

퍼지 LMS 알고리즘을 이용한 덕트의 능동소음제어

안동준^o, 김군태, 남현도

단국대학교 전기공학과

Active noise control using fuzzy LMS algorithm in ducts

Dong jun Ahn^o, kyun tae Kim, Hyun do Nam,

Dept. of Electrical Eng. Dankook Univ.

ABSTRACT

In this paper, the fuzzy LMS algorithm where the convergence coefficient is computed by a fuzzy logic controller was proposed. The proposed fuzzy LMS algorithm showed better convergence property and stability than conventional LMS algorithms. The estimation error and misadaptation degree were used for input of the fuzzy logic controller.

In a airconditioning duct case, various conditions were investigated to design active noise controllers. A case with acoustic feedback, the proposed algorithm showed good performances through computer simulations.

1. 서론

소음의 저감 방법중 소음원의 주파수가 500[Hz]이하인 경우에 매우 효과적인 능동 소음 제어 기법은 소음원과 위상이 반대이고 진폭이 같은 인공적인 2차 음원을 발생시켜 소음과 파괴 간섭을 일으킴으로써 소음을 저감시키는 방법이다[1].

능동 소음 제어계의 제어 필터로 주로 사용되는 LMS 알고리즘은 안정도와 수렴특성이 수렴계수와 밀접한 관계가 있어 수렴계수의 적절한 선정은 매우 중요하다. 그러나 이의 적절한 선정은 복잡한 함수의 비선형 해로 구해지므로 계산이 매우 어려우며 안정성을 보장하기 위하여 수렴 계수를 고정하면 측정 잡음의 특성이 시간에 따라 변동할 경우 만족스런 성능을 얻기가 어려울뿐 아니라 최적의 수렴 계수를 선정하기가 매우 힘들다. 그리고 정규화된 LMS 알고리즘으로 수렴 계수를 가변시키면 급격한 수렴 계수의 변동시에 제어계가 불안정해지는 문제점이 발생한다[2].

본 논문에서는 퍼지 논리를 사용하여 적절한 수렴계수가 선정되도록 수렴계수 갱신식을 제안하였다. 즉, LMS 알고리즘의 안정도와 수렴특성을 향상시키기 위해 퍼지 논리[3]를 이용하여 LMS 알고리즘의 오적응도의 정도에 따라 수렴계수를 적절히 가변시키는 퍼지 LMS 알고리즘을 제안하였으며 이를 공조용 덕트에서의 능동 소음 제어 시스템에 적용하고자 한다.

2. 덕트에서의 능동소음 제어계 설계

그림 2.1은 덕트에 대한 일반적인 능동 소음 제어 시스템을 나타낸 것이다. 소음원은 규정된 덕트의 한쪽 단에서 l_0 만큼 떨어진 거리에 위치하며 1차 음원에 의해 발생하는 음을 검출하는 마이크로폰(detection sensor)은 소음원으로부터 l_1 거리에 위치하고, 2차 음원은 마이크로폰으로부터 l_2 거리에 위치한다.

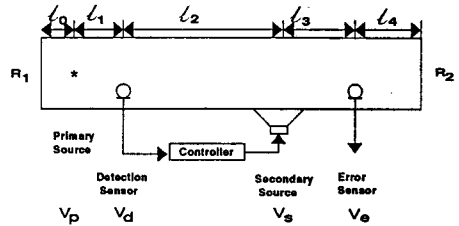


그림 2.1 덕트에서의 능동 소음 제어 시스템

오차 신호를 측정하는 데에 사용되는 마이크로폰은 2차 음원으로부터 l_3 , 덕트의 다른 한쪽 단으로부터 l_4 의 거리에 위치하며 R_1, R_2 는 덕트 양쪽 끝의 음파 반사 계수(reflection coefficient)이다. 두개의 전기적인 입력(즉, 전압 V_p 와 2차 음원을 구동시키기 위해 이용되는 V_s)과 두개의 전기적인 출력(즉, 검출센서로부터 나오는 V_d 와 오차센서로부터 출력되는 V_e)을 갖는 음향 시스템으로 모델링하면 각각의 전기적인 전달함수는 중첩의 원리가 성립된다고 가정하고 4단자망과 유사하게 다른 한쪽의 입력전압을 0으로 설정한 후 각각의 입력과 출력의 비로 정의할 수 있다[4]. 제어기의 전달함수는 중첩의 원리에 의존하기 때문에 시스템(음향, 전기 및 전기음향학적인)의 모든 성분들이 선형으로 가정하면 일반적으로 두개의 출력전압은 다음의 형태를 갖게 될 것이다.

$$V_e = AV_p + CV_s \quad (2.1)$$

$$V_d = BV_p + FV_s \quad (2.2)$$

그림 2.1에서 제어기의 전달함수를 W 라 하고 선형성을 가정하면 그림 2.2와 같은 중첩 모델을 얻을 수 있다.

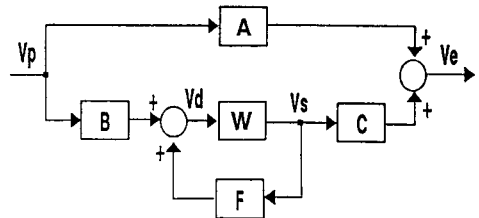


그림 2.2 블록 선도로 표현된 중첩 모델

검출 센서의 출력은 제어기를 통해 2차 음원의 입력에 연결되어 있으므로, 시스템은 단일입력 V_p 와 단일출력 V_e 를 갖는 단

일 입력력 시스템으로 나타낼 수 있다. 능동 소음 제어 시스템이 이상적으로 동작(즉, $V_e = 0$)하기 위한 이상적인 제어기의 전달함수 W_i 는

$$W_i = \frac{A}{AF - BC} \quad (2.3)$$

식(2.3)에서의 주요 전달 함수들은 실제로 측정하거나 계산하기는 매우 어렵기 때문에 제어 필터의 계수들은 적응 알고리즘으로 추정하는 것이 일반적이다. 주로 계산량이 필터 차수에 비례하는 최소 평균 자승(LMS) 알고리즘이 사용되고 있다.

Widrow 등에 의해 제안된 filtered-x LMS 알고리즘[5]의 블록 선도는 그림 2.3과 같다.

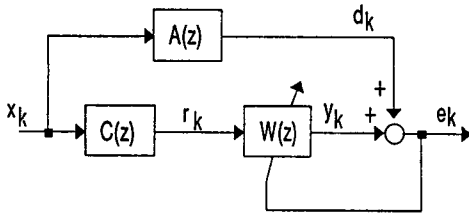


그림 2.3 Filtered-x LMS 알고리즘의 블록선도

그림에서 x_k 는 소음원 신호이고, r_k 는 2차 경로 전달 함수 출력, d_k 는 1차 경로 전달 함수 출력, y_k 는 제어 필터 출력, e_k 는 오차 신호이다

정규화된 LMS 알고리즘을 고려하면 식(2.4)와 같다.

$$W_{k+1} = W_k + \frac{\mu}{(L+1)\hat{\sigma}_k^2} r_k X_k \quad (2.4)$$

여기서 L 은 제어 필터의 차수이고, X_k 는 입력 신호의 계수 벡터이다. 그리고 μ 는 수렴 계수이며, $\hat{\sigma}_k^2$ 는 추정된 입력신호의 power 이다.

3. 퍼지 LMS 알고리즘

퍼지 LMS 알고리즘은 Chelaru[6]등이 LMS 알고리즘의 수렴 계수를 퍼지 알고리즘으로 실시간 갱신하는 정규화된 LMS 알고리즘 구조로 된 퍼지 LMS 알고리즘을 제안한 바 있으나 Chelaru의 알고리즘은 퍼지 추론 규칙에 추정 오차만 고려하여 추정 오차의 변동(오적응도)을 고려하지 않기 때문에 급격한 수렴 계수의 변동에 따라 LMS 알고리즘의 안정도가 흔들리는 경우가 있을 수 있다.

본 논문에서는 Chelaru 알고리즘의 약점을 보완하기 위하여 추정 오차의 변동도 고려하는 새로운 형태의 수렴 계수 갱신식을 제안하고자 한다. 먼저 LMS 알고리즘에서 양호한 수렴 특성을 얻기 위하여 μ 를 가변시킬 경우, 논리적인 관점에서 볼때 알고리즘의 안정도가 보장되는 범위 내에서 다음의 규칙을 따르도록 해야 한다.

수렴속도 향상: IF adaptation is LOW, THEN μ must be HIGH
오적응도 감소: IF adaptation is HIGH, THEN μ must be LOW

따라서 다음과 같이 퍼지 논리를 이용하여 알고리즘의 오적응도에 따라 스텝 크기를 적절히 가변시키는 퍼지 알고리즘을 고려할 수 있다.

$$W_{k+1} = W_k + \mu_k e_k X_k \quad (3.1)$$

$$\mu_k = \frac{v_k}{(L+1)\hat{\sigma}_k^2} \quad (3.2)$$

여기서 v_k 는 퍼지 추론 알고리즘에 의하여 계산된 퍼지 출

력이다. 식(3.2)의 v_k 는 퍼지 논리를 이용한 퍼지 논리 제어기에 의하여 계산되는데, FLC의 입력은 보통의 수치값을 갖는 오적응도의 정량적 척도인 추정 오차 ue_k 와 추정 오차의 변화율 uce_k 이고 퍼지 출력은 수렴 계수 변화량 v_k 이다.

v_k 를 계산하기 위한 FLC의 입력인 오적응도의 정량적 척도 ue_k 또는 식(3.3)과 같이 smoothing 필터에 입력 계수와 추정 오차간의 상호상관의 norm을 사용하며 uce_k 는 ue_k 의 변화율의 절대치로 정의하였다.

$$ue_k = \alpha_1 ue_{k-1} + (1-\alpha_1) \frac{\|e_k X_k\|}{(\beta_1 + \hat{\sigma}_k^2)} \quad (3.3)$$

$$uce_k = \|ue_k - ue_{k-1}\| \quad (3.4)$$

여기서 α_1 , β_1 는 각각 추정 오차의 망각 인수(forgetting factor), 편이 인수(bias factor)이다.

FLC의 언어 변수에 대한 입력 퍼지 변수 ue_k , uce_k 의 소속 함수는 그림 3.1과 같고, 출력 퍼지 변수 v_k 의 소속 함수는 그림 3.2와 같다.

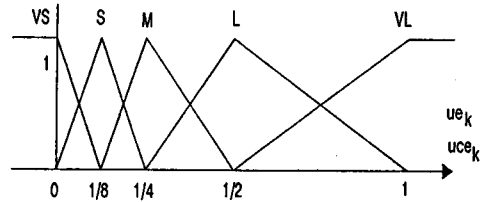


그림 3.1 퍼지 입력 변수 ue_k , uce_k 의 소속 함수 $m_{ue}(UE)$, $m_{uce}(UCE)$

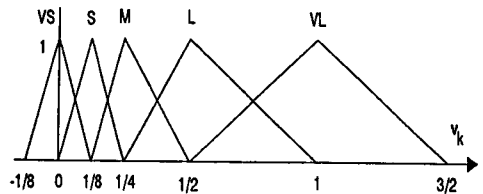


그림 3.2 퍼지 출력 변수 v_k 의 소속 함수 $m_v(V)$

퍼지 출력 v_k 를 계산하기 위해 제어 규칙이 N 개인 경우를 표현하면,

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_N = \bigcup_{i=1}^N (UC_i \times UCE_i \times V_i) \quad (3.5)$$

퍼지 출력을 얻기 위해 퍼지 출력 결정을 위한 추론 규칙은,

$$V = R \circ (UE \times UCE) \quad (3.6)$$

퍼지 출력을 결정하기 위한 언어적 제어 규칙은 표 3.1과 같다.

표 3.1 수렴 계수 결정을 위한 언어적 제어 규칙

| | | change of error (uce) | | | | | |
|------|----|-----------------------|----|----|----|----|--|
| e | 구분 | VS | S | M | L | VL | |
| r | VS | VL | L | M | S | VS | |
| r | S | VL | VL | L | M | S | |
| o | M | VL | VL | VL | L | M | |
| r | L | VL | VL | VL | VL | L | |
| (uc) | VL | VL | VL | VL | VL | VL | |

따라서 FLC의 퍼지 출력 v_k^0 는 추론 규칙으로 주로 많이 쓰이는 max-min 합성연산자로 구할 수 있다.

$$v_k^0 = m_R(UE_i, UCE_i, V_i)$$

$$= \max \left[\sum_{i=1}^N \min [m_{UE_i}(ue_i), m_{UCE_i}(uce_i), m_{V_i}(v_i)] \right]$$

(3.7)

퍼지 추론과정을 거쳐 얻어진 출력 v_k^0 는 퍼지 변수이고 FLC의 실제 출력은 crisp한 v_k 가 되어야 하므로 역퍼지화를 위해 이산화된 무게 중심법(center of gravity method)을 사용하였다.

$$v_k = \frac{\sum_{i=1}^N (v_k^0 m_V(v_i))}{\sum_{i=1}^N (m_V(v_i))}$$

(3.8)

4. 컴퓨터 시뮬레이션

제한한 능동 소음 제어 알고리즘의 유용성을 보이기 위해 시뮬레이션에 사용할 덕트 파라미터는 다음과 같다. 반사 계수는 0.1로, $l_0 = 1[m]$, $l_1=1.2[m]$, $l_2=1.6[m]$, $l_3=1.2[m]$, $l_4=1[m]$ 이다. 설계한 능동 소음 제어계의 성능을 확인하기 위하여 2차 경로의 전달함수를 알고 있다고 가정하고, filtered_x LMS 알고리즘에 적용하였다. 제어 필터의 구조를 정규화된 LMS, 퍼지 LMS로 구분하고 소음 신호는 식(4.1)과 같이 소음원의 주파수 특성이 백색 잡음(white noise)과 주요 정현파들이 섞여 있는 경우(광대역 잡음: broad band noise)로 고려하였다.

$$x_k = A_1 \sin(2\pi f_1 k) + A_2 \sin(2\pi f_2 k) + A_3 w_k \quad (4.1)$$

여기서

$$A_1 = 0.7, A_2 = 0.4, A_3 = 0.01$$

$$f_1 = 300 [Hz], f_2 = 500 [Hz]$$

w_k 는 분산이 1이고, 평균이 0인 백색 잡음

그림 4.1은 광대역 소음원에 대하여 시뮬레이션을 행한 결과이다. 수렴 계수들은 가장 수렴 특성이 빠른 계수로 선정하였고, 결과를 비교해 보면 2차 경로를 알고 있는 상태에서는 각 알고리즘들이 잘 수렴이 되고 있음을 알 수 있으며, 광대역 소음원인 경우에 제한한 퍼지 LMS 알고리즘이 좋은 특성을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

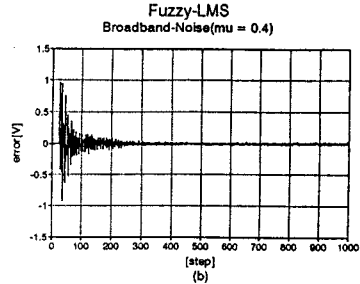
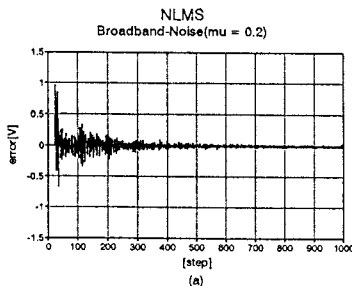


그림 4.1 광대역 소음원에 대한 능동 소음 제어
(a) 정규화된 LMS
(b) 퍼지 LMS

5. 결론

능동 소음 제어기 제어 필터로 주로 사용되는 LMS 알고리즘은 수렴특성과 안정도가 수렴계수의 크기에 크게 좌우되나 최적의 선정은 매우 어렵다. 본 논문에서는 퍼지 논리를 이용하여 수렴계수의 크기를 적절히 선정하는 퍼지 LMS 알고리즘을 제안하였고, 1차원 음장 문제인 공조용 덕트의 능동 소음 제어에 적용하여 유용성을 보였다.

참고 문헌

- [1] Elliott S.J., and Nelson P.A., Active Control of Sound, Academic Press, 1992.
- [2] Michael W.B. et al, "Adaptive filters with individual adaptation of parameters," IEEE Trans. Circuits Syst., vol. CAS-33, pp. 677-686, July, 1986.
- [3] Pedricz, Fuzzy control and fuzzy systems, Research Studies Press, Ltd., 1989.
- [4] Elliott S.J. and Nelson P.A., Models for describing active noise control in ducts, ISVR Technical Report No.127, University of Southampton, U.K., 1984.
- [5] Widrow B. and Stearns S.D., Adaptive Signal Processing, Eglewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985.
- [6] Cheralu M., Teodorescu H.N., Dumitrascu C., "A fuzzy LMS algorithm," Proceeding of the international conference on Fuzzy Logic & Neural Networks, pp. 107-110, Japan, Isuka, 1990.

본 연구는 한국과학기술원 특정연구과제의 지원에 의하여 이루어졌음.