

능동 소음 제어를 위한 적응 알고리즘들 비교

이근상*, 박영철*

Comparison of Adaptive Algorithms for Active Noise Control

Keun-Sang Lee*, Young-Cheol Park*

요약 본 논문은 능동 소음 제어를 위한 적응 알고리즘들의 성능을 비교함으로써 효과적인 적응 알고리즘을 보인다. 일반적인 적응 알고리즘으로는 normalized least mean square (NLMS) 알고리즘이 있다. NLMS는 구조가 간단하고 수렴 속도가 빠르다는 장점이 있어서 널리 사용되고 있다. 하지만 상관도가 높은 신호에 대해서는 수렴 성능이 떨어지는 문제가 발생한다. 이에 수렴 성능을 개선하기 위해 affine projection (AP) 알고리즘을 사용하고 있다. 하지만 연산량의 문제로 AP 알고리즘의 사용이 제한적이다. 이러한 사실을 바탕으로 협대역 소음 제어를 위한 능동 소음 제어 시스템에서 NLMS와 AP 알고리즘을 연산량과 수렴 성능을 비교함으로써 효과적인 알고리즘을 도출하였다. 실험을 통해 NLMS와 AP 알고리즘의 소음 제어 성능이 차이가 크게 발생하지 않는 것을 확인함으로써 NLMS가 AP 알고리즘에 비해 소음 제어에 효과적임을 확인하였다.

Abstract In this paper, we confirm the effective adaptive algorithm for the active noise control (ANC) through the performance comparison between adaptive algorithms. Generally, the normalized least mean square (NLMS) algorithm has been widely used for an adaptive algorithm thanks to its simplicity and having a fast convergence speed. However, the convergence performance of the NLMS algorithms is often deteriorated by colored input signals. To overcome this problem, the affine projection (AP) algorithm that updates the weight vector based on a number of recent input vectors can be used for allowing a higher convergence speed than the NLMS algorithm, but it is computationally complex. Thus, the proper algorithm were determined by the comparison between NLMS and AP algorithms regarding as the convergence performance and complexity. Simulation results confirmed that the noise reduction performance of NLMS algorithm was comparable to AP algorithm with low complexity. Therefore the NLMS algorithm is more effective for ANC system.

Key Words : Active noise control, filtered-x algorithm, normalized least mean square algorithm, affine projection algorithm, performance comparison

1. 서론

음향 소음 문제는 특히 산업 환경에서 산업 장비들의 증가로 인해 크게 증가 하고 있으며 그에 따른 소음에 노출되는 빈도수가 증가 하고 있으며, 이러한 음향 소음 문제를 해결하기 위해

적용필터를 이용한 다양한 능동 소음 제어 (Active Noise Control) 기법들이 제시되고 있다 [1-4]. 능동 소음 제어는 같은 크기와 반대 위상을 갖는 2차적인 소음을 이용하여 소음을 제어 하는 것으로 수동적인 방법에 비해 시스템의 크기 및 무게 비용 등에 효율적으로 대처할 수 있

*Corresponding Author : Division of Computer and Communication, Yonsei University, Wonju, Korea(ksang2@yonsei.ac.kr)
Received January 8, 2015 Revised January 30, 2015 Accepted February 7, 2015

다는 장점이 있다[2]. 따라서 능동 소음 제어 시스템은 기존의 사용되는 장비와 함께 설치 및 관리가 용이하다.

능동 소음 제어를 위한 적응 필터로는 비교적 구조가 간단하고 계산량이 적은 Normalized Least Mean Square (NLMS) 알고리즘이 널리 사용되고 있다. 하지만 유색 입력 신호에 대해서 적응 필터의 수렴 성능이 매우 낮아지는 경향이 있다. 반면, Affine Projection (AP)은 유색 입력 신호에서도 NLMS에 비해 빠른 수렴 성능을 보인다[3]. 하지만 AP 알고리즘은 역행렬 연산이 요구되어지기 때문에 많은 연산량이 필요하게 된다. 이에 본 연구에서는 능동 소음 제어를 위한 적응 알고리즘으로 NLMS와 AP 알고리즘을 소음 제어 성능과 연산량을 비교함으로써 효율적인 알고리즘을 도출한다.

본 논문의 구성은 2장에서 능동 소음 제어 시스템에 대해서 설명하며, 3장에서 AP에 대해서 설명한다. 또한, 4장에서는 알고리즘의 성능을 평가하기 위한 실험을 실시하였으며, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. 능동 소음 제어 시스템

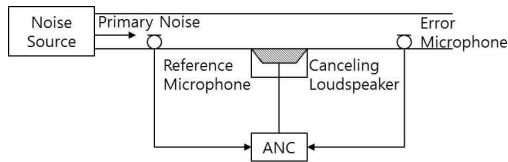


그림 1. 파이프 환경에서 능동 소음 제어시스템
Fig. 1. Active noise control system for pipe environment

위의 그림 1은 배관에서 발생되는 소음을 제어하기 위해 능동 소음 제어 시스템을 보이고 있다. 참조 마이크와 에러 마이크를 사용하여 수집된 참조 소음 신호와 잔여 소음 신호를 적응 필터의 입력으로 하여 적응 필터의 계수 벡터를 적응적으로 갱신함으로써 배관에서 발생하는 소음을 줄인다.

능동 소음 제어 시스템은 적응 필터로부터 생

성된 제어 신호가 스피커로 출력되는 경로, 스피커와 에러 마이크 사이의 경로 그리고 에러 마이크에서 다시 전기적 신호로 변환 하여 적응 필터로 입력되어 적응 필터의 계수를 갱신하기까지의 실제 환경에서 발생하는 2차 경로를 사전에 추정하여 적응 필터 출력과 스피커 사이에 보상해 주어야 한다[1][2].

2차 경로를 보상하였을 때 오차 신호 $e(n)$ 를 z -변환으로 표현 하면 다음과 같다.

$$E(z) = [P(z) - S(z)W(z)]X(z) \quad (1)$$

여기서 $S(z)$ 는 2차 경로의 주파수 응답이다. 오차 신호를 이상적으로 0으로 만들기 위한 적응 필터 최적 해 $W_0(z)$ 는 다음과 같다.

$$W_0(z) = \frac{P(z)}{S(z)} \quad (2)$$

식 (2)로부터 적응 필터가 $P(z)$ 와 $S^{-1}(z)$ 를 동시에 추정해야 한다는 것을 알 수 있다.[2] 이때, FIR(Finite Impulse Response) 필터 구조의 $S^{-1}(z)$ 를 추정하기 위해서 상당히 많은 차수가 요구되어 진다.[6] 하지만 2차 경로가 포함하고 있는 잠정적인 지연과 배수관 경로의 지연을 고려하면 적응 필터의 차수가 제한되므로 적응 필터는 biased 추정을 하게 된다. 따라서 능동 소음 제어의 성능은 2차 경로에 매우 의존적이다.

일반적으로 적응 필터는 에러 신호 $e(n)$ 은 주 입력 신호 $d(n)$ 과 필터 출력 신호 $y(n)$ 의 차로부터 얻어 지게 되는 반면, 능동 소음 제어 환경에서 얻어지는 오차 신호 $e(n)$ 은 $d(n)$ 과 $y(n)$ 이 2차 경로를 통과한 $y'(n)$ 의 차이에 의해 얻어지게 되므로 적응 필터의 biased 추정에 의해 소음 제어 시스템의 불안정성을 야기 시킨다. 만약 시스템이 선형이고 시스템과 제어 필터가 시 불변 이거나 시정수에 비해 천천히 변한다고 가정하고 2차 경로를 추정할 수 있다면 추정된 2차 경로 $S'(z)$ 를 참조 신호에 적용하는 방법인 Filtered-X 알고리즘이 제시 되었으며 다음

그림 2와 같은 블록선도를 갖는다[2].

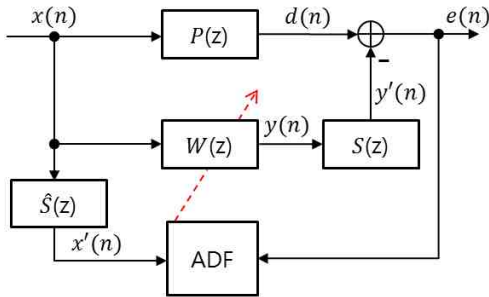


그림 2. 능동 소음 제어를 위한 Filtered-x 구조
Fig. 2. Filtered-x structure for active noise control

3. Filtered-x Affine Projection 알고리즘

3.1 Affine Projection (AP) 알고리즘

AP 알고리즘은 최근 P 개의 입력 벡터들을 기반으로 계수 벡터를 갱신 하며 다음 식과 같다.[5]

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{X}(n)(\mathbf{X}^T(n)\mathbf{X}(n))^{-1} \mathbf{e}(n) \quad (3)$$

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{d}(n) - \mathbf{X}^T(n)\mathbf{w}(n) \quad (4)$$

$\mathbf{w}(n)$ 은 적응 필터계수이며, μ 는 수렴 상수이고, $\mathbf{X}(n)$ 은 $(N \times P)$ 차의 참조 신호 매트릭스이며, $\mathbf{e}(n)$ 과 $\mathbf{d}(n)$ 은 에러와 주 입력 신호이다. 에러 신호는 다음 식과 같이 표현된다[6].

$$\mathbf{e}(n) = \begin{bmatrix} e(n) \\ (1-\mu)\bar{\mathbf{e}}(n-1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$\bar{\mathbf{e}}(n-1)$ 은 $\mathbf{e}(n-1)$ 벡터의 상위 $(P-1)$ 개의 성분이다.

3.2 Filtered-x AP 알고리즘

AP 알고리즘을 그림 1의 Filtered-x 알고리즘에 적용한 Filtered-x AP (FxAP) 알고리즘을 보인다.[7-8] 2차 경로 $S(z)$ 가 M 차의 FIR 필터로 모델링 되었다고 가정하면 그림 1의 에러 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{d}(n) - \mathbf{Y}^T(n)\mathbf{s}(n) \quad (6)$$

$y(n) = \mathbf{x}^T(n)\mathbf{w}(n)$ 이다. 식 (6)은 추정된 2차 경로와 적응 필터가 선형 조합으로 구성되어 있기 때문에 참조 신호를 추정된 2차 경로와 먼저 필터 연산을 수행한 뒤 적응 필터 계수를 수행 할 수 있으며 식 (6)을 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{d}(n) - \mathbf{R}^T(n)\mathbf{w}(n) \quad (7)$$

이때, $\mathbf{r}(n) = \mathbf{x}^T(n)\mathbf{s}(n)$ 이다. 식 (3)의 AP 알고리즘을 능동 소음 제어에 적용한 Filterd-X AP 알고리즘의 계수 갱신 식은 다음과 같다.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{R}(n)(\mathbf{R}^T(n)\mathbf{R}(n))^{-1} \mathbf{e}(n) \quad (8)$$

이때, P 가 1차인 경우가 filtered-x NLMS (FxNLMS) 알고리즘의 경우이다.

4. 실험 및 결과

알고리즘의 성능을 비교하기 위해 FxNLMS 알고리즘과 FxAP 알고리즘과 비교하였다. 시스템의 sampling rate는 4kHz로 가정하였으며, 엔진 소음원 신호는 250Hz의 기본 주파수를 갖으며 그 하모닉들은 정수배를 갖는다고 가정 하면 다음 식을 이용하여 신호를 생성 하였다.

$$x(n) = \sum_{q=1}^Q A_q \sin(2\pi f_q n + \theta_q) + b(n) \quad (9)$$

Q 는 하모닉의 개수이며, A_q 는 하모닉의 크기, f_q 와 θ_q 는 하모닉 주파수와 위상이고, $b(n)$ 은 유색 잡음으로 2차의 AR 노이즈를 사용하였다. 다음 그림 3은 실험에 사용된 소음 원 신호의 주파수 응답이다.

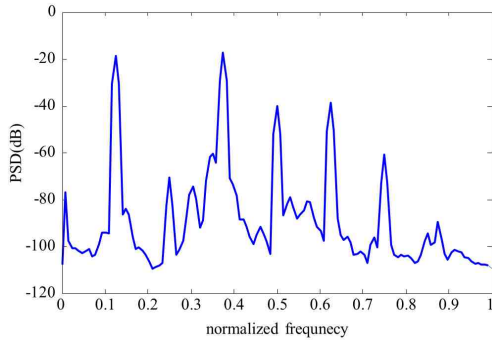


그림 3. 주 소음 스펙트럼
Fig. 3. Primary noise spectrum

배관의 길이는 2m로 가정 하고 소음 제거를 위한 스피커폰은 소음원에서부터 1.5m 떨어진 위치에 있다고 가정 하였으며, 에리 마이크는 배관의 끝 부분에 있다고 가정 하였다. 따라서 배관 경로와 2차 경로는 각각 8 과 3 sample 지연을 갖는다. 이러한 사실을 바탕으로 소음원과 스피커 사이의 주 배수관 경로 $P(z)$ 와 스피커와 에리 마이크 사이의 2차 경로 $S(z)$ 를 128-tap FIR 필터로 modeling 하였으며 다음 그림 4와 같다.

2차 경로는 사전에 충분히 추정되었다고 가정 하여 실험을 실시하였다. 성능 평가를 위해 Mean Square Error(MSE)를 측정 하였으며, 정상 상태에서의 잔여 오차와 주 소음 신호와의 Power Spectrum Density(PSD)를 비교하였다. 실험을 위해 사용된 적응 필터의 차수는 주 음향 경로와 같

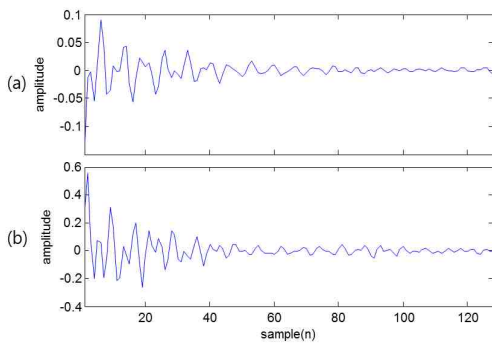


그림 4. (a) 주 음향 경로 $P(z)$ 와 (b) 2차 경로 $S(z)$
Fig. 4. (a) Primary path $P(z)$ and (b) secondary path $S(z)$

은 128차를 사용하였으며, 각 알고리즘 FxNLMS 와 FxAP 수렴 상수는 각각 0.05과 0.006 하였다. 이때 FxAP의 projection 차수는 2, 8차를 사용하였다. 다음 그림 5는 각 알고리즘의 성능을 평가 하기 위해 MSE 결과를 비교한 것이다.

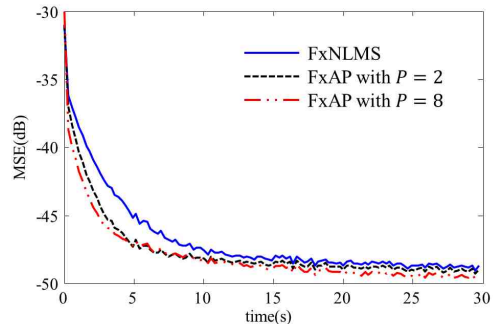


그림 5. FxNLMS, $P=2$ 와 $P=8$ 의 FxAP에 대한 MSE 곡선
Fig. 5. MSE curves of FxNLMS, FxAP with $P=2$ and $P=8$

위의 결과로부터 FxAP는 FxNLMS에 비해 많은 연산량을 사용함에도 FxNLMS에 비교하여 수렴 성능의 차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 따라서 능동 소음 제어 시스템에서 AP 알고리즘은 적합하지 못함을 확인할 수 있다. 다음

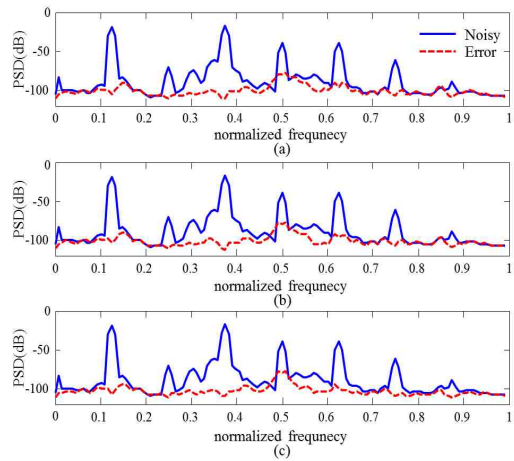


그림 6. 주 소음과 에러에 대한 PSD 결과 (a) FxNLMS, (b) $P=2$ 와 (c) $P=8$ 의 FxAP
Fig. 6. PSD of primary noise and errors of (a) FxNLMS, FxAP with (b) $P=2$ and (c) $P=8$.

은 주 소음과 잔여 소음의 PSD 결과를 그림 6에 보이고 있다.

위의 PSD 결과로부터 정상 상태에서 FxNLMS와 FxAP의 소음 제어 성능이 유사함을 확인할 수 있다. 따라서 그림 5와 6으로부터 협대역 소음 제어를 위한 능동 소음 제어의 적응 알고리즘으로 AP 알고리즘에 비해 적은 연산량을 가지는 NLMS가 효율적임을 실험을 통해 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 음향 덕트 환경에서 소음 제어를 위해 사용하는 능동 소음 제어 시스템에 적합한 적응 알고리즘을 도출하였다. 적응 알고리즘으로는 일반적으로 널리 사용되고 있는 NLMS 알고리즘과 빠른 수렴 성능을 보이는 AP 알고리즘을 고려하였다. NLMS 알고리즘은 적은 연산량으로 빠른 수렴 성능을 보이는 반면 유색 입력 신호에 대해서는 수렴 성능이 저하되는 문제가 있다. 이러한 수렴 성능 문제를 개선하기 위해 AP 알고리즘을 사용할 수 있다. 하지만 높은 연산 복잡도로 인하여 실제 환경에 제한적으로 적용 가능하다. 알고리즘의 비교를 위한 실제 음향 덕트는 협대역 소음이 빈번히 발생하는 환경으로 가정하였다. 실험 결과 FxAP는 높은 projection 차수를 사용함에도 불구하고 FxNLMS에 비해 약간의 성능 향상이 있는 것을 확인하였다. 따라서 높은 연산량을 사용하는 FxAP 알고리즘 보다 FxNLMS 알고리즘이 협대역 능동 소음 제어 효과적이다.

REFERENCES

[1] P. A. Nelson and S. J. Elliot, Active Control of Sound, Academic Press, New York, 1992.
 [2] S. M. Kuo and D. R. Morgan, "Active noise control: A tutorial review", Proc. IEEE, vol. 87, no. 6, pp. 943-973, Jun. 1999.

[3] S. J. Elliot, Signal Processing for Active Control, Academic, London, U.K., 2001.
 [4] S. M. Kuo and D. R. Morgan, Active Noise Control Systems- Algorithms and DSP Implementations, Wiley, New York, 1996.
 [5] K. Ozeki and T. Umeda, "An adaptive filtering algorithm using an orthogonal projection to an affine subspace and its properties", Electron. Commun. Jpn., 67-A, no. 5, pp. 19-27, 1984.
 [6] S. Haykin, Adaptive filter theory, Prentice Hall. Englewood Cliffs, NJ, 2002. 4th edition
 [7] A. Gonzalez, M. Ferrer, M. diego and G. Pinero, "Fast filtered-x affine projection algorithm for active noise control", Proc. IEEE WASPAA, New Paltz, New York, 2005.
 [8] A. Gonzalez, M. Ferrer, M. diego and G. Pinero, "Fast filtered-x affine projection algorithm with efficient computation of coefficient update", Proc. ICASSP, Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process., pp.V-285 - V-288, 2006.

저자약력

이근상(Keunsang Lee)



- 2006년 2월 : 연세대학교 정보기술학부 (학사)
- 2010년 2월 : 연세대학교 전산학과 (석사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 연세대학교 전산학과 (박사과정)

<관심분야>

디지털 신호처리, 적응 신호처리, 음성 신호처리

박 영 철(Young-cheol Park)



- 1986년 2월 : 연세대학교 전기전
자공학과 (학사)
- 1988년 2월 : 연세대학교 전기전
자공학과 (석사)
- 1993년 2월 : 연세대학교 전기전
자공학과 (박사)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 연세대학교
컴퓨터정보통신공학부 교수

<관심분야>

디지털 신호처리, 오디오 신호처리,
음성 신호처리, 적응 신호처리