

불예측적 이차경로에 대한 ANFIS를 이용한 능동소음제어

김응주, 최원석, 김범수, 임묘택  
고려대학교 전기공학과

Active Noise Control by ANFIS for Unpredictable Secondary Path

Eung-Ju Kim, Won-Seock Choi, Beom-Soo Kim, Myo-Taeg Lim  
School of Electrical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, South Korea

**Abstract** - Active Noise control(ANC) is rapidly becoming the most effective way to reduce noises that can otherwise be very difficult and expensive to control. This research presents ANFIS (Adaptive Network Fuzzy Inference System) controller for adaptively noise cancelling in a duct. ANC system generates secondary control sound pressure with same amplitude and with opposite phase as noise to be eliminated. ANFIS controller is trained to optimize its parameters for adaptively cancelling noise. That is ANFIS train its parameters by gradient descent and LSE method so called hybrid method. This paper present ANFIS in active noise control which provides an improvement convergence speed and limitation of linearity condition. It can model nonlinear functions of arbitrary complexity and ANFIS can construct an input-output mapping based on both human knowledge in the form of Takagi and Sugeno's fuzzy if-then rules and stipulated input-output data pairs. This paper also shows that the proposed ANFIS active noise control system successfully cancelled noise.

1. 서 론

전기적, 기계적 시스템에 있어서 원하지 않는 진동이나 소음은 작업자의 능률이나 작업환경에 좋지 않은 영향을 줄 수 있다[1]. 이러한 소음이나 진동을 방지하는 소음 및 진동제어에 대한 연구는 크게 3가지로 나눌 수 있다. 먼저 소음원으로부터 소음을 적게 방출시키는 방법, 두 번째로 흡음, 차음 등의 부가적인 방법으로 소음을 줄이는 수동적인 방법, 마지막으로 소음을 줄이기 위해서 부가적인 소음원을 사용하는 능동소음제어 방법이 있다. 이 중에서 수동적인 방법은 구조물의 재질, 형상 등에 대한 정확한 파악이 필요하고 고주파 소음에 대하여는 좋은 성능을 보이나 대부분의 전기적 기계적 소음인 500[Hz]보다 작은 저주파 소음에 대해서는 구조물의 크기가 커야 하므로 많은 제약이 따른다[2]. 따라서 이 런 수동소음제어의 단점을 극복하기 위해서 저주파 소음에 대해서 탁월한 효과를 보이는 능동소음제어가 최근 많이 연구되고 있다. 1936년 lueg 에 의해서 처음 창안된 능동소음제어는 신호처리기술과 하드웨어의 발달과 더불어 연구가 활발히 이뤄지고 있으며 초기 능동소음제어는 시스템을 수학적으로 모델링한 후 이에 대한 매개 변수들을 실험을 통해 비 실시간으로 얻고 이 결과를 이용해서 소음제어를 하였다. 그러나 시변 시스템인 경우 이와 같은 방법은 실제 적용에 어려움이 있기 때문에 신

호처리기법을 이용하여 소음과 동일 진폭, 반대위상을 갖는 부가적인 소음원을 이용한 실시간 소음제어방법이 각광받게 되었다.[3] 이러한 능동소음제어 시스템은 DSP적으로 경량화가 가능하므로 최근 항공기의 소음제어나 에어컨, 헤드셋과 같은 전자장치의 소음제어에 많이 적용되고 있다.[4]. 현재 가장 많이 사용되고 있는 능동소음제어 방법으로 Filtered-X LMS 알고리즘이 있으며 적응필터를 통과한 신호가 이차경로를 통과하면서 변형되므로 이에 대한 정확한 모델링이 필요하다. 하지만 적응필터와 에러채널에 대한 선형조건이 가정되어 야 하므로 실제 모델링과정중에 제약이 따른다.

이 연구의 목적은 퍼지시스템에 기반한 ANFIS 모델을 이용하여 소음원의 시변특성에 따라서 적응적으로 시스템의 파라메타를 변경시켜 소음을 제거하는 방법을 제안 하며 기존에 발표된 방법들과 시뮬레이션으로 비교하여 그 성능을 비교하는데 있다.

2. Concept of Active Noise Control

일반적인 feed-forward-ANC시스템은 그림1과 같이 나타낼 수 있으며 소음은 기준마이크와 오차마이크를 통해 얻어진 잡음정보를 분석하여 스피커를 통해 동일진폭과 반대위상을 갖는 신호를 이용하여 소음을 제거한다.

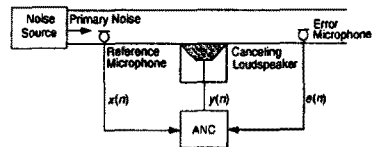


그림 1. Feed-forward broadband ANC system

원소음은 1차경로를 통해 전파되며 이때 주변의 다른 계통에 의해 원래의 소음과 성격이 다른 형태로 변형되어 도달하게 된다. 즉 그림1.에서와 같이 원소음원과 제어소음원이 각각 한 개씩 있을 때의 소음효과를 살펴보면 강도 q인 소음원에서 거리가 r인 지점의 음압 p(r)은 다음과 같다.

$$p(r) = \frac{j\omega\rho_0 q e^{-jkr}}{4\pi r} \tag{1}$$

이때 w는 각속도, ρ<sub>0</sub>는 매질의 밀도, k =  $\frac{\omega}{c}$ 는 파수

이때 그림2는 원소음과 제어소음과의 상쇄간섭을 보여 주며 시스템이 선형이라는 가정하에서 음장내의 임의의 한점에서의 음압은 중첩의원리를 적용하면 다음과 같다.

$$p(r, \theta) = \frac{j\omega\rho_0 q_p e^{-jkr_p}}{4\pi r_p} + \frac{j\omega\rho_0 q_s e^{-jkr_s}}{4\pi r_s} \quad (2)$$

그림2에서  $r$ 이 파장  $\lambda$ 와 두 음원사이의 거리  $d$ 보다 훨씬 큰 경우 각  $\theta_0$ 와 거리  $r$ 에서의 음압  $p(r, \theta)$ 을 영으로 만드는 부가음원 강도를 계산할 수 있으며 지수항의  $r_p$ 와  $r_s$ 를 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$r_p \approx r + (d/2) \cos \theta, \quad r_s \approx r - (d/2) \cos \theta \quad (3)$$

근사화된 이 식을 (2)에 대입하고  $p(r, \theta)$ 의 음압을 영이라고 하면 부가음원강도는 다음과 같다.

$$q_s = -q_p e^{-jkd \cos \theta_0} \quad (4)$$

이식으로부터  $\theta_0$ 인 위치에서의 음압을 영으로 만들기 위해서는 원소음원의 강도와 같고 위상과  $kdcos\theta_0$  만큼 차이가 있어야 함을 알 수 있다.

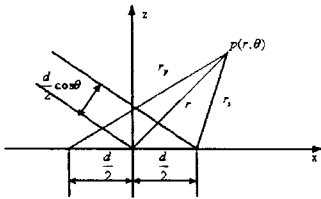


그림 2. 부가음원에 의한 원소음의 상쇄

### 3 Filtered-X ANC LMS Algorithm

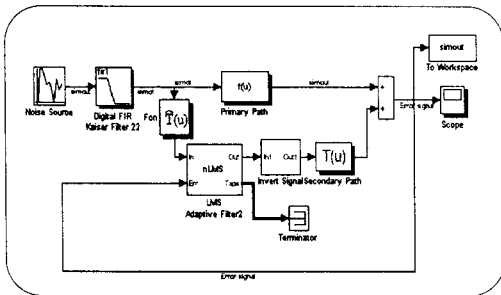


그림 3. Filtered-X LMS for ANC

실제 능동소음제어에서의 오차신호는 필터응답신호  $u(k)$ 와 목표응답신호  $d(k)$ 의 차이가 아니라 부가잡음과 오차마이크사이의 이차경로가 고려되어야 하므로 이를 보상하기 위해 Filterd-x LMS 알고리즘이 제안된다. 즉 참조신호  $x(k)$ 를 적응알고리즘의 입력신호로 쓰지 않고 그림에서처럼 이차경로를 추정하여 모델링한  $\hat{T}$ 를 거친 신호를 참조신호로 사용한다. 따라서 시스템의 성능을 향상시키기 위해서  $\hat{T}$ 를 정확히 추정하는 것이 필요하다[5]. LMS알고리즘은 상관행렬  $R$ 을 모르는 경우에 기울기만을 이용하여 최적필터 계수를 알아내는 알고리즘으로 다음과 같이 웨이트를 업데이트 한다.

$$w(k+1) = w(k) - 2\mu e(k)x(k) \quad (5)$$

Filtered-X LMS에서는 목표신호  $d(k)$ 와 출력신호  $y(k)$ 의 오차신호  $e(k)$ 는 다음과 같다.

$$e(k) = d(k) + w^T x(k)T(z) \quad (6)$$

이때 cost-function은  $\zeta = E[e^2(k)]$  이고 필터계수에 관한 도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \nabla &= \frac{\partial \zeta}{\partial w} e^2(k) = 2e(k) \frac{\partial \zeta}{\partial w} (d(k) + w^T x(k)T(z)) \\ &= 2e(k)x(k)T(z) \end{aligned} \quad (7)$$

이고  $\hat{x} = x(k)T(z)$ 를 (5)에 대입하면 다음과 같은 Filterd X LMS알고리즘을 구할 수 있다.

$$w(k+1) = w(k) - 2\mu e(k)\hat{x}(k) \quad (8)$$

### 4 Proposed ANFIS for ANC

기존의 퍼지시스템의 단점은 다음과 같다.

1. 인간의 지식을 추론화 하는데 표준화된 방법이 없다
2. 성능을 극대화하기 위해서 Membership Function을 입력-출력관계에 적응적으로 갱신할 필요가 있다.

본 논문에서는 그림4처럼 ANFIS의 1차 Sugeno 시스템에 관한 퍼지 시스템 파라메타들을 최적화하기 위해서 혼합된 학습규칙을 사용하며 조건부 파라메타의 최적화를 위해서 gradient descent 방법을 사용하며 결론부 파라메타를 풀기 위해서 최소 제곱법을 사용한다.

즉 오차를 감소시키기 위해서 두 개의 상이한 알고리즘을 사용하므로 혼련규칙을 hybrid 라고 일컫는다. 결론부 파라메타들은 최소제곱법 알고리즘을 사용하여 먼저 갱신되고 조건부 파라메타는 오류역전파 방식으로 갱신된다.

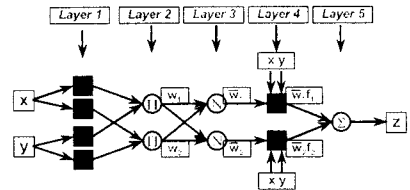
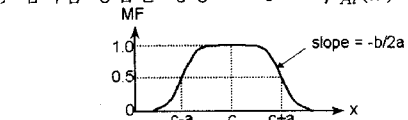


그림 4. ANFIS 다이어그램

즉 ANFIS시스템[8]은 퍼지시스템과 뉴럴네트워크의 학습기능을 이용하며 Sugeno 퍼지시스템은 주어진 정보가 수치적인 데이터일때 모델링이 가능하다. 제안된 ANFIS Sugeno 퍼지시스템의 규칙은 다음과 같다.

$$\text{IF } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2}, \text{ THEN } y_i = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (9)$$

(총1) 멤버십 등급을 형성  $O^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (10)$



$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[ \frac{x - c_i}{a_i} \right]^2} \text{ or } \mu_{A_i}(x) = \exp \left[ - \left( \frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right] \quad (11)$$

where,  $\{a_i, b_i, c_i\}$  is parameter set (premise parameters)

[층2] 발화강도를 생성  $w_i = \mu_A(x) \times \mu_B(y), i=1,2$  (12)

[층3] 발화강도의 정규화  $\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i=1,2$  (13)

[층4] 결론부 파라메타를 근거로 규칙 출력을 생성  $O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i)$  (14)

[층5] 층4의 모든 입력을 합한다.  $O_i^5 = z = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}$  (15)

즉, 이와 같이 제안된 ANFIS 훈련은 조건부 파라메타를 최적화하기 위해 구배감소 알고리즘을 사용하고 결론부 파라메타를 풀기위해서 최소제곱법을 사용한다. 이때 오차감소를 위한 두 개의 상이한 알고리즘을 사용하므로 혼련규칙을 hybrid라고 일컫는다. 제안된 ANC ANFIS의 제어출력신호는 비선형방정식에 의한 1차경로 및 2차경로의 변형된 소음을 예측하며 이때 발생된 오차신호를 입력으로 궤환시켜 오차를 최소화시킨다.

#### 4. 모의실험

제안된 능동소음제어를 위한 ANFIS를 테스트하기 위해서 입출력 데이터에 따라서 8개의 Rule을 적용하였으며 예측된 신호와 원 신호의 오차를 ANFIS의 제2의 입력으로 인가하여 오차를 최소화시키는 언어변수를 설정하였다.

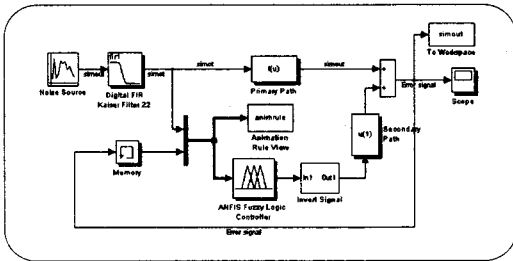


그림 5. 제안된 ANFIS를 이용한 ANC 시스템

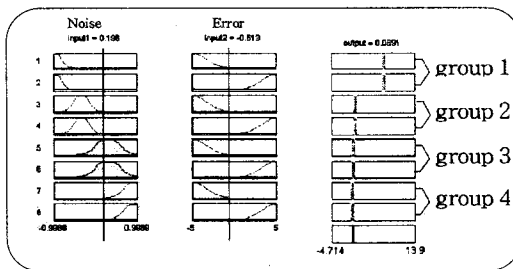


그림 6. 제안된 ANFIS의 Rule-Viewer

훈련이 끝난 후의 ANFIS Sugeno 퍼지시스템에 대한 결론부 각그룹  $i$ 의 파라메타는 다음과 같다.

$$[a_{i0}, a_{i1}, a_{i2}] = \begin{bmatrix} 6.4312, (-1)^k \times 0.012, 5.876 \\ 2.6281, (-1)^k \times 0.011, 0.1076 \\ 0.4349, (-1)^k \times 0.021, 0.0093 \\ 0.2386, (-1)^k \times 0.014, -0.141 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$k=1$ : 각그룹의 첫번째,  $k=2$ : 각그룹의 두번째

#### 5 Simulation of proposed controller

시뮬레이션은 Matlab Simulink[9]상에서 실시하였으며 기준입력잡음으로 100~300Hz의 다양한 잡음성분에 대하여 시뮬레이션을 실시하였으며 다음과 같이 Filterd-X LMS에 비하여 잡음억제 능력이 향상됨을 알 수 있었다.

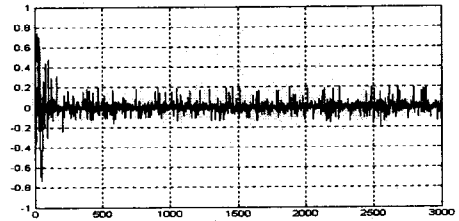


그림7 Filterd-X LMS ANC error result

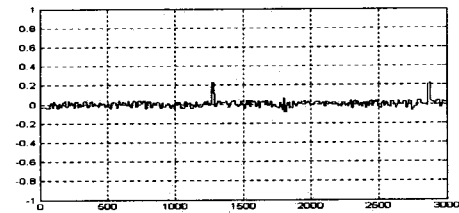


그림8. 향상된 ANFIS ANC error result

#### 6. 결 론

능동소음제어에 있어서 광대역 잡음에 대한 훈련 데이터와 이때 발생하는 오차를 이용해서 퍼지-뉴럴시스템을 구성하였고 목표신호와와의 오차를 퍼지시스템에 실시간 인가하여 파라미터를 조정하여 오차를 최소화시켰고 복잡한 방법을 통해 2차경로를 정확히 추정해야 하는 기존의 Filterd-X LMS 알고리즘에 비해서 탁월한 소음억제 결과를 얻을 수 있었다. 또한 1차경로와 2차경로에 대한 모델링 과정이 필요없이 퍼지-뉴럴시스템의 추론, 학습가능을 통하여 시스템을 예측하였으며 특성이 다른 잡음특성에 대해서도 안정적으로 소음을 제어할 수 있음을 알 수 있었다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] B Widrow et al, "Adaptive noise cancelling:", *Proc. IEEE*, Vol.63,1692-1716, Dec. 1975
- [2] P.M. Joplin and P.A Nelson "Active control of Low-frequency Random Sound in Enclosures," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol 87, No. 6, June, 1990
- [3] R. Yager and P. Filev, *Essential of Fuzzy Modeling and Control*, John-Wiley and Sons, 1994
- [4] B. Widrow and S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*, Prentice-Hall Inc. 1985
- [5] S.M. Kuo and D. R. Morgan, *Active Noise Control Systems- Algorithms and DSP Implementation* New York: Wiley, 1996.
- [6] C. X. Tan, H. Tachibana, *Nonlinearity-Tolerated Active Noise Control using an Artificial Neural Network*,
- [7] Elliott, S. J., and Nelson, P.A., "Active Noise Control," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol 10, 1993, p12-35.
- [8] Jyh-Shing Roger Jang *ANFIS: Adaptive-Network Based Fuzzy Inference System*, *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*. vol. 23, no. 3. pp665-685, May 1993
- [9] Matlab Fuzzy Logic TOOLBOX For User with MATLAB