

능동소음제어 시스템을 위한 다중채널 Fuzzy-LMS 알고리즘

김 균 태^o, 천 진 수, 연 제 근, 남 현 도
단국대학교 전기공학과

Multi-channel Fuzzy-LMS Algorithm for Active Noise Control System

Kyun-Tae Kim^o, Jin-Su Cheon, Jae-Keon Yeon, Hyun-Do Nam
Dept. of Electrical Engineering, Dankook University

Abstract. Multi-channel adaptive algorithms have poor convergence behaviors because of difficulties in selection of convergence coefficients.

In this paper, a MCFLMS(Multi-Channel Fuzzy LMS) algorithm, where the convergence coefficients are updated by a fuzzy inference engine, was proposed. A proposed algorithm showed better convergence characteristics than conventional MCLMS(Multi-Channel LMS) algorithms in computer simulations.

1. 서 론

1936년 Paul Lueg가 상쇄음향을 부가하여 소음을 제거할 수 있다는 개념[1]을 발표한 이후로 흡음재를 사용하여 제거하기 어려운 500[Hz] 이하의 저주파 소음의 제거를 위한 능동소음제어(Active Noise Control: ANC) 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[2]. 특히, 자동차 내부나 비행기 실내 등의 경우와 같은 3차원 폐공간에서의 ANC에 대해 많은 연구가 이루어지고 있는데[3, 4], 3차원 폐공간에서의 경우에는 하나의 음향이 폐공간 내의 여러개의 음향 모드를 여기시키기 때문에 여러개의 마이크로폰과 상쇄음원을 사용하는 다중채널 알고리즘을 사용하여야 하지만[5], 기존의 다중채널 알고리즘은 채널의 증가에 따라 계산량이 매우 증가하며 수렴성능도 좋지 않아 실험적 구현이 어렵다. 때문에, 다중채널 알고리즘의 계산량 감소 및 수렴성능의 개선에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있지만, 계산량의 감소와 수렴성능이 서로 Trade-off 관계에 있어 광복할 만한 성과는 이루어지지 못하였다[6].

본 논문에서는 피지션리를 도입하여 다중채널 LMS(Multi-Channel LMS: MCLMS) 알고리즘의 수렴성능을 개선한 가변시스템을 갖는 다중채널 Fuzzy-LMS(MCFLMS) 알고리즘을 제안하였으며, 제안된 알고리즘의 유용성을 검증하기 위하여 실험용 3차원 폐공간에서 다중채널 ANC 시스템을 구성하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다.

2. MCLMS 알고리즘에 대한 고찰

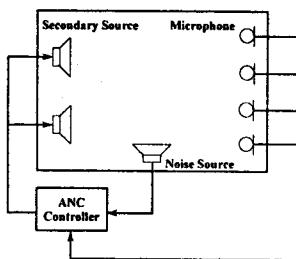


그림 2.1 다중채널 ANC 시스템

다중채널 ANC 시스템이 그림 2.1과 같이 S개의 2차음원과 M개의 오차 마이크로폰으로 구성된다고 가정하면, m번재 마이크로폰에서 감지된 오차 신호의 n번재 고조파 성분은

$$E_m(\omega_n) = D_m(\omega_n) + \sum_{i=1}^S C_{im}(\omega_n) W_i(\omega_n) \quad (2.1)$$

과 같이 표현 할 수 있으며, $D_m(\omega_n)$ 은 2차음원이 없다고 가정했을 때 소음원에서 발생한 소음신호에 의해 m번재 마이크로폰에서 감지된 복소 오차 신호이고 $C_{im}(\omega_n)$ 은 s번재 2차음원과 m번재 오차 마이크로폰 사이의 전달함수이며 $W_i(\omega_n)$ 은 s번재 2차음원에서 발생한 복소 제어 신호이다.

식(2.1)을 행렬식으로 나타내면 식(2.2)와 같다.

$$E(\omega_n) = D(\omega_n) + C(\omega_n) W(\omega_n) \quad (2.2)$$

$$E(\omega_n) = [E_1(\omega_n), E_2(\omega_n), \dots, E_M(\omega_n)]^T$$

$$D(\omega_n) = [D_1(\omega_n), D_2(\omega_n), \dots, D_M(\omega_n)]^T$$

$$W(\omega_n) = [W_1(\omega_n), \dots, W_S(\omega_n)]^T$$

$$C(\omega_n) = \begin{bmatrix} C_{11}(\omega_n) & C_{12}(\omega_n) & \cdots & C_{1M}(\omega_n) \\ C_{21}(\omega_n) & C_{22}(\omega_n) & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{S1}(\omega_n) & C_{S2}(\omega_n) & \cdots & C_{SM}(\omega_n) \end{bmatrix}$$

MCLMS 알고리즘을 유도하기 위해 다음과 같은 평가 함수를 정의하고 이를 최소화하는 MCLMS 알고리즘을 유도하면, 오차 신호의 크기를 줄이면서 동시에 제어 신호의 크기를 제한할 수 있어 제어기의 안정도를 높일 수 있다[7].

$$J = E^H E + \beta W^H W \quad (2.3)$$

식(2.3)에 식(2.2)을 대입하면

$$J = D^H D + W^H C^H D + D^H C W + W^H [C^H C + \beta I] W \quad (2.4)$$

와 같고, 오차 마이크로폰의 숫자가 2차음원의 숫자보다 많다고 가정하면 $[C^H C + \beta I]$ 는 PD(Positive Definite)가 되므로 J 의 오차 평면은 W 에 대해서 유일한 최소값을 가진다.

식(2.4)에서 W 를 실수로 가정하면 경사 벡터는

$$\nabla = -\frac{\partial J}{\partial W} = 2[C^H D + [C^H C + \beta I] W] \quad (2.5)$$

가 되고, J 의 오차 평면은 $\nabla = 0$ 에서 최소값을 가지므로

$$W^* = -[C^H C + \beta I]^{-1} C^H D \quad (2.6)$$

가 된다.

식(2.2)을 이용하면, 식(2.5)의 경사 벡터는

$$\nabla = 2[C^H E + \beta W] \quad (2.7)$$

가 되고, 최대경사법(steepest decent algorithm)을 적용하면

식(2.8)과 같은 MCLMS 알고리즘을 얻을 수 있다.

$$W(k+1) = (1 - \mu\beta) W(k) - \mu C^H E(k) \quad (2.8)$$

W 의 수렴 조건을 구하기 위해, 식(2.2)와 식(2.6)을 이용하여 식(2.8)을 표현하면

$$(W(k+1) - W^*) = [I - \mu(C^H C + \beta I)](W(k) - W^*) \quad (2.9)$$

가 되며, W 의 초기치를 모두 0이라고 가정하면

$$W(k) - W^* = -[I - \mu(C^H C + \beta I)]^k W^* \quad (2.10)$$

이다.

정규화된 고유벡터 Q 와 고유치로 이루어진 대각행렬 A 를 이용하면

$$C^H C + \beta I = Q A Q^H \quad (2.11)$$

가 되고,

$$V(k) = Q^H [W(k) - W^*] \quad (2.12)$$

라고 정의 하면,

$$V(k) = [I - \mu A]^k V(0) \quad (2.13)$$

가 된다.

각각의 고유치에 대해 식(2.13)을 근사화하면

$$V_m(k) = (1 - \mu \lambda_m)^k V_m(0) \approx e^{-\mu \lambda_m k} V_m(0) \quad (2.14)$$

가 되며, W 는 $\mu \lambda_m \ll 1$ 일 경우에 수렴한다. 또, 잘 알려진 바와 같이 신호에 잡음이 섞여 있는 경우라면 $\mu < 1/2$ 이므로 W 가 W^* 에 수렴할 조건은

$$0 < \mu < \frac{2}{\lambda_{\max}} \quad (2.15)$$

이다.

식(2.15)의 조건은 MCLMS 알고리즘의 수렴계수 μ 의 범위가 λ_{\max} 에 의해 결정되기 때문에 λ_{\max} 보다 작은 고유치를 갖는 모드(mode)에 대해서는 수렴속도가 높이므로 전체 시스템의 수렴 특성은 나빠지게 된다.

3. MCFLMS 알고리즘의 유도

식(2.15)에서 $\lambda_{\max} \leq \text{trace}[A] = \text{trace}[R]$ 이나, 실시간으로 고유치 혹은 자기상관행렬(autocorrelation matrix)을 구한다는 것은 어려우므로, L차의 transversal 필터인 경우에 신호가 가지는 파워의 추정치를 $\|x_k\|^2$ 로 정의 한다면 식(2.15)은 다음과 같이 근사화 할 수 있다[8].

$$0 < \mu < \frac{2}{(L+1)\|x_k\|^2} \quad (3.1)$$

식(3.1)에서 보는 바와 같이 수렴계수는 한계치 내의 적절한 값을 선정해 줄 수 있는데, 이것을 근거로 피지 논리를 도입하여 수렴계수를 실시간으로 갱신하는 MCFLMS 알고리즘을 유도하였다.

각각의 오차 마이크로폰에서 검출되는 신호를 정규화하면

$$\varepsilon_N = \frac{\|e_k\|}{\|x_k\|} \quad (3.2)$$

파 같고, 식(3.2)를 이용하여 제어 필터의 적응도(adaptation degree)를 정규화된 오차의 역수로 정의 할 수 있다.

$$\rho_N = \frac{1}{\varepsilon_N} \quad (3.3)$$

적응도의 변화율을 다음과 같이 정의하자.

$$c\rho_N = \|\rho_N(k) - \rho_N(k-1)\| \quad (3.4)$$

식(3.1)을 이용하면 수렴계수 갱신식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu(k) = \frac{2\rho_N}{(L+1)\|x_k\|^2} \quad (0 < \mu_N \leq 1) \quad (3.5)$$

ρ_N , $c\rho_N$, μ_N 에 대한 각각의 언어 변수 ρ'_N , $c\rho'_N$, μ'_N 의 소속함수(Membership function)는 그림 3.1, 그림 3.2와 같다.

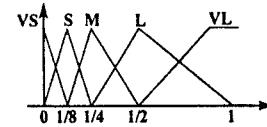


그림 3.1 ρ'_N 과 $c\rho'_N$ 의 소속함수

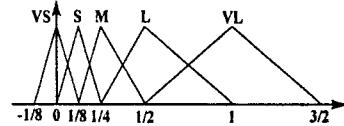


그림 3.2 μ'_N 의 소속함수

μ'_N 은 ρ'_N 과 $c\rho'_N$ 로 이루어진 관계(relation)로 설정된다.

$$\mu'_N = \rho'_N + c\rho'_N \quad (3.6)$$

식(3.6)의 μ'_N 은 표 3.1의 언어규칙에 의해서 결정된다.

표 3.1 μ_N 을 결정하기 위한 언어 규칙

		$c\rho'_N$				
		VS	S	M	L	VL
ρ'_N	VS	VL	VL	VL	VL	VL
	S	VL	VL	VL	VL	L
	M	VL	VL	VL	L	M
	L	VL	VL	L	M	S
	VL	VL	L	M	S	VS

폐지추론을 위한 합성연산자로는 Max-Min 연산자를 사용하였으며 μ'_N 의 역폐지화 방법으로는 무게중심법(COG)을 사용하였다 [9].

식(2.8)의 MCLMS 알고리즘에 Filtered-X 알고리즘과 식(3.5)의 수렴계수 갱신식을 적용하면,

$$W(k+1) = (1 - \mu(k)\beta) W(k) - \mu(k) \hat{C} X(k) E(k) \quad (3.7)$$

과 같다.

식(3.7)에서 $\mu(k)$ 은 μ_N 과 $\|x_k\|^2$ 의 함수로 정의되므로 제어 필터 W 의 적응도 및 신호의 크기에 따라서 적절한 크기로 가변되며, MCLMS 알고리즘이나 Normalized LMS 알고리즘과 같은 가변 스텝을 갖는 알고리즘과 비교하여 수렴성 및 강인성에 향상된 성능을 보였다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션

4.1 ANC 시스템의 구성

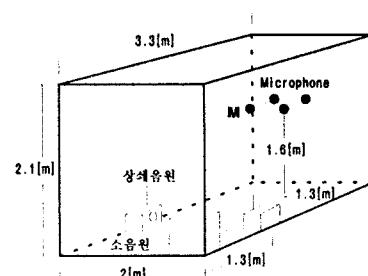


그림 4.1 실험용 ANC 시스템의 구성

실험용 3차원 폐공간에서의 소음원, 마이크로폰 및 2차음원의

구성은 그림 4.1과 같다. 폐공간의 바다에 소음원과 2개의 2차 움원을 배치하였고 마이크로폰은 바닥으로부터 1.6[m] 높이에 0.4[m]의 간격으로 4개를 두었다.

컴퓨터 시뮬레이션을 위해 1차경로 및 2차경로를 파라미터 추정기법을 통하여 모델링 하였으며, 표본화 주파수는 2[kHz]로 하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

MCFLMS 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 200[Hz]의 단일주파수 소음원을 사용하였고 제어필터로는 128차의 FIR 필터를 사용하였다. 또, 양자화 레벨이 50인 Lookup Table을 이용함으로써 수렴계수 추론시에 소모되는 계산시간을 줄였으며, 결과를 같은 조건에서 MCLMS 알고리즘을 적용한 ANC 시스템과 비교하였다.

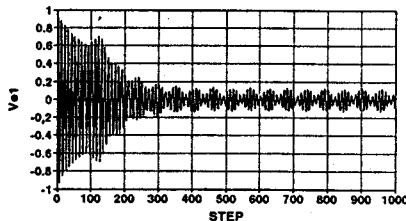


그림 4.2a 마이크로폰(M)에서 검출되는 소음(MCLMS)

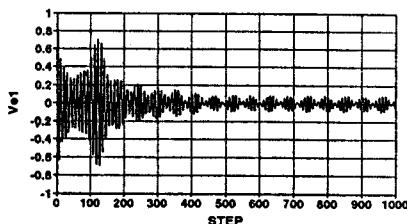


그림 4.2b 마이크로폰(M)에서 검출되는 소음(MCFLMS)

4.3 결과 검토

마이크로폰, M에서의 결과는 그림 4.2와 같으며 MCFLMS 알고리즘이 MCLMS 알고리즘에 비하여 과도특성 및 정상상태에 수렴하는 성능이 매우 향상되었음을 알 수 있으며, 다른 마이크로폰에서도 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

MCFLMS의 경우에는 최적의 수렴계수를 결정하기 위하여 많은 시뮬레이션을 통해 시행착오를 거친 수렴계수의 선정이 필요하지만, MCFLMS의 경우에는 수렴계수가 제어필터의 적응도 및 그의 변화율에 근거하여 자동조정되므로 이러한 과정이 필요없었다.

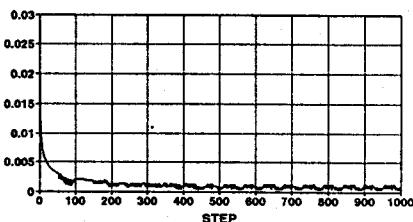


그림 4.3 시간에 따른 수렴계수의 변화

그림 4.3은 수렴계수의 변화를 보인것인데 MCFLMS 알고리즘이 제어필터의 적응도 및 적응도의 변화율에 따라 수렴계수를 적절히 조정함을 알 수 있다. 이것은 MCFLMS 알고리즘의 수렴성능이 MCLMS 알고리즘의 그것에 비하여 향상된 근거를 제시한다고 하겠다.

5. 결론

본 논문에서는 기존의 MCLMS 알고리즘의 수렴성능을 개선한 MCFLMS 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘을 이용하여 3

차원 폐공간에서의 다중채널 ANC 시스템을 구성하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 제안된 알고리즘은 기존의 알고리즘에 비하여 빠른 수렴특성을 보였으며 소음저감정도도 향상됨을 알 수 있었다.

본 연구에서 언급하지 못한 다중채널 알고리즘의 계산량에 대해서 앞으로도 많은 검토가 필요하며 특히, 수렴성능에 영향을 주지 않는 범위내에서의 계산량의 감소에 대한 연구가 필요하다고 하겠다.

참고 문헌

- [1] P. Leug, "Process of silencing sound oscillations," U.S. Patent No. 2, 043, 416, 1936.
- [2] S. J. Elliott and P. A. Nelson, "Active Noise Control," IEEE Signal Processing Magazine, pp.12-35, Oct, 1993.
- [3] S. J. Elliott, I. M. Stothers, P. A. Nelson, A. M. McDonald, D. C. Quinn, and Saunders, "The active control of engine noise inside cars," Proc. Inter-Noise 88, pp.987-990, 1988.
- [4] A. R. D. Curtis, P. A. Nelson, and S. J. Elliott, "Experiments in the active control of enclosed sound fields," Proc. Inter-Noise 88, pp.991-994, 1988.
- [5] 남현도, 안동준, "회전기에 의한 소음 제거를 위한 능동소음제어 - 3차원 공간의 경우," 대한 전기학회 논문지, Vol. 43, No. 9, pp.1553-1562, 1994.
- [6] S. J. Elliott and C. C. Boucher, "Interaction between multiple feedforward active control systems," IEEE Trans. Speech and Audio Processing, Vol. 2, No. 4, 1994.
- [7] S. J. Elliott and C. C. Boucher, and P. A. Nelson, "The behavior of a multiple channel active control system," IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 40, No. 5, 1992.
- [8] B. Widrow and S. D. Stearns, Adaptive Signal Processing, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985.
- [9] W. Pedrycz, Fuzzy Control and Fuzzy System, New York: John Wiley & Sons, 1993.

본 연구는 한국과학재단 특정연구과제의 지원에
의하여 이루어졌음.