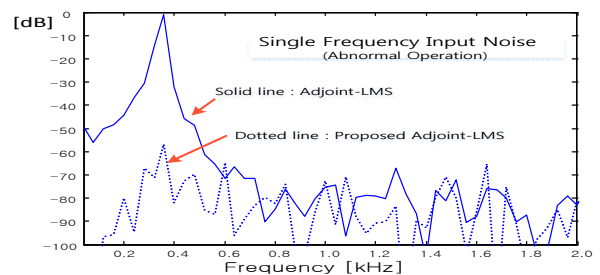


(b) Controlled error signal of multiple frequency

그림 9 제안된 robust Adjoint-LMS에 의하여 제어된 오차신호  
Fig. 9 Controlled error signal of proposed robust adjoint LMS algorithm



(a) Spectrum of normal operation of adaptive filter

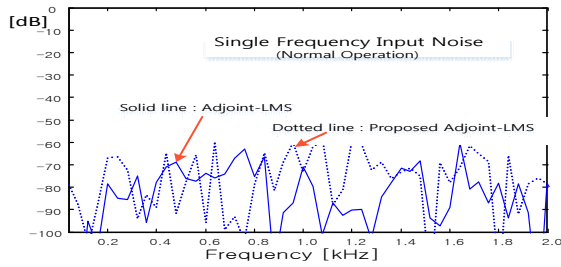


(b) Spectrum of abnormal operation of adaptive filter

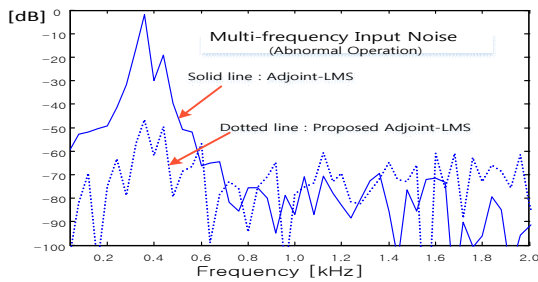
그림 10 단일주파수 입력에서의 제어신호 스펙트럼 비교  
Fig. 10 Comparison of spectrum for single frequency

는 300Hz대역에서 약 -60[dB]의 소음 제거의 효과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

복합 주파수 입력에 대하여 그림 11(a)와 같이 적응필터가 정상 동작시에는 두 가지 방법 모두 약 -60[dB]의 소음 제거 효과를 나타낸다. 그러나 그림 11(b)와 같이 적응필터



(a) Spectrum of normal operation of adaptive filter



(b) Spectrum of abnormal operation of adaptive filter

그림 11 복합주파수 입력에서의 제어신호 스펙트럼 비교  
Fig. 11 Comparison of spectrum for multiple frequency

가 고장시에는 기존의 Adjoint-LMS인 경우에는 300Hz 및 400Hz 대역에서 입력신호가 제어되지 않고 그대로 ANC시스템에 전달된다. 그러나 제안된 Adjoint-LMS인 경우에는 300Hz 및 400Hz 대역에서 약 -50[dB]의 소음 제거의 효과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

이로써 적응필터가 어떤 요인으로든 제 기능을 다하지 못하는 경우에는 기존의 Adjoint-LMS ANC시스템에서는 소음제어 기능을 상실하지만 제안한 Robust Adjoint-LMS ANC 시스템은 제 기능을 상당히 유지하여 시스템의 강인성이 많이 개선됨을 볼 수 있다.

### 5. 결 론

능동소음 제어기법은 주로 500[Hz]이하의 저주파 영역에서 소음 감소의 좋은 효과와 있는 것으로 보고 되고 있다. 이러한 ANC기법은 적응필터로서 주로 Filterd-X LMS 알고리즘을 사용한다. 그러나 이의 알고리즘은 3차원과 같은 다중 채널의 구조에서는 오차센서 및 입력필터의 증가로 인하여 알고리즘 수행을 위한 많은 계산량이 요구된다.

이러한 단점을 극복하기 위하여 Adjoint-LMS 알고리즘을 적용한 다양한 ANC기법이 소개되었다. 본 논문에서는 강인성이 고려된 Adjoint-LMS 알고리즘을 제안하였다. 이는 적응필터가 정상적으로 동작을 하지 않을 경우에도 최소한의 성능이 보장되도록 하여 높은 안정성을 가지고 알고리즘을 수행하도록 하는 것이다. 이는 덕트 내의 소음을 제어 대상으로 하여 이에 대한 오프라인 방식으로 전달함수를 추정에 의하여, 이의 고정필터를 적응필터와 병렬로 접속하는 방법을 사용한 것이다. 모의실험을 수행하여 필터의 고장시에도 제어기의 안정도가 파괴되지 않고 성능의 저하 없이 소음제어의 기능을 잘 수행하고 있음을 확인하였다.

### 감사의 글

본 논문은 한국건설기술연구원 주요사업 ‘전자식 도로교통 소음저감기술 개발’의 연구의 지원으로 수행되었습니다.

### References

- [1] S. J. Elliott and P. A. Nelson, "Active Noise Control", IEEE Signal Processing Magazine, pp.12-35, Oct, 1993.
- [2] S. D. Snyder and C. H. Hansen, "Effect of transfer function estimation errors on the filtered-X LMS Algorithm," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 42, pp. 950-953, 1994.
- [3] Sen M. Kuo and Dennis R. Morgan, "Active Noise Control System Algorithms and DSP Implementations", John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [4] B. Widrow and S.D. Stearns, 'Adaptive Signal Processing', Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.
- [5] E. A. Wan, "Adjoint LMS: an efficient alternative to the filtered-X LMS and multiple error LMS algorithms," presented at the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP, pp.1842-1845, USA, 1996.
- [6] S. J. Elliott, C. C. Boucher and P.A Nelson, "The Behavior of a Multiple Channel Active Control System", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 40, pp. 1041-1051, 1992.
- [7] S. M. Kuo and D. Vijayan, "A Secondary Path Modeling Technique for Active Noise Control System", IEEE, Vol. 42, pp. 1335-1351, 1994.
- [8] Touhami O., Ibtouen R., Guechtouli A., Iung C., "Identification of SIMO system : application to an induction machine", Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE Vol. 2, pp. 1148-1152, 2000.
- [9] Zuraida Muhammad, Zakiah Mohd Yusoff, " Modeling of Steam Distillation Pot with ARX Model", 2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications, pp. 194-198, March 2012.

## 저 자 소 개



### 문 학 룡 (文 鶴 龍)

1990년 숭실대학교 전기공학과 졸업.  
1993/2001 동 대학원 전기공학과 졸업(석사/박사). 2005~현재 한국과학연합대학원 대학 ITS공학과 부교수, 1996~현재, 한국건설기술연구원 연구위원.

E-mail : hymoon@kict.re.kr



### 손 진 근 (孫 珍 勳)

1990년 숭실대학교 전기공학과 졸업.  
1992/1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사/박사). 2002년 일본 가고시마대학 Post-doc. 2009년 Michigan State Univ. Visiting Scholar. 2016~현재 당 학회 산 학이사. 1997~현재, 가천대학교 전기공학과 교수.

E-mail : shon@gachon.ac.kr