

# 협대역 능동소음 제어기법을 이용한 화력발전소 소음제어

(Narrowband Active Control of Noise in Thermal Power Plants)

남현도\* · 서성대\*\* · 황정현\*\*\*

(Hyun-Do Nam · Sung-Dae Seo · Jung-Hyun Hwang)

## 요 약

본 논문에서는 화력발전소 보일러 운전원 근무실 소음제어를 위하여 협대역 능동소음 제어시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 기준입력으로 구형파를 사용하여 기본파는 물론 고조파까지 한꺼번에 제어할 수 있게 하였으며, adjoint LMS 알고리즘을 사용하여 기존의 filtered-X LMS 알고리즘을 사용한 경우보다 계산량을 줄였다.

컴퓨터 시뮬레이션 결과, 기존의 광대역 능동소음 제어시스템에 비해 훨씬 작은 차수의 적응 필터를 사용하였으나, 더 우수한 특성을 보였다.

## Abstract

In this paper, a narrowband active noise control system to reduce the noise in thermal power plants is proposed. The narrowband active noise control system contains rectangular wave generator and has a multi channel feed forward adaptive algorithms which uses the adjoint LMS algorithm.

Although the effectiveness have been proven in the filtered-X LMS broadband active noise control system, this algorithm has much more computational complexity than that of narrowband active noise control system.

The proposed active control system that uses the adjoint LMS algorithm, compared to the previous broadband active noise control system, not only is more effective in controlling narrowband noise but also has a more stable structure. Adaptive filter contains the FIR structure and IIR structure for primary and secondary path models.

The simulation proves the effectiveness of the proposed algorithm.

## 1. 서 론

현재 우리나라에서 가동중인 발전소는 사용 열원에 따라 석탄화력, 복합화력, 원자력발전 등으로 나눌 수 있는데 이들 발전소의 터빈 및 발전기를 비롯

한 수많은 회전기기들로부터 발생되고 있는 소음은 발전소의 근무자들에게 심각한 위해 요인이 되고 있다. 특히 화력발전소의 경우 터빈실과 터빈 보조기기실 및 보일러 주변에서 심한 소음이 발생하는 것으로 나타났으며 그 중에서 운전원이 가장 많은 시간을 보내고 있는 보일러 운전원 근무실에서의 소음이 특히 문제가 되고 있다[1].

저주파 대역의 소음을 감소시킴에 있어 좋은 효과

\* 정회원 : 단국대학교 공학부 교수

\*\* 정회원 : 단국대학교 대학원

접수 일자 : 2001년 7월 16일

를 보이고 있는 능동 소음제어 (Active Noise Control; ANC) 기법은 적응필터로서 filtered-X LMS (FXLMS) 알고리즘을, 기본 구조로서 광대역 능동소음제어가 주류를 이룬다[2]. 소음이 넓은 주파수 영역에 분포된 광대역 소음의 경우, FXLMS 알고리즘을 사용한 능동 소음 제어 기법의 효용성이 입증되어 왔으나[2], 출력 스피커의 값이 다시 입력 마이크로 들어오는 반향효과로 인해 전체 구조가 불안정해지는 단점이 있고, 협대역 소음에 대해서도 모든 주파수의 소음을 제어함에 따라, 계산량이 많아져 효용성이 떨어지는 문제가 발생한다[2,3].

협대역 제어는 이론적으로 제어하고자 하는 주파수만 제어를 하게 되므로, 훨씬 적은 계산량으로도 비슷한 효과를 나타낼 수가 있으나 입력 신호를 정하는 방법에 따라 전체 시스템의 성능이 결정된다.

터빈기실의 소음은 넓은 영역의 주파수에 걸쳐 소음이 분포하고 있으나 보일러실의 소음은 주로 낮은 주파수 대역에 소음의 에너지가 분포하고 있어 능동소음제어를 이용하면 좋은 효과가 기대되며[4], 터빈기실과는 달리 운전원이 사무 및 업무를 24시간 수행하고 있는 장소이므로 이 곳의 소음을 능동소음제어 기법을 이용하여 줄이고자 한다.

본 논문에서는 화력발전소 보일러 운전원 근무실의 소음제어를 위하여 협대역 소음을 효과적이고 제어할 수 있도록 구형파를 이용한 다중채널 adjoint LMS (ALMS) 협대역 능동소음제어를 제안한다. 제안된 협대역 능동소음제어는 제어기의 구조만을 바꾼 기존의 광대역 제어기법들과는 달리, 비 음향센서로서 입력주파수의 정보만을 받아들여 구성된 구형파 입력으로 제어기를 구동시켰으므로, 반향효과와 예방과 적은 차수의 적응필터로도 제거하고자 하는 주파수 성분의 대한 선택적이고 효과적인 제거가 가능해 졌으며, FXLMS 알고리즘 대신 비슷한 성능을 가지면서도 속도가 빠른 ALMS 알고리즘을 채용하여 타 알고리즘에 비하여 계산량의 감소로 인한 빠른 수렴속도를 가진다.

## 2. 화력발전소 소음의 특성 분석

발전소에서 발생하는 소음 특성 분석을 위하여 현재가동중인 서울 화력 발전소 5호기의 터빈기실 및 보일러 운전원 근무실 소음을 측정하였다. 터빈기실

은 3600[rpm]의 고속으로 회전하는 고압 및 저압 터빈이 설치되어 있어 항상 높은 레벨의 소음이 발생되는 곳이며, 보일러 운전원 근무실은 보일러 바로 옆에 설치되어 있어 항상 소음 및 진동에 운전원이 노출되어 있는 곳이다. 소음레벨의 측정은 sound level meter를 사용하였고, 소음 신호는 마이크를 이용하여 wave file로 저장하여 주파수 특성을 분석하였다.

보일러 운전원 근무실의 소음은 80-90[dB] 정도였으며, 터빈기실은 85-95[dB]의 소음이 측정되었다. 보일러 운전원 근무실의 경우는 터빈기실과는 달리 운전원이 사무 및 업무를 24시간 수행하고 있는 장소이기 때문에 24시간 소음에 노출되어 있어 터빈기실 소음보다 그 저감 대책이 훨씬 절실하며 주파수 분석 결과 저주파 소음이 주를 이루는 능동소음제어가 용이한 점을 고려하여 본 논문에서는 보일러 운전원 근무실 소음 중 500[Hz]이하의 저주파 부분을 능동소음제어 기법을 이용하여 효과적으로 제거할 수 있는 기법에 대하여 연구하였다.

보일러 운전원 근무실 소음의 주파수 특성은 그림 1과 같다.

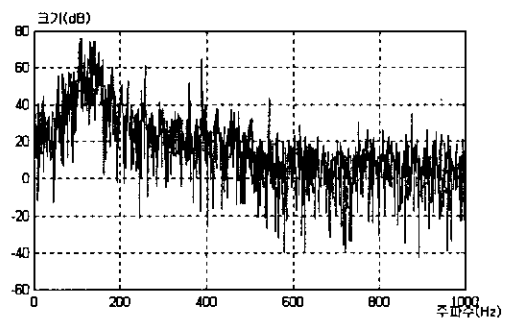


그림 1. 서울화력발전소 보일러 운전원실 소음의 파워스펙트럼  
Fig. 1. Power spectrum of noise in a boiler operator's room of Seoul Thermal Power Plant

그림 1을 분석하면, 제어 대상 소음은 300[Hz] 이하의 낮은 주파수 대역에 파워가 집중되어 있는 협대역 소음의 특징을 나타내고 있으며 110[Hz], 220[Hz], 330[Hz]의 첫 번째 모드(first mode), 130[Hz], 260[Hz], 390[Hz] 등의 두 번째 모드(second mode), 180[Hz], 360[Hz], 540[Hz] 등의 세 번째 모드(third mode)가 주를 이루고 있다. 그러므로 각 모

협대역 능동소음 제거기법을 이용한 화력발전소 소음제어

드의 기본주파수를 바탕으로, 각 고조파를 제거한다면, 적은 계산량으로도 소음이 집중된 부분을 효과적으로 제거할 수 있다.

본 논문에서는 분석된 주파수 모드 중, 대부분의 에너지를 차지하는 첫 번째와 두 번째 모드를 효과적으로 제어할 수 있는 능동 소음 제어시스템을 구성하였다.

### 3. 협대역 능동제어

#### 3.1 협대역 ANC의 해석

LMS 알고리즘에서 적응 필터 계수  $w(n)$ 은 식(1)과 같으며 식(2)와 같이 쓸 수 있다[2,5].

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

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

이 때 필터 출력은 식(3)과 같으며 식(3)에 식(2)를 대입하면 식(4)가 되며, 입력신호의 correlation은 식(5)와 같다.

$$y(n) = W(n)^T X(n) \quad (3)$$

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

$$r_{i,n} = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{n-1} x(i-j)x(n-j) \quad (5)$$

오차  $e(n) = d(n) - y(n)$ 이므로 식(4),(5)를 오차식에 대입하면,

$$e(n) + \mu L \sum_{i=0}^{n-1} r(n-i)e(i) = d(n) \quad (6)$$

식(6)을  $z$  변환하면 식(7)이 된다.

$$E(z) + \mu LR(z)E(z) = D(z) \quad (7)$$

$$\frac{E(z)}{D(z)} = \frac{1}{1 + \mu LR(z)} = H(z) \quad (8)$$

식(8)에 식(9)와 같은 단일 주파수 입력을 대입하

면 식(10)이 된다[3,6].

$$x(n) = A \cos(w_0 n T + \phi) \quad (9)$$

$$H(z) = \frac{z^2 - 2z \cos w_0 + 1}{z^2 - \left(2 - \frac{\mu LA^2}{2}\right) z \cos w_0 + 1 - \frac{\mu LA^2}{2}} \quad (10)$$

위의 전달함수에서, 영점은  $z_0 = e^{\pm jw_0 T}$ , 극점은  $z_p \approx \left(1 - \frac{\mu LA^2}{4}\right) e^{\pm jw_0 T}$ 이 되어, 영점과 극점의 위상은 같고, 영점의 절대값이 극점의 절대값보다 크므로,  $w_0$ 를 차단주파수로 하는 노치 필터가 되므로 ANC 시스템에서 기준 입력을 적절히 하면 원하는 주파수 근처의 소음을 제거할 수 있다.

#### 3.2 구형파를 이용한 협대역 능동제어

협대역 능동제어 시스템에서 원하는 주파수 대역의 소음만 제거하는 가장 효과적인 방법은 각 제거 대상 주파수마다 독립적인 적응필터를 사용하여 제어하는 방법이나 이 방법은 제거 대상인 주파수마다 독립적인 적응필터가 사용되어야 하므로 실용적이지 아니다. 본 논문에서는 제거하고자 하는 소음 주파수와 같은 기본 주파수를 갖는 구형파를 사용하여 기본파 뿐 아니라 고조파까지도 동시에 제어가 가능한 협대역 능동제어 시스템을 제안하였다.

푸리에 시리즈를 이용해 분석해 보면, 구형파는 기본 주파수의 고조파들을 모두 포함하고 있으므로, N고조파까지의 정보를 사용하는 경우, 정현파를 사용했을 때와 비교하여, 비 음향센서로부터 정보를 받아 협대역 입력을 만들기 위한 계산량은 약  $1/N$  만큼 줄어들게 된다[7]. 또한 기본 주파수들만 생성하면 되므로 기준입력부분의 하드웨어적인 부담이 크게 줄어들게 되며, 하나의 주파수 성분을 제거하려면, 최소 2차의 필터가 필요하므로, N차의 고조파를 제거하기 위한 필터의 최소 차수  $L = 2N$ 이 된다.

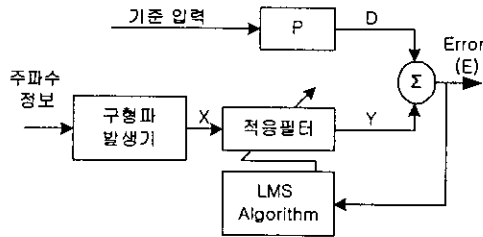


그림 2. 구형파 발생기를 갖는 협대역 능동소음 제어 시스템  
 Fig. 2. Narrow-band ANC system with a square wave generator

구형파 발생기를 갖는 협대역 ANC 시스템의 구성도는 그림 2와 같다.

#### 4. 다중채널 ANC 시스템

본 장에서는 3차원 공간에서의 능동소음 제어시스템의 구성을 위해, 다중 채널 ANC 시스템을 소개하고, 다중채널 adjoint LMS 알고리즘을 이용한 ANC 시스템을 제안하였다.

##### 4.1 다중채널 Filtered-X LMS을 이용한 ANC 시스템

그림 3은 filtered-X LMS(FXLMS) 알고리즘을 사용한 전향제어 ANC 시스템의 구성도이다. FXLMS 알고리즘에서는 적응필터 갱신 시에 입력 대신, 2차 경로 모델로 필터링된 신호를 사용하게 되므로 2차 음원과 오차센서 사이의 음향전달경로에 대한 정보가 필요하게 된다. 2차경로 전달함수를 해석적으로 구한다는 것은 매우 어려운 일이므로 일반적으로 능동소음제어 시스템에서는 이론적인 모델 대신 파라미터 추정기법을 통해 구한 실험적인 모델을 적용하게 된다[2,3].

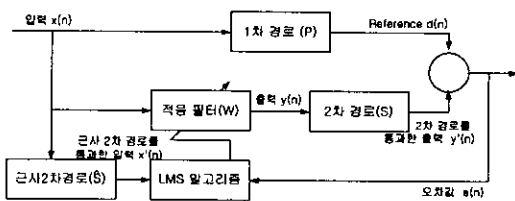


그림 3. FXLMS 구조를 갖는 ANC시스템  
 Fig. 3. ANC system with a FXLMS filter

##### 4.2 다중채널 Adjoint LMS 알고리즘을 이용한 ANC 시스템

ANC에서는 2차음원과 오차센서간의 2차경로가 존재하므로 LMS 알고리즘을 적용할 경우 계통이 불안정해질 수 있으므로 FXLMS 알고리즘을 적용해야 하는데, 다중채널인 경우 기준신호를 2차경로로 필터링해야 하므로 많은 계산량이 요구된다. 본 논문에서는 FXLMS 알고리즘을 변형한 ALMS 알고리즘을 적용하여 계산량을 줄였다. ALMS 알고리즘은 FXLMS 알고리즘과 동등한 수렴성 및 excess mse(mean square error)를 가지며, 알고리즘을 유도할 때 오차경로가 선형이라 가정할 필요가 없어 오차경로의 비선형 모델링이 가능하다.

다채널인 경우,  $J$  는 기준입력,  $K$  는 2차음원의 수,  $M$  은 오차센서의 수라고 하면, 적응필터는  $J \times K$  행렬  $W(n)$ 으로 나타내지며 2차경로는  $K \times M$  행렬  $C(q^{-1}, n)$ 가 된다.

ALMS 알고리즘은 filtered-X LMS 알고리즘에서 파생되었으며, 비슷한 성능을 가지면서도, 계산량이 줄어드는 효과가 있다. 다음은 filtered-X LMS 알고리즘의 기본 갱신 식이다[2,8].

$$w(n+1) = w(n) - \mu e(n) x'(n) \tag{11}$$

$$x'(n) = \hat{S}(n) * x(n) \tag{12}$$

식(11),(12)로부터 변형된 ALMS 알고리즘의 기본 갱신 식은 다음과 같다.

$$w(n+1) = w(n) - \mu \tilde{e}(n-Q) x(n-Q) \tag{13}$$

$$\tilde{e}(n) = \hat{S}(q^{+1}, n) * e(n) \tag{14}$$

로 나타낼 수 있는데, 여기서  $\tilde{e}(n)$ 은  $e$ 를 adjoint 2차경로 모델로 필터링한 것이며  $Q$ 는 이차 경로전달함수의 차수이다[8].  $e$ 는  $M$ 차원의 벡터이므로  $K \times M$  필터연산만이 필요하게된다. 따라서 다중채널인 경우 FXLMS 알고리즘에 비해 계산량을 감소시킬 수 있다. ALMS 알고리즘을 사용한 ANC 시스템의 구성도는 그림 4와 같다.

협대역 능동소음 제거기법을 이용한 화력발전소 소음제어

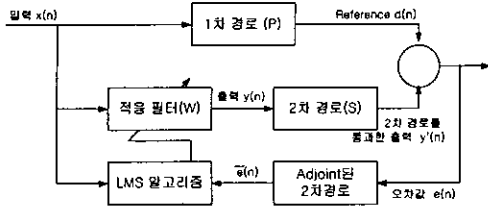


그림 4. Adjoint LMS 능동소음 제어 시스템  
Fig. 4. Adjoint LMS ANC system

4.3 다중채널에서 FXLMS 알고리즘과 ALMS 알고리즘의 비교

FXLMS 알고리즘은 소음제어 알고리즘에서 가장 많이 사용되고 있으며, 공간의 소음에 적용하기 위해서는 앞서와 같이 각각의 경로와 요소들의 차원을 일치 시켜주는 과정이 필요하다[9]. 이 연산의 계산량은 근사 2차 경로와 입력행렬간의 convolution 연산에서  $Q \times J \times M \times K$  번의 곱셈이 필요하며, 적응필터의 가중치를 계산함에 있어,  $J \times M \times L \times K$  번의 곱셈이 필요하다. 이는 순수한 연산만의 계산량이며, 각 필터구조에 맞게 각 요소들의 구조를 맞추기 위해선, 이외의 계산량이 필요하다. 그러므로, 다차원의 구조에서 소음제어를 할 때, 각 차원에 비례하여, 계산량이 지나치게 늘어나는 단점이 발생한다.

ALMS 알고리즘은 이러한 단점을 상당부분 보완하면서도, 수렴도와 정확도 면에서 결코 뒤지지 않는 성능을 발휘하는 알고리즘이다. 에러의 값을 보정하기 위한 2차 경로의 adjoint 행렬에서 필요한 계산량은  $Q \times M \times K$  이며, 이 adjoint 행렬을 통과한 여러의 차원은 출력의 차원과 같은 차원이 되므로 입력값의 행렬과  $K \times M \times L$  번의 곱셈을 필요로 하게 된다.

표 1은 이 두 알고리즘의 주된 부분의 계산량을 비교한 표이다.

표 1. Adjoint LMS와 FXLMS의 계산량 비교  
Table 1. Comparison of computational burden of adjoint LMS and FXLMS

구분	항목	곱셈량
FXLMS	Filtered-X	$J \times K \times M \times Q$
	필터 출력	$J \times K \times L$
	계수 갱신	$J \times K \times L \times M$
	계	$JK(MQ+L(M+1))$

구분	항목	곱셈량
Adjoint	$\tilde{e}(n)$ 계산	$K \times M \times Q$
	필터 출력	$J \times K \times L$
LMS	계수 갱신	$J \times K \times L$
	계	$K(MQ+2JL)$

4.4 구형파를 사용한 ALMS 협대역 ANC 시스템

특정 주파수의 파워가 큰 협대역 능동제어는 광대역 제어에 비해 뛰어난 효율성을 가지게 되며, 특정 주파수만을 제거하고자 할 때 그 유용성은 더욱 더 증가되게 된다. 본 논문에서는 협대역 능동제어를 위해, 구형파를 기준입력으로 사용하고, ALMS 알고리즘을 채용하고자 한다. 그림 5는 그 구조를 나타낸 것이다.

제안한 구조는 구형파 발생기의 채용으로, 입력부의 경량화 및 비용의 절감, 계산량의 감소, 기본파 및 고조파들의 손쉬운 제거 등의 이점이 생기며, 2차 경로를 보정하는데 있어 ALMS 알고리즘의 채용함으로써 불확실한 경로의 영향을 보정하고, FXLMS 알고리즘에 비한 계산량의 감소로 비용의 절감 효과가 얻어지며, 협대역 능동 소음제어 시스템을 채택함으로써 시스템의 안정화, 비용의 절감, 하드웨어 경량화를 비롯한 여러 가지 효과를 기대할 수 있다.

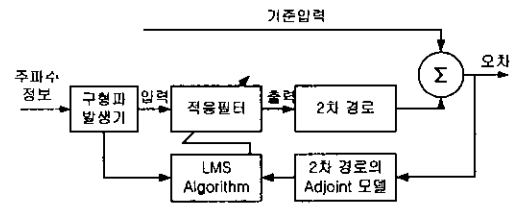


그림 5. Adjoint LMS 협대역 능동제어 시스템  
Fig. 5. Adjoint LMS narrow-band ANC system

5. 컴퓨터 시뮬레이션

제안한 ALMS 협대역 능동제어의 효율성을 평가하기 위해 발전소 보일러 운전실의 소음신호를 대상으로 시뮬레이션을 행하였다. 2개의 제어용 스피커와 4개의 감지 마이크로폰을 갖는  $2 \times 4$  시스템을 대상으로 하였으며, 1차 경로 및 2차경로의 모델링은 극점이 16차이며 영점이 12차인 pole-zero 모델을 이용

하여 추정하였다.

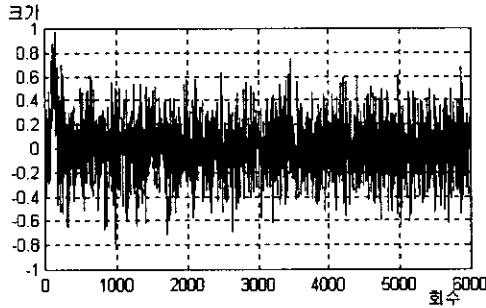


그림 6. 제어소음의 시간주어 (광대역 ANC, Mic #1)  
Fig. 6. Controlled noise (wide-band ANC, Mic #1)

먼저 광대역 ANC 시스템을 이용하여 발전소 소음을 제어한 결과 그림 6, 7과 같은 결과를 얻었다. 적응필터의 차수는 64차로 두었으며, adjoint LMS 알고리즘을 사용하였다. 다른 마이크로폰에서도 비슷한 결과를 얻었다.

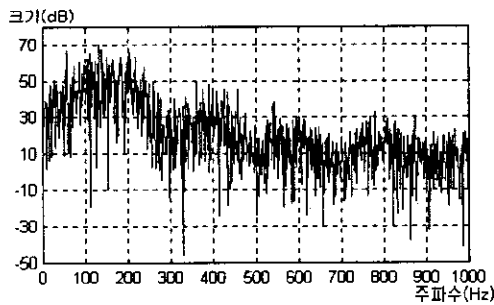


그림 7. 제어소음의 파워 스펙트럼 (광대역 ANC, Mic #1)  
Fig. 7. Power spectrum of Controlled noise (wide-band ANC, Mic #1)

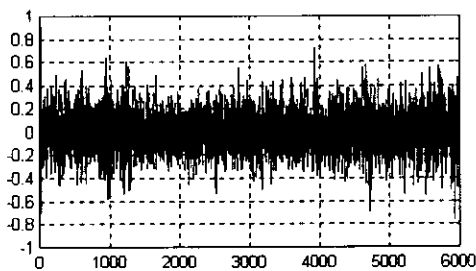


그림 8. 제어소음의 시간주어 (협대역 ANC, Mic #1)  
Fig. 8. Controlled noise (narrow-band ANC, Mic #1)

협대역 능동소음제어 시스템의 제어 효과를 시험하기 위해, 110[Hz]와 130[Hz]의 성분을 구형파 입력으로 사용하고 12차의 적응필터를 사용하였다. 마이크로폰 #1에서의 시뮬레이션 결과는 그림 8,9와 같다.

그림 7과 9를 비교해보면, 소음의 주된 파워를 형성했던 110[Hz]와 130[Hz] 부근의 저주파 성분과 그 고조파 성분들이 그림 7과는 달리, 그림 9에서 상당 부분 감소 되었음을 볼 수 있다.

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

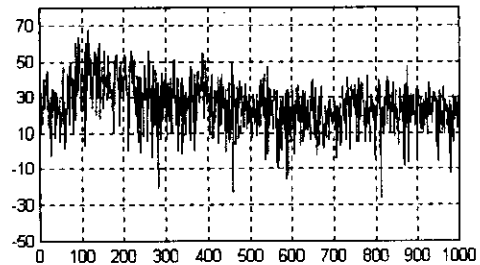


그림 9. 제어소음의 파워 스펙트럼 (협대역 ANC, Mic #1)  
Fig. 9. Power spectrum of Controlled noise (narrow-band ANC, Mic #1)

## 6. 결 론

본 논문에서는 화력발전소 보일러 운전원 근무실 소음제어를 위하여 좁은 주파수대에 소음의 구성 성분이 집중된 협대역 소음에 좋은 효과를 보이는 협대역 능동소음 제어시스템을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 비 음향 센서로부터 주파수 정보를 얻어, 구형파를 발생시켜 시스템의 입력으로 사용할 수 있게 하는 구형파발생기와 adjoint LMS 알고리즘을 이용한 다중 채널 전향제어계로서 구성된다.

제안된 알고리즘은 협대역 소음에서 유용성을 보이며, 기존의 광대역 제어 방식에 비하여, 적은 계산

## 협대역 능동소음 제어기법을 이용한 화력발전소 소음제어

량과 빠른 수렴특성을 가진다. 광대역 제어 기법을 이용하면 원하는 주파수 대역만을 제거할 수 없으나, LMS 알고리즘이 단일 주파수 입력이 들어왔을 때 노치 필터로 작용한다는 점을 이용하여 제거하고자 하는 주파수 대역만을 협대역 제어 기법을 사용하여 효과적으로 제거할 수 있다. 화력발전소 소음이 주로 100[Hz]에서 200[Hz] 사이의 저주파 소음이므로 협대역 능동소음 제어기법을 이용하여 이를 제거한 결과 광대역 소음제어기법을 사용할 때보다 훨씬 작은 차수의 적응필터를 사용하여 더 좋은 결과를 얻었으며, 비음향 센서로부터 기준입력을 얻기 때문에 강한 특성을 가진다.

실제 발전소에 적용시에는 보일러 소음을 소거할 정도의 큰 출력을 갖는 스피커와 앰프의 제작이 필요하며 소음원의 주파수나 2차 경로의 전달함수가 변할 때도 안정하게 동작하는 능동소음 제어시스템의 설계가 과제로 남는다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초 전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

## 참고 문헌

- (1) 양건영, 조수연 외, "발전소 운전원 근무 환경에 관한 기초 조사," 한국전력공사 기술연구원, 1992.

- (2) S. M. Kuo and D. R. Morgan, Active Noise Control Systems, John Wiley and Sons, Inc, New York, 1996.
- (3) P.A. Nelson and S.J. Elliott, Active Control of Sound. Academic Press Inc., San Diego, 1992.
- (4) 남현도, "능동소음제어기법을 이용한 화력발전소 소음 제어," 연구보고서, 기초전력공학공동연구소, 2000.
- (5) B. Widrow and S. D. Stearns. Adaptive Signal Processing, Prentice-Hall, EngleWood Cliffs, New Jersey, 1985.
- (6) P. M. Clarkson, Optimal and Adaptive Signal Processing, CRC Press, Florida, 1993.
- (7) E.C. Ifeachor and B.W. Jervis, Digital Signal Processing, Addison-Wesley, Dorset, 1993.
- (8) E.A. Wan, "Adjoint LMS : An efficient alternative to the Filtered-X LMS and multiple error LMS algorithms," IEEE ICASSP, pp. 1842-1845, 1996.

## ◇ 저자 소개 ◇

### 남 현 도 (南炫道)

1956년 3월 27일생. 1979년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1991년-1992년 Visiting fellow, ISVR, Univ. of Southampton, England. 1982년-현재 단국대학교 공학부 전기전자컴퓨터공학전공 교수, 산업기술연구소장.

### 서 성 대 (徐成大)

1960년 2월 25일생. 1987년 2월 단국대학교 전자공학과 졸업. 1998년 2월 단국대학교 산업대학원 메카트로닉스공학과 졸업(공학석사). 현재 단국대학교 대학원 전기공학과 박사과정, 멀티미디어시스템 연구소장.

### 황 정 현 (黃鼎鉉)

1972년 11월 28일생. 1997년 2월 단국대학교 전기공학과 졸업. 2001년 2월 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사).