Adjoint LMS 알고리즘을 사용한 화력발전소 소음의 협대역 능동제어

황 정 현, 서 성 대, 김 준 래, 남 현 도
단국대학교 전기공학과

Narrowband Active Control of noise in thermal power plants using adjoint LMS algorithm

Jung Hyun Hwang, Sung Dae Seo, Jun Lae Kim, Hyun-Do Nam
Department of Electrical Engineering, Dankook University

Abstract - Narrowband active noise control (ANC) techniques to reduce the noise in thermal power plant are considered. To reduce the computational burden of the ANC system, an adjoint LMS algorithm instead of a filtered-x LMS algorithm is used for adaptive filters.

The square wave signal is used for the reference signal of adaptive filters to reduce the higher order harmonics as well as the fundamental frequency of noise.

A computer simulation has done to show the effectiveness of a proposed algorithm.

1. 서 론

생활의 질이 향상됨에 따라 쾌적한 삶의 추구는 현실적인 문제가 되었다. 특히, 소음은 인간생활에 직,간접적으로 영향을 미치는 요소로 인식되어 왔으며, 흡음재를 사용하는 기존의 차폐방식으로선 인간에게 큰 영향을 미치는 저주파 대역의 소음을 잘 제거할 수 없어, 능동소음제어 기법이 개발되었다. 기존의 능동소음제어는 적응필터로서 LMS알고리즘을, 기본 구조로서 filtered-x 구조를 사용한 광대역 능동소음제어가 주류를 이뤄왔다[1].

광대역 제어는 소음 중 원하는 정보가 섞여있는 경우, 제거대상 만을 효과적으로 제거하지 못하며, 필터의 차수가 지나치게 커져 비용이 많이 들고, 출력 스피커의 값이 다시 입력 마이크로 들어오는 음향궤환 효과로 인해 전체 구조가 불안정해지는 단점이 있었다. 또한 특정 주파수영역에 소음의 파워가 몰려있는 소음에 대해서도 광대역을 적용함에 따라, 효율성이 떨어지는 문제가 발생했다.

본 연구에서는 이러한 단점들의 해결을 위해 협대역 능동소음제어를 제안하고자 한다. 협대역 능동소음제어는 비 음향센서의 사용으로 인한 반향효과의 예방과 제거하고자 하는 주파수 성분의 선택적인 제거가 가능하며, 주기적인 소음을 가지는 기기에 대해 실용적으로 적용할 수 있다[1].

적응 알고리즘으로는 계산시간을 단축시키기 위해 filtered-x LMS 구조에서 변형된 adjoint LMS 구조를 사용하여 협대역 능동소음 제어를 행하였으며, 제안된 제어 기법의 효율성을 알아보기 위해 화력발전소의 보일러 운전실 소음에 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 발전소 소음의 특성 및 분석

본 연구에 사용할 발전소 발생 소음을 측정하기 위하여 현재 가동중인 서울 화력 발전소 5호기에서 측정하였다. 소음 측정 장소는 보일러 운전원 근무실로서, 보일러 바로 옆에 설치 되어 있어 소음 및 진동에 운전원이 노출되어 있는 곳이다.

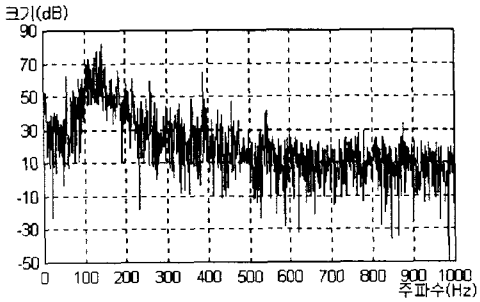

그림 1 보일러 운전원 근무실 소음의 파워스펙트럼

그림 1은 2000Hz로 샘플링 한 화력발전소 보일러 운전실 소음의 파워스펙트럼이다. 이 소음은 낮은 주파수 대역에 파워가 집중되어 있으며 첫 번째 모드인 107Hz 및 그의 정수 배 주파수인 214Hz,321Hz등의 성분과 두 번째 모드인 130 Hz 및 그의 정수 배 성분인 260Hz, 390Hz성분의 소음이 주를 이루는 것은 알 수 있었다. 본 연구에서는 이점을 이용하여, 107과 130Hz의 기본 주파수와 각 고조파들을 협대역 능동제어의 기준 신호로 사용하였다.

3. 협대역 능동제어 이론

LMS 알고리즘을 사용한 협대역 능동제어 시스템의 기본 구조는 그림과 같다.

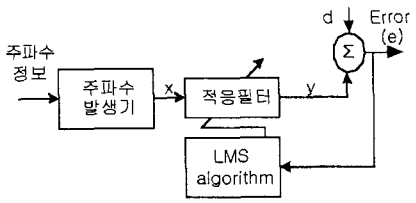

그림 2 협대역 능동제어 이론의 기본 구조

적응 필터의 계수 $w(n)$는 LMS 알고리즘을 이용하면 다음 식과 같이 갱신할 수 있다[2].

$$w(n+1) = w(n) + \mu x(n)e(n) \qquad (1)$$

식(1)은 $w(0) = 0$ 일 때, 다음과 같이 급수로 정리할 수 있다[3].

$$w(n) = \mu \sum_{i=0}^{n-1} e(i)x(i) \qquad (2)$$

식(2)를 LMS 알고리즘의 출력식인, 다음 식(3)에 대입하면,

$$y(n) = \sum_{i=0}^{L-1} w_i(n)\, x(n-l) \quad (3)$$

$$y(n) = \mu \sum_{j=0}^{L-1} e(i)\, x_i^T(i-j)\, x(n-j) \quad (4)$$

식(4)에서, $x_i^T(i-j)x(n-j)$은 x(n)의 auto-correlation이므로 식(4)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y(n) = \mu L \sum_{i=0}^{n-1} e(i) r_{i,n} = \mu L \sum_{i=0}^{n-1} e(i) r(n-i) \quad (5)$$

식(5)의 $r_{i,n}$과 $r(n-i)$은 x(n)의 autocorrelation의 표기이며, 다음과 같이 정의된다[3].

$$r_{i,n} = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} x(i-j)x(n-j) \quad (6)$$

LMS 알고리즘의 에러 계산식은 다음 식과 같다[1].

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (7)$$

식(7)에 식(5),(6)을 대입하면,

$$e(n) + \mu L \sum_{i=0}^{n-1} r(n-i)e(i) = d(n) \quad (8)$$

식(8)을 z-변환을 이용하여 새로 쓰면,

$$\mathbf{E(z)} + \mu\, \mathbf{R(z)E(z)} = \mathbf{D(z)} \quad (9)$$

식(9)을 변형하여 **D(z)**와 **E(z)**사이의 전달함수인 **H(z)**를 구하면,

$$\mathbf{H(z)} = \frac{\mathbf{E(z)}}{\mathbf{D(z)}} = \frac{1}{1+\mu L\, \mathbf{R(z)}} \quad (10)$$

다음과 같이 단일 주파수의 입력이 들어올 때,

$$x(n) = A\cos(w_0 nT + \phi) \quad (11)$$

식 (11)의 autocorrelation **R(z)**를 구해 식 (10)의 전달함수에 대입하면[4],

$$\mathbf{H(z)} = \quad (12)$$

$$\frac{z^2 - 2z\cos w_0 + 1}{z^2 - \left(2 - \frac{\mu L A^2}{2}\right) z\cos w_0 + 1 - \frac{\mu L A^2}{2}}$$

식 (12)에서 정의한 **H(z)**의 영점은 $z_0 = e^{\pm j w_0 T}$, 극점은 $z_p \approx (1 - \frac{\mu L A^2}{4}) e^{\pm j w_0 T}$이 되어, 영점과 극점의 위상은 같고, 영점의 절대값이 극점의 절대값보다 크므로, w_0 에서의 노치 필터가 된다[3,4].

협대역 능동제어는 식(11)과 같은 단일주파수가 들어올 때, 식(13)의 전달함수처럼 노치 필터가 된다는 점을 이용하여, 제거 대상의 주파수마다 동일 주파수를 가지는 노치필터를 사용하여 소음을 제거한다.

4. Adjoint LMS 알고리즘을 사용한 협대역 능동제어

그림 2의 협대역 능동 소음제어 시스템의 정현파 대신 구형파를 사용하면, 기본파외에 고조파의 성분까지 포함하며, 정현파 발생기 대신 구형파 발생기를 사용하므로 계산량이 줄어들게 된다.

구형파를 사용한 협대역 능동소음 제어 시스템의 블록선도는 그림 3과 같다.

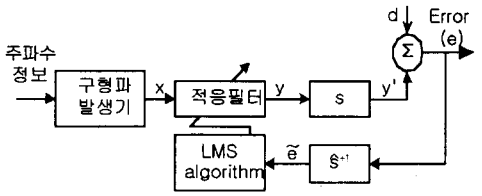

그림 3 구형파를 사용한 Ajoint 협대역 능동제어

Adjoint LMS 알고리즘은 filtered-X LMS 알고리즘에서 파생되었으며, 비슷한 성능을 가지면서도, 계산량이 줄어드는 효과가 있다. 다음은 filtered-x LMS 알고리즘의 기본 갱신 식이다[1,5].

$$w(n+1) = w(n) - \mu e(n)\, x'(n) \quad (13)$$

$$x'(n) = \hat{S}(n) * x(n) \quad (14)$$

식(13),(14)로부터 변형된 adjoint LMS 알고리즘의 기본 갱신 식은 다음과 같다.

$$w(n+1) = w(n) - \mu \tilde{e}(n-Q)\, x(n-Q) \quad (15)$$

$$\tilde{e}(n) = \hat{S}(q^{+1}, n) * e(n) \quad (16)$$

식(13)에서 Q는 2차 경로 모델차수이며, adjoint 모델은 2차 경로 모델차수 Q만큼 지연을 해야한다.

위 두 알고리즘의 계산량을 비교하면, 단일채널일 경우 동일한 계산량을 갖지만, 다중채널의 경우 표1과 같이 adjoint LMS의 계산량이 적어진다[5].

구 분	항 목	곱 셈 량
FXLMS	Filtered-X	J×K×M×Q
	필터 출력	J×K×L
	계수 갱신	J×K×L×M
	계	JK(MQ+L(M+1))
Adjoint LMS	$\tilde{e}(n)$ 계산	K×M×Q
	필터 출력	J×K×L
	계수 갱신	J×K×L
	계	K(MQ+2JL)

표 1 다중채널의 FXLMS와 Adjoint LMS의 계산량
{ J:입력차수,K:출력차수,M:에러차수,Q:2차경로차수 }

5. 컴퓨터 시뮬레이션

제안한 adjoint 협대역 능동제어의 효용성을 평가하기 위해 그림 4와 같은 발전소 보일러 운전실의 소음신호를 대상으로 시뮬레이션을 행하였다.

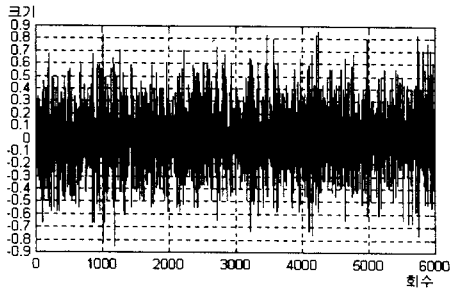

그림 4 보일러 운전원 근무실 소음의 시간추이

5.1 광대역 ANC 기법을 사용한 소음제어

먼저 광대역 ANC 시스템을 이용하여 발전소 소음을 제어한 결과 그림 5 및 그림 6과 같은 결과를 얻었다. 적응필터의 차수는 64차로 두었으며, adjoint LMS 알고리즘을 사용하였다.

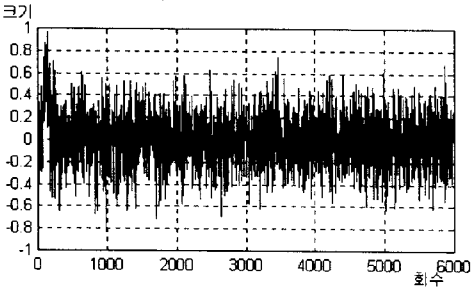

그림 5. 광대역 ANC 기법을 사용시, 소음의 시간추이

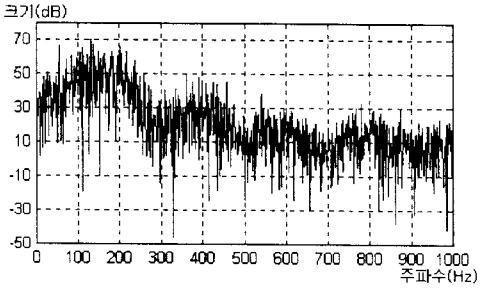

그림 6. 광대역 ANC 기법을 사용시, 소음의 파워 스펙트럼

5.2 협대역 ANC 기법을 이용한 소음제어

107Hz와 130Hz의 구형파 신호를 기준입력으로 사용하여 협대역 능동소음제어를 행한 결과 그림 7,8과 같은 결과를 얻었다. 12차의 적응필터를 사용하였으며 광대역 ANC 의 경우와 같이 adjoint 알고리즘을 사용하였다.

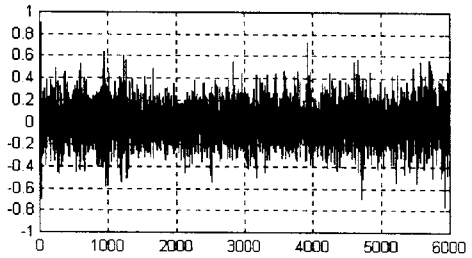

그림 7 Adjoint 협대역제어를 한 소음의 시간추이

그림 4,5,7을 비교해보면, 그림4의 입력 소음에 대해, 64차의 광대역 ANC 제어기법의 감쇄효과보다도, 12차의 협대역 ANC 제어기법의 감쇄효과가 더 좋음을 볼 수 있다.

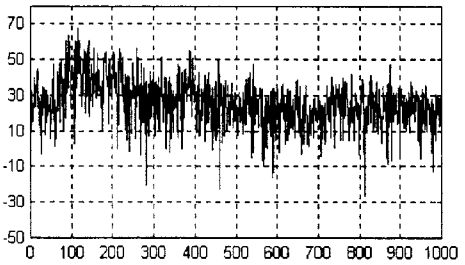

그림 8. Adjoint 협대역제어를 한 소음의 스펙트럼

또한 그림 1,6,8의 비교로부터, 소음의 주된 파워를 형성했던 107Hz와 130Hz 부근의 저주파 성분과 그 고조파 성분들이 그림 6과는 달리, 그림 8에서 상당부분 감쇄 되었음을 볼 수 있다.

64차의 광대역 ANC기법보다도, 12차의 협대역 ANC기법이 전체적인 감쇄비율과 지정 주파수의 감쇄비율에서 모두 우수한 특성을 보였다. 특히 광대역 ANC 기법이 모든 주파수대를 무작위의 비율로 제거함에 반해, 협대역 제어는 지정 주파수대 의 제거 비율이 대부분을 차지함으로서, 소음과 정보가 섞인 음파를 제어함에 있어 훨씬 좋은 결과를 기대할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 협대역 능동제어를 이용해, 협대역 소음의 에너지가 모여있는 발전소 보일러 운전실의 소음제어를 하였다.

제안된 협대역 ANC 시스템은 adjoint LMS 알고리즘을 사용하여 기존의 filtered-x LMS 알고리즘을 사용할 때 보다 계산량을 줄였으며, 기준 신호로 구형파를 사용하여 기본 주파수 소음은 물론 고주파 성분까지도 제어할 수 있었다.

컴퓨터 시뮬레이션 결과, 더 많은 차수의 필터를 사용한 광대역 ANC 시스템에 비해 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] S. M. Kuo and D. R. Morgan, *Active Noise Control Systems*, John Wiley and Sons. Inc, New York, 1996,

[2] B. Widrow and S. D. Stearns. *Adaptive Signal Processing*, Prentice-Hall, EngleWood Cliffs, New Jersey, 1985.

[3] P. M. Clarkson, *Optimal and Adaptive Signal Processing*, CRC press, Boca Raton, Florida, 1993.

[4] X, Kong and S. M. Kuo, *Analysis of asymmetric out-of-band overshoot in narrowband active noise control system*, IEEE Trans. speech and audio processing, VOL, 7, NO. 5, 1999.

[5] 김덕중, "서브밴드 기법을 이용한 다중채널 능동소음제어," 석사학위 논문, 단국대학교, 1997, pp.6-8