

### Filtered-X LMS 알고리즘을 사용한 적응 잡음 제거기의 구현

안두수                    김종부                    이태표                    최승욱  
\*성균관 대학교 전기공학과 교수    \*\*인덕 전문대 조교수  
\*\*\*현대 자동차 중앙 연구소        ◦ 금성산전 연구소

#### Implementation of Active Noise Canceller via Filtered-X LMS Algorithm

Doosoo Ahn    Jongbo Kim    Taepyo Lee    Seungwook Choi  
\* Sung Kyun Kwan Univ.                    \*\* Induk design of institute  
\*\*\* Hyundai R&D Institute                    ◦ LGIS R&D Lab.

#### Abstract

This paper concerns about the active noise canceller via filtered-X LMS algorithm. There are various kinds of algorithms to implement a active noise canceller. Traditional LMS algoritms are not enough to implement a sharp noise cancellation characteristics. We simulates a filtered-X LMS algorithm and implements an algorithm to the TMS320C5x DSP processor and shows that result.

#### 1. 서 론

적응 잡음 제거기는 최근 고속 마이크로 프로세서의 급격한 발전과 더불어 불필요한 소음의 저하를 위하여 특별한 부피의 증가없이 설치 할수 있고 지역의 주파수를 효과적으로 차폐할 수 있다는 잇점을 갖는 점때문에 많은 주목을 받고 있다.<sup>1,2</sup> 이러한 능동 소음 제거를 위한 알고리즘으로 적응 제어 방식의 횡단형 필터를 사용하고 최소 제곱법(Least Mean Square)에 의한 알고리즘이 Widrow에 의해 제안 되었다.<sup>3,4</sup> 능동 소음 제거의 기본 원리는 소음원과 밀접한 상관 관계를 갖는 잡음 신호를 원하는 신호(소망 신호)와 합쳐진 신호내에서 효율적으로 제거하기 위하여 상관 제거기를 사용하여 입력 신호, 즉 잡음 신호와 원래의 신호가 혼재된 신호의 상관 행렬의 역행렬을 구하여 잡음을 제거하는 구조로 되어있다. 이것은 구현상의 용이함<sup>5,6</sup> 때문에 자주 사용되지만 입력 신호의 통계적 특성에 대한 영향을 직접적으로 받기 때문에 수렴 성능이 저하 될수 있다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 여러 가지 알고리즘들이 제안 되었는데 특히 직교형 특성을 이용하여 수렴성능을 향상한 격자형 필터가 그러한 예라고 할수 있다. 격자형 필터를 사용한 수렴 성능은 후방 예측 오차 신호 간의 직교성 때문에 수렴 성능의 향상을 가져 오지만 계산량이 많아 실시간 구현에는 문제가 있다. 이러한 알고리즘에 의한 특성 외에 실제 적응 잡음 제거기를 구현시 적응 제어기의 출력과 오차신호 사이에 실제적으로 존재하는 음향 경로의 전달 특성에 의해서 수렴성능이 저하 되고 잔류 소음의 파위가 증가 할수 있다.

이러한 음향 경로상의 전달 특성에 의한 시스템 성능 저하는 기준 입력 신호에 음향 전달 특성과 근사한 필터를 삽입하여 입력 신호를 필터링후 적응 제어기에 입력하는 filtered-X LMS 알고리즘을 사용하여 성능 향상을 기대 할수 있다. 즉 횡단형 필터를 사용한 소음 제거의 경우 필터의 입력 신호에 잡음 신호가 섞이게 되어 적응 잡음 제거기가 수렴하는 최종적인 해인 Wiener해에 접근하게 되는데 이때 Wiener해는 입력 신호의 상관 행렬의 역행렬에 의해서 구해지게 되므로 입력 신호 상관 행렬에 직접적인 영향을 받게 된다. 이러한 이유 때문에 새로운 알고리즘으로써 filtered X LMS 알고리즘을 사용하는데 특히 제거하고자 하는 신호를 음향 경로상의 전달 특성때문에 primary신호의 입력으로 직접적으로 구기가 어려운 경우 사용 되어질수 있다. 이러한 음향 경로상의 복잡한 특성은 기존의 LMS 방식을 사용한 알고리즘 상에서는 본질적으로 불안정성을 유발 시킬수 있다. 이러한 것을 보상하는 하나의 방법으로써 2차 소음경로에서 발생한 신호와 상관 되기전의 잡음 제거 경로상의 전달 특성을 근사적으로 예측하여 이를 예측 필터로 사용하여 입력 신호를 필터링후 LMS 알고리즘에 가하게 하여 성능 개선을 기대 할수 있다.

#### 2. Filtered-X LMS 알고리즘

기존의 LMS 알고리즘을 사용하여 적응 제어 알고리즘을 사용할 경우 오차 신호를 얻는 음향 경로상의 복잡한 전달 특성에 의한 입력 신호의 왜곡으로 필연적으로 불안정성을 유발 할수 있다. 따라서 이러한 여러 신호를 얻는 음향 경로상의 전달 특성을 근사적으로 예측하여 입력 신호를 예측한 계수에 의해서 필터링하여 안정된 수렴 특성을 기대 할수 있다. 이렇게 적응 제어기의 입력 신호를 필터링하여 적응 제어를 하는 이유로 Filtered-X LMS 알고리즘 이라고 한다. 즉 오차 경로 상의 전달 특성의 예측을 하는것이 일반 LMS 알고리즘과 다르다고 할수 있으며 이것은 다음과 같이 나타 낼수 있다.

$$e(n) = d(n) + \sum_{j=0}^{k-1} c_j \cdot \sum_{i=0}^{N-1} w_i(n-j)x(n-i-j) \tag{식 2-1}$$

여기서 e(n)은 primary신호 경로상의 소망 신호와 적응 제어기의 출력과의 합신호이고 입력신호 x(n)은 적응 FIR 필터 계수인 w(n)을 통하여 적응 제어 출력을 얻는다. 그리고 적응

제어기의 오차 신호  $e(n)$  상의 경로 전달 함수를 FIR 필터로 모델링 하면 (식 2-1)과 같이 쓸수 있다. L과N은 각각 DUCT 모델용 위한 FIR 차수와 적응 제어기의 차수이다.

이러한 오차 신호는 최소 제곱의 의미상에서의 최적화가 되어야 하므로 오차 신호의 최소화에 의한 식을 정의 하면

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

이곳 여기서  $E\{\}$ 는 기대값을 나타낸다. 즉 입력 신호  $x(n)$ 이  $d(n)$ 과 부분적인 상관 관계가 있으면 (식 2-2)에 의해서  $J$ 가 최소화 되도록 계가 된다. 여기서 적응 잡음 제거기의 입력 신호를 필터링한 출력을  $r(n-i)$ 로 표시 하면 LMS상의 하중차 갱신식은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$w(k+1) = w(k) - \beta e(n)r(n-i) \quad (\text{식 2-3})$$

여기서  $\beta$ 는 수렴 계수이다. (식 2-2)에 의한 오차 표면에 대한 최소 오차해인 필터 계수들 구하는 식을 구하기 위해서 (식 2-1)을 다음과 같이 쓸수 있다.

$$e(n) = d(n) + r^T w \quad (\text{식 2-4})$$

여기서

$$r^T = [r_0(k) \ r_1(k) \ \dots \ r_{L-1}(k)]$$

$$w^T = [w_0 \ w_1 \ \dots \ w_{N-1}]$$

(식 2-5)

이고 (식 2-2)에 의해서

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

$$= E\{d^T d\} + 2w^T E\{r^T d\} + w^T E\{r^T r\} w$$

(식 2-6)

이라고 쓸수 있고 따라서 여기에 대한 최적 Weiner해는

$$w_{opt} = -[E\{r^T r\}]^{-1} \cdot E\{r^T d\}$$

(식 2-7)

이라고 쓸수 있다.

### 3. 적응 잡음 제거기의 구현

잡음이 섞인 신호에서 원하는 신호를 추출하는 일은 제어 이론에서는 자주 등장하는 주제이다. 적응 잡음 제거기도 이런 범주에 속한다고 할수 있으며 이것은 두개의 입력, 즉 기준 신호 혹은 레퍼런스 신호와 소망 신호를 입력으로 하고 FIR 필터를 적응 필터로 구성하는 구조로 되어있다. 이것을 그림 1에 보였다. 2차 센서라고도 불리는 레퍼런스 신호는 주변 잡음을 센싱하여 입력하는데 쓰이고 만일 1차 센서상에 입력되는 잡음과 상관 관계를 갖는 입력만이 입력 되면 적응 제어기는 마치 선형 필터 처럼 동작 하게 된다. 따라서 적응 잡음 제거기를 효과적으로 이용하기 위해서는 레퍼런스 신호에 최대한으로 잡음과 상관관계가 높은 신호만을 입력 하여 원하는 신호의 상관성분을 최소화 하여 원하는 신호를 얻을 수 있도록 하여야 한다. 이것을 위하여 센서의 위치와 액츄에이터의 위치 설정이 주의 깊게 이루어져야 한다.

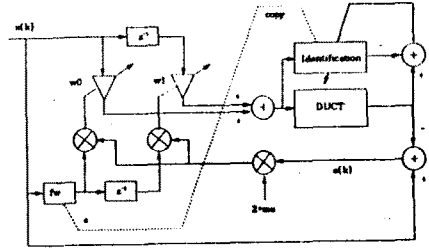


그림 1. Filtered-X LMS used한 적응 잡음 제거기의 구조

### 4. 시뮬레이션 및 실험

Filtered-X LMS 알고리즘을 사용한 적응 잡음제거기의 모의 실험을 위하여 입력 신호에는 잡음 신호와 원 신호와 혼합된 신호를 입력하고 기준 신호에는 잡음 신호를 입력 하여 그 수렴 결과 및 출력을 관찰 하였다. 그림2는 적응 잡음 제거기에 입력된 신호의 파형이다. 입력 신호는 60Hz의 정현파 신호와 120Hz의 정현파 신호를 합성하고 여기에 gaussian noise를 추가한 형태를 사용 하였다. 이때 제거하고자 하는 신호인 기준 신호는 60Hz의 정현파를 입력 하였다. 입력 파형에 대한 스펙트럼은 그림 3에 나타났다. 이것을 보면 60Hz와 120Hz성분이 있음을 알수 있다.

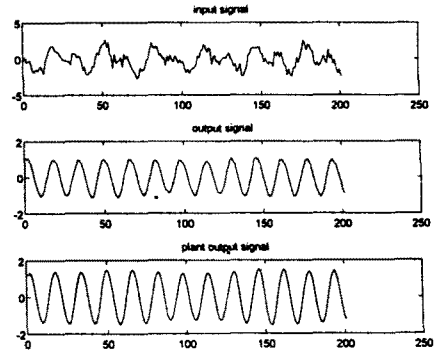


그림 2. 적응 잡음 제거기의 입력 및 출력 파형

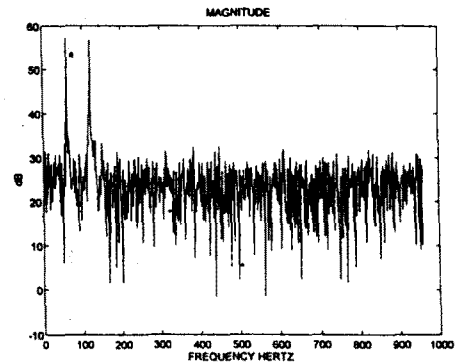


그림 3. 입력 신호의 스펙트럼

본 실험에서는 적응 제거 알고리즘의 시뮬레이션 및 실험을 수행 하였다. 이때 수렴 계수는 시행 착오적인 방법으로 찾을 수 있었으며 비교적 작은 수렴 계수는 대개가 수렴을 하는데 문제가 없었다.

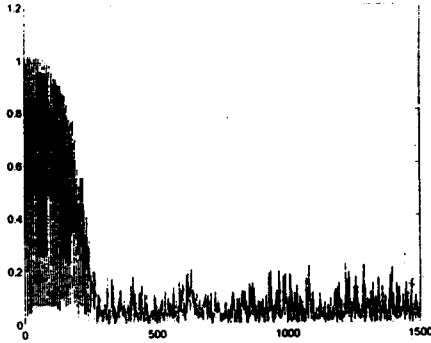


그림 4. 적응 잡음 제거기의 오차곡선(mu = 0.005)

그림4는 순시 경사치를 사용한 오차를 반복 연산에 대하여 표시한 그림이다. 일정한 반복 연산후에는 오차가 크게 줄어들어 작은 변동만을 하고 있음을 알수 있다. 사용한 수렴 계수는 0.005이다. 이는 모델링 필터와 소음 제거기 모두 같이 사용 하였다. 그리고 이때 사용한 모델 전달 특성은 다음과 같다.

$$p(z) = \frac{2.4z^{-1}(1 - 0.8z^{-1})}{(1 + 0.6z^{-1})(1 - 0.7z^{-1})}$$

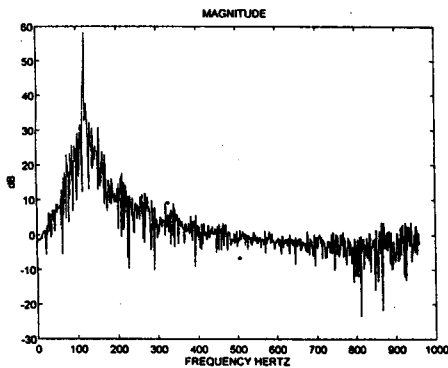
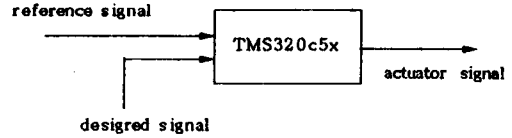


그림 5. 적응 잡음 제거후의 출력 스펙트럼

그림 5는 적응 제거후의 출력 스펙트럼이고 시간영역상의 적응 제거기의 입력 및 출력을 그림 2에 보였다. 이러한 시뮬레이션을 수행후 이를 Texas Instrument사의 TMS320c5x에 적용하여 알고리즘의 기능을 수행하였다. 실험을 위한 기본 구성을 그림 6에 보였다. primary 신호에는 60Hz의 정현파 신호를 입력 하고 나머지 입력에는 잡음과 혼재된 120Hz의 신호를 입력하여 ADF의 출력상에 나타나는 제거된 신호를 시뮬레이션의 결과와 동일하게 얻을수 있음을 확인 할수 있었다.

## 5. 결론

적응 잡음 제거기는 주변의 소음원에서 원하는 신호만을 검출하거나 주변의 소음을 억제하는 기능을 하는 제어기 이다. 이러한 제어기의 성능 평가는 알고리즘의 안정성 및 수렴



input sampling rate: 8KHz,

A/D D/A resolution 14 bit respectively.

SCF anti aliasing filter for input and LPF for output

그림 6. TMS320c5x를 사용한 알고리즘 실험 구성

속도에 의해서 결정 되어 진다고 말할수 있다. Filtered- X LMS 알고리즘은 일반 LMS 알고리즘과 유사한 방식을 갖고 있으나 주변 환경에 대한 잡음의 영향 으로부터 알고리즘의 안정성을 강화 시켜주는 효과가 있음을 알수 있었다. 또한 실제 DSP 상의 구현도 비교적 용이하다고 할수 있다. 효과적인 적응 잡음 제거는 또한 입력 센서와 출력 액츄에이터의 위치도 크게 영향을 미치므로 충분한 음향적 해석이 뒷받침 되어야 한다고 생각되며 이 부분은 앞으로 연구 되어야 할 부분이라고 생각된다. 또한 실제에 적용한 실제의 실험도 앞으로 추진해야 할 과제이다.

## 6. 참고 문헌

- 1) A New Application of Adaptive Noise Cancellation, IEEE Trans. on Acoustics, Speech, Signal Processing Vol. ASSP-34, No 1, Feb. 1986
- 2) A Multiple Error LMS Algorithm and Its Application to the active control of sound and vibration IEEE Trans. on Acoustics, Speech, Signal Processing Vol. ASSP-35, No.10 Oct. 1987
- 3) Analysis of the filtered- X LMS algorithm IEEE Trans. on Speech and audio signal processing Vol. 3, No. 6, Nov. 1995
- 4) Adaptive signal processing, Prentice-Hall Bernard Widrow, Samuel D. Stearns
- 5) TMS320c5x User's Manual, Texas Instruments.
- 6) Active noise cancellation in ducts using internal model-based control algorithms IEEE Trans. on Control systems Tech. Vol 4, NO 2, Mar. 1996