

# 도로소음 정온화를 위한 ANC시스템에서 성능개선을 위한 Expanded-CLMS 알고리즘의 특성

## Characteristics of Expanded-CLMS Algorithm for Performance Improvement in ANC Systems for Road Noise Calming

문 학 룡\* · 손 진 근†

(Hak-ryong Moon · Jin-geun Shon)

**Abstract** - Noise problem that occurs on the road is raising a lot of problems in the economic, social and environmental aspects. The active noise control (ANC) systems based on the filtered-X least mean square(FxLMS) algorithm have a problem with compensating the acoustic feedback of secondary route. However, newly proposed correlation-LMS(CLMS) and expanded CLMS 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. The CLMS and expanded CLMS algorithm was developed to improve the real-time implementation performance under the variable input noise such as road noise environment. In this paper, we compared and analyzed their performance. From the results of the Matlab simulation for an ANC system, it is shown that expanded CLMS algorithms are more convergence speed and keep the desirable performance even in the input of road noise situation.

**Key Words** : Acoustic feedback, ANC(active noise control), Convergence speed, Correlation LMS(least mean square ; CLMS), Expanded CLMS, FxLMS, Road noise situation

### 1. 서 론

소음은 생활환경에 밀접한 영향을 미치게 되며 근래에는 환경 문제에서도 소음을 가장 심각하게 인식하는 것으로 보고되고 있다. 특히 주거지역의 야간 소음은 국제기준을 웃도는 것으로 조사되고 있으며 주요 소음원으로 도로소음이 가장 많은 피해를 주고 있어 이의 대책으로 저비용 고효율 지향의 전자식 소음저감 기술개발이 시급한 실정이다[1].

지금까지 도로 환경 개선을 위한 기존의 소음 저감 기술은 저소음 아스팔트 포장공법 및 흡음체를 이용한 방음벽이 있으나 도로교통 소음의 저주파 성분을 저감시키기에는 미약하므로 기존의 방음벽과 상호 보완적으로 소음을 저감할 수 있도록 능동형 저감기술의 적용이 필요하게 된다.

도로교통의 소음은 사회적 비용과 민원의 발생으로 사회적 손실이 급격히 증가하고 있는 추세에 있다. 이에 우리나라는 국가적 차원의 대책으로 소음 기준 강화, 연구비투자, 신형 방음벽 개발을 통해 도로교통 소음 저감을 위한 노력을 하고 실정이며, 일본과 네델란드의 국가에서는 도로변 방음벽에서도 능동형 소음저감 기술인 ANC 기법을 적용하려

는 시도가 태동되고 있다[2].

도로변에서의 소음 및 일상의 다양한 소음원은 소음주파수와 진폭이 연속적으로 변화하게 되며 공기의 흐름이나 온도 및 습도의 가변환경은 소음원의 속도와 형태를 변경시키게 된다. 이러한 가변 음향의 소음원과 전송경로들은 시변이므로 소음제거를 위해서는 필터의 특성을 연속적으로 가변시켜야만 한다. 따라서 이러한 소음원 저감을 위해서는 신호처리 기법에 기반한 적응 필터를 도입하여야 하며 이의 적응필터는 시스템의 계수를 추정 및 갱신하면서 필터링하는 LMS알고리즘의 도입이 필요하다[3].

이러한 능동소음제어기법인 ANC의 적용 기술은 주로 FxLMS 알고리즘[4]이 주로 사용되고 있다. 그러나 이의 알고리즘 기법은 추가적인 2차 경로의 반향 특성에서 기인한 또 다른 성능저하의 문제점 때문에 이의 경로에 대한 추가적 전달함수의 측정과 보상 등의 부가적 알고리즘의 개발이 필요하며 이 때문에 실시간 구현이 어렵게 된다.

이의 FxLMS 알고리즘에 대한 문제점 개선 및 수렴성 개선 등을 위하여 통신 분야에서 주로 사용되는 상호상관(correlation) 기법에 기반한 CLMS 알고리즘[5, 6]을 ANC 시스템에 적용하는 사례가 새롭게 태동되고 있다. 이의 기법은 FxLMS 알고리즘에서의 문제점인 2차 경로의 전달함수를 측정해야 한다는 번거로운 없이 실시간으로 처리가 가능한 방법이지만 수렴성의 문제와 계수추종의 기법이 난해하다는 단점을 내재하고 있다.

본 논문에서는 CLMS 알고리즘을 기본으로 하여 이의 제어특성에 대한 성능개선의 일환으로 새롭게 제시되고 있는 Expanded-CLMS 알고리즘을 본 ANC시스템에 적용하였다.

\* 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 : 2015년 8월 8일

수정일자 : 2015년 8월 18일

최종완료 : 2015년 8월 24일

이의 알고리즘은 CLMS 알고리즘과 동일한 환경에서 소음의 입출력 상호상관 관계를 더욱 온전하게 하여 상관 추종 계수를 더욱 개선하는 방법으로 소음오차에 대한 제어의 수렴속도 개선 및 전 주파수 대역에서의 소음제거 성능이 개선된다는 점이 주 특징으로 Matlab을 이용하여 이의 성능을 검증하였다.

2. ANC에서의 CLMS 및 Expanded-CLMS 알고리즘

2.1 FxLMS 알고리즘

능동소음저감 ANC시스템에서는 음향 잡음원과 전송경로들이 시변이므로 이의 필터 특성을 연속적으로 가변 시켜야만 하는 적응필터링 기법이 필요하며, 이의 알고리즘에는 연산량이 비교적 적은 LMS(least mean square)알고리즘이 주로 사용된다[2]. 특히나 ANC시스템에서는 그림 1과 같이 입력부에서 필터링을 수행(x'(n)) FxLMS 알고리즘이 주로 사용된다. 그러나 이의 기법은 소음저감의 제어스피커에서 오차마이크로폰까지의 전송경로 (S(z)) 즉, 2차 경로의 추가적 전달함수에 의하여 전체 시스템을 불안정하게 만드는 문제점이 발생된다[3, 4].

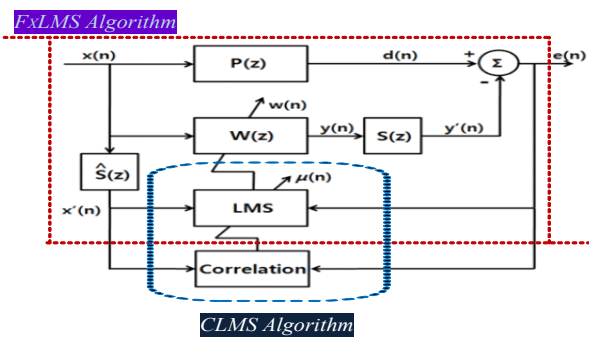


그림 1 FxLMS 및 CLMS 알고리즘의 블록선도  
Fig. 1 Block diagram of FxLMS and CLMS algorithm

이러한 문제점을 해결하기 위하여 소음입력의 참조신호 x(n)을 부가경로 보상 필터에 통과시킨 이 신호를 사용하여 적응 필터의 계수(step size)를 조정하는 방법이 FxLMS 알고리즘이며 그림 1과 같이 구성된다. 이를 ANC시스템에 적용할 경우에는 부가된 2차경로 전달함수 S(z)는 알 수 없으며, 부가경로의 필터 S-hat(z)에 의해 추정된다. 이렇게 필터링된 입력 벡터 x'(n)은 입력벡터 x(n)을 부가경로 필터 S-hat(z)에 통과 시켜서 구할 수 있으며 다음과 같이 표현된다.

$$x'(n) = \hat{s}(n) * X(n) \tag{1}$$

여기서 s-hat(n)은 부가경로 필터 S-hat(z)의 임펄스응답이다. 실제로 ANC제어를 수행할 때는 부가경로 전달함수 S(z)를 사전에 오프라인으로 모델링하여 부가경로 필터 S-hat(z)의 충격 응답 s-hat(n)을 구한 후에 수행한다. 이때의 참조신호 x(n)은 필터링 되며 오차신호 e(n)과 함께 적응 필터 W(z)의 계수를 갱신시키기 위하여 사용된다. 이러한 가중치벡터 W(z)의 업데이트(W(n+1))는 이전의 값 W(n)에다 수렴계수(step size) mu와 오차 e(n)와 입력 값의 곱으로써 식(2)와 같이 갱신하게 된다.

$$W(n+1) = W(n) + \mu X'(n)e(n) \tag{2}$$

식 (2)와 같이 FxLMS 알고리즘은 수렴계수 mu와 필터링된 입력벡터 x'(n)에 의하여 안정성과 수렴속도가 결정된다. 그러나 FxLMS에서는 고정된 수렴계수를 사용하므로 참조신호 x(n)의 파워가 시간에 따라 변하는 경우 고정된 수렴계수로서는 정상적인 제어 성능을 나타내지 못한다.

이러한 점을 보완하기 위하여 부가경로가 보상된 참조신호 x'(n)의 파워에 따라 수렴계수를 정규화하여야 하며, 이의 작업을 Correlation(상호상관)에 의한 기법을 CLMS 알고리즘[4]이라 하고 그림 1의 빗금친 부분과 같이 제어블록을 구성할 수 있으며 식 (3)의 관계로 정규화 할 수 있다[5]. 여기서 alpha는 정규화 된 수렴계수이고 P-hat\_x(n)는 x'(n)의 파워에 대한 추정치이다. P-hat\_x(n)을 추정하는 가장 간단한 방법은 x'(n)의 제곱에 대한 이동평균필터를 사용하는 것이다.

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{LP_x(n)}, (0 < \alpha < 2) \tag{3}$$

2. CLMS 알고리즘

앞 절에서 설명한 FxLMS 및 CLMS 알고리즘을 ANC에 사용하기 위해서는 부가경로(제어스피커 입력과 마이크로폰의 출력 사이)내의 전달함수 S-hat(z)를 측정해야 한다[2]. 이는 경로의 변화 환경에서는 매번 오프라인으로 측정해야 하는 번거로움이 있으며, 이때마다 프로그램을 바꾸어 줘야하는 번거로움과 함께 실시간 처리가 난해하다는 단점이 있다.

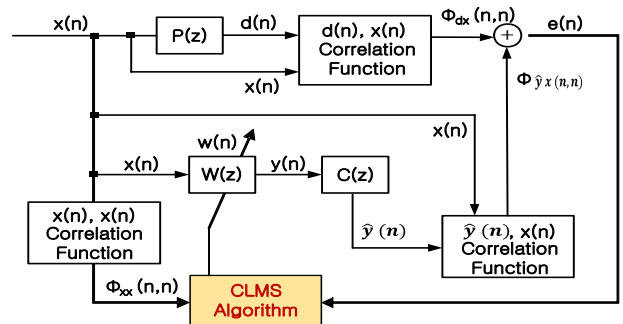


그림 2 CLMS 알고리즘을 이용한 ANC 블록선도  
Fig. 2 ANC blockdiagram using CLMS algorithm

이러한 단점을 극복하기 위하여 본 논문에서는 그림 2와 같이 CLMS 알고리즘을 적용한 ANC 시스템을 구성하여 제어특성 및 모의실험 결과를 비교 고찰하여 본다. 이러한 CLMS 알고리즘은 FxLMS 알고리즘과 달리 입력 x(n) 대신 입력신호의 상관 함수 phi\_xx를 적용한다는 것이다.

이때의 입력 x(n)에 대한 상관 함수는 식 (4)와 같으며, 오차신호는 목표신호와 입력신호의 상관함수, 필터의 출력신호와 입력신호의 상관함수의 차로 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\phi_{xx}(n, n-k) = E[x(n) \cdot x(n-k)] \tag{4}$$

$$e(n) = \phi_{dx}(n, n) - \phi_{yx}(n, n) \tag{5}$$

여기서,  $\phi_{dx}(n,n)$ 은 목표신호  $d(n)$ 과 입력신호  $x(n)$ 의 상관함수이며, 필터 출력  $\hat{y}(n)$ 는 입력신호  $x(n)$ 과 임펄스 응답  $\hat{h}(n)$ 의 관계에 있다. 이는 FxLMS 알고리즘에서와 같이 오차 신호의 기대값 추정 대신 Widrow가 제안한 stochastic gradient method[3]를 활용하고 수렴에 대한 충분한 조건을 확보하기 위해 정규화 하면 임펄스 응답을 식 (6)과 같이 얻을 수 있다.

$$\hat{\mathbf{h}}(n+1) = \hat{\mathbf{h}}(n) + \frac{2\mu}{1 + \boldsymbol{\Phi}_{xx}^T(n,n)\boldsymbol{\Phi}_{xx}(n,n)} \boldsymbol{\Phi}_{xx}(n,n)e(n) \quad (6)$$

여기서,  $\mu$ 는 수렴 계수로서  $0 < \mu < 1$ 인 상수이다. 식 (6)을 ANC 시스템에 적용하기 위해서는 식 (4), 식 (5)의 계산이 필요하지만 오차신호  $e(n)$ 는 목표신호와 입력신호와의 상관함수  $\phi_{dx}(n,n)$ 과 필터의 출력신호와 입력신호의 상관함수  $\phi_{yx}(n,n)$ 의 차이이다. 따라서 오차신호는 목표신호와 필터의 출력신호의 차이인  $z(n)$ 과 입력신호와의 상관함수  $\phi_{zx}(n,n)$ 로 식 (7)과 같이 근사화 할 수 있으며, 이는 회귀방정식의 도입에 의하여 현재값과 과거값에 일정한 가중치를 주어 알고리즘의 수렴속도를 조절하게 된다.

$$e(n) = \phi_{dx}(n,n) - \phi_{yx}(n,n) = \phi_{zx}(n,n) \quad (7)$$

### 2.3 Expanded-CLMS 알고리즘

앞 절에서의 CLMS 알고리즘은 일반적인 FxLMS 알고리즘에 비하여 능동소음 제어 성능이 우수하나 만족할 만큼 충분한 수렴 특성과 안정성을 갖지 못한다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 Expanded-CLMS 알고리즘이 제시되고 있는데 이의 기법을 새롭게 적용하여 본 ANC시스템에 응용하고자 한다.

Expanded-CLMS 알고리즘은 입력신호 자체의 상관 함수 및 목표신호와 입력신호의 상관 함수에서 계수를 추종하는 기존의 CLMS 알고리즘과 달리, 입력신호 자체의 상관 함수, 그리고 목표신호 및 출력신호를 동시에 상관함수의 관계로 확장시키기 때문에 수렴성을 더욱 좋게 하면서 보다 개선된 제어성능을 나타낼 수 있는 방법으로 알려져 있다.

우선 새로운 필터의 적용을 위하여 평가함수  $J$ 를 정의한다. Expanded-CLMS 알고리즘에서의 평가함수  $J$ 는 식 (8)과 같이 지연 자승 오차의 합으로 표현하고 오차신호 벡터  $\mathbf{e}(n)$ 은 식 (9)로 표현한다.

$$J = E[\mathbf{e}^T(n)\mathbf{e}(n)] \quad (8)$$

$$\mathbf{e}(n) = [e(n,0), e(n,1), e(n,2), \dots, e(n,N-1)]^T \quad (9)$$

여기서,  $e(n,k)$ 는 목표신호  $d(n)$ 과 입력신호  $x(n)$ 과의 상관함수  $\phi_{dx}(n,n-k)$ 와 필터 출력신호  $\hat{y}(n)$ 과 입력신호  $x(n)$ 과의 상관함수  $\phi_{yx}(n,n-k)$ 의 차로 식 (10)과 같다. 또한  $\phi_{dx}(n,n-k)$ 는 식 (11)으로 표현할 수 있다.

$$e(n,k) = \phi_{dx}(n,n-k) - \phi_{yx}(n,n-k) \quad (10)$$

$$\phi_{dx}(n,n-k) = E[d(n) \cdot x(n-k)] \quad (11)$$

필터 출력  $\hat{y}(n)$ 는 식 (12)로 표현되고 이 때문에 식 (8)은  $\hat{\mathbf{h}}$ 의 함수가 되고 최적의 필터 계수를 구하기 위해 편미분하면 식 (13)으로 표현된다.

$$\hat{y}(n) = \sum_{i=0}^{N-1} \hat{h}_i x(n-i) \quad (12)$$

$$\hat{\nabla} J = \frac{\partial}{\partial \hat{\mathbf{h}}} E[\mathbf{e}^T(n)\mathbf{e}(n)] = E\left[2\left[-\frac{\partial}{\partial \hat{\mathbf{h}}} \mathbf{e}(n)\right]^T \mathbf{e}(n)\right] \quad (13)$$

식 (13)의 두 번째 항은 식 (14)와 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{e}(n)}{\partial \hat{\mathbf{h}}} &= \frac{\partial}{\partial \hat{\mathbf{h}}} [\boldsymbol{\Phi}_{dx}(n,n) - \boldsymbol{\Psi}_{xx}(n,n)\hat{\mathbf{h}}] \\ &= -\boldsymbol{\Psi}_{xx}(n,n) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,  $\boldsymbol{\Phi}_{dx}(n,n)$ 와  $\boldsymbol{\Psi}_{xx}(n,n)$ 는 각각 식 (15) 및 식 (16)과 같다.

$$\boldsymbol{\Phi}_{dx}(n,n) = [\phi_{dx}(n,n-0), \phi_{dx}(n,n-1), \dots, \phi_{dx}(n,n-N+1)]^T \quad (15)$$

$$\boldsymbol{\Psi}_{xx}(n,n) = \begin{bmatrix} \phi_{xx}(n,n-0) & \phi_{xx}(n,n-1) & \dots & \phi_{xx}(n,n-N+1) \\ \phi_{xx}(n,n-1) & \phi_{xx}(n,n-0) & \dots & \phi_{xx}(n,n-N+2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{xx}(n,n-1+N) & \phi_{xx}(n,n-2+N) & \dots & \phi_{xx}(n,n-0) \end{bmatrix} \quad (16)$$

또한 식 (14)를 식 (13)으로 대치할 수 있으므로 식 (8)의 gradient 벡터는 식 (17)로 표현할 수 있다. 따라서 식 (17)로 부터 식 (18)과 같은 최대경사의 Expanded-CLMS 알고리즘을 구할 수 있다.

$$\hat{\nabla} J = -E[\boldsymbol{\Psi}_{xx}(n,n)\mathbf{e}(n)] \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{h}}(n+1) = \hat{\mathbf{h}}(n) + 2\mu E[\boldsymbol{\Psi}_{xx}(n,n)\mathbf{e}(n)] \quad (18)$$

식 (18)은 FxLMS, CLMS 알고리즘에서와 같이 오차 신호의 기대값 추정 대신 Widrow가 제안한 stochastic gradient method[3]를 활용하고 이의 수렴에 대한 충분한 조건을 확보하기 위해 정규화 하면 식 (19)로 된다.

$$\hat{\mathbf{h}}(n+1) = \hat{\mathbf{h}}(n) + \frac{2\mu}{1 + \text{tr}[\boldsymbol{\Psi}_{xx}(n,n)\boldsymbol{\Psi}_{xx}(n,n)]} \boldsymbol{\Psi}_{xx}(n,n)\mathbf{e}(n) \quad (19)$$

여기서  $0 < \mu < 1$ ,  $\text{tr}[\cdot]$ 은 trace 연산자이다. 또한 식 (19)를 능동소음제어 시스템에 적용하기 위해서는  $\mathbf{e}(n)$ 과  $\boldsymbol{\Psi}_{xx}(n,n)$ 의 계산이 필요하다. 그런데, 오차신호는 식 (11)에서 나타낸 바와 같이 목표신호와 입력신호와의 상관함수  $\phi_{dx}(n,n-k)$ 와 필터의 출력신호와 입력신호의 상관함수  $\phi_{yx}(n,n-k)$ 의 차이이다. 그러므로 식 (19)는 목표신호와 필터의 출력신호의 차이인  $z(n)$ 과 입력신호와의 상관함수  $\phi_{zx}(n,n-k)$ 로 식 (20)과 같이 근사화할 수 있다.

$$e(n,k) = \phi_{dx}(n,n-k) - \phi_{yx}(n,n-k) = \phi_{zx}(n,n-k) \quad (20)$$

따라서 식 (20)을 적용하여 그림 3과 같이 Expanded-CLMS 알고리즘에 의한 계수 추종의 능동소음제어 시스템을 구성할 수 있으며 이의 계수추종은 회귀 방정식을 도입하게 되며, 이의 추종계수의 현재 값과 과거 값에 일정한 가중치를 주어 알고리즘의 수렴 속도 조절이 가능하다.

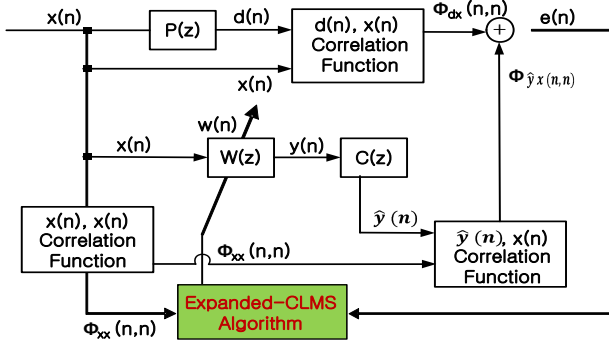


그림 3 Expanded-CLMS 알고리즘을 이용한 ANC 블럭선도  
Fig. 3 ANC blockdiagram using Expanded-CLMS algorithm

3. ANC시스템의 시뮬레이션 및 결과 고찰

3.1 승용차 도로소음 입력의 시뮬레이션

본 논문에서는 도로상에서 발생하는 자동차 소음을 채취하여 이의 신호를 ANC제어의 입력신호로 사용하여 시뮬레이션을 수행 하였다. 이는 원천 소음 저감을 위하여 차량 주행 시 타이어와 포장체에서 발생하는 원천 소음을 측정하여 이를 ANC 알고리즘의 입력으로 사용한 것이다.

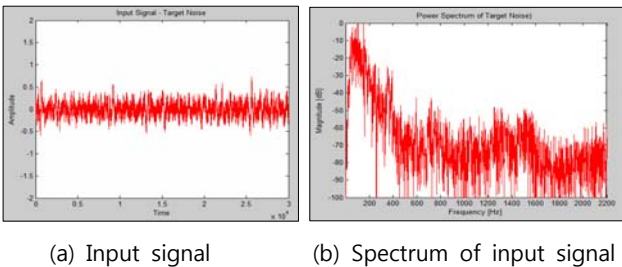
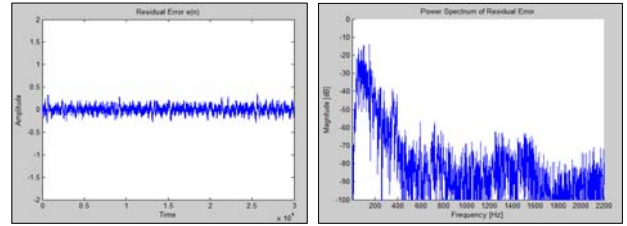


그림 4 승용차의 일반 도로소음의 입력과 스펙트럼  
Fig. 4 Input signal and spectrum results of car road noise

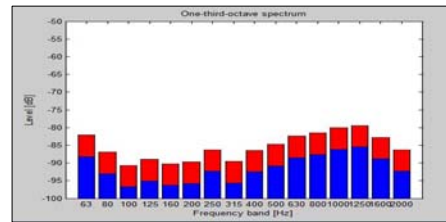
이의 측정에서는 승용차 및 덤프트럭의 2종의 차량이 80[km/h]의 시속으로 각각 주행하고 있으며, 아스팔트 포장체로서는 쇠석매스틱 아스팔트(Stone Mastic Asphalt: SMA)와 밀입도 아스팔트(Dense Grade Asphalt : DGA)의 2개 포장체를 대상으로 선정하여 신호의 주파수분석 및 제어 수행하였다.

그림 4는 승용차 시속 80[kM/h]의 일반 도로소음의 경우에 대하여 입력 노이즈신호(a)와 이의 FFT에 대한 결과파형(b)을 Matlab Tool을 이용하여 각각 나타낸 것이다. 이의 소음 입력은 도로환경에서 채집한 데이터를 8[kHz]로 샘플링한 신호 및 이의 스펙트럼 신호로써 약 100[Hz] 및 200[Hz]의 저주파 대역에서 그 크기가 지배적이었으며 광대

역에서는 약 -70[dB] 에서 -80[dB]의 평균소음이 나타나고 있음을 보여준다.

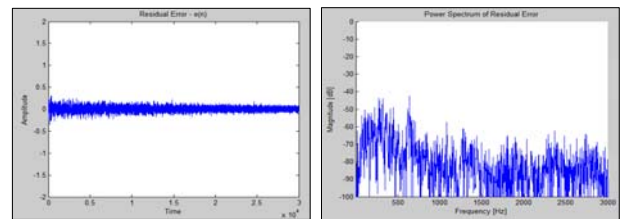


(a) Controlled error signal (b) Spectrum of error signal

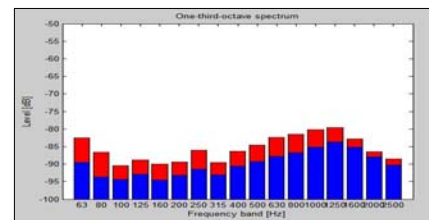


(c) 1/3 Octave Spectrum results

그림 5 FxLMS알고리즘에 의한 ANC 제어결과  
Fig. 5 ANC control results by using FxLMS algorithm



(a) Controlled error signal (b) Spectrum of error signal



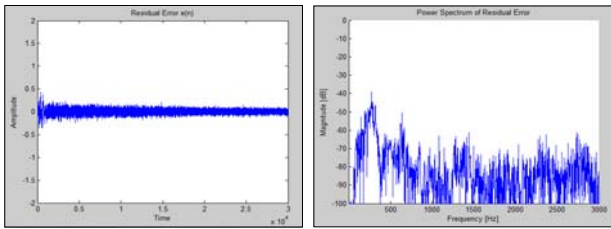
(c) 1/3 Octave Spectrum results

그림 6 CLMS알고리즘에 의한 ANC 제어결과  
Fig. 6 ANC control results by using CLMS algorithm

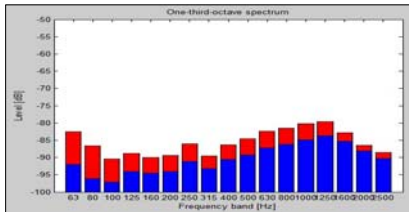
그림 5(a)와 (b)는 그림 4와 같은 도로소음의 입력에 대하여 FxLMS 알고리즘을 적용한 제어의 오차신호 및 이의 스펙트럼 신호를 나타낸 것이다. 입력과 동일하게 실제 약 100, 200[Hz]의 저주파 대역에서 그 크기가 지배적으로 나타나고 있으며 약 -15~-20[dB]의 저감 효과 그리고 광대역에서도 약 -15~-20[dB]의 저감 효과가 나타나고 있다. 또한 그림 5(c)는 가청주파수를 감안한 1/3 옥타브(약 1.26배율) 주파수 스펙트럼에 대한 결과 파형을 나타낸 것이다. 적색 막대기는 오차신호의 원음 스펙트럼을 청색막대기는 소음의 저감레벨[dB]를 나타낸 것으로 기존의 FxLMS 알고리즘에 비하여 전 대역에서 제어특성이 우수하게 나타나고 있음을

보여준다.

그림 6(a),(b) 및 그림 7(a),(b)는 그림 4(a)와 같은 도로소음의 입력에 대하여 CLMS 및 Expanded-CLMS 알고리즘을 적용한 제어의 오차신호 및 이의 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림 6(b)에서는 실제 약 500[Hz]의 저주파 대역에서 약 -40에서 -50[dB]의 저감 효과 그리고 광대역에서도 약 -10[dB]의 저감 효과가 나타나고 있다. 그림 6(c)는 주파수 분석에 대한 1/3 옥타브 스펙트럼 결과를 나타낸 것으로 전 대역에서 제어특성 잘 나타나고 있으면서 특히 저주파 영역에서 제어성이 좋음을 보여주고 있다.



(a) Controlled error signal (b) Spectrum of error signal

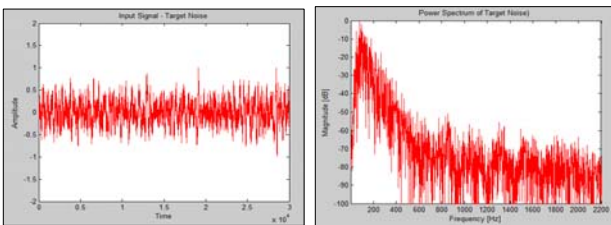


(c) 1/3 Octave Spectrum results

그림 7 Expanded-CLMS 알고리즘에 의한 ANC 제어결과  
Fig. 7 ANC results by using Expanded-CLMS algorithm

그림 7(b)에서는 실제 약 200[Hz]의 저주파 대역에서 입력과 비슷한 신호가 나오면서 전체적으로 약 -15~-20[dB]의 저감 효과가 나타나고 있다. 그림 7(c)는 1/3 옥타브 스펙트럼 결과를 나타낸 것으로 63[Hz], 80[Hz], 100[Hz], 125[Hz] 등의 저주파 영역에서 그림 6의 CLMS 알고리즘에 비하여 약 -3~-5[dB]의 저감 효과가 더 나타나고 있음을 보여주고 있다.

3.2 덤프트럭 도로소음 입력의 시뮬레이션



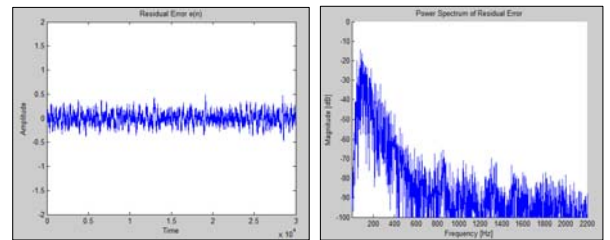
(a) Input signal (b) Spectrum of input signal

그림 8 덤프트럭의 도로소음의 입력과 스펙트럼  
Fig. 8 Input signal and spectrum of dump truck road noise

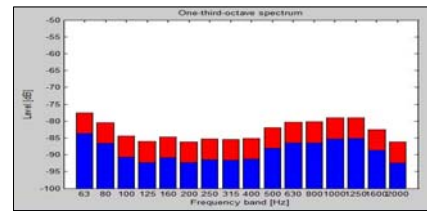
그림 8은 위의 그림 4와 같은 도로소음의 조건에 덤프트럭의 충격음이 혼합된 입력 노이즈신호 (a)와 이의 FFT에

대한 스펙트럼 결과과형(b)을 각각 나타낸 것이다. 이의 채집된 데이터는 마찬가지로 8[KHz]로 샘플링한 도로소음으로 약 100[Hz]의 저주파 대역에서 그 크기가 지배적이며 광대역에서는 약 -80 ~ -90[dB]의 평균소음이 나타나고 있다.

또한 그림 9(a),(b) 및 그림 10(a),(b), 그림 11(a),(b)는 그림 (8)과 같은 입력에 대하여 FxLMS, CLMS 및 Expanded-CLMS 알고리즘을 적용한 제어의 오차신호 및 스펙트럼을 각각 신호를 나타낸 것이다. 그림 9(b)는 입력과 동일하게 실제 약 100[Hz]의 저주파 대역에서 그 크기가 크면서 지배적으로 나타나고 있으며 약 -20[dB]의 저감 효과 그리고 광대역에서도 약 -15~-20[dB]의 저감 효과가 나타나고 있다. 그림 9(c)는 1/3옥타브 스펙트럼 결과를 나타낸 것으로 전 대역에서 제어성능이 잘 나타나고 있음을 보여준다.

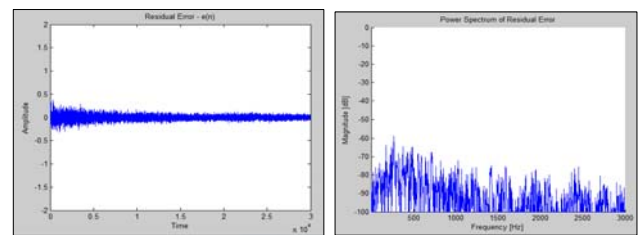


(a) Controlled error signal (b) Spectrum of error signal

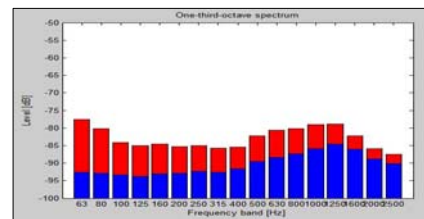


(c) 1/3 Octave Spectrum results

그림 9 FxLMS 알고리즘에 의한 ANC 제어결과  
Fig. 9 ANC control results by using FxLMS algorithm



(a) Controlled error signal (b) Spectrum of error signal

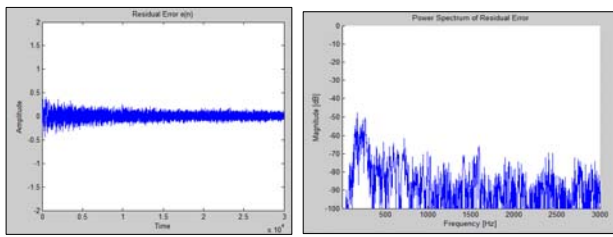


(c) 1/3 Octave Spectrum results

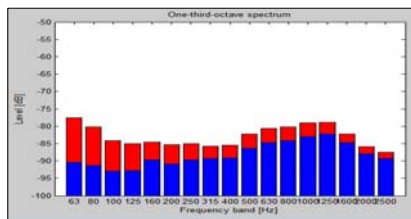
그림 10 CLMS 알고리즘에 의한 ANC 제어결과  
Fig. 10 ANC control results by using CLMS algorithm

그림 10(b)는 약 500[Hz]이하의 저주파 대역에서 제어성이 좋게 나타나면서 약 -50[dB]의 저감 효과 그리고 광대역에서는 약 -15~-20[dB]의 저감 효과가 나타나고 있다. 그림 10(c)는 1/3 옥타브 스펙트럼 결과를 나타낸 것으로 특히 저주파 대역은 물론 전 대역에서 FxLMS 알고리즘에 비하여 제어특성이 잘 나타나고 있음을 보여준다.

그림 11(b)는 약 500[Hz] 이하의 저주파 대역에서 제어성이 좋게 나타나면서 약 -50[dB]의 저감 효과 그리고 광대역에서는 약 -15~-20[dB]의 저감 효과가 나타나고 있으며 1/3 옥타브 스펙트럼 결과에서도 좋은 감쇄효과가 있음을 알 수 있다.



(a) Controlled error signal (b) Spectrum of error signal



(c) 1/3 Octave Spectrum results

그림 11 Expanded-CLMS 알고리즘에 의한 ANC 제어 결과  
Fig. 11 ANC control results by using Expanded-CLMS algorithm

#### 4. 결 론

본 논문에서는 도로소음과 같은 원치 않는 소음을 제거하는 방법으로 적응필터 기반의 ANC 기법에 대하여 기존의 FxLMS 알고리즘의 단점인 2차 경로의 반향효과를 보상하기 위하여 경로의 전달함수를 미리 추정해야 하는 문제점을 개선하기 위하여 CLMS 및 Expanded-CLMS 알고리즘을 제시하여 도로소음 입력에 대한 ANC 시스템에 새롭게 적용하여 그 결과를 고찰하였다. 위의 두 알고리즘은 기존의 FxLMS 알고리즘에 비하여 제어성능이 약간 더 우수하다고 할 수 있으며 전달함수 추정의 문제점이 해결되었다. 또한 Expanded-CLMS 알고리즘은 CLMS와 동일한 환경에서 소음의 입출력 상호상관 관계를 더욱 온전하게 하여 상관 추종계수를 더욱 개선하는 방법으로 소음오차에 대한 제어의 안정성이 더욱 개선된다는 점의 주 특징을 확인하였다.

따라서 새롭게 적용된 CLMS 및 Expanded-CLMS 알고리즘의 적용은 전달함수를 미리 추정하여야 하는 큰 번거로움 없이도 도로소음에 능동적으로 대처하는 전자식 ANC 시스템의 적용에 보다 좋은 대안이 될 수 있음을 확인하였으며 이의 실험적 구현에 대한 검증이 추후의 과제라 할 수 있다.

#### 감사의 글

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

#### References

- [1] S.J. Elliott, "A Review of Active Noise and Vibration Control in Road Vehicles," Institute of Sound and Vibration Research University of Southampton, 2008.
- [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] Y. Xiao, A. Ikuta, L. Ma, and K. Khorosani, "Stochastic analysis of the FXLMS narrowband active noise control system," IEEE Trans. Audio, Speech, Lang. Process., vol. 16, no. 5, pp. 1000 - 1014, Nov. 2008.
- [5] Hak-ryong Moon, Jin-geun Shon, "A Study on the Co-LMS Algorithm Characteristics of Real-time Applicants for Road Environment Calming," The Transactions of the KIEE, Vol. 63P, No. 3, pp. 157~162, 2014.
- [6] M. R. Asharif, A. Shimabukuro, T. Hayashi, K.Yamashita, "Expanded CLMS algorithm for double-talk echo cancelling," Proc IEEE, SMC'99, Japan, Vol.1, pp. 998-1002, Oct. 1999.
- [7] S. M. Kuo and D. Vijayan, "A Secondary Path Modeling Technique for Active Noise Control System," IEEE, Vol. 42, pp. 1335-1351, 1994.

#### 저 자 소 개



#### 문 학 룡 (文鶴龍)

1990년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1993/2001 동 대학원 전기공학과 졸업(석사/박사). 2005~현재 한국과학기술원 대학원 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). 2013~현재 당 학회 회원교육 이사 및 평의원. 1997~현재, 가천대학교 전기공학과 교수.

E-mail : shon@gachon.ac.kr