

수렴속도 개선을 위한 새로운 LMS 알고리즘

A New LMS Algorithm for Improved Convergence Time in Active Noise Control

최 경 호, 김 일 환

(Kyoung Ho Choi and Il Hwan Kim)

Abstract : Many industrial processes that are operated by rotating machines and large air-moving fans are excellent examples to which the single channel ANC systems can be applied. In these environments, the active noise control techniques are most popular nowadays. In this paper, a modified LMS algorithm(EAC, Error Amplitude Compared) is proposed. The algorithm is a kind of variable step-size LMS-type algorithm. Computer simulations show that the proposed EAC algorithm achieves a better convergence time than a conventional VS(Variable Step-Size) algorithm, Also, this algorithm has been implemented by using an experimental duct system.

Keywords : active noise control, DSP, duct, LMS, variable step-size

I. 서론

LMS 알고리즘은 매우 간단하고 강력한 적응 알고리즘임에 틀림없으며 이의 응용 또한 매우 널리 사용되어 왔다. 최근에는 DSP 시스템의 발전에 따라서 좀 더 강력하고 유용한 알고리즘이 발표되고 있으며, 특히 수렴 상수를 가변 시킴으로써 더 낮은 성능을 발휘 할 수 있도록 많은 논문들이 발표되고 있고[1]-[2], 이의 증명 또한 많이 발표되어왔다. 이러한 기존 방법의 사용에 있어서 시스템 자체가 파라미터에 의존한다거나 실험 시스템의 적용에 계산량이 문제가 되기도 하며[3]-[4]. 이를 고려하여, 이 논문에서는 수렴 상수를 가변 시키기 위해 주기적으로 각 수렴 계수 계산시 입력된 전 오차값과 이를 비교 사용하는 알고리즘을 전개한다. 이 알고리즘의 변위는 입력받은 오차에 대해서 그 전 오차값과 비교 이를 상수화해 현재 수렴 계수 계산시 이용하는 방법을 채택하고 있다.

능동 소음 제거에서 일반적으로 많이 사용되는 LMS 알고리즘을 좀더 발전시켜 수렴속도와 안정성을 확대시킨 알고리즘(Error Amplitude Compared LMS Algorithm)을 제안하고 이의 모의실험 및 모의 가상덕트 실험 기구를 가지고 실제 실험한 결과를 보여주고자 한다.

II. EAC LMS 알고리즘

가변 계수(Variable Step-Size, VS)알고리즘과 비교해서 이 논문에서 구성한 EACLMS (Error Amplitude Compared LMS)알고리즘은 다음과 같다.

입력 벡터 X_k^T 를

$$X_k^T = [x(k)x(k-1)\dots x(k-L+1)] \quad (1)$$

이라 하고, 필터의 출력은 $y(k)$ 으로, 오차 출력은 $e(k)$ 으로, FIR 필터의 계수는 W_k 으로 하면,

$$W_k^T = [w_{0(k)}w_{1(k)}\dots w_{L-1}(k)] \quad (2)$$

로 표기할 수 있고, 필터의 출력은 간단하게 $y(k) = W_k^T X_k$ 로 나타낼 수 있다. 최급 하강 방법(Steepest Decent)을 사용하면, 가변 계수 알고리즘은 계수를 다음과 같은 방법으로 갱신한다.

$$W_{k+1} = W_k + 2e(k)U_k X_k \quad (3)$$

U_k 는 평균자승오차(Mean Square Error)의 최소값을 얻기 위해서 다음과 같이 선택된다. U_k 각 요소들은 μ_{\min} 과 μ_{\max} 사이에 얻을 수 있으며($0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$), λ_{\max} 는 입력 신호의 자기상관 함수 R_{xx} 의 최대 고유치이며 간단하게 $0 < \mu < 2/3LP_x$ 로 나타낼 수 있다. 여기서, P_x 는 입력신호 power의 최대치이고, L은 필터 길이이다. μ_{\min} 은 실제로 필터가 수렴한 이후에 목적하는 정상상태를 얻기 위해서 오차 허용 범위 내에서 선택될 수 있다.

EAC에서, U_k 는 다음과 같은 과정에 의해 얻어지게 된다.

$$1) \alpha_k = \sum_{l=0}^{M-1} \frac{|e(l)|}{M}$$

$$2) \mu_k = \mu_{k-1} * \frac{\alpha_k}{\alpha_{k-1}}$$

위의 α_k 은 잔류 소음 신호의 평균치를 얻게 되며, 이는 M 샘플링 시간마다 주기적으로 평균치를 갱신하게 된다. 또한 계수 계산시 이를 가속화 계수로도 사용한다. 모의 실험에서 $M=10$ 인 경우가 가장 적당한 실험 결과를 가져왔다. 이렇게 얻어진 α_k 를 M 샘플링 시간 전의 α_{k-1} 평균값과 비교를 해서 새로운 μ_k 을 만들어 내게 된다. 초기값 μ_0 는 μ_{\max} 를 취함으로써 초기에 수렴이 빠르게 진행되도록 하고, 이후 신호의 감소, 혹은

증가에 따라서 μ_k 이 감소, 혹은 증가하게 된다. 따라서 상당히 유연한 시스템을 만들어 낼 수 있으며, 시스템이 안정된 상태에 있을 때도 μ_{min} 의 선택에 의해 시스템이 허용된 오차 범위내에서 구동될 수 있도록 한다. 이는 기본적인 LMS 방법에 비해 초기수렴이 빠르고, 안정된 상태에서 양호한 시스템 특성을 가지고 있으며, 수렴비 또한 우수하게 된다.

III. 시스템 모의 실험

LMS 알고리즘을 증명하기 위해 위의 식들을 정리하고, MATLAB의 Simulink를 사용하여 모의 실험을 수행하였다. 다음과 같은 식에 의해 EAC LMS 알고리즘에 사용하기 위한 가상 덩트 시스템 실험기구의 시간지연을 계산해 내고 사용하였다.

$$T_i = \frac{l_{path}}{c}$$

$$c = \sqrt{k \frac{P_0}{\rho_0}} = \sqrt{k \frac{RT}{M}} \approx 340 \frac{m}{s} \quad \text{at } 20^\circ C \quad (4)$$

소리의 속도 c는 온도에 따라서 변하기는 하지만 약 $\pm 5\%$ 정도의 차이를 가지고 있기 때문에 실제 실험에서는 별로 고려하지 않았다. 위의 식을 가지고 계산을 해 보면 가상 소음원부터 오류 검출 마이크까지의 시간이 60.4ms 정도의 시간 지연을 계산할 수가 있었다. 또한 제어 소음원으로 부터 오류 검출 마이크까지의 시간이 2.7059ms 정도의 시간지연 계산할 수가 있었다. 그리고 그 크기에 있어서는 거의 변화가 없기 때문에 실제 2차 경로는 시간 지연으로만 구성되어 있으며 1차원 평면파만 고려하면 되기 때문에 시간지연으로만 구성되어 있다는 추정이 맞다고 할 수 있다. 따라서 모의 실험에서는 이를 고려 시간 지연을 제공하여 실험을 하였다.

그림 1에서 보면 입력 신호는 순음파를 사용하였으며, 이를 각기 VS 알고리즘을 사용한 필터와 EAC 알고리즘을 사용한 필터에 입력을 하였다. 2차 경로는 같은 시간 지연을 가지고 사용을 했다. 따라서 같은 조건을 가진 것으로 할 수 있다. 필터의 계수가 각

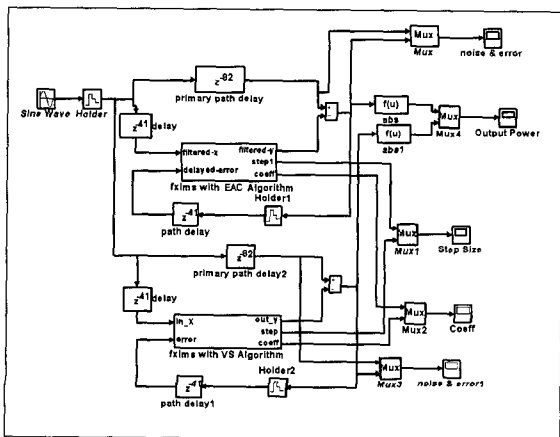


그림 1. 시스템 모의 실험도.
Fig. 1. Computer simulation block diagram.

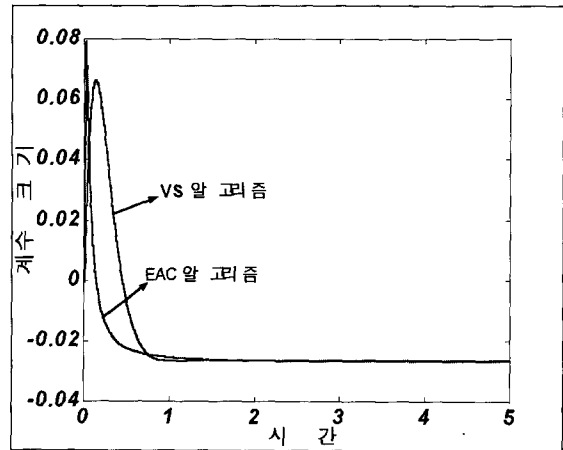


그림 2. 필터 가중치 계수 변화.
Fig. 2. Coefficients proceeding.

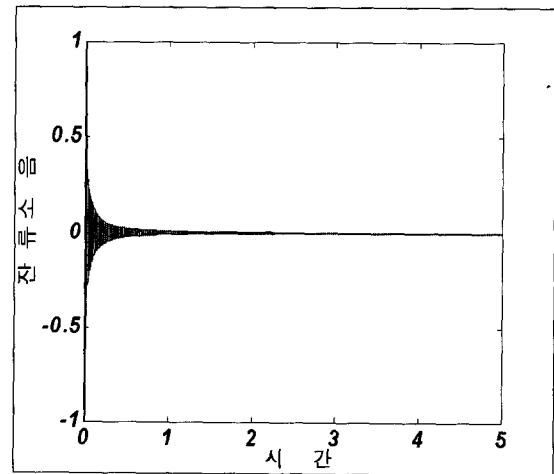


그림 3. EAC 알고리즘 사용 잔류소음측정.
Fig. 3. Residual noise with EAC algorithm.

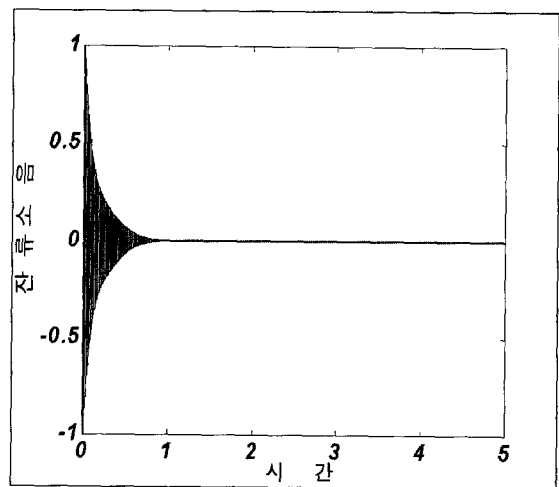


그림 4. VS 알고리즘 사용 잔류소음측정.
Fig. 4. Residual noise with VS algorithm.

순간 어떻게 변화치를 그림 4에 표시를 하였다. 필터의 계수 또한 좀 더 빠른 시간 내에 안정한 영역으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 각각의 필터를 통한 원 소

음과 잔류소음에 대한 비교를 그림 3과 그림 4에 나타내었다.

IV. 가상 덕트내 전파소음의 고찰 및 실제 실험

이번 실험에 사용한 실험기구는 원형 덕트의 형태를 취하고 있다. 우선 덕트내 소음의 능동 제어를 위해서는 덕트 내부의 음파의 전달과정을 파악하는 것이 중요하다.

이 실험에서는 차단 주파수 영역 아래의 평면파만 제어한다고 가정한다. 이러한 차단 주파수 영역 아래에서 고차모드는 소음원로부터 멀어짐에 따라서 상당히 급격하게 줄어듦을 이용한다. 이를 이용 실험용 덕트는 1차원으로 가정하며, 이를 뒷받침하기 위해 덕트 내부의 소음원과 센서 사이의 거리가 얼마나 되어야 1차원 평면파가 남는지 다음과 같이 표기하였다.

반경이 d인 원형 단면을 갖는 무한 덕트에서 r=d, $\theta=0, z=0$ 인 위치에 단위 점음원이 존재할 경우 내부 음장은 다음과 같다.

$$p(r, \theta, z) = \frac{i}{2S} \sum \frac{\Psi_{mn}(r, \theta) \Psi_{mn}(r_0, 0)}{\Lambda_{mn} K_{mn}} \exp[iK_{mn}|z|] = \frac{i}{2Sk} \exp[ik|z|] + \sum_{m,n} \frac{ij_m(\pi q_{mn}) J_m(\pi q_{mn} r / r_0) \cos(m\theta)}{2S \Lambda_{mn} K_{mn}} \exp[iK_{mn}|z|] \quad (5)$$

$$\Lambda_{mn} = \frac{1}{\epsilon_m} \left[1 - \frac{m^2}{\pi^2 q_{mn}^2} \right] J_m^2(\pi q_{mn}) \quad (6)$$

$$K_{mn} = \left\{ k^2 - \left(\pi \frac{q_{mn}}{a} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$

k는 파수(wave number), Λ_{mn} 는 (m,n)차 모드에 대한 고유함수의 정규화 인자, S는 덕트의 단면적, q_{mn} 은 (m,n)차 모드에 대한 상수, J_m 는 m차의 제 1종 Bessel 함수, a는 덕트의 반경을 의미한다.

위의 식에서 보면 첫 번째 항은 평면파 (0,0)모드를 나타내고, 두 번째 항은 고차모드를 나타낸다. 음원으로부터의 거리 z가 증가함에 따라 평면파에 대한 고차모드 성분의 비를 고려하면 차단 주파수 이하에서는 평면파만 고려하는 1차원 평면파에 대한 것만 제어하면 됨을 알 수 있다.

이를 위한 차단 주파수는 원형 덕트의 경우, 다음과 같이 주어진다. $f_{cu} = 0.586c_0/d$ 여기서 d는 덕트의 반지름이다.

따라서 덕트를 가정한 파이프로 실험기구를 사용하면 기구의 차단 주파수는 d가 7cm인 플라스틱 파이프를 사용하였으므로 5.86KHz가 제어 최대 주파수임을 알 수 있다.

센서로는 일반적인 콘덴서 마이크가 사용이 되었다. DC-gain은 없는 것으로 한다. 스피커와 증폭기도 이 영역에 맞게 선택되고 실험에 사용되었다.

음원으로부터 센서까지의 거리가 1차 평면파만 고려할 수 있도록 충분히 떨어져 있으면 평면파에 대한 고차모드의 비율을 무시하고 실험할 수 있음을 알 수 있

으며, 이번 실험에서는 소음원으로부터 원소음 감지 마이크까지의 거리가 0.8m이며, 제어음원으로부터 마이크까지의 거리가 0.79m만큼 떨어져 있다. 따라서 제어 가능 범위 내에 있다고 할 수 있다.

덕트 전체 길이는 2m이고, 두께 2mm인 PVC 파이프를 사용하였다. 덕트의 구조를 보면 한 개의 원 소음 감지 마이크와, 한 개의 제어 소음 스피커, 그리고 마지막으로 한 개의 오류 검출 마이크를 사용했다. 가상의 덕트 시스템을 구성하기 위해, 덕트 내부의 소음을 만들어 내는데, 이는 파형발생기를 사용하여 임의의 순음파를 만들어 사용하였다. 또한 신호 처리기는 TMS 32032를 사용하였다.

제어 소음원으로는 신호처리 시스템 킷에서 나온 신호를 스피커 입력범위에 맞도록 증폭하여 사용하고 있다. 이를 바탕으로 실험기구를 구성, 소음 저감이 이뤄지도록 장치를 구성하였다.

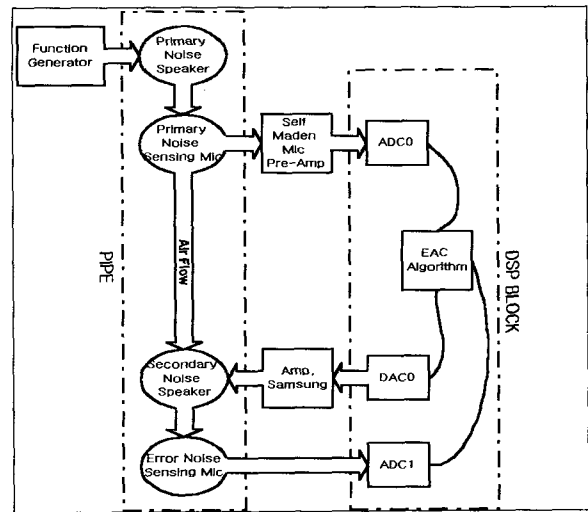


그림 5. 실험 장치 블록도.
Fig. 5. Block diagram of a simplified duct system.

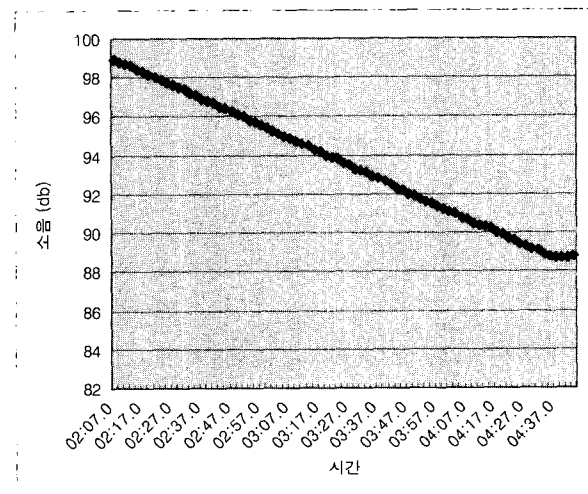


그림 6. Db Meter로 측정된 소음 저감 과정.
Fig. 6. Noise reduction captured with Db meter.

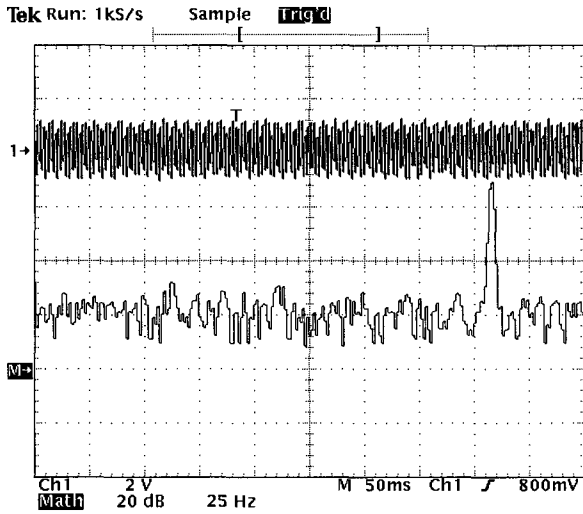


그림 7. ANC 구동 초기화면.
Fig. 7. Initial residual noise.

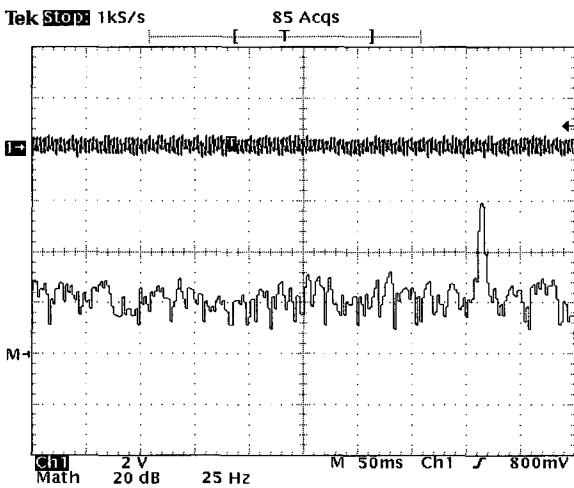


그림 8. ANC 동작후 소음 저감후.
Fig. 8. Residual noise after using ANC system.

전체 시스템에 대한 축소 축도는 그림 5에 나와있다. 실제 실험장치를 가지고 350Hz 부근의 가상 소음을 만들어서 측정해낸 결과를 표시한다. 그림 7이 소음을 포함하고 있는 능동 소음 제거를 작동시키지 않은 상태의 소음이고, 그림 8이 능동 소음 제거를 구동시켜서 오류 마이크로로부터 측정된 소음의 결과치이다. 결

과를 보면 원 소음에 비해 약 12db정도 줄어 들을 알 수 있다. 이러한 결과를 좀더 정확히 하기 위해서 DB Meter를 사용하여 시간에 따른 소음 저감 과정을 그림 8에 표시하였다.

V. 결론

μ_{max} 와 μ_{min} 사이에서 수렴상수가 적당히 움직임의 모의실험을 통해서 결과를 얻어낼 수 있었다. 기존의 VS 알고리즘과 비교 모의실험 결과상 좀 더 빠르게 수렴할 수 있음을 알 수 있었다.

EAC LMS 알고리즘에 대한 모의 실험 결과 수렴상수가 빠른 수렴비를 가지고 있음을 알 수 있었고, 이를 덕트 내부 소음 제어 응용에 적용하였으며, 허용치 내에서 LMS 알고리즘에 비해 혹은 VS 알고리즘에 비해 나은 성능을 가지고 있음이 실험결과로 얻어졌다. 입력 오차의 평균치를 구하기 위한 샘플링 범위는 여러 번의 모의실험결과로 M=10의 선택이 가장 좋음을 알 수 있었다. 이러한 모의 실험결과를 가지고 가상 덕트 내에서 신호처리킷을 사용, 소음 저감을 얻어 낼 수 있었다. 만약, 원 소음이 변화한다고 하더라도 오차 입력 또한 이에 따라 동적으로 움직이기 때문에 자동적으로 필터 계수 계산시 수렴상수를 그에 맞게 변화시킬 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] C. P. Kwong. "Dual sign algorithm for adaptive filtering", *IEEE Trans, on Commun*, vol. COM-34 Dec., 1986.
- [2] M. A. Khasawneh and K. A. Mayyas, "A newly derived variable degree variable step size LMS alogrithm", *INT.J. Electronics*, vol. 79, no. 3, 1995.
- [3] V. John Mathews and Zhenhna Xie, "A stochastic gradient adaptive filter with gradient adaptive step size" *IEEE Trans,on Signal Processing*, vol. 41. no. 6, June, 1993.
- [4] R. W. Harris, D. M. Chabries, and F. A. Bishop "A variable step(VS) adaptive filter algorithm", *IEEE. Trans. on Acoust., Speech, and Signal Processing*, no. 2, April, 1986.
- [5] S. J Elliot and P. A Nelson "Active noise control," *IEEE Signal Processing Magazine*, 12-35, Oct, 1993.



김 일 환
1982년 서울대 제어계측공학과 졸업. 동 대학원 석사. (1988), 일본 동북대학 박사. (1993). 1995년~현재 강원대학교 전기전자정보통신공학부. 조교수. 관심분야는 지능제어, 로봇공학.



최 경 호
1998년 강원대 제어계측공학과 졸업. 동 대학원 석사(2000), 현재 일본 기후대학 연구생 과정. 관심분야는 휴먼 인터페이스, 제어이론 응용.