

도로환경 정온화의 실시간 적용을 위한 Co-LMS 알고리즘의 특성 고찰

A Study on the Co-LMS Algorithm Characteristics of Real-time Applicants for Road Environment Calming

문 학 룡* · 손 진 근†
(Hak-ryong Moon · Jin-geun Shon)

Abstract - The active noise control(ANC) method for noise problems solution generally uses filtered-X LMS algorithms. However, Filtered-X LMS algorithms were mainly used but these had a limitation that had to measure a transfer function of secondary noise path. However, newly proposed correlation-LMS algorithms have slightly much calculation and are minutely behind performance, these have a advantage not in measuring transfer function onerously so that we can easily adapt these in real time. Thus Co-LMS algorithm was developed to improve the real-time implementation performance under the variable input noise such as road noise environment. In this paper, the performance of the Co-LMS is presented in comparison with that of the Filtered-X LMS algorithm. Simulation results show that active noise control using Co-LMS have slightly much calculation and are minutely behind performance, these have a advantage not in measuring transfer function onerously so that we can easily adapt these in real time.

Key Words : Active noise control(ANC), Co(correlation)- least mean square(LMS), Filtered-X LMS, Road noise environment, Secondary noise path, Transfer function.

1. 서 론

산업 및 경제의 발전과 더불어 도로를 주행하는 차량의 증가에 따라 도로 주변의 소음 문제도 많은 민원이 발생되고 있으며, 이에 따라 교통 정온화에 대한 다양한 대책이 모색되고 있다. 가령 최고속도의 제한이나 험프(hump), 시케인(chicane) 등 법적·제도적인 대책으로 교통소음의 완화를 일부 시도하고 있으나 교통 정온화에 대한 기술에 대한 연구는 아직 미미한 실정으로 연구가 매우 시급한 실정에 있다[1,2].

이러한 도로환경의 소음저감 및 개선을 위한 전통적인 소음 경감의 기술로써는 저소음의 아스팔트 포장공법이나 흡음제 등을 이용한 방음벽의 설치에 있으나, 도로교통 소음의 주요 인자인 500[Hz] 이내의 저주파 성분을 저감시키기에는 미흡한 것이 현실이다. 이러한 제약에 따라 또 다른 시도의 일환으로 최신의 전자식 저감 기술을 이용한 능동형 소음저감 기술(Active Noise Cancellation, 이하 ANC)의 도입이 다양하게 검토되고 있다.

본 논문에서는 도로환경에 대한 ANC 시스템의 도입 개념을 그림 1에 나타낸 바와 같이 설정하였다. 이의 도로형 능동소음저감 장치는 주거지나 스쿨 존에 설치를 목표로 하

며, 대용량의 ANC보다는 낮은 방음벽과 함께 융합되는 소용량의 ANC로 초기 접근하고자 하며 이는 최근 일본이나 네델란드에서도 다양하고도 활발한 연구를 진행하고 있는 실정이다.

이의 ANC 알고리즘은 크게 피드포워드와 피드백 알고리즘으로 나누어진다. 피드포워드 알고리즘을 사용한 ANC 제어기법은 Widrow[3]에 의해 제안된 Filterd-X LMS 알고리즘이 주류를 이루며 이는 소음원 신호를 레퍼런스로 사용하므로 레퍼런스와 상관관계가 높은 소음저감에 유리하다. 피드백 ANC 제어기법은 레퍼런스를 필요로 하지 않는 것이 큰 장점이지만 제어기가 무한 이득을 가져야한다는 문제점이 있다[4,5].

본 논문에서는 피드포워드 ANC 제어기법을 적용하는 맥락에서 새로운 Co-LMS 알고리즘을 본 ANC 시스템에 도입하여 소음 저감의 제어특성을 검증하고자 한다. 기존의 Filterd-X LMS 알고리즘은 2차 제어음원에서 발생하는 제어음파가 기준센서로 검출되는 즉 음향회환이 발생되어 제어기의 안정도가 파괴된다는 문제점이 늘 존재하게 되며, 이의 문제를 해결하고자 2차 경로의 전달함수를 미리 측정하여 이를 필터의 입력부에서 미리 보상 처리하는 방식이다[5,6].

따라서 기존의 Filterd-X LMS ANC기법은 알고리즘 수행과정이 매우 번거로운 방식으로 가변환경에 적용이 어려우면서 실시간 구현이 난해하다. 그러나 제안된 Co-LMS 알고리즘은 미리 설정된 상호상관(correlation) 함수를 이용하는 방식으로 2차 경로의 전달함수를 미리 측정해야 한다는 번거로움이 없어 실시간 처리가 수월한 방법이다[6]. 이

* 주저자, 정회원 : 한국건설기술연구원 연구위원 · 공박

† 교신저자, 정회원 : 가천대학교 전기공학과 교수 · 공박

E-mail : shon@gachon.ac.kr

접수일자 : 2014년 8월 5일

수정일자 : 2014년 8월 18일

최종완료 : 2014년 8월 19일

의 기법은 계산량은 다소 많을 수 있으나 최신의 고성능 DSP를 적용한다면 도로환경의 능동소음 저감 시스템에 대하여 실시간으로 적용이 충분히 가능하다고 판단된다.

이의 가능성 타진을 위하여 Matlab을 이용한 시뮬레이션을 수행하였으며, 이의 결과는 기존의 Filterd-X LMS 알고리즘에 비하여 성능이 다소 저하되었다고도 할 수 있겠으나 Off-line 방식에 의존하는 전달함수의 측정이 필요 없어서 도로소음 저감에 대한 실시간의 적용 가능성을 한층 기대할 수 있다고 사료된다.

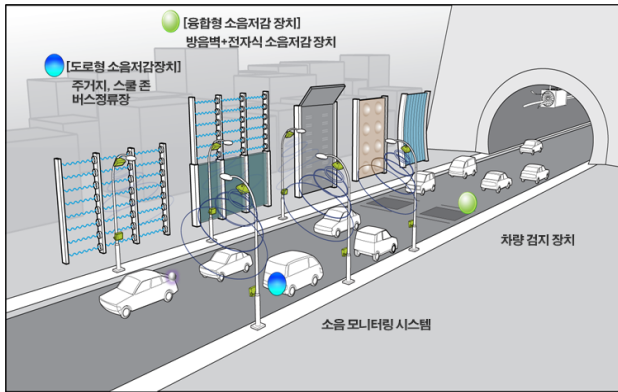


그림 1 도로환경에 대한 ANC 시스템의 도입 개념도
Fig. 1 Concept of ANC system for road environment calming

2. 새로운 ANC 제어알고리즘의 도입

2.1 Filterd-X LMS 알고리즘의 도입

2.1.1 LMS 적응필터의 도입

일상의 다양한 소음원은 소음주파수와 진폭이 연속적으로 변화하게 되며 공기의 흐름이나 온도 및 습도의 가변환경은 소음원의 속도와 형태를 변경시키게 된다. 이러한 가변 음향의 잡음원과 전송경로들은 시변이므로 소음제거를 위해서는 필터의 특성을 연속적으로 가변 시켜야만 한다. 따라서 이러한 소음원 저감을 위해서는 신호처리 기법의 최적필터를 도입하여야 한다. 이의 최적필터는 시스템의 정보가 불충분하거나 또는 시스템 계수의 주변여건이 시변인 경우 시스템의 계수를 추정하면서 필터링하는 LMS(least mean square) 적응필터링 기법의 도입이 필수적이다[3,5].

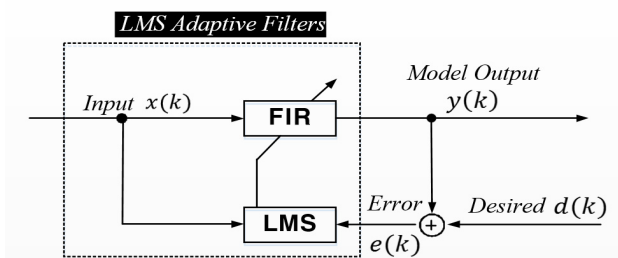


그림 2 LMS 적응필터의 기본원리
Fig. 2 Principle of LMS adaptive filter

그림 2는 LMS 알고리즘을 이용한 적응필터의 기본원리 도이며 신호d(k)을 목표신호로 하여 이를 추정한 예이다. 이때 적응필터의 역할은 필터계수를 변화시키면서 출력신호 y(k)을 목표신호 d(k)에 근접시키는 것이다. 즉 추정오차신호 e(k)를 최소화하는 것이 적응필터의 역할이다. 따라서 오차신호 e(k)는 목표신호 d(k)와 모델의 출력 y(k)의 차로 표현된다.

2.1.2 Filterd-X LMS 알고리즘의 도입 필요성과 특성

일반적으로 덕트내에서의 능동소음 제어기법에는 그림 3과 같이 피드포워드 제어기법이 사용된다. 피드포워드 제어기법은 1차 소음원에 대한 정보를 얻을 수 있을 때 사용할 수 있으며, 이 방법은 다른 음향에 영향을 주지 않고 소음만 제거할 수 있다.

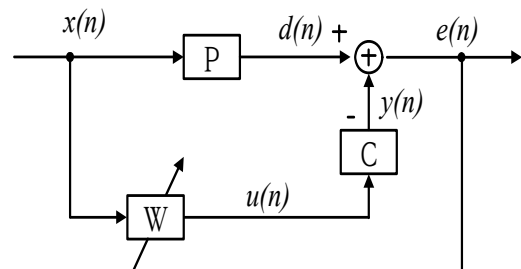


그림 3 피드포워드 제어기법을 이용한 ANC 블록선도
Fig. 3 Block diagram of ANC using feedforward method

그림 3의 블록선도에서 P는 1차 소음원에 대한 전달경로의 전달함수이며, C는 스피커 입력과 마이크로폰의 출력 사이의 전달함수이며, W는 제어의 적응필터를 나타낸다. 이의 제어필터 W는 FIR 혹은 IIR 구조가 모두 사용될 수 있으나 음향회환이 존재할 때에는 IIR 필터가 효과적일 수 있다. 그런데 이 두 가지 필터구조의 경우 모두 LMS 알고리즘과 같은 적응필터 알고리즘을 사용할 수 없게 된다.

즉, LMS 알고리즘을 사용하기 위해서는 필터 출력 u(n)과 d(n)을 비교할 수 있는 신호가 필요하나 오차신호 e(n)은 d(n)과 u(n)의 차이가 아니라 d(n)과 y(n)의 차이므로 e(n)을 알고리즘에 적용해서 필터 계수를 추정하면 적응 과정이 불안정하게 되거나 부적절한 해를 찾게 된다. 따라서 e(n)을 사용하기 위해서는 적응 알고리즘에 기본적인 변화를 주어야 한다. 이러한 변화로 결과된 것이 바로 Filterd-X LMS 알고리즘이다. 그러나 Filterd-X LMS 알고리즘을 사용하기 위해서는 보조경로 (스피커 입력과 마이크로폰의 출력 사이)내의 전달함수 C를 측정해야만 한다. 이는 경로가 변화하는 환경에서는 매번 측정해야 하는 번거로움이 있으며, 이때 마다 프로그램을 바꾸어 줘야 하므로 실시간구현이 매우 힘들게 된다.

그림 4에서는 이러한 변화 절차에 따르는 Filterd-X LMS 알고리즘을 도입한 능동소음제어의 일반적인 적용 절차를 나타낸 것이다. 여기서 P는 입력마이크로폰으로부터 제어스피커까지의 소음경로의 전달함수이고, M1과 M2는 마이크로폰과 전치증폭기, 저역통과필터의 전체전달함수이다. S는 저역통과필터, 전력증폭기, 제어스피커의 전체전달함수

를, E는 제어스피커에서 오차마이크로폰까지의 소음의 전달 경로에 대한 전달함수를 나타낸다. 그리고 F는 음향계환을 나타낸다.

또한 LMS필터 C는 보조경로와 오차경로내의 전달함수 S, E, M2를 역모델링 하는 역필터이다. 오차경로의 적응지연 역모델의 계수는 LMS필터 W로 가는 입력 경로내에 복제되며 입력마이크로폰에서 받은 입력 데이터를 필터링하여 주 적응제어기의 계수(W)를 갱신토록 하는 오차상관기로 동작하게 된다.

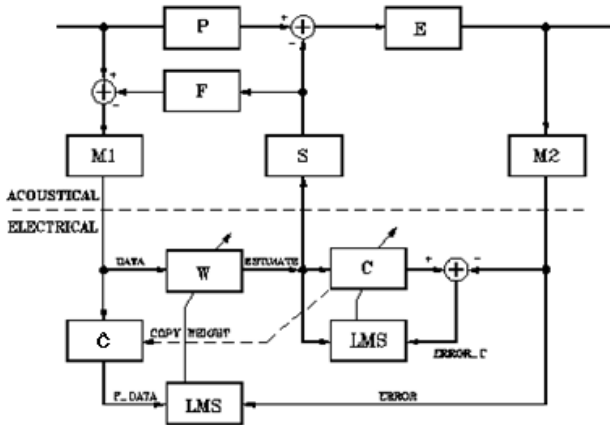


그림 4 Filtered-X LMS 알고리즘의 ANC 블록선도
Fig. 4 ANC block diagram using Filtered-X LMS algorithm

2.2 Co-LMS 알고리즘의 도입제한

앞에서 처럼 ANC제어기법을 수행하기 위한 Filterd-X LMS 알고리즘을 사용하기 위해서는 스피커 입력과 마이크로폰의 출력 사이의 2차경로 대한 전달함수를 측정해야만 하는 번거로움 때문에 실시간 구현이 어렵다고 정리하였다. 따라서 본 논문에서는 이러한 전달함수의 측정절차를 생략할수 있는 상호상관(correlation) 함수를 도입하여 응용한 Co-LMS 알고리즘을 ANC제어 시스템에 적용하기로 한다.

Co-LMS 알고리즘은 입력신호 자체의 상관 함수와 목표신호와 입력신호의 상관 함수에서 회선 추종 계수를 각각 변경하여 수렴속도를 조절하면서 목표오차 신호를 제어하는 알고리즘으로 그림 5에 나타낸 바와 같다.

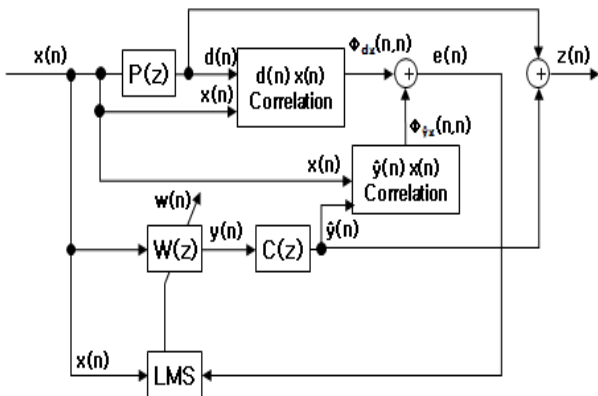


그림 5 Co-LMS 알고리즘을 이용한 ANC 블록선도
Fig. 5 ANC block diagram using Co-LMS algorithm

입력 x(n)에 대한 상관 함수는 식 (1)과 같다.

$$\phi_{xx}(n, n-k) = E[x(n) \cdot x(n-k)] \quad (1)$$

오차신호의 제곱에 기대값을 취한 값을 평가함수라 하면, 평가함수 J는 식 (2)와 같다.

$$J = E\{e(n)^2\} \quad (2)$$

Co-LMS 알고리즘을 적용한 능동소음제어 시스템의 오차신호는 목표신호와 입력신호의 상관함수, 필터의 출력신호와 입력신호의 상관함수의 차로 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$e(n) = \phi_{dx}(n, n) - \phi_{yx}(n, n) \quad (3)$$

여기서, $\phi_{dx}(n, n)$ 은 목표신호 d(n)과 입력신호 x(n)의 상관함수로서 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\phi_{dx}(n, n) = E[d(n) \cdot x(n)] \quad (4)$$

또한 필터 출력 $\hat{y}(n)$ 는 입력신호 x(n)과 임펄스 응답인 필터 계수 h_i , $i=0,1,2,\dots,N-1$ 에 의해 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{y}(n) = \sum_{i=0}^{N-1} \hat{h}_i x(n-i) \quad (5)$$

여기서, N은 필터의 차수이며, h_i 는 임펄스 응답이다.

그리고 식(2)는 다음의 식 (6)으로 다시 표현할 수 있으며, 식 (6)은 \hat{h} 의 함수이므로, 최적의 필터 계수를 구하기 위해 식 (7)과 같이 편미분을 취한다.

$$J = E\{e(n)\{\phi_{dx}(n, n) - \phi_{yx}(n, n)\}\} \quad (6)$$

$$= E\{e(n)\{\phi_{dx}(n, n) - \hat{h}^T \phi_{xx}(n, n)\}\}$$

$$\hat{\nabla} J = \frac{\partial J}{\partial \hat{h}} = -E \begin{bmatrix} e(n)\phi_{xx}(n, n-0) \\ e(n)\phi_{xx}(n, n-1) \\ \vdots \\ e(n)\phi_{xx}(n, n-N+1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= -E\{e(n)\Phi_{xx}(n, n)\}$$

그러면, 식 (8)과 같은 최대경사 알고리즘을 얻을 수 있다.

$$\hat{h}(n+1) = \hat{h}(n) + 2\mu E\{e(n)\Phi_{xx}(n, n)\} \quad (8)$$

여기서, $\hat{h}(n) = [\hat{h}_0(n), \hat{h}_1(n), \dots, \hat{h}_{N-1}(n)]^T$ 이고, μ 는 수렴 계수로서 $0 < \mu < 1$ 의 범위에 있는 상수로 쓰인다. 또한

$$\Phi_{xx}(n, n) = [\phi_{xx}(n, n-0), \phi_{xx}(n, n-1), \dots, \phi_{xx}(n, n-N+1)]^T$$

이고, N은 필터의 차수이다.

앞에서의 LMS 알고리즘에서와 같이, 오차 신호의 기대값

추정 대신 Widrow가 제안한 stochastic gradient method를 활용하고, 수렴에 대한 충분한 조건을 확보하기 위해 식 (8)을 정규화하면 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$\hat{\mathbf{h}}(n+1) = \hat{\mathbf{h}}(n) + \frac{2\mu}{1 + \Phi_{\mathbf{xx}}^T(n,n)\Phi_{\mathbf{xx}}(n,n)}\Phi_{\mathbf{xx}}(n,n)e(n) \quad (9)$$

식 (9)를 능동소음제어 시스템에 적용하기 위해서는 식 (1), (3)에서 정의한 $\phi_{xx}(n,n-k)$, $e(n)$ 의 계산이 필요하다.

그런데, 오차신호 $e(n)$ 는 식 (3)에서 알 수 있듯이 목표신호와 입력신호와의 상관함수 $\phi_{dx}(n,n)$ 과 필터의 출력신호와 입력신호의 상관함수 $\phi_{yx}(n,n)$ 의 차이이다. 따라서 이 식은 목표신호와 필터의 출력신호의 차이 $z(n)$ 과 입력신호와의 상관함수 $\phi_{zx}(n,n)$ 로 근사화할 수 있다.

$$\begin{aligned} e(n) &= \phi_{dx}(n,n) - \phi_{yx}(n,n) \\ &= \phi_{zx}(n,n) \end{aligned} \quad (10)$$

또한 식 (11) 및 식 (12)와 같은 회귀 방정식을 도입한다.

$$\begin{aligned} \phi_{xx}(n,n-k) &= (1-\alpha)\phi_{xx}(n-1,n-1-k) \\ &\quad + \alpha x(n)x(n-k) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\phi_{zx}(n,n) = (1-\beta)\phi_{zx}(n-1,n-1) + \beta z(n)x(n) \quad (12)$$

여기서, α 와 β 는 회선 추종 계수로서, $0 < \alpha, \beta \leq 1$ 이며, 현재 값과 과거 값에 일정한 가중치를 주어 알고리즘의 수렴 속도를 조절하는 것이다.

Co-LMS 알고리즘을 적용한 ANC시스템과 Filterd-X LMS 알고리즘을 적용한 ANC 시스템과의 차이점을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 알고리즘에 입력 $x(n)$ 대신 입력신호의 상관 함수 ϕ_{xx} 를 적용한다.

둘째, 오차를 계산하기 위한 식 $e(n) = d(n) - \hat{y}(n)$ 대신에 입력 $x(n)$ 과의 상관관계(correlation) 함수를 적용한 $e(n) = \phi_{dx} - \phi_{yx} = \phi_{zx}$ 의 관계를 적용한다는 것이다.

3. ANC 모의실험 및 결과 분석

본 논문에서는 제안된 Co-LMS 알고리즘의 성능을 입증하고자 Matlab R2013a 버전을 이용한 모의실험을 수행하였다. 소음제어의 2차 경로에 대한 전달함수의 측정에 의존하여 Filterd-X LMS 알고리즘을 수행하는 기존의 ANC기법과는 달리 본 제안된 기법은 사전에 전달함수의 측정 없이도 ANC 기능이 수행되게 되어 가변환경에도 쉽게 적용이 가능하다는 장점이 있다.

수행한 모의실험에서의 샘플링 간격은 0.05[ms]이고, 샘플링 수 10,000개의 데이터를 사용하였다. ANC 소음 제거기의 필터 차수는 64차이고, step-size μ 는 0.001로 하였다. 소음 제거기의 성능은 $z(n)$ 의 스펙트럼으로 확인하게 하였으며, $z(n)$ 은 목표신호와 필터의 출력신호와의 차로써 오차신호 $e(n)$ 과 같은 신호이다. 이의 처리과정에 대한 신호 흐름 선

도를 그림 6에 나타내었다. 초기 Co-LMS 결과 값에 대하여 오차신호가 최소화되도록 FIR 필터의 계수를 계속 조정하면서 잡음신호가 제어되도록 프로그램이 구성되었다.

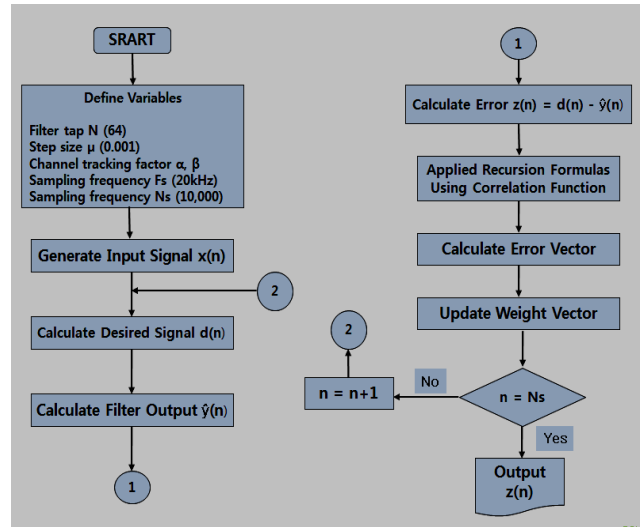
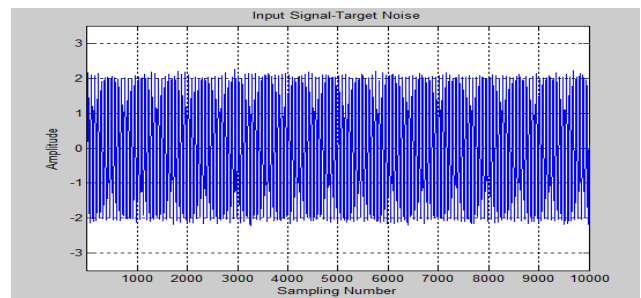
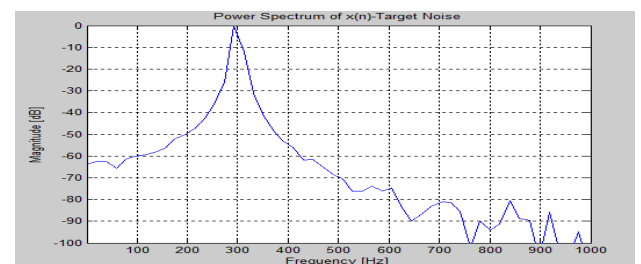


그림 6 Co-LMS 알고리즘의 신호 흐름선도

Fig. 6 Flow chart of Co-LMS algorithm



(a) Input signal (300[Hz]+white noise) - Target noise



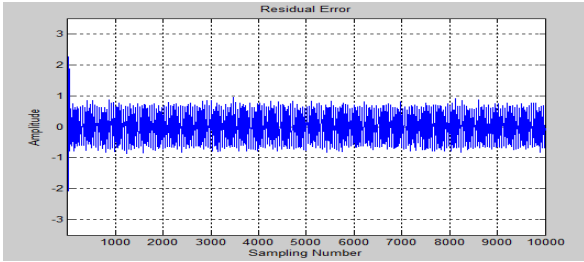
(b) Power spectrum of input signal(300[Hz]+white noise)

그림 7 단일주파수의 노이즈 입력신호

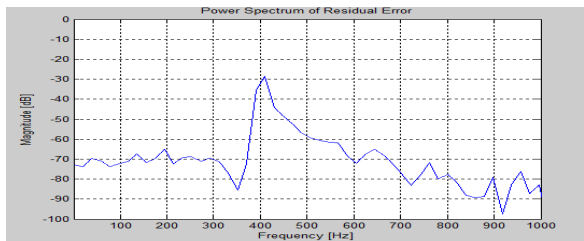
Fig. 7 Noise input signal of 300[Hz] single frequency

본 모의실험에서는 가정된 소음 신호에 대하여 단일 주파수 신호입력 및 복합 주파수 입력의 두 가지로 수행하였다. 그림 7은 인가한 소음신호를 나타낸 것으로 입력소음은 300[Hz]의 단일주파수 정현파 신호에 백색잡음을 첨가한 신호 (a) 및 이의 스펙트럼 신호 (b)를 나타낸 것이다. 그림 8은 그림 7의 입력을 바탕으로 기존의 Filterd-X LMS 알고

리즘을 수행한 ANC제어의 오차신호와 그 스펙트럼 신호를 나타낸 것이며, 그림 9는 제안된 Co-LMS 알고리즘을 수행한 ANC 제어에 대한 오차신호와 그 스펙트럼 신호를 나타낸 것이다. Co-LMS의 오차신호는 Filterd-X LMS 알고리즘과 같이 점차 안정적인 제어모드로 수렴되고 있으며, 스펙트럼 신호 역시 300[Hz]의 주파수 대역을 기반으로 소음의 큰 차이 없이 서로 약 -30[dB]의 감쇠 제어특성을 보여주고 있다.

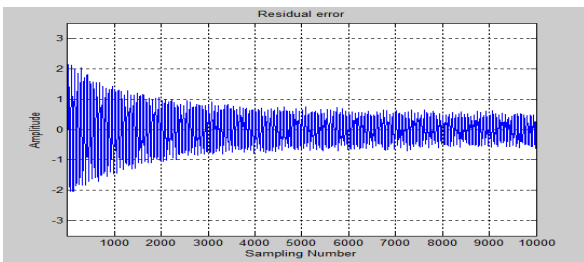


(a) Controlled error signal : Filtered-X LMS

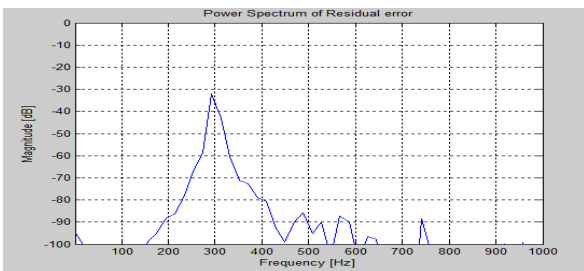


(b) Power spectrum of error signal : Filtered-X LMS

그림 8 단일주파수(300Hz) 입력 Filtered-X LMS의 제어결과
Fig. 8 Control results of Filtered-X LMS by single frequency



(a) Controlled error signal : Co-LMS

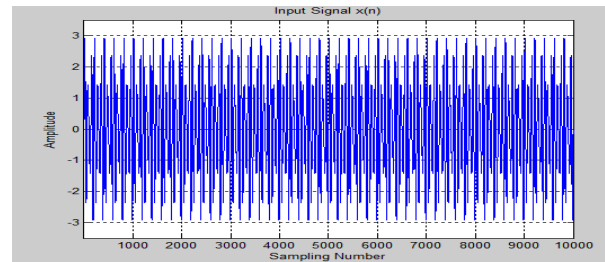


(b) Power spectrum of error signal : Co-LMS

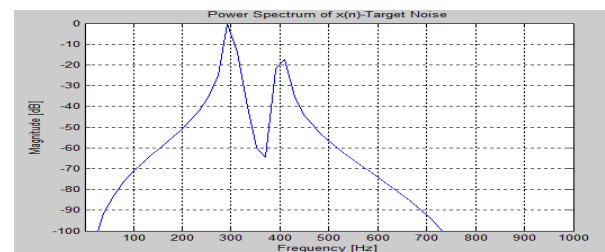
그림 9 단일주파수(300Hz) 입력 Co-LMS의 제어결과
Fig. 9 Control results of Co-LMS by single frequency

그림 10은 그림 7과 같이 인가한 소음신호를 나타낸 것으로 입력소음은 300[Hz] 및 400[Hz]의 복합주파수의 정현파 신호에 백색잡음을 첨가한 신호(a)와 이의 스펙트럼 신호(b)를 나타낸 것이다. 그림 11은 그림 10의 입력을 바탕으로 기존의 Filterd-X LMS 알고리즘을 수행한 ANC제어의 오차신호와 그 스펙트럼 신호를 나타낸 것이다.

또한 그림 12는 제안된 Co-LMS 알고리즘을 수행한 ANC 제어에 대한 오차신호와 그 스펙트럼 신호를 나타낸

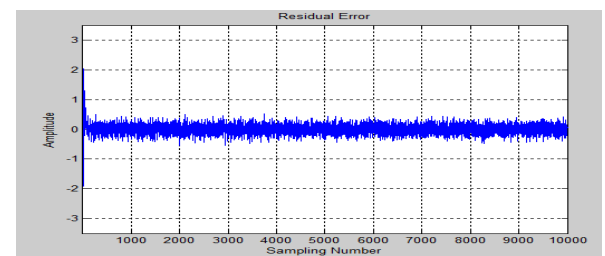


(a) Input signal (300Hz+400Hz+white noise) - Target noise

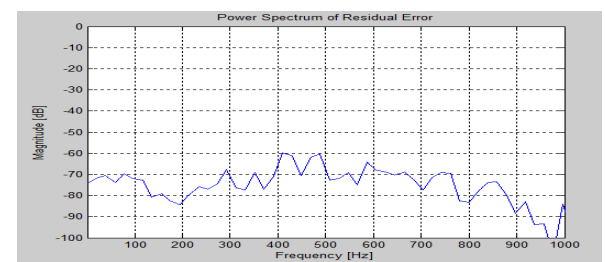


(b) Power spectrum of multi-frequency input signal

그림 10 복합 주파수의 노이즈 입력신호
Fig. 10 Noise input signal of multi-frequency (300Hz+400Hz+white noise)



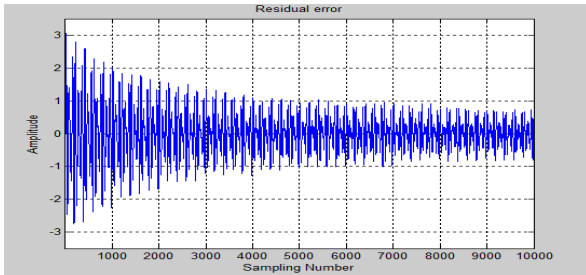
(a) Controlled error signal : Filtered-X LMS



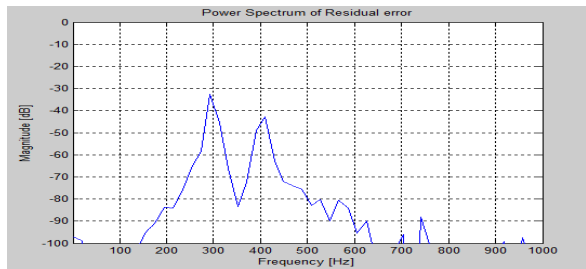
(b) Power spectrum of error signal : Filtered-X LMS

그림 11 복합주파수 입력의 Filtered-X LMS의 제어결과
Fig. 11 Control results of Filtered-X LMS by multi-frequency

것이다. Filterd-X LMS에서는 두 주파수 대역 모두 약 -60[dB]의 감쇠효과가 나타났으며, Co-LMS에서는 -30[dB]의 감쇠효과가 나타나고 있지만 점차 안정적인 제어모드로 수렴되어 가고 있다. 두 종류의 모의실험에서 소음의 이득 ([dB]차이는 기존의 Filterd-X LMS 알고리즘이 유리하였지만 제안된 Co-LMS 알고리즘의 성능은 기존의 Filterd-X LMS 알고리즘에 비하여 사전의 전달함수 측정 없이도 큰 성능의 저하 없이 우수한 제어특성의 유지가 가능함을 확인할 수 있었다.



(a) Controlled error signal : Co-LMS



(b) Power spectrum of error signal : Co-LMS

그림 12 복합주파수 입력의 Co-LMS 제어결과
Fig. 12 Control results of Co-LMS by multi-frequency

4. 결 론

본 논문에서는 차량증가로 인하여 도로변에서 발생되고 있는 도로교통 소음의 저감에 대한 대책의 일환으로 실시간 구현이 가능할 수 있는 전자식 ANC 제어기법에 대하여 모의실험을 수행하였다. 이의 가능성 타진을 위하여 종래의 Filterd-X LMS 알고리즘의 수행과정 및 주요특성을 고찰하였으며, 이의 단점에 대응할 수 있는 새로운 Co-LMS 알고리즘에 대한 이론전개 및 소음 저감의 제어특성을 분석 및 고찰하여 보았다.

이때의 입력소음은 단일 및 복합주파수의 정현파에 백색 잡음을 첨가하여 2차 경로의 전달함수 측정 없이도 상호상관 함수를 이용하여 ANC 소음저감을 수행하였다. 제어가 수행된 잔존오차와 그의 스펙트럼의 분석결과는 제안된 Co-LMS 알고리즘의 적용이 Filterd-X LMS에 비하여 그 특성이 미세한 열세로 나타났지만, 전달함수를 미리 측정하여야 하는 큰 번거로움을 제거했다는 것이 큰 특징이다. 따라서 제안된 Co-LMS 알고리즘은 향후 도로소음에 능동적으로 대처하는 ANC시스템의 적용에 대하여 보다 실시간으로 구현할 수 있다는 가능성이 충분히 있다고 사료된다.

감사의 글

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

References

- [1] Sen M. Kuo and Dennis R. Morgan, Active Noise Control System Algorithms and DSP Implementations, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [2] 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.
- [3] B. Widrow and S. D. Stearns, Adaptive Signal Processing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985.
- [4] S.J. Elliott, "A Review of Active Noise and Vibration Control in Road Vehicles", Institute of Sound and Vibration Research University of Southampton, 2008.
- [5] S. M. Kuo and D. Vijayan, "A Secondary Path Modeling Technique for Active Noise Control System", IEEE, Vol. 42, pp. 1335-1351, 1994.
- [6] M.R. Asharif, T. Hayashi, K. Yamashita, "Correlation LMS algorithm and its application to double-talk echo cancelling", ELECTRONICS LETTERS, vol. 35, No3, pp. 194-195, 4th February 1999.

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 勛)

1990년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1992/1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사/박사). 2002. 2~2003. 2 (한국과학재단) 일본 가고시마대학 전기공학부 Post-doc. 2009. 1~2010. 2 Michigan State University 방문교수. 2013년 당학회 이사/평의원. 1997~현재, 가천대학교 전기공학과 교수.

E-mail : shon@gachon.ac.kr