

3차원 공간의 능동소음제어를 위한 안정화된 다중채널 적응 필터

서성대*, 안동준**, 남현도*
 단국대학교*, 아주자동차대학**

A Stabilized Multichannel Adaptive Filters for Active Noise Control in Three Dimensional Enclosures

Sung Dae Seo*, Dong Jun Ahn**, Hyun Do Nam*
 Dankook University*, Ajou Motor College**

Abstract - 본 논문에서는 안정성이 강화된 다중채널 적응 필터를 사용한 능동소음 제어 시스템을 제안한다. 초기에는 IIR필터의 극점을 원점방향으로 강제로 이동시켜 안정성을 확보하고, 망각인수를 도입하여 정상상태에 도달하면 최적 수렴치로 유지하게 함으로써 제어 정상상태 성능에는 영향을 미치지 않고 안정도가 강화된 적응 IIR 필터 알고리즘을 제안한다.

LMS 알고리즘의 수렴 성능을 개선하기 위한 방법으로 정규화 기법을 사용하면 수렴 속도가 향상되지만 이에 비례하여 안정성이 떨어지게 된다. 소음원 입력의 파워가 시변 할 경우 적응 알고리즘의 안정성이 약화되는 문제점이 발생하는데, 본 논문에서는 Leaky LMS 알고리즘과 비슷한 구조이지만 안정성이 강화된 IIR정규화 LMS 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘의 유용성을 비교 분석하기 위하여 실험을 수행하였다.

1. 서 론

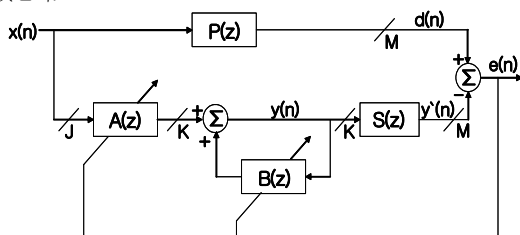
능동소음제어는 적용 대상에 따라 공조용 덕트의 경우와 같은 1차원 음장 문제와 자동차 내부의 경우와 같이 3차원 폐공간의 문제로 나눌 수 있으며, 대표적인 제어 기법에는 전향제어 기법과 케환제어기법 등이 있다[1]. 케환제어기법은 제어 목적이 소음을 포함한 모든 음향을 제거하는 것이기 때문에 소음의 정도가 큰 현장에서 쓰이는 headset 등에 적용할 수 있는 반면, 전향제어기법은 원하는 소음만을 선택적으로 제거할 수 있으므로 1차원 및 3차원 음장의 능동소음제어에 광범위하게 적용되고 있다. 능동소음제어의 목적이 달성되기 위해서는 제어대상 시스템의 동특성을 알고 있어야 하지만, 실제로는 이를 알아내기가 어렵기 때문에 적응 알고리즘을 주로 적용하고 있다.

LMS 알고리즘은 구조가 단순하고 계산량이 적은 장점이 있지만, 광대역 소음원에 적용 할 경우 수렴 성능이 좋지 않은 단점이 있으며, LMS 알고리즘의 수렴 성능을 개선하기 위한 방법으로 정규화 기법을 사용하면 수렴 속도가 향상되지만 이에 비례하여 안정성이 떨어지게 된다[2]. 소음원 입력의 파워가 크게 시변 할 경우 적응 알고리즘의 안정성이 약화되는 문제점을 개선하기 위하여 Leaky LMS 알고리즘과 비슷한 구조이지만 안정성이 강화된 IIR정규화 LMS 알고리즘을 제안하였다.

3차원 폐공간에 광대역 소음의 경우를 적용하여 제안된 능동소음제어 시스템을 제작된 실험장비를 이용하여 실험을 수행한 결과 우수한 특성을 얻었다.

2. 다중채널 정규화(MCRLMS) 알고리즘

다중채널 RLMS 알고리즘의 블록선도는 그림 1과 같다[4]. 여기서 J는 기준입력신호, K는 제어음원, M은 오차센서의 수이고, P(z)은 주경로 전달함수 행렬로 J × M, S(z)은 2차경로 전달함수 행렬로 K × M 요소를 갖는다.



<그림 1> 다중채널 순환 LMS 알고리즘의 블록선도

k번째 2차음원의 출력은 다음과 같다.

$$y_k(n) = \sum_{j=1}^J A_{kj}^T(n) X_j(n) + \sum_{i=1}^K B_{ki}^T(n) Y_i(n-1), k=1,2,..,K \quad (1)$$

여기서

$$X_j(n) \equiv [x_j(n) \dots x_j(n-L+1)]^T, j=1,..,J \quad (2)$$

$$Y_k(n) \equiv [y_k(n) \dots y_k(n-L+1)]^T, j=1,..,K \quad (3)$$

L차의 전향제어 필터와 I차의 케환제어 필터라 하면 필터계수 벡터는 다음과 같으며,

$$A_{kj}(n) \equiv [a_{kj,0}(n) a_{kj,1}(n) \dots a_{kj,L-1}(n)]^T \quad (4)$$

$$B_{ki}(n) \equiv [b_{ki,1}(n) b_{ki,2}(n) \dots b_{ki,I}(n)]^T \quad (5)$$

다중채널 RLMS 알고리즘은 다음과 같이 표현된다[2].

$$A_{kj}(n+1) = A_{kj}(n) + \mu_a \sum_{m=1}^M X'_{jkm}(n) e_m(n) \quad (6)$$

$$B_{ki}(n+1) = B_{ki}(n) + \mu_b \sum_{m=1}^M Y'_{ikm}(n) e_m(n) \quad (7)$$

일반적으로 다중채널 적응 IIR 필터는 차수에 비해 성능이 좋으나 소음 제어 초기에 극점이 z평면의 단위 원 밖으로 빠져나가서 발산하는 경우가 많으므로 초기에 필터 극점의 위치를 단위원의 중심 방향으로 조금 옮겨 주는 전처리 과정을 거침으로써 좀 더 안정된 순환 LMS 알고리즘을 적용할 수 있다[2].

케환제어 전달함수 행렬 F(z)을 다음식과 같이 정의한다.

$$F(z) = \begin{bmatrix} f_{11}(z) & f_{12}(z) & \dots & f_{1K}(z) \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ f_{K1}(z) & \dots & \dots & f_{KK}(z) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$f_{kk}(z) = 1 + kb_{kk,1}(n)z^{-1} + \dots + k^I b_{kk,I}(n)z^{-I}, 0 \leq k \leq I \quad (9)$$

케환제어 전달함수의 $f_{kk}(z) = [1 - b_{kk}(z)]$ 의 근을 z_1 라 한다면 $f_{kk}(z)$ 를 만족시키는 근은 kz_1 이 된다.

3. 안정한 IIR 정규화 LMS 알고리즘

IIR 필터를 이용한 IIR LMS 알고리즘의 케환제어 전달함수를 식 (9)를 적용하여 안정도를 1차 개선한 안정화된 IIR LMS 알고리즘에 다음과 같이 LMS 알고리즘을 개선한 정규화 LMS 알고리즘과 결합하여 안정성을 최대한 향상시켰다[3].

정규화 LMS 알고리즘은 구조가 간단하고 계산량이 필터의 차수에 비례한다는 장점 때문에 널리 적용되고 있는 적응 알고리즘이다. 특히 입력의 파워가 시변의 경우 현재의 추정 파워를 계산하여 수렴계수에 반영하여 제어의 안정성을 유지한다[4].

NLMS (Normalized LMS Algorithm)은 다음과 같이 된다.

$$W(n+1) \equiv W(n) + \mu(n) X(n) e(n) \quad (10)$$

여기서 $\mu(n)$ 은 적응 스텝 크기이며 다음과 같다.

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{L \hat{P}_x(n)} \quad (11)$$

여기서 $\hat{P}_x(n)$ 은 입력 $x(n)$ 의 파워 추정치이며, α 는 정규화 된 수렴계수이며 0과 2 사이의 수이다.

입력 신호의 파워를 추정하는 방법 중 하나로서, Rectangular Moving Window 기법을 적용하면,

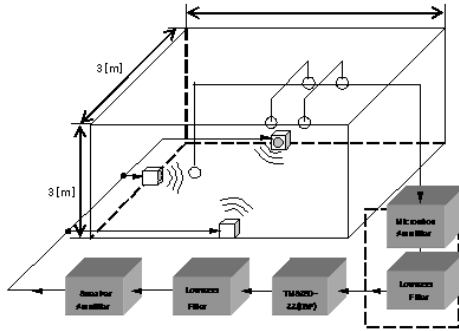
$$\hat{P}_x(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} x^2(n-m)$$

$$= \hat{P}_x(n)(n-1) + \frac{x^2(n) - x^2(n-M)}{M} \quad (12)$$

여기서 M 은 Moving Window Length이다. 식(12)는 좋은 추정 결과를 보이지만 M+1 저장 공간을 필요로 한다[5].

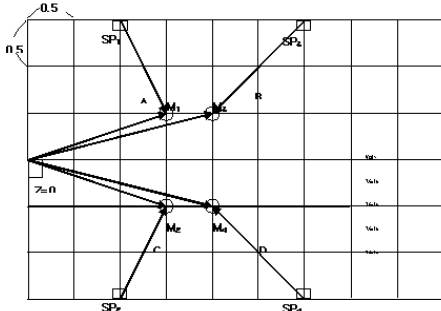
4. 3차원 폐공간에서의 소음제어 실험

실험은 그림 2와 같이 1 x 2 x 4의 구성으로 행하고 성능을 평가하였다. 4개의 오차 센서 (마이크로폰)의 위치는 인체의 귀의 위치에 해당하는 높이인 1.6m 로 설치하였다.



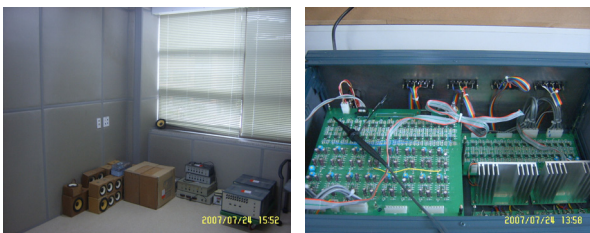
<그림 2> 능동소음제어 시스템의 전체 구성도

다른 상세치수는 폐공간을 위에서 본 그림 3의 폐공간 평면도와 같이 균등간격 (0.5[m]x0.5[m])으로 40등분하여 배치하였다. 전체 시스템의 구성은 그림 2와 같이 3차원 폐공간 외부에 DSP B/D를 중심으로 프리앰프, 로우패스필터, 파워앰프 등을 내장한 전체 하드웨어 시스템이 연결 되어있다



<그림 3> 폐공간 평면도

그림 4(a)는 폐공간의 사진이며, 그림4(b)는 실험용 하드웨어의 사진이다.

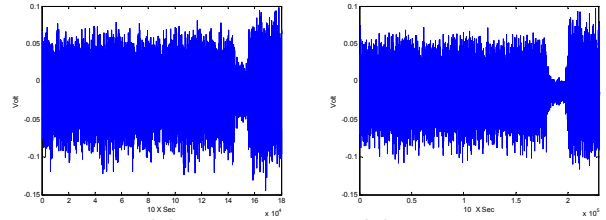


(a) 폐공간 내부 사진 (b) 실험용 하드웨어

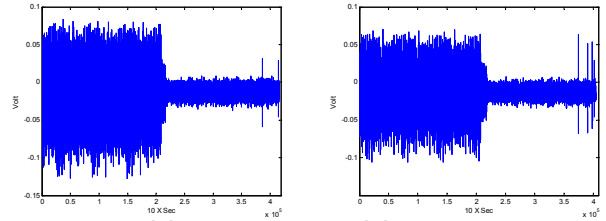
<그림 4> 실험용 폐공간 및 하드웨어

그림 5(a)(b)는 일반 IIR LMS 알고리즘 적용시 광대역 소음원을 사용하고 필터차수 52, 수렴 계수 0.00004 일 때 소음제어 후 mic1, mic2의 오차 신호이다. 수렴계수를 크게 했을 때 시스템이 능동소음제어를 시작함과 동시에 발산하였다. 그림 6(a)(b)는 안정한 IIR 정규화 LMS 알고리즘 적용시 광대역 소음원을 사용하고 필터차수52, 수렴계수 0.00006 일 때 소음제어 후 mic1, mic2의 오차신호이다. 수렴계수를 크게 증가시켜도 시스템이 발산되지 않고 안정됨을 알 수 있다.

안정도 면에서 고찰 할 때 안정한 IIR 정규화 LMS 알고리즘이 기존의 IIR LMS 알고리즘에 비교하여 우수하며 또한 안정화가 안된 일반 IIR LMS 알고리즘은 동일 조건에서 심하게 발산하여 시스템 전체가 불안정하였다.



(a) mic. 1 (b) mic. 2
<그림 5> IIR LMS 알고리즘 적용
(광대역 소음 L=52, $\mu_a = \mu_b = 0.00004$)



(a) mic. 1 (b) mic. 2
<그림 6> 안정한 IIR 정규화 LMS 알고리즘 적용
(광대역 소음 L=52, $\mu_a = \mu_b = 0.00006$)

5. 결 론

본 논문에서는 3차원 폐공간에서의 능동소음제어를 위해 다중 채널 LMS 알고리즘을 유도하였고, 안정화 IIR 필터구조를 적용한 적응 필터를 설계하였다. 안정한 IIR 필터구조 알고리즘에 정규화 LMS 알고리즘을 결합하여 새로운 알고리즘을 제안하였다.

능동 소음제어 실험을 위한 폐공간을 제작하였고, 마이크로폰, 전단 증폭기, 출력증폭기 등 음향장비와 고속연산용 DSP 프로세서를 장착한 제어 보드와 멀티채널용 A/D, D/A 변환보드, 지역 통과 필터, 전원장치 등을 제작하여 능동소음제어 장치를 구현하였다. 실험을 통해 제안된 알고리즘의 우수성을 확인하였다.

[참고문헌]

- [1] Kuo S.M. and Morgan D., *Active Noise Control System*, John Wiley and Sons. Inc., New York, 1996.
- [2] Nam H.D. and Baek K.H., "Satbilized recursive LMS algorithms for active noise control," *Internoise 2003*, Jeju, pp.467-473, 2003.
- [3] L. Tan and J. Jiang, "Adaptive Volterra filters for active control of nonlinear noise processes," *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol.49, pp.1667-1676, 2001.
- [4] S. M. Kuo, H. T. Wu, F. K. Chen, and M. R. Gunnala, "Saturation effects in active noise control systems," *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. 51, pp. 1163-1171, 2004.
- [5] 서성태, "안정성이 강화된 적응필터를 이용한 능동소음제어," 박사학위논문, 단국대학교, 2008.